

伏牛山区栓皮栎天然次生林地位指数 ANN 模型构建

陈晨¹, 刘光武¹, 陈涛¹, 温仲清^{2*}

(1. 河南林业职业学院, 河南 洛阳 471002; 2. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100)

摘要: 研究编制了伏牛山地区栓皮栎天然次生林地位指数表, 以期为当地栓皮栎天然次生林后期的经营管理和保护工作奠定基础。根据伏牛山区调查的 120 块栓皮栎天然次生林标准地和 180 株平均优势木解析木数据, 采用人工神经网络建模技术, 建立了优势木平均高 ANN 模型, 拟合精度为 98.66%。基准年龄为 40 a, 依据平均优势高与地位指数的关系, 编制了地位指数表。用未参加建模的 60 块标准地数据进行落点检验, 检验精度达到 96.67%。结果表明, ANN 模型构建地位指数模型方法简单, 所建模型精度高, 应用推广能力强。

关键词: 栓皮栎; 天然次生林; 地位指数; ANN

中图分类号: S792.18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7461(2019)01-0206-05

Site Index Simulation for *Quercus variabilis* Natural Secondary Forest in Funiu Mountainous Area Based on ANN

CHEN Chen¹, LIU Guang-wu¹, CHEN Tao¹, WEN Zhong-qing^{2*}

(1. Henan Forestry Vocational College, Luoyang 471002, Henan, China;

2. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: The paper designed the site index table for *Quercus variabilis* natural secondary forest in the Funiu Mountainous area in order to lay the foundation for the later management and protection of the forest. According to the survey data of 120 sample plots and the analytical data of 180 average dominant trees, and based on artificial neural network (ANN) modeling technique, the ANN model of the dominant tree average height was established. The fitting precision of the model was 98.66%. The ANN growth model of the dominant tree average height was selected as oriented curve, and the age of these trees was about 40 years. The site index table was established depending on the relationship of the dominant tree average height and the site index. The test precision was 96.67% through test of falling point with the data from 60 sample plots which were not used to build the growth model. The results indicated that it was simple to establish the site index model of ANN, which had promising precision and better application potential.

Key words: *Quercus variabilis*; natural secondary forest; site index; ANN

地位指数是目前评价林地生产力的主要方法, 地位指数表是森林经营所用的基础数表, 国外早在 20 世纪初就开始编制各个树种的地位指数表, 并依据地位指数表指导生产(Monserud, 1984)。我国从 20 世纪 80 年代开始编制一些主要用材树种的地位指数表(松、杉等)。国内对栓皮栎地位指数表的研

究方法主要基于生长方程或最优数学模型^[1-2], 存在模拟生长过程简单化、计算繁琐、计算量大、模型精度低等缺点。

栓皮栎是重要的木材、能源、软木、栲胶等资源树种, 栓皮栎等栎类树种是最长寿的树种之一, 森林生态系统以栓皮栎等栎类树种为支撑, 可以长久稳

收稿日期: 2018-03-27 修回日期: 2018-04-28

基金项目: 河南省 2017 年科技攻关计划项目(172102110239)。

作者简介: 陈晨, 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 森林资源与经营管理。E-mail: 1005147274@qq.com

* 通信作者: 温仲清, 男, 工程师, 研究方向: 森林培育。E-mail: 476886810@qq.com

定^[3]。我国现存的栓皮栎天然次生林绝大多数为经过多次砍伐的萌生次生林,这种林分密度过大、干形弯曲、材质差、疏于管理,其生态价值和经济价值大大降低。本研究通过建立伏牛山区栓皮栎地位指数模型,并编制地位指数表,可以客观地评价伏牛山林地生产力,为栓皮栎经营方案制定提供数表参考。

人工神经网络(简称 ANN)是 20 世纪末迅速发展起来的一门高新技术。近 20 a 来,人工神经网络在林业上的应用主要涉及林业基础学科、森林保护学科、水土保持学科、森林经营管理学科等。人工神经网络在林分生长模型上的应用更少,在栓皮栎地位指数模型的研究国内至今还没有。地位指数模型是林分生长模型的基础^[4-5],林分的生长系统是一个复杂的非线性过程。传统的地位指数建模方法多根据林分生长规律,采用线性或简单的非线性进行拟合而林分的生长系统是一个复杂的非线性过程^[6]。人工神经网络具有无限逼近非线性的功能,并且人工神经网络建模不需要依赖现存的生长方程,特别适合拟合林分的非线性生长过程。同时,与传统建模相比,人工神经网络具有拟合精确性更高、速度更快等优点。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

伏牛山属秦岭山脉东段支脉(33°02′—34°08′N,111°27′—112°54′E),是河南省境内重要的山脉。整个伏牛山区约占河南省山地丘陵面积的 40%^[7]。一般海拔 1 000~1 500 m,是北亚热带和暖温带的气候分界线。伏牛山南坡属北亚热带气候,植被类型为常绿落叶混交林。伏牛山北坡属暖温带,植被类型为落叶阔叶林。同时,垂直气候变化明显,天然植被和野生动物繁多,是河南省植物多样性的分布中心。山体主要由花岗岩组成,土壤类型主要为棕壤土和褐色土。栓皮栎是伏牛山地区海拔 1 000 m 以下的山地和丘陵的建群种,是伏牛山区的地带性植被^[1,8-9]。

1.2 材料来源

调查所用标准地分布于栾川县合峪镇、城关镇、庙子镇、四棵树乡,南召县板山坪镇、马市坪乡、乔端乡等。标准地分别设在伏牛山东、西、南、北、东南、东北,西南、西北共 8 个坡向,有上、中、下 3 个坡位。在不同立地、不同林龄的林分设置标准地共 180 块,标准地面积 20 m×40 m,并对标准地进行常规调查,标准地林分特征见表 1。由表 1 可见,栓皮栎年龄组涵盖了幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林。每个标准地选取 4 株优势木,从中选择 1 株平

均优势木做树干解析,共得到 180 株解析木(表 2),优势木年龄在各个年龄组均有分布。

表 1 标准地胸径树高统计

Table 1 The statistics for D-H of sample plots			
龄组/a	样地数	平均胸径/cm	平均高/m
幼龄林(<20)	51	6.8~15.0	7.2~12.8
中龄林(21~40)	102	5.7~21.4	4.9~13.7
近熟林(41~50)	17	10.8~20.7	11.7~19.6
成熟林(51~60)	6	14.6~20.9	15.2~22.4
过熟林(>61)	4	28.9~36.8	18.7~27.8

表 2 解析木特征统计

Table 2 The statistics for feature of analytical trees		
龄阶/a	解析木数量	优势木平均高/m
5	180	2.5
10	180	5.4
15	178	7.8
20	175	9.5
25	160	10.9
30	156	12.0
35	140	12.8
40	90	13.5
45	75	14.6
50	48	15.8
55	51	16.7
60	30	17.5
65	18	19.6
70	12	20.4

1.3 数据可行性分析

研究所有标准地栓皮栎数据,90%以上由栓皮栎树种组成,符合相对纯林的概念^[10-11]。所用栓皮栎标准地大都为经过皆伐的天然次生萌生林,可以视为相对同龄林。同龄纯林的直径分布近似遵从正态分布。为进一步验证,从不同坡向、不同坡位的标准地中,各随机抽取 1 块标准地分别做直径分布直方图(图 1),并统计相应标准地的相对直径及株数累计分布表(表 3)。由图 1 可以看出林分直径主要分布在 7~17 cm,中等径阶林木株数较多,直径较小的林木株数相对较少,大径阶的林木株数偏少,林分直径分布基本符合正态分布。

研究表明,林分平均直径(D_g)在株数累计分布曲线上的位置在 55%~64%,一般在 60%处^[9,11]。由表 3 可以看出,相对直径=1.0(即林分平均直径 13.5 cm)处,所对应的株数累计百分数为 61.27%,61.27%介于 55%~64%之间,并且非常接近 60%,说明所用固定标准地林分样本数据符合人工林直径分布规律,可以用来建立模型。对建模所用的平均优势木解析木数据做散点图(图 2),由图 2 可知,优势高随年龄变化符合林分基本生长规律。

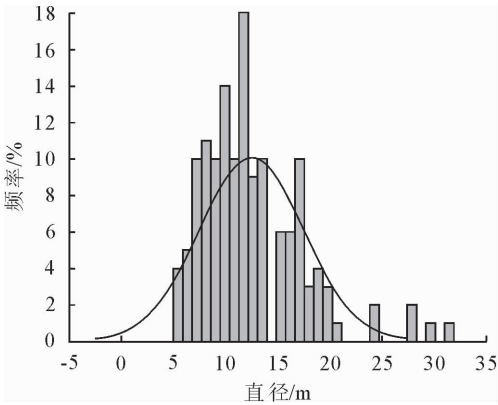


图 1 栓皮栎直径分布频率

Fig. 1 The figure for frequency of *Quercus variabilis* diameter distribution

表 3 栓皮栎标准地林分相对直径与株数累计 ($D_g=13.5\text{ cm}$)

Table 3 Table for the relative diameter and accumulative trees of *Quercus variabilis* sample plots($D_g=13.5\text{ cm}$)

径阶/cm	径阶下限/cm	相对直径	株数	频率	累计频率
5	5.5	0.407 4	4	0.002 8	0.002 8
6	6.5	0.481 5	5	0.035 5	0.038 3
7	7.5	0.555 6	10	0.070 9	0.109 2
8	8.5	0.629 6	12	0.085 1	0.194 3
9	9.5	0.703 7	10	0.070 9	0.265 2
10	10.5	0.777 8	14	0.099 3	0.364 5
11	11.5	0.851 9	10	0.070 9	0.435 4
12	12.5	0.925 9	16	0.113 5	0.548 9
13	13.5	1.000 0	9	0.063 8	0.612 7
14	14.5	1.074 0	12	0.085 1	0.697 8
15	15.5	1.148 1	6	0.042 3	0.740 1
16	16.5	1.222 2	6	0.042 3	0.782 4
17	17.5	1.296 3	10	0.070 9	0.853 3
18	18.5	1.370 4	3	0.021 3	0.874 6
19	19.5	1.444 4	4	0.028 4	0.903 0
20	20.5	1.518 5	3	0.021 3	0.924 3
21	21.5	1.592 6	1	0.007 1	0.931 4
24	24.5	1.814 8	2	0.014 2	0.945 6
28	28.5	2.111 1	2	0.014 2	0.959 8
30	30.5	2.259 3	1	0.007 1	0.966 9
32	32.5	2.407 4	1	0.007 1	0.974 0
合计			141	1.000 0	1.000 0

1.4 模型构建思路

以 120 块伏牛山标准地的优势木平均高与年龄及优势木解析木资料为基础建立 ANN 树高模型,再依据优势木平均高与地位指数的关系,编制地位指数表。另外 60 块标准地数据作为检验样本,用来检测地位指数模型。

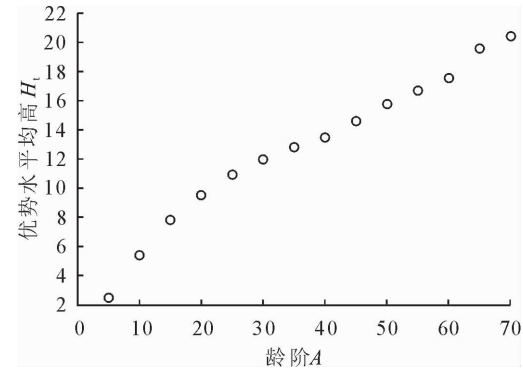


图 2 栓皮栎林分年龄——优势木平均高散点图

Fig. 2 Scatter diagram of *Q. variabilis* stand age
—dominate average height

1.5 ANN 模型构建方法

在神经网络工具箱中,输入层以林分年龄 A 为输入向量,输出层以林分优势木平均高 H_t 为输出向量,中间层为隐层,隐层的神经元有 s 个。 s 的具体数字需经模型训练,结合拟合精度及林分生长规律曲线确定。在输入层与隐层神经元之间、隐层与输出层之间有连接权值。隐层和输出层每个神经元设有阈值。模型训练前,系统会自动给所构建模型的权值、阈值一个初始值,模型训练之后,权值、阈值会重置。隐层神经元的传递函数采用对数函数,输出层的传递函数采用直线函数。所构建的 ANN 模型结构见图 3。

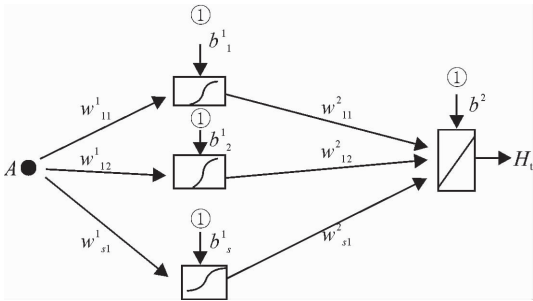


图 3 优势高生长神经网络模型结构

Fig. 3 Neural network model of topping height growth

注: A 为林分年龄; H_t 为优势高; $w_{s1}^1 (s=1, 2, 3 \cdots)$ 为输入层节点至隐层神经元的权值; $b_s^1 (s=1, 2, 3 \cdots)$ 为隐层神经元的阈值;①为输入值为 1 的输入节点; $w_{s1}^2 (s=1, 2, 3 \cdots)$ 为隐层至输出层节点的权值; b^2 为输出层阈值;“S”形符号表示神经元的传递函数为对数 sigmoid 函数,即 matlab 的 logsig 函数。“/”符号表示神经元的传递函数为线性函数,即 matlab 的 pureline 函数。

2 结果与分析

2.1 模型训练

以林分年龄 A 为输入向量,将 120 块标准地及优势木解析木数据按年龄求平均值作为输出向量,

依据图 3 所建 ANN 模型,在 matlab 系统里,经反复训练,训练结果见表 4。

由表 4 可知,随着隐层神经元的增加,模型拟合精度、相关系数也逐渐增大,而均方误差 mse 在逐渐减小,似乎结构为 1:4:1 的模型是最好的。由于人工神经网络具有无限逼近非线性的功能,为避免出现过拟合,在建模时要采用定性和定量相结合的办法^[10]。拟合后不仅要看模型的拟合精度,而且要参考仿真效果图。由图 4、图 5 可知,结构为 1:3:1 的模型在拟合数据时变化稳定,而 1:4:1 的模型性能不稳定。结合优势木平均高拟合效果图及拟合精度等要素,最终确定 1:3:1 的模型为目标模型。均方误差性能函数 $mse=0.046\ 343$,总体精度=98.66%,相关系数=99.937%,模型的权值矩阵阈值矩阵如下:

表 4 模型结构及精度分析

Table 4 The model structure and analysis of precision			
模型结构	拟合精度 $P_c/\%$	相关分析 $R/\%$	均方误差 mse
1:2:1	97.60	99.71	0.321 01
1:3:1	98.66	99.937	0.046 343
1:4:1	99.38	99.947	0.050 072

$IW\{1,1\}=[w_{11}^1,w_{21}^1,w_{31}^1]^T=[10.607\ 4,$
 $2.559\ 4,-5.675\ 4]^T$ (1)

$b\{1\}=[b_1^1,b_2^1,b_3^1]=[-5.128\ 5,-1.637\ 4,$
 $-5.027\ 5]^T$ (2)

$IW\{2,1\}=[w_{11}^2,w_{12}^2,w_{13}^2]=[-0.177\ 27,$
 $1.781,-1.394\ 8]$ (3)

$b\{2\}=[b^2]=[-0.107\ 97]$ (4)

相应的 ANN 数学模型为:
 $H_t=\text{pureline}(-0.177\ 27H_1+1.781H_2-$
 $1.394\ 8H_3-0.107\ 97)$ (5)

$H_1=\text{logsig}(10.607\ 4A-5.128\ 5)$ (6)

$H_2=\text{logsig}(2.559\ 4A-1.637\ 4)$ (7)

$H_3=\text{logsig}(-5.675\ 4A-5.027\ 5)$ (8)

式中, H_i 为隐层神经元的输出($i=1,2,3$)。
用 matlab 的仿真函数,式(5)可简洁地表达为:
 $H_t=\text{sim}(\text{mynet},A)$ (9)
式中,mynet 为训练好的 ANN 模型名字。

2.2 训练模型拟合显著性分析

图 6 为林分年龄与优势木平均高的拟合效果图,可以看出,实测数据均匀地分布在拟合曲线两侧,拟合曲线平滑,符合林分生长规律曲线。总体拟合精度达 98.66%。

2.3 地位指数的计算

地位指数指林分在标准年龄 A_0 时的平均优势

木高^[10]。确定标准年龄的方法有多种,国外对标准年龄的确定是速生树种为 50 a、慢生树种 100 a。也有通过建立优势木各龄阶树高标准差与年龄的回归方程以确定标准年龄的^[12-13]。在以往栓皮栎地位指数的编制研究中,标准年龄选定在 30~50 a。结合以往栓皮栎地位指数研究及栓皮栎生长特点,本研究确定栓皮栎标准年龄 A_0 为 40 a。将 A_0 带入式(9)中,可得栓皮栎地位指数 ANN 表达式:

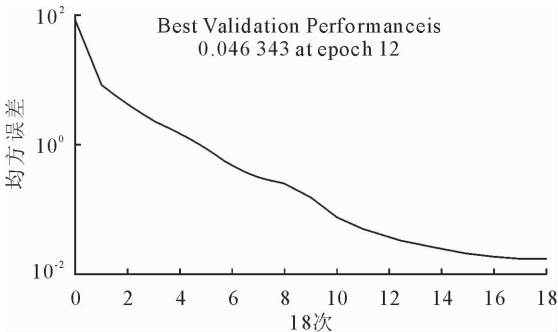


图 4 模型结构为 1:3:1 误差曲线

Fig. 4 Error curve figure of 1:3:1 net model structure

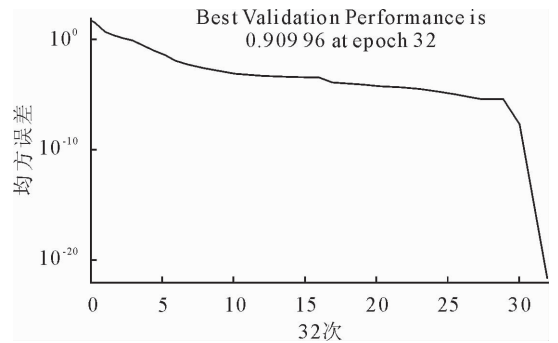


图 5 模型结构为 1:4:1 均方误差

Fig. 5 Error curve figure of 1:4:1 net model structure

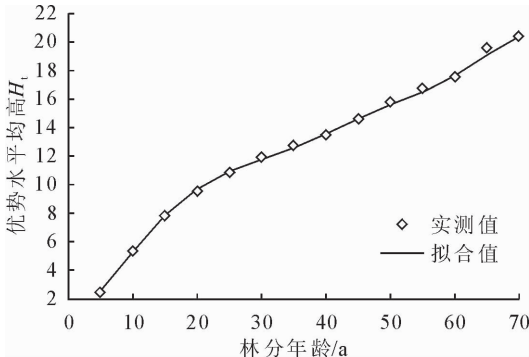


图 6 林分年龄与优势木平均高拟合效果

Fig. 6 Fitting result of stand age and the dominate average height

$SI=\text{sim}(\text{mynet},A_0)$ (10)

由式(9)、(10)可得以标准地优势高、林分年龄为自变量的地位指数计算式:

$SI=H_t\ \text{sim}(\text{mynet},A_0)/\text{sim}(\text{mynet},A)$ (11)

$H_t=SI\ \text{sim}(\text{mynet},A)/\text{sim}(\text{mynet},A_0)$ (12)

将 A_0 为 40 带入上述计算式,(11)、(12)可转化为:

$SI=13.4684H_t/\text{sim}(\text{mynet},A)$ (13)

$H_t=SI\text{ sim}(\text{mynet},A)/13.4684$ (14)

只要将标准地林分年龄、优势高代入计算式(13),即可得到该标准地的精确的地位指数。取林分年龄分别为 5、10、15...70,地位指数分别为 6、7、8...20,用 matlab 绘图功能绘制出伏牛山栓皮栎地位指数曲线(图 7),也可用式(14)编制出栓皮栎地位指数(表 5)。

2.4 地位指数适用性检验

为验证地位指数的应用推广能力,用未参加建模的 60 块标准地平均优势木数据用落点检验法对地位指数进行检验。由图 8 可知,60 块标准地数据,有 58 株优势木平均高数据落在了曲线簇范围

内,精度达到了 96.67%,结果表明所编制的地位指数表具有很好的应用推广能力,可以用来评价伏牛山区天然次生林立地质量^[14-18],并为伏牛山区栓皮栎经营提供参考。

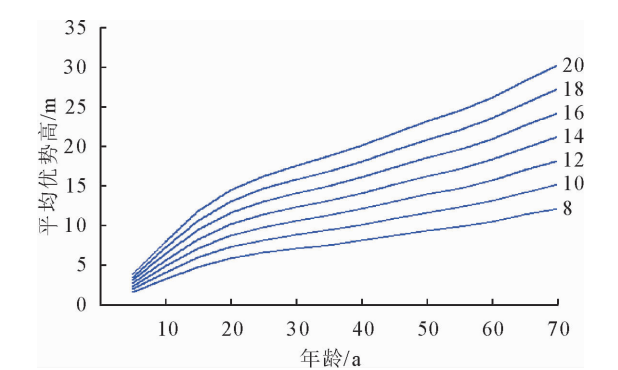


图 7 栓皮栎天然次生林地位指数曲线簇

Fig.7 The site index cluster of *Q. variabilis* natural secondary stand

表 5 栓皮栎天然次生林地位指数表(标准年龄 40 a)

Table 5 The site index table for *Q. variabilis* natural secondary stand(standard age 40)

龄阶/a	地位指数/m							
	8	10	12	14	16	18	20	22
5	1.50	1.87	2.25	2.62	3.00	3.37	3.75	4.12
10	3.14	3.93	4.71	5.50	6.29	7.07	7.86	8.64
15	4.68	5.85	7.02	8.18	9.35	10.52	11.69	12.86
20	5.76	7.21	8.65	10.09	11.53	12.97	14.41	15.85
25	6.46	8.08	9.69	11.31	12.93	14.54	16.16	17.77
30	6.97	8.72	10.46	12.20	13.95	15.69	17.43	19.18
35	7.46	9.32	11.19	13.05	14.91	16.78	18.64	20.51
40	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00	22.00
45	8.62	10.77	12.93	15.08	17.24	19.39	21.55	23.70
50	9.22	11.53	13.84	16.14	18.45	20.75	23.06	25.37
55	9.75	12.19	14.62	17.06	19.50	21.94	24.37	26.81
60	10.43	13.04	15.65	18.26	20.87	23.48	26.09	28.69
65	11.27	14.08	16.90	19.72	22.53	25.35	28.16	30.98
70	12.07	15.08	18.10	21.12	24.13	27.15	30.17	33.18

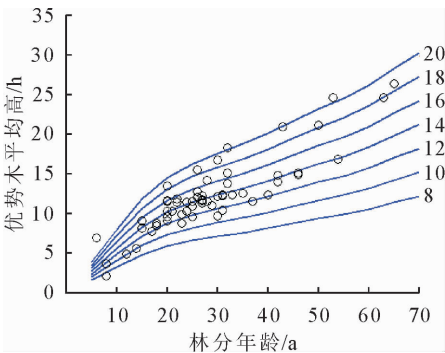


图 8 伏牛山栓皮栎天然次生林地位指数落点检验

Fig.8 Falling point test of *Q. variabilis* natural secondary stand

3 结论与讨论

用 120 块常规标准地数据及 180 株平均优势木树干解析材料,建立了栓皮栎天然次生林地位指数 ANN 模型。所建立的地位指数 ANN 模型,不依赖

于现存的数学模型,模拟精度更高。

用年龄与优势高数据建立了林分优势高生长 ANN 模型,又依据林分平均优势高与地位指数的关系编制了地位指数表。所设标准地使用数据涵盖了各个年龄段、各种立地类型,并且经过落点检测,具有很强的拟合推广能力,可以对伏牛山地区立地质量进行科学的评价。

所用人工神经网络建模技术具有过度拟合数据的缺点,在使用时必须采用定性与定量相结合的办法,即绘制相应的拟合曲线,看其是否符合林分生长的一般规律。建模所用数据幼龄林、中龄林较多,成、过熟林少,主要因为早期栓皮栎人为破坏严重造成。近年来实施的天保工程对栓皮栎的保护起了一定的作用,这也为后期增加近、成、过熟林的数量,进一步提高地位指数精度营造了很好的条件。

ZHANG X A,ZHU Y X,CHENG L M,*et al.* The comparison of dynamic and static MOR of bamboo strengthened LVL[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition,2006,30(1):69-71. (in Chinese)

[9] 徐咏兰,华毓坤. 不同结构杨木单板层积材的蠕变和抗弯性能[J]. 木材工业,2002,16(6):10-12.

[10] 刘焕荣. 浸渍法生产竹木复合强化单板层积材工艺研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2007.

[11] 张占宽,刘君良. 密实型杨木强化单板层积材制造工艺及应用前景分析[J]. 林业机械与木工设备,2005,33(7):28-30.

[12] 马贞,宋俞成,刘文金. 基于有限元分析的梓木家具直榫结构设计研究[J]. 木材加工机械,2013,24(2):39-43,59. MA Z,SONG Y C,LIU W J. Straight tenon structure design of lignum catalpa furniture based on finite element analysis [J]. Wood Processing Machinery,2013,24(2):39-43,59. (in Chinese)

[13] 郭兆霞,高颖,伊松林,等. 杨木柜类家具 T 型节点连接强度及其补强研究[J]. 西北林学院学报,2017,32(2):280-285,314. GUO Z X,GAO Y,YI S L,*et al.* Strength and reinforcement of T-type joint of poplar solid wood cabinet[J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(2):280-285,314. (in Chinese)

[14] CHANG W S,HSU M F,KOMATSU K. Rotational performance of traditional Nuki joints with gap II: the behavior of butted Nuki joint and its comparison with continuous Nuki joint[J]. Journal of Wood Science,2007,52(5),401-407.

[15] 王丽宇,鹿振友,申世杰. 白桦材 12 个弹性常数的研究[J]. 北京林业大学学报,2003,25(6):64-67. WANG L Y,LU Z Y,SHEN S J. Study on twelve elastic constant values of *Betula platyphylla* Suk. wood[J]. Journal of Beijing Forestry University,2003,25(6):64-67. (in Chinese)

[16] 张帆,李黎,张立,等. 五种家具常用木材弹性常数及力学性能参数的测定[J]. 林业机械与木工设备,2012,40(1):16-19.

[17] GB/T 1935-2009. 木材顺纹抗压强度测试方法[S]. 北京,中国标准出版社,2009.

[18] GB/T 1938-2009. 木材顺纹抗拉强度试验方法[S]. 北京,中国标准出版社,2009.

[19] GB/T 1933-2009. 木材密度测试方法[S]. 北京,中国标准出版社,2009.

[20] 马尔妮,赵广杰. 木材物理学专论[M]. 北京:中国林业出版社,2012.

[21] GB/T 10357.3-2013. 家具力学性能试验 第 3 部分:椅凳类强度和耐久性[S]. 北京,中国标准出版社,2013.

(上接第 210 页)

参考文献:

[1] 祝维,张西,贾黎明. 伏牛山地区栓皮栎天然次生林地位指数表的编制[J]. 东北林业大学学报,2017,12(45):32-37.

[2] 张瑜,贾黎明,郑聪慧,等. 秦岭地区栓皮栎天然次生林地位指数表的编制[J]. 林业科学,2014,50(4):47-54. ZHANG Y,JIA L M,ZHENG C H,*et al.* Establishment of a site index table for *Quercus variabilis* natural secondary stand in Qinling Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae,2014,50(4):47-54. (in Chinese)

[3] 侯元兆,幸良,国吉. 栎类经营[M]. 北京:中国林业出版社,2017.

[4] SABATIA C O,BURKHART H E. Predicting site index of plantation loblolly pine from biophysical variables[J]. Forest Ecology and Management,2014,326:142-156.

[5] AERTSEN W,KINT W,VMUYS B,*et al.* Effects of scale and scaling in predictive modelling of forest site productivity[J]. Environmental Modelling and Software,2012(31):19-27.

[6] 陈晨,刘光武. 马尾松人工林树高 BP 模型研究与应用[J]. 安徽农业科学,2012,40(14):8175-8177.

[7] 宋朝枢. 伏牛山自然保护区科学考察集[M]. 北京:中国林业出版社,1994.

[8] 罗伟祥. 中国栓皮栎[M]. 北京:中国林业出版社,2009.

[9] 张益,陈丹丹,郝凡等. 麻栎和栓皮栎叶脉序与环境因子关系研究[J]. 西北林学院学报,2018,33(1):31-36. ZHANG Y,CHEN D D,HAO F,*et al.* Relationship between leaf venation and environment in *Quercus acutissima* and *Q. variabilis*[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(1):31-36. (in Chinese)

[10] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京:中国林业出版社,2006.

[11] 黄家荣. 森林生长的人工神经网络建模[M]. 北京:中国农业出版社,2006.

[12] 陈晨,刘光武. Weibull 函数在杉木人工林直径分布中的研究[J]. 绿色科技,2017,3:59-61.

[13] 郑聪慧,贾黎明. 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.

[14] 黄国胜,马炜,王雪军,等. 基于一类清查数据的福建省立地质量评价技术[J]. 北京林业大学学报,2014,36(3):1-8. HUANG G S,MA W,WANG X J,*et al.* Forestland site quality evaluation of Fujian Province based on continuous forest inventory data [J]. Journal of Beijing Forestry University,2014,36(3):1-8. (in Chinese)

[15] 吴恒,党坤良,田相林,等. 秦岭林区天然次生林与人工林立地质量评价[J]. 林业科学,2015,51(4):78-88. WU H,DANG K L,TIAN X L *et al.* Evaluating site quality for secondary forests and plantation in Qinling Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae,2015,51(4):78-88. (in Chinese)

[16] 徐罗,亢新刚,刘洋,等. 长白山天然云冷杉针阔混交林地位指数导向曲线的模拟[J]. 东北林业大学学报,2014(4):32-37.

[17] 陈晨,刘光武,康文涛,等. 马尾松人工林地位指数 BP 模型研究[J]. 西北林学院学报,2009,24(2):128-130. CHEN C,LIU G W,KANG W T,*et al.* Site index BP model of masson pine fortunei plantation[J]. Journal of Northwest Forestry University,2009,24(2):128-130. (in Chinese)

[18] 朱伟杰,高光芹,黄家荣,等. 毛白杨农田防护林林分密度指数模型[J]. 西北林学院学报,2011,26(1):151-154. ZHU W J,GAO G Q,HUANG J R,*et al.* Density index model of *Populus shelterbelts*[J]. Journal of Northwest Forestry University,2011,26(1):151-154. (in Chinese)