

黄龙山林区白皮松天然次生林生长规律研究

陈 晨, 刘光武*

(河南林业职业学院, 河南 洛阳 471002)

摘要:【目的】为实现陕西省白皮松天然次生林的合理经营,建立符合其生长规律的模型,为科学抚育较大树龄的天然次生林提供决策依据。【方法】以陕西省黄龙山林区白皮松天然次生林为研究对象,选择标准木进行树干解析,采用人工神经网络(ANN)和3种常见的理论函数建立了胸径、树高、材积生长模型,并绘制生长曲线图对林区内白皮松天然次生林生长规律进行分析。【结果】①采用人工神经网络建模技术构建的胸径生长量模型、树高生长量模型、材积生长量模型优于3种传统模型。②所建神经网络模型在拟合生长缓慢的白皮松生长过程方面具有较好的应用推广能力。③白皮松胸径速生期为30~60 a,胸径连年生长量在120 a达到最大值;20~30 a为树高生长的速生期,树高连年生长量在30 a达到最大值;白皮松材积生长速生期为110~130 a,材积连年生长量在130 a达到最大值。在135 a时,黄龙山林区白皮松还未达到数量成熟龄。【结论】所建神经网络模型能为黄龙山林区白皮松古树研究奠定基础,生长规律的研究可以为不同阶段白皮松经营提供参考。

关键词:白皮松;天然次生林;树干解析;人工神经网络;生长规律;黄龙山林区

中图分类号:S757.2

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2006(2020)06-0125-06



The growth law for natural secondary forests of *Pinus bungeana* in the Huanglong Mountain forest region

CHEN Chen, LIU Guangwu*

(Henan Forestry Vocational College, Luoyang 471002, China)

Abstract: 【Objective】In order to realize the reasonable management of *Pinus bungeana* natural secondary forests in Shaanxi Province, the growth model which accords with the growth law of *P. bungeana* was established to provide bases for management decisions and achieve a reasonable management of oak natural secondary forests of *P. bungeana* with the older tree age. 【Method】This study was conducted in a natural secondary forest of *P. bungeana* in the Huanglong Mountain forest region, Shaanxi Province. Standard trees were chosen for a trunk analysis, and diameter at breast height (DBH), tree height, and volume growth models were established based on data from the analysis of tree trunks with artificial neural network(ANN) and three common models. Growth curves were drawn to study the growth law of natural secondary forests of *P. bungeana*. 【Result】The DBH ANN growth model, tree height ANN growth model, and volume ANN growth model were better than the three commonly used models. The ANN model showed a good application and promotion ability in fitting the growth process of *P. bungeana*, which grows slowly. The rapid DBH, tree height and volume growth periods were 30-60, 20-30 and 110-130 a, respectively. The maximum current annual increment for DBH, tree height and volume was 120, 90 and 130 a, respectively. *P. bungeana* has not reached the age of quantitative maturity in 135 a. 【Conclusion】The ANN models could lay the foundation for ancient tree research in the Huanglong Mountain forest region. The growth law research can provide a reference and support for the management of different stages of *P. bungeana* forest.

Keywords: *Pinus bungeana*; natural secondary forest; analysis of tree trunks; artificial neural network(ANN); growth

收稿日期:2019-08-10

修回日期:2019-12-16

基金项目:河南省2017年科技攻关计划项目(172102110239)。

第一作者:陈晨(1005147274@qq.com),讲师。*通信作者:刘光武(450875443@qq.com),讲师,ORCID(0000-0002-7050-0911)。

引文格式:陈晨,刘光武.黄龙山林区白皮松天然次生林生长规律研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2020,44(6):125-130.

CHEN C, LIU G W. The growth law for natural secondary forests of *Pinus bungeana* in the Huanglong Mountain forest region[J].

Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, 44(6): 125-130. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.201908018.

law; Huanglong Mountain forest region

白皮松(*Pinus bungeana*)是东亚唯一的三针松,也是我国特有的乡土树种^[1],具有较强的抗旱、抗寒性和寿命长的特点,也因干形优美、适应性强成为城市绿化树种和山区重要的造林树种^[2-3]。黄龙山林区是陕西黄土高原森林分布最集中、野生动植物资源最丰富的地区^[4],也是白皮松天然次生林分布相对集中区,但受各种因素影响,现存白皮松林存在块状分布、林相不完整、材质差等问题,严重影响其生态价值及经济价值,为保护和发展我国这一特有树种,有必要对其生长规律进行研究。

目前,对白皮松的研究主要集中在地理分布^[5-6]、育苗^[7-8]、群落特征^[9-11]、种群特点^[12]等方面,对其生长规律的研究多以林龄70 a以下的白皮松为对象,对白皮松古树生长规律的报道还较少,且采用的方法通常是线性函数或简单的非线性函数模拟生长规律^[13-14]。林分的生长过程是一个复杂的非线性过程,用线性函数或简单的非线性函数可将复杂的生长规律简单化处理。本研究以陕西省白皮松天然次生林古树为研究对象,采用神经网络建模技术建立白皮松古树生长模型,并对白皮松古树胸径、树高、材积生长规律进行研究,旨在为白皮松林的合理经营和科学抚育提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

材料来源于陕西省五大林区之一的黄龙山林区,黄龙山林区位于黄土高原南缘(110°08′~110°30′E,35°26′~35°46′N),海拔650~1100 m。气候类型为暖温带季风性大陆气候,土壤类型主要为棕壤土、褐壤土,土层较薄,厚度40~50 cm,pH范围为6.8~7.2。年均气温为9~12.5℃,极端最高气温36.7℃,极端最低气温-22.5℃;年降水量为500~620 mm,降水主要集中在5—9月。群落内乔木层植物主要有白皮松(*Pinus bungeana*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*),乔木层白皮松占绝对优势。

1.2 数据采集方法

在调查区不同海拔、不同坡向选择生长正常、人为干扰少的白皮松天然次生林设置调查样地,样地面积为20 m×30 m,共设2块标准地,在标准地内进行每木检尺。每块标准地选择1株平均标准木伐倒进行树干解析,共获得解析木2株,按照2

m的段长、10 a为1个龄阶进行树干解析。解析木特征及立地条件特征如下:古树年龄(A)135 a,胸径(DBH,*D*)29.4 cm,树高(*H*)13.3 m,材积(*V*)0.419 1 m³,样地海拔1 100 m,阴坡,坡度32°,土壤为棕壤,土层厚度50 cm;检验树年龄79 a,胸径13.2 cm,树高10.2 m,材积0.087 5 m³;样地海拔760 m,阳坡,坡度25°,土壤为砂壤,土层厚度40 cm。

1.3 模型构建及检验

为了解白皮松的生长规律,分别以古树龄阶为自变量,以胸径、树高、材积为因变量构建古树胸径、树高及材积神经网络模型,并与Logistic函数、负指数函数、对数函数拟合效果做比较,依据拟合精度、*R*²、均方误差(MSE)选择最优模型。采用的生长模型如下:

$$\text{Logistic 函数 } y = \frac{a}{1 + e^{bA+c}}$$

$$\text{负指数函数 } y = a \frac{b}{e^{A+c}}$$

$$\text{对数函数 } y = a + b \ln(A+c);$$

神经网络模型(ANN) $y = \text{pureline}[\log \text{sig}(A)]$ 。

式中:*A*为龄阶,*y*为总生长量,*a*、*b*、*c*为模型参数,pureline为直线函数,log sig为曲线函数。

以未参与模型构建的解析木数据为样本,检验拟合精度高、拟合效果好的神经网络模型,以检测模型的应用推广能力。

2 结果与分析

2.1 白皮松生长规律建模结果

2.1.1 模型拟合

1)神经网络建模结果。以白皮松古树解析木各龄阶(*A*)为输入向量,以各龄阶胸径平均值(*D*)、树高平均值(*H*)、材积平均值(*V*)为输出向量,分别构建古树胸径、树高和材积神经网络模型。以解析木数据为训练样本,对所构建的生长量模型进行反复训练,最终得到相应的神经网络模型数学表达式如表1,拟合结果如表2,所得拟合曲线如图1。

由表1、表2可知,神经网络在拟合胸径、树高、材积生长规律时,拟合精度均达到了98.5%以上,拟合值与实测值的相关性均达到了99.9%以上,均方误差(MSE)也很小,拟合效果非常理想。

表 1 白皮松生长模型 ANN 拟合结果
Table 1 The fitting results of *Pinus bungeana* growth model with ANN

因子 factor	函数表达式 function expression	$P_c/\%$	$R/\%$	MSE
胸径 DBH	$D = \text{purelin}(1.430\ 2D_1 + 4.901\ 4D_2 + 0.852\ 87D_3 - 4.494\ 8)$	98.875	99.96	0.470\ 7
	$D_1 = \log \text{sig}(3.002\ 4A - 2.717\ 7)$			
	$D_2 = \log \text{sig}(1.189\ 1A + 1.853\ 7)$			
	$D_3 = \log \text{sig}(-8.607\ 9A - 9.468\ 7)$			
树高 height	$H = \text{purelin}(-0.533\ 1H_1 + 1.674\ 3H_2 - 1.068\ 2H_3 - 0.002\ 945)$	99.29	99.95	0.000\ 3
	$H_1 = \log \text{sig}(9.275\ 4A - 4.969\ 1)$			
	$H_2 = \log \text{sig}(4.159\ 1A - 1.805\ 8)$			
	$H_3 = \log \text{sig}(-8.187\ 9A - 5.484\ 3)$			
材积 volume	$V = \text{purelin}(0.891\ 97V_1 + 1.394\ 1V_2 - 1.012\ 8)$	97.09	99.93	0.037\ 8
	$V_1 = \log \text{sig}(13.806\ 4A - 10.568\ 1)$			
	$V_2 = \log \text{sig}(2.993\ 6A - 1.372\ 7)$			

注: D_1 、 D_2 、 D_3 分别为胸径隐层第 1~3 个神经元的输出值 D_1 、 D_2 和 D_3 are the output values of the first to third neuron in the hidden layer. H_1 、 H_2 、 H_3 分别为树高隐层第 1~3 个神经元的输出值 H_1 、 H_2 、 H_3 are the output values of the first to third neuron in the hidden layer. V_1 、 V_2 分别为材积隐层第 1~2 个神经元的输出值 V_1 和 V_2 are the output values of the first to second neuron in the hidden layer. P_c : 拟合精度 fitting accuracy; R : 实测值与拟合值的相关系数 correlation coefficient between the measured value and the fitted value; MSE: 均方误差 means square error. 下同。The same below.

表 2 ANN 模型对白皮松生长的拟合结果
Table 2 The fitting results of ANN model to the growth of *P. bungeana*

年龄/a age	胸径/cm DBH		树高/m tree height		材积/m ³ volume		年龄/a age	胸径/cm DBH		树高/m tree height		材积/m ³ volume	
	测定值 measured	拟合值 fitting	测定值 measured	拟合值 fitting	测定值 measured	拟合值 fitting		测定值 measured	拟合值 fitting	测定值 measured	拟合值 fitting	测定值 measured	拟合值 fitting
10	0.740 7	0.736 1	0.864 2	0.865 3	0.001 547 99	0.002 6	80	13.703 7	14.407 8	9.104 9	9.049 4	0.065 015 48	0.078 9
20	1.477 8	1.228 4	1.944 4	1.777 2	0.003 125 00	0.004 8	90	15.926 0	16.686 5	10.500 0	10.194 7	0.100 619 20	0.110 2
30	2.963 0	3.142 5	4.166 7	3.652 2	0.004 963 56	0.008 4	100	18.222 2	19.180 4	11.358 0	11.171 9	0.148 437 50	0.147 2
40	5.185 2	5.486 9	5.740 7	5.660 7	0.010 835 91	0.014 0	110	21.538 5	21.959 0	11.913 6	11.6566	0.187 306 50	0.198 4
50	7.407 4	7.827 6	7.037 0	6.833 4	0.018 575 85	0.022 7	120	24.613 0	24.998 1	12.191 4	12.1812	0.286 377 71	0.305 5
60	9.851 9	10.068 9	7.592 6	7.492 2	0.032 507 74	0.035 6	130	28.762 9	28.146 1	12.795 9	12.8086	0.407 120 74	0.411 4
70	11.538 4	12.236 6	8.209 9	8.145 3	0.044 891 64	0.054 0	135	29.690 7	29.685 7	13.071 4	13.0715	0.433 187 50	0.435 2

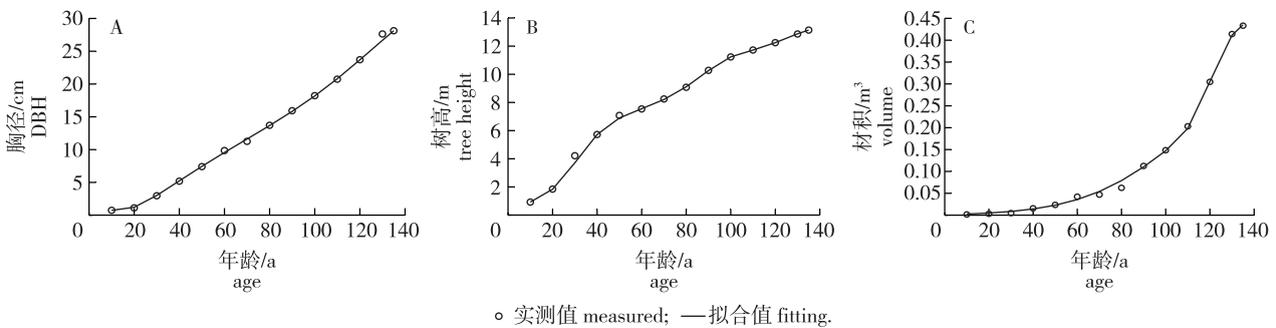


图 1 白皮松胸径、树高和材积的 ANN 拟合曲线图

Fig.1 The fitting curve of DBH,height and volume of *Pinus bungeana* with ANN

2) 传统方法建模结果。选择对树木生长规律拟合效果较好的 Logistic 模型、负指数函数、对数函数作为基本函数模型,利用白皮松古树解析木数据进行模拟,拟合结果及精度分析如表 3。

由表 3 可知,以负指数函数拟合胸径生长规律

最好,拟合精度为 96.61%, R^2 值为 0.990,均方误差为 1.120 0,胸径与树龄的关系式为:

$$D = 170.490\ 0 \times \frac{-349\ 367}{e^A + 58.493} \quad (1)$$

表 3 白皮松胸径、树高、材积模型拟合结果

Table 3 The fitting results of DBH, tree height and volume growth model of *P. bungeana*

因子 factor	函数名称 function	参数 parameter			$P_c/\%$	R^2	MSE
		a	b	c			
胸径 DBH	Logistic 函数	36.097 0	-0.031 9	3.099 2	94.14	0.997	0.683 0
	负指数函数	170.490 0	-349.670 0	58.493 0	96.61	0.990	1.120 0
	对数函数	-3 005.700 0	403.230 0	1 710.400 0	93.98	0.987	1.220 0
树高 height	Logistic 函数	14.917 0	-0.026 1	1.567 3	94.43	0.993	0.491 0
	负指数函数	21.967 0	-79.179 0	15.632 0	96.90	0.994	0.042 0
	对数函数	-36.720 0	9.679 0	37.914 0	97.38	0.995	0.340 0
材积 volume	Logistic 函数	2.195 6	-0.038 9	6.524 1	93.96	0.998	0.008 4
	负指数函数	2 992.100 0	-2 677.000 0	178.710 0	69.59	0.995	0.012 1
	对数函数	-70.450 0	8.930 5	2 631.800 0	56.35	0.806	0.080 2

对数函数对树高生长规律拟合较好,拟合精度为 97.38%, R^2 值为 0.995,均方误差为 0.340 0,树高与树龄的关系式为:

$$H = -36.72 + 9.679 \ln(A + 37.914) \quad (2)$$

Logistic 函数对材积生长规律拟合最佳,拟合精度为 93.96%, R^2 值为 0.998,均方误差为 0.008 4。材积和树龄的关系式为:

$$V = \frac{2.1956}{1 + e^{-0.0389834 + 6.5241A}} \quad (3)$$

2.1.2 模型检验

检测树与建模用古树的立地条件有明显区别,但检测树与古树均为生长较慢的树。以检测树解析木龄阶为输入向量,代入表 3 中胸径、树高、材积神经网络生长模型,即可得到检测树胸径、树高、材积的拟合值,拟合结果如表 4 所示。

由表 4 可知,胸径检验精度为 89.29%,树高检验精度为 83.86%,材积检验精度为 76.36%,说明所构建的古树生长模型在拟合立地条件差、生长速度慢的白皮松生长规律方面,具有较好的应用性。

表 4 白皮松古树生长 ANN 模型检测结果

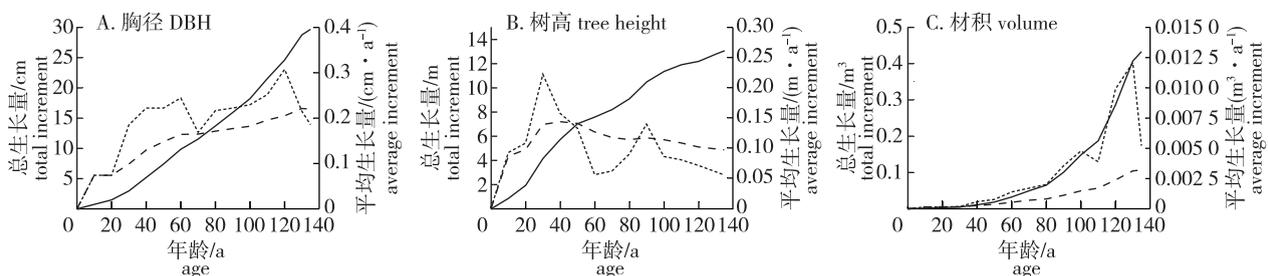
Table 4 Results of tests based on ANN model for *P. bungeana*

年龄/a age	胸径/cm DBH		树高/m height		材积/m ³ volume	
	测定值 measured	拟合值 fitting	测定值 measured	拟合值 fitting	测定值 measured	拟合值 fitting
10	1.037 0	0.739 4	1.384 6	0.924 3	0.003 125	0.002 6
20	2.444 0	1.203 9	3.907 7	1.836 7	0.006 250	0.004 9
30	4.000 0	3.013 8	4.923 1	3.712 8	0.007 813	0.008 4
40	6.148 1	5.231 1	6.769 2	5.722 2	0.023 438	0.014 1
50	8.148 1	7.445 0	7.076 9	6.895 5	0.034 375	0.022 7
60	10.740 7	9.564 9	8.461 5	7.554 7	0.056 250	0.035 6
70	12.222 2	11.615 2	9.630 8	8.208 2	0.062 525	0.054 0
79	13.185 2	13.460 7	10.153 8	9.008 6	0.087 500	0.076 2

2.2 白皮松古树生长过程分析

2.2.1 胸径生长过程

胸径大小是衡量生长量的重要指标,由图 2A 可以看出,白皮松古树从 0~135 a,胸径由 0 增至 29.7 cm,出现持续增长趋势。在 20 a 之前,胸径增长缓慢,年平均增长量为 0.073 89 cm,20~135 a 期间,胸径持续稳定增加。白皮松胸径平均生长量



—总生长量 total increment; - - -平均生长量 average increment; 连年生长量 current annual increment.

图 2 白皮松胸径、树高和材积的总生长量、连年生长量及平均生长量曲线

Fig.2 The total, current annual and average increment at DBH, height and volume of *P. bungeana*

曲线变化稳定,由0 a时的0 cm/a稳定增长到130 a的最大值0.221 3 cm/a;30~60 a期间为胸径速生期,年均增长量达0.229 6 cm/a。连年生长量曲线在生长过程中出现明显的波动现象,在60、70和120 a出现峰值,120 a为连年生长量的最大值,达0.307 5 cm/a,120 a后连年生长量呈下降趋势。连年生长量的波动现象与多种因素有关,比如物种生长特性、气象因素、抚育管理措施等。另外,在20~130 a期间,连年生长量大于平均生长量,在130 a平均生长量达最大值,连年生长量与平均生长量相交。130 a以后,平均生长量大于连年生长量。

2.2.2 树高生长过程

树高是衡量树木高度生长的数量指标。由图2B可见,随着年龄由0到135 a,树高由0逐渐增大到13.1 m。由白皮松树高连年生长量曲线可以看出,在20 a之前,树高增长速度缓慢,年均增长量为0.097 2 m;20~30 a为树高生长的旺盛期,年均增长量为0.222 2 m;30~60 a树高增长速度逐渐降低,60 a时达到谷值;60~90 a树高增长速度回升,90 a时达到增速小高峰。在90 a附近,连年生长量与平均生长量相交,随后树高连年生长量逐年减少。生长过程期间,树高连年生长量波动变化明显,峰值出现在30、60、90 a附近,其中30 a对应的连年生长量为最大值,达到0.222 2 m/a。树高平均生长量曲线变化平缓,最大值出现在40~50 a附近,随后平均生长量逐渐降低。连年生长量与平均生长量有3个交点,分别在43、83、93 a附近。整体而言,43 a之后连年生长量小于平均生长量。连年生长量与平均生长量曲线多个交点的出现,可能和异常天气、病虫害、人为活动的过度干扰有关。

2.2.3 材积生长过程

材积是衡量木材产量的数量指标,是森林资源调查的一项重要内容。从图2C可以看出,在135 a之前,白皮松材积总生长量持续增加。由连年生长量曲线可知,0~30 a时,材积增长速度非常慢,年增速不到0.000 2 m³,30 a之后增长速度明显加快;110~130 a为材积增长速生期,年增速为0.011 m³。白皮松材积平均生长量呈稳定增长趋势,材积连年生长量呈波动变化,在80、100、110、130 a附近出现均峰值,其中最大峰值出现在130 a附近,连年生长量达到0.012 1 m/a。10~135 a,材积连年生长量均大于平均生长量,二者没有相交,说明135 a仍处于材积增长速生期,还未达到数量成熟龄。

3 讨论

目前,树干解析是研究树木生长规律的有效方法。本研究以陕西省黄龙山林区白皮松古树树干解析资料为研究对象,采用人工神经网络建模技术建立白皮松胸径、树高、材积生长模型,并与传统建模效果进行比较,认为神经网络建模技术在拟合精度、建模速度、适应性等方面均优于传统建模技术。用未参与建模、立地条件明显有别但同样生长缓慢的解析木资料为检测样本,检测所建神经网络生长模型,发现拟合精度较高,说明所建神经网络生长模型对生长较慢的白皮松具有较好的应用性。

树龄为0~135 a期间,白皮松古树胸径、树高、材积随着年龄的增加而增大。20 a之前,胸径、树高、材积均增长缓慢;树高、胸径、材积速生期分别为20~30、30~60、110~130 a。平均生长量达到最大值的先后顺序是树高、胸径、材积,最大值分别出现在43、130、135 a以后。连年生长量出现最大值的先后顺序是树高、胸径、材积,最大值分别出现在30、120、130 a。由统计分析可知,白皮松树高速生期出现最早,材积速生期出现最晚;连年生长量出现最大值的时间早于平均生长量出现最大值的时间。平均生长量达到最大值时,树龄的先后顺序,符合树木生长的一般规律^[15]。

依据树高和胸径速生期出现的时间,在白皮松20 a左右应对林分进行适当的间伐和人工培育措施,保证林分有足够的营养和空间;树高、胸径速生期出现在20~60 a,在50 a左右应对林分进行第2次间伐,以缓解林分生长压力,延缓增长速度下降。

营养面积降低及缺乏相应的抚育措施,导致树高连年生长量和胸径连年生长量在60、70 a时出现低谷。

间伐可以促进林分树高、胸径的生长,但对胸径的影响更大。间伐后,白皮松树高连年生长量持续增加并达到峰值的时间为30 a,而胸径连年生长量持续增加的时间为50 a。70 a时的间伐抚育措施促进了白皮松树高和胸径的生长,树高连年生长量和胸径连年生长量分别在90、120 a达到了峰值。135 a前,材积连年生长量大于材积平均生长量,因此,白皮松的数量成熟龄在135 a以后。130 a时材积生长速率下降开始,直到数量成熟龄之前,树高、胸径、材积还处于增长期。白皮松生长规律符合实生苗早期生长慢、成熟晚、长寿等特点。

检测树数据代入模型后,拟合精度在90%以下,拟合精度不够高。后期还需增加建模样本数据

数量,以提高模型的应用推广能力。

参考文献(reference):

- [1] 彭重华,薄楠林.白皮松研究进展[J].中国农学通报,2007,23(11):174-178. PENG C H, BO N L. Research progress in *Pinus bungeana*[J]. Chin Agric Sci Bull, 2007, 23(11): 174-178.
- [2] 王九龄.中国北方森林技术大全[M].北京:北京科学技术出版社,1992.
- [3] 许绍惠,边立琪,郭泳,等.白皮松抗寒性及抗寒育苗技术的研究[J].林业科学,1994,30(6):497-505. XU S H, BIAN L Q, GUO Y, et al. Nursery techniques for the enhancement of cold resistance of *Pinus bungeana* seedlings[J]. Sci Silvae Sin, 1994, 30(6): 497-505.
- [4] 李敏,赵鹏祥,郝红科,等.陕北黄龙山林区景观格局动态[J].林业科学,2012,48(12):109-115. LI M, ZHAO P X, HAO H K, et al. Dynamics of landscape pattern in Huanglong Mountains forest region of northern Shaanxi Province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(12): 109-115.
- [5] 毕润成,魏学智,尉文龙,等.山西省五鹿山自然保护区科学考察报告[M].北京:中国科学技术出版社,2004.
- [6] 赵罕,郑勇奇,李斌,等.白皮松天然群体遗传结构的地理变异分析[J].植物遗传资源学报,2013,14(3):395-401. ZHAO H, ZHENG Y Q, LI B, et al. Genetic structure analysis of natural populations of *Pinus bungeana* in different geographical regions[J]. J Plant Genet Resour, 2013, 14(3): 395-401. DOI: 10.13430/j.cnki.jpgr.2013.03.029.
- [7] 郭聪聪,沈永宝,史锋厚.白皮松种子休眠研究进展[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(2):175-183. GUO C C, SHEN Y B, SHI F H. Review on seed dormancy of *Pinus bungeana* Zucc.[J]. J Nanjing Fore Univ (Nat Sci Ed), 2019, 43(2): 175-183. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.201710045.
- [8] 俞方洪,游晓庆,李晓辉,等.不同种源白皮松在赣东北的育种试验[J].南方林业科学,2019,47(1):19-22. YU F H, YOU X Q, LI X H, et al. Breeding experiments of different species of *Pinus bungeana* in northeastern Jiangxi Province[J]. South China For Sci, 2019, 47(1): 19-22. DOI: 10.16259/j.cnki.36-1342/s.2019.01.005.
- [9] 毕润成,成亚丽,尹大泽,等.吕梁山南端白皮松的群落特征及其多样性的研究[J].植物研究,2002,22(3):366-372. BI R C, CHENG Y L, YIN D Z, et al. The study on *Pinus bungeana* community characteristics and species diversity in the south of Mt. Lüliang[J]. Bull Bot Res, 2002, 22(3): 366-372.
- [10] 李谭宝,李淑静,王彩云.黄龙山白皮松林林隙物种多样性动态[J].西北林学院学报,2015,30(4):66-72. LI T B, LI S J, WANG C Y. Gap dynamics of species diversity in *Pinus bungeana* forest in Huanglong Mountain[J]. J Northwest For Univ, 2015, 30(4): 66-72.
- [11] 秦廷松,李登武,吕振江,等.黄土高原地区黄龙山白皮松林地土壤种子库研究[J].浙江农林大学学报,2011,28(5):694-700. QIN T S, LI D W, LV Z J, et al. Soil seed banks in the *Pinus bungeana* forestland of the Huanglong Mountains on the Loess Plateau[J]. J Zhejiang A & F Univ, 2011, 28(5): 694-700.
- [12] 张首军,何斌.五鹿山自然保护区白皮松群落物种组成和群落结构[J].南京林业大学学报(自然科学版),2012,36(4):157-160. ZHANG S J, HE B. The species composition and structural characteristics of *Pinus bungeana* community of Wulu Mountain nature reserve[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2012, 36(4): 157-160. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2012.04.033.
- [13] 李春义,姚光刚,陈文婧,等.甘肃小陇山白皮松生长模型研究[J].中南林业科技大学学报,2018,38(2):70-75. LI C Y, YAO G G, CHEN W J, et al. Growth estimation model of *Pinus bungeana* in Xiaolongshan of Gansu Province[J]. J Central South Univ For Technol, 2018, 38(2): 70-75. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2018.02.011.
- [14] 张首军,杨志芳,刘任涛.五鹿山国家级自然保护区白皮松生长规律研究[J].河南大学学报(自然科学版),2007,37(3):285-288. ZHANG S J, YANG Z F, LIU R T. Study on the growth regulations of *Pinus bungeana* Zucc. in Wulu Mountain National Nature Reserve[J]. J Henan Univ (Nat Sci), 2007, 37(3): 285-288. DOI: 10.15991/j.cnki.411100.2007.03.014.
- [15] 孟宪宇.测树学[M].北京:中国林业出版社,2006.

(责任编辑 郑琰燧)