

## 西北地区红桦天然次生林立地质量评价

王泽龙<sup>1</sup>,李泽义<sup>1</sup>,陈邑烜<sup>1</sup>,马孟良<sup>1</sup>,姜在民<sup>2</sup>,蔡靖<sup>1,3\*</sup>

(1.西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100;2.西北农林科技大学 生命科学学院,陕西 杨陵 712100;  
3.陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站,陕西 宁陕 711600)

**摘要:**在陕西、宁夏、甘肃、青海等地设置红桦天然次生林临时样地 85 块,以年龄-树高、胸径-树高数据为依据,选取常用的 9 个树木生长模型拟合导向曲线,采用相对优势高法编制立地指数表和立地形表,并采用 2 种方法对 4 个不同地区的立地质量进行比较,实现对西北地区红桦天然次生林立地质量的科学评价。结果表明,立地指数和立地形的最优导向曲线方程分别为  $H=18.073/\{1+\exp[-(A-22.571)/9.144]\}$ 、 $H=19.793/\{1+\exp[-(D-12.218)/6.588]\}$ ;确定基准年龄为 40 a,基准胸径为 20 cm,指数级距为 2 m,划定 10~20 m 共 6 个立地质量等级,编制立地指数表和立地形表。检验结果表明,两表的卡方值均小于临界值,落点检验精度分别为 95% 和 97.5%,达到编表精度要求,均能够良好地反映红桦天然次生林立地质量。2 种方法在对 4 个地区的立地质量评价中表现出较好的一致性,其中陕西火地塘林场立地质量最优,宁夏二龙河林场次之,青海北山林场和甘肃洮坪林场立地质量一般。

**关键词:**红桦天然次生林;立地质量评价;立地指数;立地形

中图分类号:S758

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2024)01-0059-08

### Evaluating Site Quality of Natural Secondary Forest of *Betula albosinensis* in Northwestern China

WANG Ze-long<sup>1</sup>, LI Ze-yi<sup>1</sup>, CHEN Yi-xuan<sup>1</sup>, MA Meng-liang<sup>1</sup>, JIANG Zai-min<sup>2</sup>, CAI Jing<sup>1,3\*</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

2. College of Life Science, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

3. Qinling Nat Forest Ecosystem Research Station, Ningshan 711600, Shaanxi, China)

**Abstract:** A total of 85 temporary plots of natural secondary forest of *Betula albosinensis* were set up in Shaanxi, Ningxia, Gansu and Qinghai provinces. Using age-tree height and DBH data as analytical resources, 9 tree growth models were selected to fit the guide curve, and the site index table and site form table were compiled by the method of relative advantage height. The site quality in four different regions was compared by the two methods to realize the scientific evaluation of site quality of natural secondary forest of *B. albosinensis* in northwestern China. The results showed that the optimal guiding curve equations of the site index and site form were  $H=18.073/\{1+\exp[-(A-22.571)/9.144]\}$  and  $H=19.793/\{1+\exp[-(D-12.218)/6.588]\}$ , respectively, and the fitting correlation coefficients were above 0.95. The basal age was determined to be 40 a, the basal DBH to be 20 cm, the exponential distance to be 2 m, and a total of 6 site quality grades of 10–20 m were demarcated. The site index table and the site form table showed that the Chi-square values of the two tables were both less than the critical value, and the accuracies of the drop point test were 95% and 97.5%, respectively, which met the accuracy requirements of the table prepara-

收稿日期:2022-11-24 修回日期:2023-02-26

基金项目:国家重点研发计划(2021YFD2200304-3, 2017YFD0600603-02)。

第一作者:王泽龙。研究方向:森林生态。E-mail: wangzelong21@126.com

\*通信作者:蔡靖,博士,教授,博士生导师。研究方向:森林生态、树木水分生理生态。E-mail: cjcailing@163.com

tion. Both of the two methods could well reflect the site quality of the natural secondary forest of *B. albosinensis*. Moreover, the two methods showed a good consistency in the site quality evaluation of the four regions, among which the site quality of Shaanxi Huoditang Forest Farm was the best, followed by Ningxia Erlonghe Forest Farm. The site qualities of Qinghai Beishan Forest Farm and Gansu Taoping Forest Farm was in general level.

**Key words:** *Betula albosinensis* natural secondary forest; site quality evaluation; site index; site form

森林的生长和发展与立地质量息息相关,立地质量评价是掌握和研究森林生长环境以及环境对森林生产力影响的一个重要手段,是科学开展造林规划设计、森林抚育经营等林业生产实践的基础,对实现森林可持续经营具有极其重要的意义<sup>[1-4]</sup>。

目前国内外学者多用树高作为立地质量评价的指标,主要方法有立地指数、立地形、地位级法<sup>[5-8]</sup>。地位级法简便易行,但相比立地指数法其精度和准确性较差。立地指数法在人工林中应用较广,其优势在于优势树高受林分密度影响较小,能够比较客观地反映森林立地质量<sup>[9]</sup>。然而在异龄林或混交林中,林分年龄这一概念意义不大,因此立地指数不适用于异龄林,且在一些国家森林调查中主要调查林分的平均年龄,由于优势木年龄数据缺乏,限制了立地指数的应用<sup>[10-11]</sup>。立地形法回避了林分年龄的问题,所以适用于异龄林和混交林,但立地形受林分密度影响较大。因此目前有关立地质量评价方法还是以立地指数为主,立地形的应用较为少见,其评价效果有待进一步研究。

红桦(*Betula albosinensis*)是我国特有树种,具有较高的观赏价值和经济价值,其适应能力强,是我国北方高海拔地区重要的先锋造林树种,也是高山主要成林树种<sup>[12-13]</sup>。但现存红桦原始林较少,多为天然次生林,且普遍存在林内环境差、林木质量低等问题<sup>[14]</sup>。开展红桦天然次生林立地质量评价是解决上述问题,充分发挥林地生产力的一项重要基础研究。马俊<sup>[15]</sup>建立了秦岭南坡的红桦天然次生林立地指数模型,但区域相对有限,目前未见有关红桦天然次生林立地形方面的研究。本研究通过对西北地区红桦主要分布地进行样地调查,编制立地指数和立地形表,以期科学评价西北地区红桦天然次生林的立地质量,对实现红桦高质量森林经营管理和可持续发展具有现实和长远意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据收集与预处理

在陕西火地塘林场、甘肃洮坪林场、宁夏二龙河林场、青海北山林场等红桦天然次生林分布较为集中地区,按照海拔、坡向、坡位等因子共设置临时样

地 85 块,样地以红桦纯林为主,大小为 20 m × 20 m。样地内进行每木检尺,每个样地选择树高最高、不受其他林木挤压、无病虫害、无断梢的优势木 3 株,并用生长锥钻取树芯,确定树龄,数据统计信息见表 1。对于调查数据,按龄级 5 a、径阶 2 cm 整化,计算各龄级、径阶优势木平均树高和标准差,±3 倍标准差为界剔除该龄级或径阶范围之外的异常点。样地数据中 80% 用于拟合,20% 用于检验。

表 1 样地林分因子统计数据描述

Table 1 Description of statistical data of stand factors in sample plots

林分因子	数据特征			
	最小值	最大值	平均值	标准差
坡度/(°)	5.00	40.00	18.25	10.58
海拔/m	2 100.00	2 720.00	2 445.63	229.17
土层厚度/cm	20.00	60.00	40.17	9.47
树高/m	2.00	21.00	13.69	3.82
胸径/cm	3.00	52.00	17.79	7.87
优势木高/m	2.20	21.00	16.25	2.90
优势木年龄/a	5.00	78.00	47.30	12.15
优势木胸径/cm	4.00	39.50	23.33	5.56
林分密度指数/(株·hm <sup>-2</sup> )	197.02	947.50	532.32	170.24
林分断面面积/(m <sup>2</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	5.12	31.28	16.60	6.55

### 1.2 研究方法

1.2.1 导向曲线的选择 以各样地优势木树高、年龄、胸径的算术平均值为材料,选用 9 个常用的树木生长模型来拟合胸径-树高、年龄-树高生长曲线<sup>[16]</sup>(表 2),最终选择相关性最大以及残差平方和最小的模型作为导向曲线。

1.2.2 立地指数和立地形表的编制 立地指数和立地形表的编制方法基本一致,本研究采用相对优势高法进行编表<sup>[17]</sup>。计算公式如下

$$K_j = H_{0j} / H_{0k} \quad (1)$$

$$H_{ij} = K_j H_{ik} \quad (2)$$

式中: $K_j$  为各龄阶立地指数的调整系数; $H_{0j}$  是基准年龄的树高值; $H_{0k}$  是基准年龄的树高理论值; $H_{ij}$  是第  $i$  龄阶第  $j$  指数级的树高值; $H_{ik}$  为各龄阶的树高理论值。

1.2.3 立地指数和立地形表的检验 利用 40 个检

验样本数据进行落点检验和卡方检验。落点检验以检验样本数据作散点图,将其绘制于立地指数曲线图和立地形曲线图上,计算样本数据溢出情况。卡方检验的目的是检验立地指数曲线和立地形曲线与优势木的树高生长趋势是否存在显著差异,计算公式如下

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n [(H_0 - H_i)^2 / H_i]$$

(3)

式中: $H_i$  代表树高理论值; $H_0$  代表实际树高值。

表 2 树木生长备选模型

Table 2 The alternative models for tree height growth		
序号	名称	表达式
1	二次函数	$H=a+b\times A_D+c\times A_D^2$
2	反比例函数	$H=a+b/A_D$
3	西格摩德	$H=a/\{1+\exp[-(A_D-b)/c]\}$
4	逻辑斯谛	$H=a/[1+\exp(b+cA_D)]$
5	坎派兹	$H=a\times\exp\{-\exp[(b-A_D)/c]\}$
6	希尔	$H=a\times A_D^b/(c^b+A_D^b)$
7	理查德	$H=a\times[1-\exp(-b\times A_D)]^c$
8	舒马赫	$H=a\times\exp[-b/(A_D-c)]$
9	考尔夫	$H=a\times\exp(-b\times A_D^{-c})$

注:表中  $H$  为优势木树高,  $A_D$  在胸径-树高生长曲线模型中为胸径,在年龄-树高生长曲线模型中为年龄,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为模型参数。

2 结果与分析

2.1 编制红桦天然次生林立地指数表的可行性检验

立地指数法主要适用于同龄纯林,因此需要对红桦天然次生林是否适用立地指数进行检验。孟宪宇等<sup>[18]</sup>认为,天然次生林的径阶分布如果与正态分布没有显著性差异,便可视为“相对同龄林”。由于本研究样地设置以红桦纯林为主,故只需对林分的径阶分布进行正态分布检验即可。随机抽取一块样地,运用 Origin 2019 绘制林分胸径分布直方图(图 1),可以看出胸径结构为一条主要分布于 8~14 cm、以 11 cm 为峰点的单峰山状曲线,近似于正态分布曲线,说明该样地的红桦天然次生林符合“相对同龄林”特征。其他样地作相同分析,结果基本一致,因此本研究区域中的红桦天然次生林可视为“相对同龄林”。

2.2 导向曲线拟合结果

用于拟合导向曲线的数据见图 2、图 3,采用 SPSS 20 软件对所选 9 个备选模型进拟合(表 3)。年龄-树高关系拟合中, Sigmodial 模型的决定系数最大(0.615);残差平方和最小;胸径-树高关系拟合中,同样是 Sigmodial 模型的决定系数最大(0.708),残差平方和最小。因此选择 Sigmodial 模型作为立地指数和立地地形的导向曲线。其中,立地指数导向曲线方程为

$$H=18.073/\{1+\exp[-(A-22.571)/9.144]\}$$

(4)

立地形导向曲线方程为

$$H=19.793/\{1+\exp[-(D-12.218)/6.588]\}$$

(5)

式中: $H$  为优势木树高; $A$  为优势木年龄; $D$  为优势木胸径。

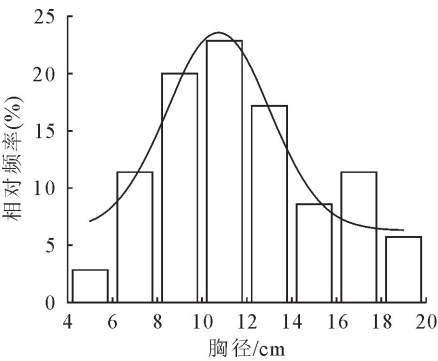


图 1 林分胸径结构分布频率

Fig. 1 Distribution frequency of DBH structure of stands

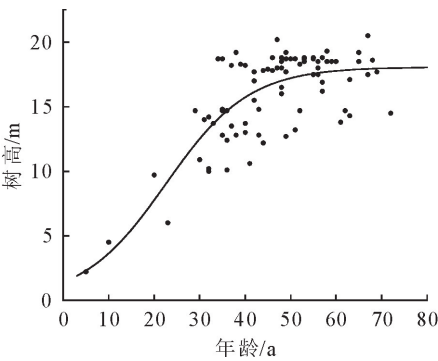


图 2 年龄-树高数据散点图及导向曲线

Fig. 2 Scatter plot and guide curve of age-tree height data

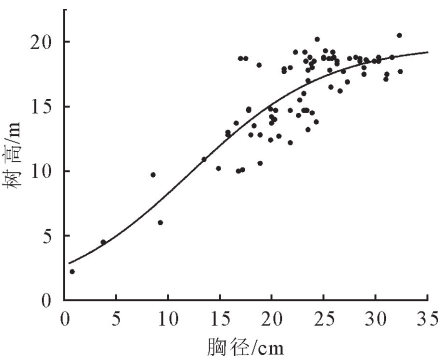


图 3 胸径-树高数据散点图及导向曲线

Fig. 3 Scatter plot and guide curve of DBH-tree height data

2.3 基准年龄(胸径)和指数级距确定

2.3.1 基准年龄(胸径)的确定 基准年龄对于立地指数表或立地形表的准确编制影响十分明显,选择不当会对立地质量评价造成偏差,一般选择树高生长趋于稳定且能灵敏反映立地差异的年龄作为基准年龄<sup>[19-20]</sup>。由图 2 可知,红桦在 40 a 以后的生长

趋于稳定,其成熟年龄一般为 80 a,故将红桦的基准年龄定为 40 a。

为更好地比较 2 种评价方法的精度,选择基准年龄对应的胸径作为基准胸径。运用表 3 中的模型对年龄-胸径关系进行拟合(图 4),其中自变量为年

龄,因变量为胸径,经过筛选,Richard 方程为最优模型,表达式为

$$D=30.814\times[1-\exp(-0.05\times A)]^{2.402}\quad(6)$$

将基准年龄  $A_0=40$  代入式(6),求得  $D$  为 20.7 cm,为方便编表,最终确定基准胸径为 20 cm。

表 3 树木生长备选模型拟合结果

Table 3 Fitting results of alternative models for tree height growth

方程名称	林分因子	$R^2$	Q	$a$	$b$	$c$
二次函数	年龄	0.614	406.186	-2.182	0.668	-0.006
	胸径	0.705	310.475	0.608	0.972	-0.012
反比例函数	年龄	0.443	586.064	18.639	-107.945	406.186
	胸径	0.293	744.798	16.769	-14.388	
西格摩德	年龄	0.615	404.928	18.073	22.571	9.144
	胸径	0.708	307.203	19.793	12.218	6.588
逻辑斯谛	年龄	0.598	422.872	19.621	22.852	-2.411
	胸径	0.700	316.429	30.697	20.607	-1.201
坎派兹	年龄	0.608	412.816	18.515	17.069	12.969
	胸径	0.707	308.569	21.074	8.925	10.049
希尔	年龄	0.390	642.082	16.723	20.000	28.534
	胸径	0.384	649.164	16.657	23.000	14.313
理查德	年龄	0.603	418.296	18.683	0.068	2.669
	胸径	0.701	314.891	23.657	0.056	1.144
舒马赫	年龄	0.586	436.159	24.828	19.590	-0.859
	胸径	0.702	314.143	33.720	21.186	-6.242
考尔夫	年龄	0.587	434.622	21.911	50.908	1.352
	胸径	0.696	320.024	84.974	4.874	0.345

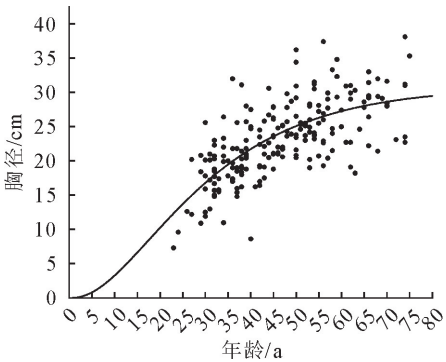


图 4 年龄与胸径关系拟合

Fig. 4 Fitting the relationship between age and DBH

2.3.2 指数级距的确定 指数级距主要根据在基准年龄(胸径)时树高的绝对变动幅度及经营水平来确定。根据编表数据,在基准年龄 40 a 时优势木树高的最大值为 20 m,最小值为 10 m;在基准胸径 20 cm 时优势木树高最大值为 19.5 m,最小值为 10.1 m。根据红桦的生长特性和树高分布差值,确定指数级距为 2 m,最终划分 10、12、14、16、18、20 m 共 6 个立地质量等级。

2.4 立地指数表和立地形表

以导向曲线为基础,按基准年龄(胸径)时的树高和指数级距,采用相对优势高法,可编成立地指数

和立地形表(表 4、表 5)。

表 4 红桦立地指数

Table 4 Site index table of *B. albosinensis*

年龄/a	各立地指数的树高理论值/m					
	10	12	14	16	18	20
5	1.5	1.8	2.1	2.3	2.6	2.9
10	2.3	2.8	3.2	3.7	4.2	4.6
15	3.5	4.2	4.9	5.6	6.3	7.0
20	4.9	5.9	6.9	7.9	8.9	9.9
25	6.5	7.8	9.1	10.4	11.7	13.0
30	8.0	9.5	11.1	12.7	14.3	15.9
35	9.1	11.0	12.8	14.6	16.5	18.3
40	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0
45	10.6	12.7	14.8	16.9	19.0	21.2
50	10.9	13.1	15.3	17.5	19.7	21.9
55	11.2	13.4	15.6	17.9	20.1	22.3
60	11.3	13.6	15.8	18.1	20.3	22.6
65	11.4	13.7	15.9	18.2	20.5	22.8
70	11.4	13.7	16.0	18.3	20.6	22.8
75	11.4	13.7	16.0	18.3	20.6	22.9
80	11.5	13.8	16.1	18.3	20.6	22.9

2.5 立地指数与立地形表检验

2.5.1 卡方检验 利用 40 个检验样本数据,在编制的立地指数和立地形表中查出样本所在的立地质量等级,再按照对应等级求出其树高理论值,然后将



树高实际值与理论值运用式(3)求出卡方值。最终得到立地形的卡方值为 1.09,立地指数的卡方值为 1.24,均远小于  $\chi^2_{0.05}(40-1)=54.572$ 。这表明,立地指数曲线和立地形曲线与红桦树高生长趋势的差异不显著,符合精度要求。

表 5 红桦立地形表  
Table 5 Site form table of *B. albosinensis*

胸径/cm	各立地形的树高理论值/m					
	10	12	14	16	18	20
4	2.9	3.5	4.1	4.7	5.2	5.8
6	3.7	4.4	5.1	5.9	6.6	7.3
8	4.5	5.4	6.3	7.2	8.1	9.0
10	5.4	6.5	7.6	8.7	9.8	10.9
12	6.4	7.7	9.0	10.3	11.6	12.9
14	7.4	8.9	10.4	11.9	13.3	14.8
16	8.4	10.0	11.7	13.4	15.0	16.7
18	9.2	11.1	12.9	14.8	16.6	18.5
20	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0
22	10.7	12.8	14.9	17.0	19.2	21.3
24	11.2	13.4	15.7	17.9	20.2	22.4
26	11.6	14.0	16.3	18.6	20.9	23.3
28	12.0	14.4	16.8	19.2	21.6	24.0
30	12.2	14.7	17.1	19.6	22.0	24.5
32	12.5	14.9	17.4	19.9	22.4	24.9
34	12.6	15.1	17.6	20.2	22.7	25.2
36	12.7	15.3	17.8	20.4	22.9	25.4
38	12.8	15.4	17.9	20.5	23.1	25.6
40	12.9	15.5	18.0	20.6	23.2	25.8

2.5.2 落点检验 在立地指数曲线簇和立地形曲线簇中绘制检验样本的散点图。立地指数落点检验中(图 5),散点在曲线范围外的有 2 个,占散点总数的 5%,检验精度为 95%;立地形落点检验中(图 6),散点在曲线范围外的点有 1 个,占散点总数的 2.5%,检验精度为 97.5%。两者误差均较小,说明所编立地指数和立地形表能够较好地反映红桦天然次生林的立地质量,符合精度要求。

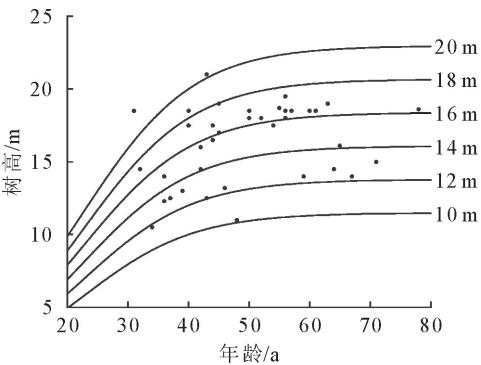


图 5 立地指数落点检验  
Fig. 5 Drop point test of site index

2.6 立地指数与立地形模型的相关性

2.6.1 树高生长预测的相关性 以检验样本为例,通过查表确定每个样地的立地指数和立地形,计算其龄阶和径阶对应的树高理论值并进行线性拟合(图 7)。理想情况下应该为  $y=x$  的直线,说明 2 种方法对树高生长预测具有高度的一致性。经过拟合,得到方程  $S_F=1.255+0.934\times S_1$ ,相关系数为 0.897,说明两者在树高生长预测中具有高度相关性。

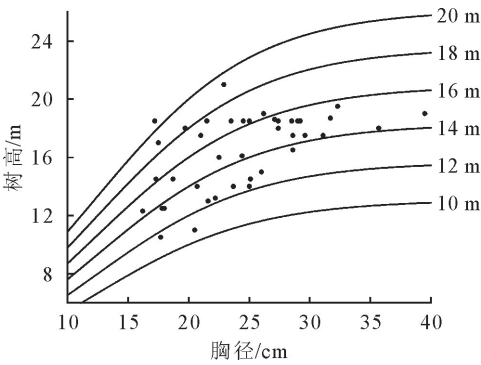


图 6 立地形落点检验  
Fig. 6 Drop point test of site form

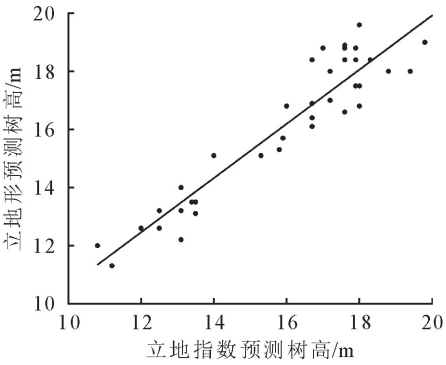


图 7 立地指数与立地形树高预测值线性拟合  
Fig. 7 The fitting of tree height predicted value of site index and site form

2.6.2 立地质量评价的相关性 作为评价同一研究对象的 2 种不同方法,在评价结果上应该具有较好的相关性,即对于同一个样地,应该划分为相同的立地质量等级。为方便比较,分别用 1、2、3、4、5、6 表示 10、12、14、16、18、20 m 共 6 个不同立地质量等级。将全部样地通过查立地指数和立地形表,确定其立地质量等级(表 6)。比较发现,2 种方法在立地质量等级划分上存在一定的一致性,就整体立地质量而言,均呈现正态分布趋势,立地质量等级划分相同的样地共 39 块,占比 47.56%。但 2 种方法也存在一定的差异性,其中立地形中等级 3、4 所占比例最高,分别为 39.02%、37.80%,其次是等级 2,占比 10.98%;立地指数中立地质量等级占比最高的是等

级 4、5, 分别为 40.24%、21.95%, 其次是等级 3, 占比 15.85%。立地指数等级高于立地形的样地共 30 块, 占比 36.59%, 总体来看, 立地指数对立地质量等级的评价高于立地形。

表 6 2 种方法立地质量等级划分的比较

Table 6 Comparison of site quality classification by two methods

立地质量等级	立地形	所占比例(%)	立地指数	所占比例(%)
1 (10 m)	1	1.22	4	4.88
2 (12 m)	9	10.98	9	10.98
3 (14 m)	32	39.02	13	15.85
4 (16 m)	31	37.80	33	40.24
5 (18 m)	5	6.10	18	21.95
6 (20 m)	4	4.88	5	6.10

## 2.7 不同地区的立地质量比较

按照编制的立地指数和立地形表对 4 个地区的立地质量进行评价(表 7), 陕西火地塘林场样地的立地质量主要为 4、5、6 级, 宁夏二龙河林场样地的立地质量主要为 3、4、5 级, 青海北山林场和甘肃洮坪林场样地的立地质量主要为 2、3、4 级。因此, 总体来看, 陕西火地塘林场的立地质量最好, 宁夏二龙河林场次之, 青海北山林场和甘肃洮坪林场立地质量则一般。

表 7 不同地区立地质量等级比较

Table 7 Comparison of site quality grade in different regions

调查地点	样地数	评价方法	各立地质量等级的样地数量					
			1	2	3	4	5	6
宁夏二龙河林场	28	立地指数	0	1	4	16	7	0
		立地形	0	0	8	20	0	0
陕西火地塘林场	17	立地指数	1	0	0	3	8	5
		立地形	0	1	0	6	6	4
青海北山林场	17	立地指数	0	6	2	8	1	0
		立地形	0	5	9	2	1	0
甘肃洮坪林场	23	立地指数	3	2	7	7	4	0
		立地形	1	3	15	4	0	0

## 3 讨论

### 3.1 立地指数和立地形的适用性

利用立地指数来评价立地质量主要基于以下假设: 优势木树高的生长取决于立地质量, 与林分密度无关。这一点在很多研究中已被证实, 并且有大量学者将这一方法应用于栓皮栎(*Quercus variabilis*)、楠木(*Phoebe zhennan*)等天然次生林的立地质量评价中, 均取得了良好的评价效果<sup>[5, 18, 21-23]</sup>。本研究通过绘制林分胸径结构分布图, 验证了红桦天然次生林符合“相对同龄林”的基本特征, 这为立地指数法的应用提供了重要基础, 同时从模型拟合和评价结果来看, 立地指数法在红桦天然次生林中具有

良好的适用性。与马俊<sup>[15]</sup>在秦岭南坡红桦天然次生林的研究相比, 本研究扩大了研究范围, 提高了模型预测精度, 能够为西北地区红桦天然次生林评价提供较为可靠的依据。立地形评价立地质量主要基于 2 个假设: ①树高胸径关系和立地质量之间存在确定相关关系; ②林分密度对优势木树高胸径关系影响不显著<sup>[24]</sup>。Fu 等<sup>[25]</sup>在对吉林省中东部地区的蒙古栎和朝鲜松天然林中的研究证明了以上假设的成立。李清顺等<sup>[26]</sup>在对马尾松的研究中认为, 当优势木生长不受周围树木竞争的影响时, 可以忽略林分密度对优势木胸径树高关系的影响, 本研究调查区域的红桦天然次生林样地, 林分密度指数均在 1 000 以下, 且红桦为唯一优势树种, 因此林分内生长竞争较小, 基本能够满足上述条件, 这为立地形在红桦天然次生林中的应用提供了重要基础。立地形与林分断面积以及衡量立地质量的生态指标之间存在显著相关关系<sup>[27-31]</sup>, 后续可以补充研究立地形与林分蓄积量之间的关系, 以便建立与立地生产力的直接关系, 从而进一步证明立地形评价立地质量的科学性。

### 3.2 立地形与立地指数比较

通过对 2 种模型进行卡方检验和落点检验比较, 立地形模型的卡方值小于立地指数模型, 落点检验精度大于立地指数模型, 说明立地形对于树木生长的预测和立地质量的反映均优于立地指数。从年龄与树高、胸径拟合的结果看出, 随着年龄的增长, 胸径和树高的增长速度并不一致, 红桦在 40 a 前树高快速增长, 40 a 之后树高生长速度极为缓慢, 而胸径的增长则表现出更好的稳定性, 同样从树高与年龄、胸径的拟合结果来看表现出相同的规律, 这可能是立地形在红桦立地质量评价中表现出更高精度的主要原因。从 2 种方法对树高生长预测方面来看, 两者拟合相关系数为 0.897, 具有高度相关性。沈剑波等<sup>[32]</sup>在长白落叶松人工林中对 2 种方法相关性也进行了比较, 但结果表明 2 种方法相关性较差, 可能是因为人工林相比天然次生林更易受到人为因素的干扰, 从而影响了林分密度, 降低了立地形评价的准确性。有学者提出通过建立多隐含层神经网络方法为基础的立地形模型, 可以显著提高立地形与立地指数的一致性, 这也为立地形代替立地指数提供了更加可靠的思路<sup>[21]</sup>。

## 4 结论

对西北地区红桦天然次生林进行样地调查, 得到 257 组优势木数据, 选取 9 个树木生长模型进行年龄-树高关系、胸径-树高关系拟合, 确定立地指数

导向曲线  $H = 18.073 / \{1 + \exp[-(A - 22.571) / 9.144]\}$  和立地形导向曲线  $H = 19.793 / \{1 + \exp[-(D - 12.218) / 6.588]\}$ , 运用相对优势高法编制了立地指数和立地形表, 落点检验精度分别为 95% 和 97.5%, 并通过了卡方检验, 可作为西北地区红桦天然次生林立地质量评价的依据。

立地指数和立地形在红桦天然次生林的立地质量评价中表现出较好的一致性, 在 4 个不同地区的立地质量评价中, 陕西火地塘林场立地质量最优, 宁夏二龙河林场次之, 青海北山林场和甘肃洮坪林场立地质量一般。在实际生产应用中胸径相比年龄数据更易获取, 且测定更准确, 当缺乏优势木年龄数据时, 在选取符合条件的优势木的基础上, 可以考虑用立地形作为评价红桦天然次生林立地质量的指标。

### 参考文献:

- [1] 雷相东, 符利勇, 李海奎, 等. 基于林分潜在生长量的立地质量评价方法与应用[J]. 林业科学, 2018, 54(12): 116-126.  
LEI X D, FU L Y, LI H K, et al. Methodology and applications of site quality assessment based on potential mean annual increment[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(12): 116-126. (in Chinese)
- [2] 刘智军, 朱丽艳, 吴恒, 等. 基于清查数据的立地质量评价方法准确性分析[J]. 西南林业大学学报: 自然科学版, 2019, 39(5): 127-135.  
LIU Z J, ZHU L Y, WU H, et al. Accuracy analysis of site quality evaluation method based on continuous forest inventory data[J]. Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences, 2019, 39(5): 127-135. (in Chinese)
- [3] 付晓, 曹霖, 王雪军, 等. 吉林省林地立地质量评价及生产潜力研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(5): 1-9.  
FU X, CAO L, WANG X J, et al. Study on evaluation of forestland site quality and productivity potential for Jilin Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(5): 1-9. (in Chinese)
- [4] 段高辉, 赵鹏祥, 周远博, 等. 黄龙山林区油松人工林立地质量评价研究[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(5): 161-166.  
DUAN G H, ZHAO P X, ZHOU Y B, et al. On site quality evaluation of *Pinus tabulaeformis* plantation in the forest region of Huanglong Mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(5): 161-166. (in Chinese)
- [5] 郑聪慧, 贾黎明, 段劼, 等. 华北地区栓皮栎天然次生林地位指数表的编制[J]. 林业科学, 2013, 49(2): 79-85.  
ZHENG C H, JIA L M, DUAN J, et al. Establishment of site index table for *Quercus variabilis* natural secondary forest in north China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(2): 79-85. (in Chinese)
- [6] 马丰丰, 贾黎明, 段劼, 等. 北京山区侧柏人工林立地指数表的编制[J]. 北京林业大学学报, 2008(6): 78-82.  
MA F F, JIA L M, DUAN J, et al. Compilation of site index table for plantations of *Platycladus orientalis* in Beijing mountainous area[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008(6): 78-82. (in Chinese)
- [7] 刘发林, 刘四海, 肖化顺, 等. 臭松天然次生林地位指数模型研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(11): 24-29.  
LIU F L, LIU S H, XIAO H S, et al. Study on site index model of *Abies nephrolepis* natural secondary forest[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(11): 24-29. (in Chinese)
- [8] 张艺超, 赵天忠, 苏晓慧. 广西杉木人工林多形地位指数模型构建[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(12): 1-4.  
ZHANG Y C, ZHAO T Z, SU X H. Polymorphous site index models for *Cunninghamia lanceolata* plantation in Guangxi autonomous region[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(12): 1-4. (in Chinese)
- [9] 段劼, 马履一, 贾黎明, 等. 北京低山地区油松人工林立地指数表的编制及应用[J]. 林业科学, 2009, 45(3): 7-12.  
DUAN J, MA L Y, JIA L M, et al. Establishment and application of site index table for *Pinus tabulaeformis* plantation in the low elevation area of Beijing[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(3): 7-12. (in Chinese)
- [10] JUAN A M, ULISES D, JUAN G Á, et al. Assessing site form as an indicator of site quality in even-aged *Pinus radiata* D. Don stands in north-western Spain[J]. Annals of Forest Science: Official Journal of the Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), 2019, 76(4): 113.
- [11] SOCHA J, COOPS N C, OCHAL W. Assessment of age bias in site index equations[J]. iForest-Biogeosciences and Forestry, 2016, 9(1): 402-408.
- [12] 任坚毅. 太白山红桦林自然更新障碍及种子萌发生理的研究[D]. 西安: 西北大学, 2008.
- [13] 段学鑫, 王军会, 党坤良, 等. 间伐对秦岭南坡红桦林土壤活性有机碳组分的影响[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(1): 8-14.  
DUAN X X, WANG J H, DANG K L, et al. Effects of thinning on soil active organic carbon composition in *Betula albosinensis* forest on the southern slope of Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(1): 8-14. (in Chinese)
- [14] 陈怀祥. 抚育间伐对秦岭南坡红桦林生长及固碳能力的影响[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2017.
- [15] 马俊. 秦岭南坡红桦次生林生长收获模型研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2016.
- [16] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- [17] 刘柄昂, 彭湃, 马丰丰, 等. 亚热带日本落叶松人工林立地指数表编制[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(2): 60-64.  
LIU B A, PENG P, MA F F, et al. Site index table preparation for subtropical *Larix kaempferi* plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(2): 60-64. (in Chinese)
- [18] 孟宪宇, 陈东来. 山杨次生林地位指数表编制方法的研究[J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(3): 47-51.  
MENG X Y, CHENG D L. Study on constructive method of site index table for poplar secondary forest[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2001, 23(3): 47-51. (in Chinese)
- [19] 吴恒. 秦岭林区松栎混交林立地质量评价[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2016.
- [20] 陈永富. 基准年龄立地质量评价的影响分析[J]. 林业科学研究, 2010, 23(2): 283-287.

- CHENG Y F. Research on standard age affecting analysis of site quality evaluation[J]. Forest Research, 2010, 23(2): 283-287. (in Chinese)
- [21] 沈剑波. 基于广东省针阔混交异龄林的立地质量评价方法研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
- [22] 龚召松. 湖南楠木次生林立地质量评价与生长模型研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
- [23] 罗也, 杨雨春, 王君, 等. 吉林省长白山区胡桃楸天然次生混交林立地指数模型[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4049-4058.
- LUO Y, YANG Y C, WANG J, *et al.* Site index model of *Juglans mandshurica* natural secondary mixed forest in Changbai Mountain area, Jilin Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4049-4058. (in Chinese)
- [24] VANCLAY J K, HENRY N B. Assessing site productivity of indigenous cypress pine forest in southern queensland[J]. The Commonwealth Forestry Review, 1988, 67(1): 53-64.
- [25] FU L, LEI X, SHARMA R P, *et al.* Comparing height-age and height-diameter modelling approaches for estimating site productivity of natural uneven-aged forests[J]. Forestry: An International Journal of Forest Research, 2018, 91(4): 419-433.
- [26] 李清顺, 王得军, 孙景梅, 等. 利用马尾松解析木对林地立地指数和立地形的研究[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(4): 159-166.
- LI Q S, WANG D J, SUN J M, *et al.* Site index and site form of the forest land by stem analysis of *Masson pine* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(4): 159-166. (in Chinese)
- [27] 孙拥康, 汤景明, 王怡, 等. 鄂西山区日本落叶松人工林全林整体模型研究与应用[J]. 森林工程, 2023, 39(3): 57-63.
- [28] SHONGMING H, STEPHEN J T, DOUGLAS P W. Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1992, 22(9): 1297-1304.
- [29] KOUROSH A, SEYED J A, MASOUD T K. Constructing site quality curves and productivity assessment for uneven-aged and mixed stands of oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in Hyrcanian forest, Iran [J]. Forest Science and Technology, 2017, 13(1): 41-46.
- [30] GUANGSHUANG D, ZHIGANG G, QIUYAN W, *et al.* Comparison of different height-diameter modelling techniques for prediction of site productivity in natural uneven-aged pure stands[J]. Forests, 2018, 9(2): 63.
- [31] 马羽, 许业洲, 袁慧, 等. 湖北省杉木人工林胸径差分方程及多形地位指数表研究[J]. 森林工程, 2023, 39(2): 72-81.
- [32] 沈剑波, 雷相东, 雷渊才, 等. 长白落叶松人工林地位指数及立地形的比较研究[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(6): 1-8.
- SHEN J B, LEI X D, LEI Y C, *et al.* Comparison between site index and site form for site quality evaluation of *Larix olgensis* plantation [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(6): 1-8. (in Chinese)

(上接第 58 页)

- [19] 盘远方, 陈兴彬, 姜勇, 等. 桂林岩溶石山灌丛植物叶功能性状和土壤因子对坡向的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1581-1589.
- PAN Y F, CHEN X B, JIANG Y, *et al.* Changes in leaf functional traits and soil environmental factors in response to slope gradient in Karst hills of Guilin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(5): 1581-1589. (in Chinese)
- [20] 杨子, 范世献, 周芮宸, 等. 太行山南麓优势树种不同坡向下的叶功能及土壤养分差异[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(3): 408-414.
- YANG Z, FAN S X, ZHOU R C, *et al.* Leaf function and soil nutrient differences of dominant tree species on different slope aspects at the south foothills of Taihang Mountains[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2020, 54(3): 408-414. (in Chinese)
- [21] 魏翠华, 谢宇, 秦建彬, 等. 光照强度对金线莲生长及产量的影响[J]. 北方园艺, 2015(12): 139-141.
- [22] 卢艺苗, 王满堂, 陈晓萍, 等. 江西常绿阔叶林木本植物不同冠层高度当年生小枝茎构型对叶生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3653-3661.
- LU Y M, WANG M T, CHEN X P, *et al.* Effects of the current-year shoot stem configuration on leaf biomass in different canopy heights of woody plants in evergreen broad-leaved forest in Jiangxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(11): 3653-3661. (in Chinese)
- [23] 孙蒙柯, 程林, 王满堂, 等. 武夷山常绿阔叶林木本植物小枝生物量分配[J]. 生态学报, 2018, 37(6): 1815-1823.
- SUN M K, CHENG L, WANG M T, *et al.* Twig biomass allocation of woody species in evergreen broad-leaf forest, Wuyi Mountain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(6): 1815-1823. (in Chinese)
- [24] XIANG S, WU N, SUN S C. Within-twig biomass allocation in subtropical evergreen broad-leaved species along an altitudinal gradient: allometric scaling analysis[J]. Tress, 2009, 23(3): 637-647.
- [25] 翟江维, 林馨慧, 武瑞哲, 等. 小兴安岭不同功能型阔叶植物的柄叶权衡[J]. 植物生态学报, 2022, 46(6): 700-711.
- ZHAI J W, LIN X H, WU R Z, *et al.* Trade-offs between petiole and lamina of different functional plants in Xiao Hinggan Mountains, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(6): 700-711. (in Chinese)
- [26] YANG F, XIE L H, HUANG Q Y, *et al.* Twig biomass allocation of *Betula platyphylla* in different habitats in Wudalianchi Volcano, northeast China [J]. Open Life Sciences, 2021, 16(1): 758-765
- [27] 党晶晶, 赵成章, 李钰, 等. 祁连山高寒草地甘肃臭草叶性状与坡向间的关系[J]. 植物生态学报, 2015, 39(1): 23-31.
- [28] 朱瑞清, 刘美玲, 李刚, 等. 2 种水分生境下红砂叶片功能性的响应及适应机制[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 29-34.
- ZHU R Q, LIU M L, LI G, *et al.* Responses of leaf functional traits of *Reaumuria soongorica* in two different desert habitats [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5): 29-34. (in Chinese)