

火地塘林区铁杉生长规律研究

彭舜磊¹,王得祥²

(1 西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨凌 712100;
2 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】 **【目的】**探讨火地塘林区铁杉的生长规律,为合理保护和培育铁杉珍稀资源提供参考。**【方法】**以火地塘林区铁杉解析木资料为基础,运用 SPSS 软件进行回归分析,分别建立了铁杉胸径、树高、材积与树龄的数学模型,用标准地调查的实测值验证模型的精确性。用根据解析木得到的生长量实测值与模型预测的理论值分别绘制胸径、树高、材积平均生长量和连年生长量曲线,并对其生长规律进行分析。**【结果】**建立的生长模型拟合效果较好。铁杉胸径连年生长量的最大值出现在 35~45 年,105~115 年仍保持较高的生长水平;平均生长量在 45 年以前逐年提高,45 年后稳定在一个较高的水平。树高生长在 10 年以内生长缓慢,连年生长量最大值出现在 35~45 年和 105~125 年,平均生长量在树龄大于 10 年后一直维持在一个稳定的水平。材积连年生长量和平均生长量的最大值出现在 105 年以后。**【结论】**建立的生长模型准确性高,可用于铁杉生长规律的预测。铁杉是寿命较长、生长缓慢、但持续生长时间较长的树种,在其生命周期内有 2 个速生期,分别是在树龄 35~45 年和 105~125 年。

【关键词】 铁杉;生长模型;生长曲线;生长规律;火地塘林区

【中图分类号】 S791.170.1 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-9387(2008)04-0083-06

Growth law of *Tsuga chinensis* in Huoditang Forest Region

PENG Shun-lei¹, WANG De-xiang²

(1 College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2 National Forest Ecosystem Research Station in Shaanxi Qinling Mountain, Ningshan, Shaanxi 711600, China)

Abstract: **【Objective】** The study is to find the growth law of *Tsuga chinensis* in Huoditang region in order to provide the reference of reasonable protecting and nurturing rare resources of *Tsuga chinensis*. **【Method】** Based on the data of the analytical trees in Huoditang region, this paper used SPSS software to build the optimal growth models of diameter, tree height and volume. The data collected from the investigation plots were used to check the accuracy of the models. According to the data of the analytical trees and the predictable data, we drew the average growth curve, year after year growth curve compactly and studied the growth law deeply. **【Result】** The result showed that the residuals were very little which indicated the growth models had better performance. During the age of 35—45 years, the year after year growth of DBH reached the maximum. This growth still kept higher lever during the age of 105—115 years. Average growth increased year by year before the age of 45 years. After that, this growth still kept a higher velocity steadily. Before the age of 10 years, the height grew slowly. After that, average growth maintained a steadily lever. The peak growth of the tree height appeared during the age of 35—45, 105—125 years. The year after year growth of volume reached the maximum after the age of 105 years. But the mean growth of vol-

* [收稿日期] 2007-04-06
[基金项目] 国家林业局“948”引进项目(2005-4-20);西北农林科技大学“青年学术骨干”人才支持计划项目
[作者简介] 彭舜磊(1974—),男,河南上蔡人,工程师,在读硕士,主要从事森林生态和近自然森林经营研究。
[通讯作者] 王得祥(1966—),男,青海乐都人,教授,博士生导师,主要从事森林生态和森林可持续经营研究。

ume didn't meet the top value at the age of 150 years, which indicated *Tsuga chinensis* had not arrived the amateur age at the age of 150 years. 【Conclusion】 The models we built had good performance and could be used to predict the growth law of *Tsuga chinensis*. *Tsuga chinensis* has a longer life expectancy, slow growth, but the continuous growth of the trees longer has two life cycles respectively at the age of 35—45, 105—125 years.

Key words: *Tsuga chinensis*; growth model; growth curve; growth law; Huoditang Forest Region

铁杉(*Tsuga chinensis*)为松科铁杉属常绿乔木,是我国的特有珍稀树种,分布于秦岭以南及长江流域各省,秦岭为其分布的北界^[1]。铁杉是耐荫性较强、生长较慢、寿命较长的树种,喜温暖湿润的山地气候,多生长于谷边山坡上^[2]。在秦岭火地塘林区,铁杉分布在海拔 1 500~2 500 m 的中山地带,常与华山松、漆树、槭树等形成针阔混交林,林中铁杉古树、大树众多,非常珍贵,多为顶级群落^[3-5],铁杉对秦岭的水源涵养、水土保持、生态系统形成与维护起着十分重要的作用。研究其生长规律不仅有利于铁杉种群的培育和保护,而且对南水北调中线工程水源涵养林的培育和建设均有重要的理论和现实意义。

目前,有关铁杉(*Tsuga chinensis*)的研究文献较少,张仰渠^[1]对铁杉生长特性进行了研究;彭鸿^[6]对铁杉群落进行了定量分析;Zobel 等^[7]研究了环境、苗龄和种源对铁杉叶子抵抗力的影响^[7]。但对铁杉生长模型和生长规律的研究尚未见报道。为此,本研究对铁杉胸径(D)、树高(H)、材积(V)与树龄(T)之间的数学模型进行了研究,分别绘制了铁杉胸径、树高和材积的生长过程曲线,并对其胸径、树高和材积的连年生长量与平均生长量进行了量化分析,以期阐明铁杉的生长规律,为合理保护和培育该珍稀树种资源提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站火地塘林区内。该区地理坐标为 $N33^{\circ}25' \sim 33^{\circ}29'$, $E108^{\circ}25' \sim 108^{\circ}30'$; 海拔 1 600~2 500 m; 年平均气温 $8 \sim 12^{\circ}\text{C}$, 年降水量 1 000~1 200 mm, 年日照 1 100~1 300 h, 年积温 $2\,200 \sim 3\,100^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 77.1%; 土壤为山地棕壤, 土层厚 85~100 cm, pH 值 5.14~5.81。研究区铁杉群落为铁杉天然针阔混交林, 混交树种主要为华山松(*P. armandi*)、漆树(*T. vernicifluum*)、青榨槭(*A. davidii*)等, 受干扰小, 林下灌木有木姜子(*Lit-*

sea Pungens)、桤木(*Viburnum betulae-folium*)、蔷薇(*R. multiflora* Thunb. cathayensis)、绣线菊(*S. wilsonii* Duthie)、中华旌节花(*Stachyurus chinensis*)等, 草本植物主要有菝葜(*Smilax chinensis*)、莎草(*Cyperus rotundas* L.), 细辛(*Asarum caulescens*)等。

1.2 研究方法

运用西北农林科技大学林学院森林经理资料室火地塘林区铁杉解析木资料, 选择不同的数学模型, 通过回归分析, 分别拟合出铁杉胸径、树高、材积生长的最优数学模型。将标准样地调查的数据与模型预测的理论值进行比较, 验证模型的精确性。然后根据由解析木得到的生长量的实测值与模型预测的理论值绘制生长曲线, 探讨铁杉的生长规律。

1.2.1 资料来源 铁杉生长量数据来自西北农林科技大学林学院森林经理组火地塘林区铁杉解析木资料^[1]。

1.2.2 样地调查 在研究区铁杉典型群落内, 根据树龄选取 5 个面积为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的标准样地(表 1)。标准样地铁杉林分类型为天然针阔混交异龄林, 树种组成为 4 铁 3 华 2 漆 1 槭一株, 树龄为 8~160 年。对每个标准样地的铁杉进行每木检尺, 用生长锥确定树龄, 用直径围尺测胸径(对幼树用游标卡尺测地径), 用瑞典 Vertex III 超声波树木测高仪测树高, 以 10 年为一个龄级记录每株乔木的树龄、胸径(幼苗地径)、树高值。不同树龄的林木材积值由平均实验形数公式计算:

$$V = g_{1.3}(h+3)f_d。$$

式中: V 为材积; $g_{1.3}$ 为胸高断面面积; h 为树高; f_d 为平均实验形数(铁杉的 f_d 取 0.45)^[8]。

1.2.3 数据处理 数据采用 SPSS 软件进行回归分析。采用的数学模型有逻辑斯蒂、理查德、苏玛克、韦布尔、坎派兹、高斯和二次曲线模型^[9-15]。

(1) 逻辑斯蒂模型:

$$Y = \frac{K}{1 + e^{A+BT}}。$$

式中: Y 表示生长量; K 、 A 、 B 为随机参数; T 表示树

龄。

(2)理查德模型：

$$Y=A(1-Be^{-KT})^C。$$

式中： $A、B、K、C$ 为随机参数。

(3)苏玛克模型：

$$Y=Ae^{\frac{-B}{T+C}}。$$

式中： $A、B、C$ 为随机参数。

(4)韦布尔模型：

$$Y=A[1-e^{-(\frac{T-B}{C})^D}]。$$

式中： $A、B、C、D$ 为随机参数。

(5)坎派兹模型：

$$Y=Ae^{(-Be^{-KT})}。$$

式中： $A、B、K$ 为随机参数。

(6)高斯模型：

$$Y=A(1-Be^{-KT^2})。$$

式中： $A、B、K$ 为随机参数。

(7) 二次曲线：

$$Y=A+BT+CT^2。$$

式中： $A、B、C$ 为随机参数。

分别将铁杉解析木 $D、H、V$ 数据用上述 7 个模型进行拟合,通过回归分析,从中选出最优模型。

表 1 火地塘林区铁杉群落标准地的基本情况

Table 1 Basic standards of *Tsuga chinensis* community in Huoditang forest region

样地号 Plot number	林分类型 Forest type	林龄/年 Forest age	海拔/m Altitude	坡位 Slope position	坡向 Slope aspect	坡度/(°) Slope degree	土壤类型 Soiltype	密度/ (株·hm ⁻²) Stand density	郁闭度 Canopy density
1	天然林 Natural forest	8~60	197 5	中坡 Middle	西北 NW	28	棕壤 Brown soil	350	0.9
2	天然林 Natural forest	70~90	197 5	中坡 Middle	西北 NW	28	棕壤 Brown soil	280	0.8
3	天然林 Natural forest	100~120	198 0	中坡 Middle	西北 NW	25	棕壤 Brown soil	260	0.8
4	天然林 Natural forest	130~140	198 0	中坡 Middle	西北 NW	25	棕壤 Brown soil	190	0.8
5	天然林 Natural forest	140~150	198 5	中坡 Middle	西北 NW	25	棕壤 Brown soil	170	0.8

2 结果与分析

2.1 铁杉胸径、树高和材积生长数学模型的建立

2.1.1 胸径生长数学模型 由表 2 可知, Schu-

macher 模型拟合的决定系数最大,残差平方和最小,拟合效果最好, D 与 T 回归关系极为显著,故铁杉胸径生长模型为:

$$D=110.656e^{\frac{-116.3}{T+10.609}},R^2=0.996^{**} \tag{1}$$

表 2 铁杉胸径生长数学模型拟合结果

Table 2 Curve fitting types and modeling results for diameter growth of *Tsuga chinensis*

数学模型 Mathematical model	拟合参数 Model parameter	残差平方和 Sum of residual square	决定系数 Correlation index
逻辑斯蒂 Logistic	$K=54.636, A=2.966, B=-0.0394$	66.368	$R^2=0.986$
理查德 Richards	$A=75.513, B=1.135, K=0.115, C=1.502$	16.939	$R^2=0.996$
苏玛克 Schumacher	$A=110.656, B=116.300, C=10.609$	16.852	$R^2=0.996$
韦布尔 Weibull	$A=69.480, B=11.222, C=103.752\ 9, D=1.341\ 8$	17.605	$R^2=0.996$
坎派兹 Compertz	$A=60.560, B=4.316, K=0.023\ 0$	30.880	$R^2=0.993$
高斯 Gauss	$A=56.2, B=0.986, K=0.000$	31.110	$R^2=0.993$
二次曲线 Quadratic Curve	$A=-7.288, B=0.528, C=-0.001$	31.573	$R^2=0.993$

2.1.2 树高生长的数学模型 由表 3 可知, Weibull 模型拟合效果最好,铁杉树高生长模型为:

$$H=10\ 843.793[1-e^{-(\frac{T-0.017}{82\ 540.738})^{0.952}}],R^2=0.999^{**} \tag{2}$$

2.1.3 材积生长数学模型 由表 4 可以看出, Logistic、Weibull 和 Richards 模型拟合效果均非常好,但是 Logistic 模型更为简洁,更符合材积生长的生物学特性,所以铁杉的材积生长模型为:

2.2 铁杉胸径、树高和材积生长数学模型的验证

按 10 年一个龄级,将不同的龄级分别代入 3 个模型,计算出胸径、树高、材积的预测值,然后与样地调查得到的实测值进行比较,结果见表 5。由表 5 可以看出,预测值与实测值间残差很小,二者数值非常吻合,说明 3 个模型的精度均较高;随着树龄的增大,预测值与实测值更加接近。

表 3 铁杉树高生长数学模型的拟合结果

Table 3 Curve fitting types and modeling results for tree height growth of <i>Tsuga chinensis</i>			
数学模型 Mathematical model	拟合参数 Model parameter	残差平方和 Sum of residual square	决定系数 Correlation index
逻辑斯蒂 Logistic	$K=30.679, A=2.243, B=-0.027$	8.955	$R^2=0.990$
理查德 Richards	$A=7\,120.911, B=1, K=0.000, C=0.952$	1.023	$R^2=0.999$
苏玛克 Schumacher	$A=86.075, B=249.536, C=61.369$	2.422	$R^2=0.997$
韦布尔 Weibull	$A=10\,843.793, B=0.017, C=82\,540.738, D=0.952$	1.022	$R^2=0.999$
坎派兹 Compertz	$A=37.533, B=2.873, K=0.014$	4.490	$R^2=0.995$
高斯 Gauss	$A=29.735, B=0.884, K=0.000$	10.081	$R^2=0.988$
二次曲线 Quadratic Curve	$A=0.292, B=0.184, C=0.000$	1.092	$R^2=0.999$

表 4 铁杉材积生长数学模型的拟合结果

Table 4 Curve fitting types and modeling results for volume growth of <i>Tsuga chinensis</i>			
数学模型 Mathematical model	拟合参数 Model parameter	残差平方和 Sum of residual square	决定系数 Correlation index
逻辑斯蒂 Logistic	$K=3.805, A=5.518, B=-0.045$	0.018	$R^2=0.999$
理查德 Richards	$A=3.874, B=-181.603, K=0.0434, C=1.077$	0.018	$R^2=0.999$
苏玛克 Schumacher	$A=40.135, B=449.283, C=24.622$	0.041	$R^2=0.997$
韦布尔 Weibull	$A=3.380, B=-122.746, C=249.698, D=8.681$	0.018	$R^2=0.999$
坎派兹 Compertz	$A=6.896, B=9.446, K=0.016$	0.030	$R^2=0.998$
高斯 Gauss	$A=5\,813.316, B=1, K=0.000$	0.225	$R^2=0.985$
二次曲线 Quadratic Curve	$A=0.120, B=-0.0104, C=0.000$	0.059	$R^2=0.996$

表 5 铁杉胸径、树高和材积生长模型预测值与实测值的比较

Table 5 *Tsuga chinensis* diameter, tree height and volume growth model predictive value compared with the measured values

树龄/年 Age	胸径/cm Diameter			树高/m Height			材积/m ³ Volume		
	实测值 Measured values	预测值 Predictive value	残差 Residuals	实测值 Measured values	预测值 Predictive value	残差 Residuals	实测值 Measure dvalues	预测值 Predictive value	残差 Residuals
10	0.8	0.4	-0.4	2.1	2.0	-0.1	0.000 1	0.024	0.024
20	2.4	2.5	0.1	3.7	3.9	0.2	0.001 4	0.038	0.036
30	4.6	6.3	1.7	5.5	5.7	0.2	0.006	0.059	0.053
40	11.2	11.1	-0.1	7.6	7.6	0	0.047	0.092	0.045
50	18.3	16.3	-2.0	10.0	9.4	-0.6	0.147	0.143	-0.004
60	22.5	21.3	-1.2	11.5	11.2	-0.3	0.254	0.220	-0.034
70	26.1	26.1	0	13.1	12.9	-0.2	0.354	0.335	-0.019
80	29.2	30.6	1.4	14.5	14.7	0.2	0.530	0.503	-0.027
90	33.7	34.8	1.1	16.3	16.4	0.1	0.774	0.737	-0.037
100	37.9	38.6	0.7	17.8	18.1	0.3	0.983	1.043	0.060
110	41.6	42.2	0.6	19.5	19.9	0.4	1.388	1.420	0.032
120	46.8	45.4	-0.6	21.6	21.6	0	1.888	1.841	-0.047
130	49.5	48.3	-1.2	23.4	23.3	-0.1	2.252	2.269	0.017
140	51.4	51.1	-0.3	25.1	25.0	-0.1	2.676	2.661	-0.015
150	52.9	53.6	0.7	26.9	26.7	-0.2	2.981	2.989	-0.008

2.3 铁杉胸径、树高和材积的生长规律分析

2.3.1 胸径生长规律 将树龄代入(1)式,计算出相应的铁杉胸径平均生长量和连年生长量的预测值,并依此值及实测值绘制胸径生长曲线,结果见图1。由图1可见,通过模型得到的铁杉胸径平均生长量的预测值与实测值基本吻合;在树龄小于10年时,铁杉胸径平均生长量和连年生长量均很小,10年以后生长量逐渐增大。在0~150年,铁杉胸径有2个速生期:一个在35~45年,连年生长量达到最大值0.71 cm,胸径生长最为旺盛;另一个在105~

115年,连年生长量为0.52 cm。铁杉胸径连年生长量在达到最大值0.71 cm后开始衰减,120年以后明显下降。铁杉胸径平均生长量在树龄小于10年时低于0.08 cm,10~30年时为0.08~0.15 cm,30年后生长加快,45年以后一直保持在0.35~0.39 cm的较高水平;接近120年时平均生长量曲线与连年生长量曲线相交,说明铁杉平均生长量达到最大值^[16],此时其胸径平均生长量为0.39 cm,之后缓慢下降。出现上述结果的原因是林分处于高郁闭状态,影响了林木直径的生长。

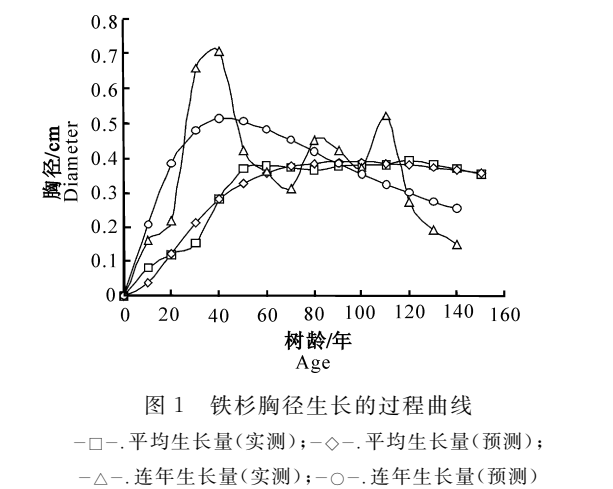


Fig. 1 *Tsuga chinensis* diameter growth process curve
—□—, Average growth (measured value); —◇—, Average growth (predictive value); —△—, Year after year growth (measured value); —○—, Year after year growth (predictive value)

2.3.2 树高生长规律 将树龄代入(2)式,计算出相应的铁杉树高平均生长量和连年生长量的预测值,并依此值及实测值绘制树高生长曲线,结果见图2。由图2可见,通过模型求得的树高平均生长量与实测值非常接近,连年生长量实测值上下波动大,预测值位于其波动轴上。在0~150年,铁杉树高连年生长量为0.14~0.24 m;树高生长有2个速生期,一个在35~45年,另一个在105~125年。在40年

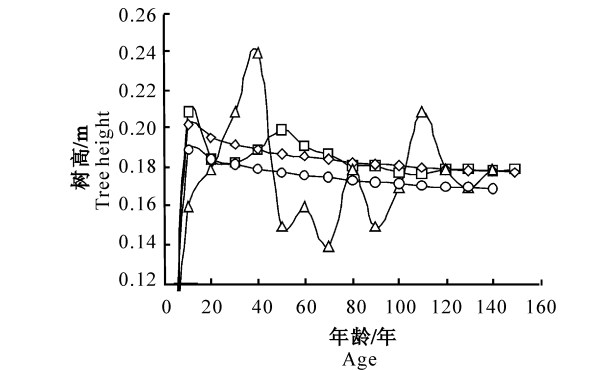


图 2 铁杉树高生长的过程曲线

—□—, 平均生长量(实测); —◇—, 平均生长量(预测);
—△—, 连年生长量(实测); —○—, 连年生长量(预测)

Fig. 2 *Tsuga chinensis* tree height growth process curve
—□—, Average growth (measured value); —◇—, Average growth (predictive value); —△—, Year after year growth (measured value); —○—, Year after year growth (predictive value)

3 结论与讨论

本试验根据秦岭火地塘林区铁杉解析木资料,建立了铁杉胸径、树高和材积生长的数学模型,并用同一立地条件下标准地调查的实测值对模型进行了

时,连年生长量达到最大值0.24 m,树高生长最为迅速,此后下降;在110~120年时又上升到0.21 m,此后又缓慢下降,维持在0.15~0.18 m的水平。树高平均生长量变幅较小,10年后一直维持在0.18~0.2 m。铁杉树高的实测平均生长量在树龄为50年时达到最大值0.2 m,之后缓慢下降,但一直稳定在0.18~0.19 m。结果表明,铁杉高生长比较稳定,林分结构对其影响小。

2.3.3 材积生长规律 将树龄代入(3)式,可计算出相应的铁杉材积平均生长量和连年生长量的预测值,并依此值及实测值绘制材积生长曲线,结果见图3。由图3可见,铁杉材积平均生长量和连年生长量的预测值与实测值非常吻合。铁杉材积连年生长量和平均生长量均逐年增加,最大值出现较迟,在105年以后。在110年时,实测的铁杉材积连年生长量达到最大值0.05 m³,此后明显呈下降趋势。铁杉材积平均生长量一直呈上升趋势,140年后增长率渐缓,但仍维持在0.03~0.04 m³的较高水平。150年时,平均生长量和连年生长量2条曲线仍未相交,说明平均生长量尚未达到最大值,林分尚未达到成熟期^[17]。结果表明,铁杉生长缓慢,生长期持续时间较长。

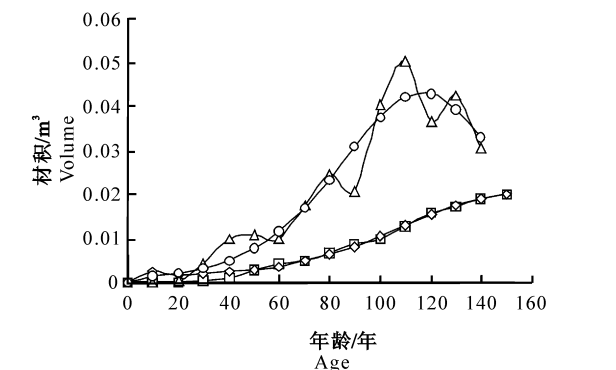


图 3 铁杉材积生长的过程曲线

—□—, 平均生长量(实测); —◇—, 平均生长量(预测);
—△—, 连年生长量(实测); —○—, 连年生长量(预测)

Fig. 3 *Tsuga chinensis* volume growth process curve
—□—, Average growth (measured value); —◇—, Average growth (predictive value); —△—, Year after year growth (measured value); —○—, Year after year growth (predictive value)

检验,结果表明,本试验建立的铁杉生长模型拟合精度高,可用于火地塘林区铁杉生长过程的预测。

铁杉是寿命较长、生长缓慢、但持续生长时间较长的树种。本试验结果显示,树龄<10年时,铁杉生长较慢,30年后生长相对加快,110年后胸径、树

高和材积仍维持较高的生长率,材积的平均生长量在 150 年尚未达到最大值,说明其成熟期大于 150 年;在铁杉漫长的生长期内有 2 个速生期,分别在 35~50 年和 105~125 年。总体上看,铁杉胸径生长变幅大,而树高生长比较稳定,材积生长呈持续上升趋势。

在铁杉的 2 个速生期,可以按照近自然林经营的思想,对林分进行抚育间伐^[18]。第一次抚育年龄应在 40 年左右,第二次抚育年龄应在 120 年左右。火地塘林区树龄大于 100 年的铁杉古树、大树很多,非常珍贵,应加强保护。此外,应注重促进铁杉的天然更新,加强对树龄小于 10 年的更新幼苗、幼树的抚育管护,以促进其生长。

铁杉的胸径、树高和材积连年生长量波动较大,可能是由于开花结实,抚育间伐或随机因素的干扰所致。对铁杉连年生长量波动的具体原因以及铁杉数量成熟年龄的确定有待进一步研究。

[参考文献]

[1] 张仰渠. 陕西森林 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1989: 173-177.
Zhang Y Q. Shaaxi forest [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1989: 173-177. (in Chinese)

[2] 北京林业大学. 树木学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1991: 16-18.
Beijing Forestry University. Tree [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1991: 16-18. (in Chinese)

[3] 雷明德. 陕西植被 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 130-131.
Lei M D. Shaaxi vegetation [M]. Beijing: Science Press, 1999: 130-131. (in Chinese)

[4] 雷瑞德, 彭 鸿, 陈存根. 火地塘林区天然次生林类型及群落特征的研究 [J]. 西北林学院学报, 1996, 11 (Suppl.): 43-52.
Lei R D, Peng H, Chen C G. Types and phytoenosis of natural secondary forest at Huoditang Forest Region [J]. Journal of Northwest Forestry University, 1996, 11 (Suppl.): 43-52. (in Chinese)

[5] 张硕新, 王 斌, 雷瑞德, 等. 火地塘林区主要景观类型地形格局及其解释 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34 (8): 93-97.
Zhang S X, Wang B, Lei R D, et al. Landscape pattern and topographic interpretation of the main forest types in Huoditang Forest Region [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2006, 34 (8): 93-97. (in Chinese)

[6] 彭 鸿. 秦岭中段铁杉森林群落的定量分析 [J]. 西北林学院学报, 1992, 7 (1): 59-65.
Peng H. Quantitative analysis of *Tsuga chinensis* community in middle part of Qinling Mountain [J]. Journal of Northwest Forestry University, 1992, 7 (1): 59-65. (in Chinese)

[7] Zobel D B, Liu V T. Effects of environment, seedling age, and

seed source on leaf resistance of three species of *Chamaecyparis* and *Tsuga chinensis* [J]. Oecologia, 1980, 46 (3): 412-419.

[8] 北京林业大学. 测树学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1987: 37-39.
Beijing Forestry University. Forest measurement [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1987: 37-39. (in Chinese)

[9] 魏占才. 长白山落叶松人工林林分模型的应用 [J]. 东北林业大学学报, 2006, 34 (4): 31-33.
Wei Z C. Application of stand models of *Larix olgensis* plantation [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2006, 34 (4): 31-33. (in Chinese)

[10] 王顺忠, 王 飞, 张恒明, 等. 长白山阔叶红松林径级模拟研究—林分模拟 [J]. 北京林业大学学报, 2006, 28 (5): 23-27.
Wang S Z, Wang F, Zhang H M, et al. Modeling the diameter distribution of forest stands of *Broadleaved-Korean pine* mixed forests on Changbaishan mountain: forest stands modeling [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28 (5): 23-27. (in Chinese)

[11] 段爱国, 张建国, 童书振. 6 种生长方程在杉木人工林林分直径结构上的应用 [J]. 林业科学研究, 2003, 16 (4): 423-429.
Duan A G, Zhang J G, Tong S Z. Application of six growth equations on stands diameter structure of *Chinese fir* plantations [J]. Forest Research, 2003, 16 (4): 423-429. (in Chinese)

[12] 洪 伟, 吴承祯, 闫淑君. 广义 Schumacher 模型的改进及应用 [J]. 应用生态学报, 2004, 15 (2): 241-244.
Hong W, Wu C Z, Yan S J. Modification and its application of generalized Schumacher model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15 (2): 241-244. (in Chinese)

[13] Annadurai G, Rajesh B. Development of mathematical models (Logistic, Compertz and Richards Models) describing the growth pattern of *Pseudomonas putida* [J]. Bioprocess and Biosystem Engineering, 2000, 23 (6): 607-612.

[14] Kool B W, Boer M P, Kooijman S A. On the use of the logistic equation in models of food chains [J]. Bulletin of Mathematical Biology, 1998, 60 (2): 231-246.

[15] Zeide B. Analysis of growth equation [J]. Forest Science, 1993, 39 (3): 594-616.

[16] 吴福桢. 测树学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1990: 123-126.
Wu F Z. Forest measurement [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1990: 123-126. (in Chinese)

[17] 潘 辉, 朱 炜, 鲍晓红, 等. 福建省火炬松人工林生长特性研究 [J]. 林业科学, 2003, 39 (S1): 47-51.
Pan H, Zhu W, Bao X H, et al. Study on growth characteristic of *Pinus taeda* plantation grown in Fujian Province [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39 (S1): 47-51. (in Chinese)

[18] 陆元昌. 近自然森林经营的理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 134-136.
Lu Y C. Near the natural forest management theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2006: 134-136. (in Chinese)