

油松林分断面积与蓄积量生长模型研究

冉啟香¹, 邓华锋^{1*}, 吕常笑¹, 王雪军², 张璐²

(1. 北京林业大学,北京 100083;2. 国家林业局 调查规划设计院,北京 100029)

摘要:对北京地区油松林分断面积、蓄积量生长模型进行研究,为建立通用的、相容的断面积、蓄积量生长模型奠定基础。利用北京市油松一类清查数据,以 Richards 和 Shumacher 为基础模型,通过选取不同的密度指标,分别拟合油松林分的断面积、蓄积量生长模型,并选取最优的断面积、蓄积量模型,引入哑变量,将间伐林分和未间伐林分合并建立林分断面积、蓄积量生长模型。结果表明,油松林分的断面积、蓄积的模拟效果都较好, R^2 分别最高达 0.900 0、0.890 0,而且不同的密度指标直接影响模型的预估效果,林分断面积生长模型选用林分密度指数作为密度指标的预估效果更好;林分蓄积量生长模型选用林分断面积作为密度指标时预估效果更好,当在模型中的渐近值参数引入密度指标后,Schumacher 模型对林分蓄积量的预估精度又要略优于 Richards 模型,通过模型的独立性检验,预测精度均在 91% 以上;而在最优的模型上引入哑变量后的林分断面积、蓄积量模型的 R^2 、预测精度都比常规的模型稍高, R^2 均在 0.900 0 以上,预测精度在 0.950 0 以上。引入哑变量能适当的提高模型的精度,可以用来描述北京地区油松林分在不同措施下的生长变化规律,也解决了不同类型林分合并建模不相容的问题。

关键词:油松;哑变量;人工林;生长模型

中图分类号:S757 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)05-0217-07

Stand Basal Area and Volume Growth for *Pinus tabulaeformis*

RAN Qi-xiang¹, DENG Hua-feng^{1*}, LYV Chang-xiao¹, WANG Xue-jun², ZHANG Lu²

(1. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Academy of Forest Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing 100029, China)

Abstract: The objective of this study was to establish general and compatible models of stand basal area and stand volume growth. By using the inventory data of *Pinus tabulaeformis* in Beijing, taking the Richards and the Shumacher models as the prototypes, choosing different density index, we separately fit the basal area model and the volume growth model, and then selected the optimal one, introduced the dummy variable, then we combined the thinning and not thinning standing forest, trying to build the basal area model and volume growth model. The results showed that the simulations of the basal area and volume were fine and the maximums of R^2 reached 0.900 0 and 0.890 0, respectively. Moreover, using different density indices would directly affect the model and the effect would be better if we chose the stand density as the index for the stand basal area growth model and the stand basal area as the index for the volume growth model. When we added the asymptotic value parameters of the model to the density indicator, the precision of Schumacher model was slightly better than the Richards model on forecasting the stand volume. Independence test of the model indicated that the accuracy of the model on forecasting was above 91%. Besides, the forecasting precision of the optimal model was slightly higher than the conventional one after we introduced

收稿日期:2015-12-10 修回日期:2016-03-04

基金项目:北京市教育委员会科学研究与科研基地建设项目(省部共建重点实验室);国家林业公益性行业科研专项(201204510)。

作者简介:冉啟香,女,在读硕士,研究方向:森林资源监测与评价。E-mail:851912335@qq.com

*通信作者:邓华锋,男,教授,博士,硕士生导师,研究方向:森林可持续经营。E-mail:denghuafeng@bjfu.edu.cn

the dummy variable, the value of R^2 was above 0.900 0 and the prediction accuracy was above 0.950 0. It was concluded according to the result that to a certain degree the introducing of the dummy variable could improve the precision of the model, and we could use it to describe the growth law of the standing forests with different management measures in Beijing and to solve the incompatibility of combining different types of models.

Key words: *Pinus tabulaeformis*; dummy variable; artificial forest; growth model

油松(*Pinus tabulaeformis*)是松科常绿乔木,在我国松属中,油松的分布地域仅略小于马尾松占第2位。油松耐瘠薄,成活率高^[1],分布范围广、保持水土能力强,生产力高^[2],是北京市主要的树种之一,在改善北京生态环境方面占着重要作用^[3]。但林木生长是一个复杂的过程,不同的学者对此进行了大量的研究,而目前,应用生长模型来模拟林木生长过程是最主要的手段之一^[4],张雄清^[5]、卢军^[6]等学者研究了不同树种的林分断面积、蓄积量预估模型和蓄积枯损率模型,王勇^[4]、李忠国^[7]等学者对华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)和日本落叶松(*Larix kaempferi*)的胸径、树高和材积生长模型进行了相关的研究,但涉及到间伐措施对林分生长的影响的报道较少^[8-10]。近年来,国内外学者对间伐林分也进行了相关的研究,比如国外 Bailey^[11]、Murray^[12]、Pienaar^[13]等学者对间伐林分进行了相关的研究;国内杜纪山^[14]、李春明^[15-16]、高东启^[17]等学者对杉木(*Cunninghamia Lanceolata*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、落叶松(*Larix olgensis*)间伐林分进行了研究。但对油松间伐林分的研究相对较少。从理论上来讲,同种树种的林分在不同间伐措施下需要独立建模,但实际上间伐和未间伐林分之间存在一定的联系,因此如何把这两种类型的林分结合起来建立统一的模型并保证模型预估值可靠性下尽量简化所建模型,是值得研究的一个问题^[18],而哑变量模型方法为解决这一问题提供了可能途径。

近年来,我国学者对哑变量的应用主要是集中在对森林生物量模型参数估计法和模型区域通用性进行了大量研究,比如李忠国^[7]等利用哑变量方法研究了北亚热带高山区和暖温带中山区日本落叶松的生长模型;郑冬梅^[19]等利用哑变量方法构建东北落叶松(*Larix spp.*)和栎类(*Quercus*)分段地上生

物量模型;王勇^[4]等利用哑变量方法构建了燕山3个地区的华北落叶松人工林生长模型;符利勇^[20]等利用哑变量方法构建了东北地区兴安落叶松和长白落叶松(*Larix olgensis*)2个树种地上生物量通用模型,但是针对间伐与未间伐林分的研究相对较少。因此在前人研究的基础上,以北京市油松一类清查数据为例,以 Richards 和 Schumacher 模型为基础模型,选取每公顷株数、林分密度指数、每公顷断面面积等不同的林分密度指数,利用地位指数(SI)来反映林分的立地质量^[6,21],分别模拟北京地区油松林分的断面积、蓄积量生长模型,并在最优的断面积、蓄积生长模型上,引入以间伐措施为特征的哑变量,来建立统一的、相容的油松林分断面积、蓄积生长预估模型,对模型的拟合效果进行评价分析,为今后油松林分的经营管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样地数据来源

该研究的数据来源于北京市油松全国森林资源清查数据,分别调查于1996年、2001年、2006年,样地面积为0.066 7 hm²,剔除每个样地的异常数据,最后选出133个样本进行分析。样地调查因子主要有林分平均胸径、林分年龄、坡度、坡向、坡位、林分蓄积、林分平均树高、地类、郁闭度、龄组等。其中,间伐林分65个、未间伐林分68个,2个林分类型的样地基本情况见表1。主要统计了样地的每公顷株数、每公顷断面面积以及每公顷蓄积量、林分的平均年龄、平均胸径、平均树高。

对133个样地进行随机抽取,其中80个样本为建模数据,间伐林分、未间伐林分分别为41个、39个;剩下的53个样本作为检验数据,其中间伐林分24个、未间伐林分29个(表2)。

表1 间伐林分和未间伐林分主要因子统计

Table 1 Main factors statistics in thinned stands and unthinned stands

林分类型	样地	样本	年龄 /a	胸径 /cm	树高 /m	每公顷株数 (株·hm ⁻²)	每公顷断面面积 (m ² ·hm ⁻²)	蓄积 (m ³ ·hm ⁻²)
间伐林分	65	4 229	38	12.9	9.5	955	13.394	49.874
未间伐林分	68	4 330	35	12.2	8.9	992	12.481	49.84
合计	133	8 629	36	12.6	9.2	928	12.927	51.622

表 2 样地分布情况统计
Table 2 Distribution of sampling plots

数据类型	间伐样地		未间伐样地		合计	
	样地	样木	样地	样木	样地	样木
建模数据	41	2 876	39	2 504	80	5 380
检验数据	24	1 423	29	1 826	53	3 249
合计	65	4 299	68	4 330	133	8 629

1.2 地位指数研究

由于所用的国家森林资源连续清查数据中缺乏油松林分的优势高,所以本文的林分优势高是在前人研究的基础上,参考贺姗姗^[22]、高东启^[17]的算法,根据油松人工林优势木平均高与林分平均高的相关关系

$$H=1.115 \times h + 0.429 \quad (1)$$

计算出各样地的林分优势木平均高,再根据林分优势高与林分年龄查阅油松地位指数表^[21],所得的地位指数作为评价林分立地质量的指标。式中, H 为林分优势木平均高; h 为林分平均树高; 相关系数为 0.952 1。

1.3 林分密度指数计算

通常所说的林分密度指数是指林分在标准胸径时单位面积上的株数^[30],计算公式为:

$$SDI=N \times (D_g/D_0)^b \quad (2)$$

式中, SDI 为林分密度指数, N 为每公顷株数, D_g 为林分的平均胸径(即林分平均断面积所对应的直径,是反映林木粗度的基本指标), D_0 为基准胸径(即树木在树高生长曲线上升趋势变缓的年龄时所达到的直径),参考贺姗姗^[22]等的研究,油松取 20 cm, b 为自稀疏率(1.384)。

1.4 林分断面积生长模型

目前,对林分断面积生长模型的研究越来越多,但以 Richards 和 Schumacher 2 类模型应用最多^[14,23]。因此参考以往的研究,本文主要以 Richards 模型来模拟林分断面积模型,林分的立地质量利用地位指数来反映^[6,21],密度指标分别选取每公顷株数、林分密度指数来拟合林分断面积生长模型^[24-25]。基于 Richards 模型拟合时的方程式为:

$$G=a_1 \times SI \times a_2 \times \{1-\exp[-a_3 \times (SDI/1000) \times a_4 \times (t-t_{1.3})]\} \times a_5 \quad (3)$$

$$G=a_1 \times SI \times a_2 \times \{1-\exp[-a_3 \times (N/1000) \times a_4 \times (t-t_{1.3})]\} \times a_5 \quad (4)$$

式中, G 为林分断面积, SI 为地位指数, N 为林分每公顷株数, t 为林分平均年龄, SDI 为林分密度指数, $t_{1.3}$ 为林木生长到胸高时的年龄, $a_1 \sim a_5$ 为待定参数。

1.5 林分蓄积量生长模型

在蓄积量生长模型研究中, Richards 模型和 Schumacher 模型也是目前应用最多、适应性比较强的一类生长曲线方程^[17],所以选用这 2 种模型来拟合林分蓄积量生长模型。在模型中,引入地位指数来反映林分的立地质量,选用林分密度指数和林分断面积作为密度指标,其模型如下:

$$V=a_1 \times SI \times a_2 \times \{1-\exp[-a_3 \times (SDI/1000) \times a_4 \times t]\} \times a_5; \quad (5)$$

$$V=a_1 \times SI \times a_2 \times [1-\exp(-a_3 \times G \times a_4 / t)]. \quad (6)$$

相关研究认为,在以 Schumacher 模型拟合蓄积量模型时,模型中的渐近值参数不但与立地质量有关联,还与密度有一定的联系^[6,28],因此其形式还可以转换为:

$$V=a_1 \times SI \times a_2 \times (SDI/1000) \times a_3 \times \exp(-a_4 / t); \quad (7)$$

$$V=a_1 \times SI \times a_2 \times G \times a_3 \times \exp(-a_4 / t). \quad (8)$$

式中, V 为林分蓄积量, SI 为地位指数, SDI 为林分密度指数, G 为林分断面积, t 为林分平均年龄, $a_1 \sim a_5$ 为待定参数。

1.6 基于哑变量的方法

在前面林分断面积和蓄积生长模型研究的基础上,选出最优的林分断面积、蓄积生长模型,然后通过引入以间伐措施为特征的哑变量^[29],将油松间伐和未间伐 2 个类型的林分整合成一个统一的模型来构建。这样不仅减少了工作量,而且又使模型具有相容性。因此,将第 i 个类型的林分编号为 S_i ,将定性数据 S_i 转化为(0,1),即:

$$S_i=\begin{cases} 1, & \text{当 } S_i \text{ 为第 } i \text{ 个类型的林分时,} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

式中, $i=1, 2, S_1, S_2$ 为间伐林分和未间伐林分的定性代码。本文数据的处理使用 Forstat2.0 软件来进行哑变量的计算。经过初步计算,在林分断面积方面,模型 3 的精度更高,在林分蓄积方面,模型 8 的精度更高。因此,在模型 3 和 8 中引入以间伐措施为特征的哑变变量,公式为:

$$G=(a_0 \times S_1 + a_1 \times S_2) \times SI \times a_2 \times (1-\exp(-a_3 \times (SDI/1000) \times a_4 \times (t-t_{1.3}))) \times a_5 \quad (9)$$

$$M=(a_0 \times S_1 + a_1 \times S_2) \times SI \times b_2 \times G \times a_3 \times \exp(-$$

a_4/t

(10)

式中的参数与前面公式中的参数含义相同。

1.7 参数估计与模型检验

综合应用 ForStat、Excel2007 进行数据分析、处理和对模型的参数进行估计，并计算平均绝对偏差(MAD)、均方根误差(RMSE)、模型的决定系数(R^2)和预估精度(P)等几个指标来检验模型的预估能力，公式为：

$$R^2 = 1 - \sum_{i=1}^n (W_i - \hat{W}_i)^2 / \sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2 \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}} \quad (12)$$

$$MAD = \sum |(y_i - \hat{y}_i)/n| \quad (13)$$

$$P = (1 - \frac{\sum (W_i - \hat{W}_i)^2}{\sum W / n(n-1)}) \times 100\% \quad (14)$$

2 结果与分析

2.1 林分断面积、蓄积建模分析

根据北京市一类清查数据，选择 133 块油松样地进行了断面积和蓄积生长模型研究，统计各个模型的评价指标(表 3)。

表 3 模型评价指标统计结果

Table 3 Evaluation indexes statistics of the models

模型类型	模型编号	R^2	RMSE	MAD	P
林分断面积	3	0.902 5	0.161 8	0.159 6	0.958 0
	4	0.850 4	0.200 6	0.159 6	0.947 9
林分蓄积	5	0.872 7	0.717 1	0.530 3	0.953 5
	6	0.797 0	0.905 6	0.647 8	0.939 3
	7	0.891 7	0.653 1	0.483 1	0.955 0
	8	0.892 3	0.642 7	0.420 5	0.955 9

由表 3 可以看出，从林分断面积拟合效果来说，拟合效果较好，所拟合的林分断面积的决定系数 R^2 都在 0.850 0 以上，最高达到 0.902 5，其中模型 3 的拟合效果要优于模型 4，说明对密度指标而言，林分密度指数反映林分断面积生长变化的规律要优于每公顷株数。所拟合的林分蓄积生长模型也较合理，决定系数 R^2 都超过 0.750 0 以上，最高达到 0.892 3，其中模型 8 的拟合效果最好，选用的密度指标为林分断面积，其次是模型 7 和模型 5，而以 Schumacher 模型为原型，认为渐进值参数只与立地质量(地位指数)相关的模型 4 拟合效果最差。这表明在选取密度指标时，林分断面积比林分密度指数更能反映林分蓄积生长量变化的规律，而式(7)和式(8)表明在渐进值参数中引入密度指标后，Schumacher 模型的拟合效果要稍高于 Richard 模型(式(5)和式(6))，所以表明 Schumacher 模型中的渐进值

参数不但与立地质量(地位指数)相关，而且密度指标也有一定的联系，这与高东启^[17]、卢军^[6]、邓成^[27]等学者的研究结果是一致的。

2.2 林分断面积、蓄积检验结果分析

由表 4 可以看出，在林分断面积生长模型方面，模型 3 的各项误差相对较小，预估精度更好，为 91% 以上；而在林分蓄积生长模型方面，也是模型 7 和模型 8 的拟合效果较好，其中模型 8 的各项误差最小，预估精度最高，为 93% 以上，并对实测值和预测值进行成对 t 检验，结果 $P > 0.05$ ，说明在 0.05 的显著水平上，实测值与预测值无显著差异，模型的效果显著，所建林分断面积和蓄积生长模型是适用的。

表 4 模型检验评价指标统计结果

Table 4 Evaluation indexes statistics of the models tested

模型类型	模型编号	R^2	RMSE	MAD	P
林分断面积	3	0.851 6	0.242 3	0.152 5	0.919 3
	4	0.718 3	0.333 1	0.204 8	0.884 9
林分蓄积	5	0.804 4	1.163 8	0.379 3	0.903 1
	6	0.849 8	0.643 7	0.552 0	0.919 5
	7	0.894 0	0.886 2	0.646 2	0.929 0
	8	0.929 5	0.638 4	0.427 4	0.936 3

通过前面的研究分析，得到最优的林分断面积、蓄积生长模型，然后引入以间伐措施为哑变量来建模，即模型 9 和模型 10，得出 2 个模型的评价结果(表 5)。从表 5 可以看出，引入哑变量后的断面积和蓄积生长模型的确定系数 R^2 都有所提高，都在 0.900 0 以上，预估精度也稍微提高了，都在 95% 以上，各项误差也相对的减少了，并对模型进行了检验，各个模型的确定系数都在 0.850 0 以上，预测精度都在 90% 以上。由残差分析结果(图 1)可以看出，残差分布没有明显的异质性，说明模型的拟合效果较好，而且在一定程度上也说明，引入哑变量能适当地提高模型的精度，并能解决模型单独建模不相容的问题。

表 5 哑变量模型的建模和检验数据的评价指标统计

Table 5 Modeling and testing data evaluation index

of dummy variable model

数据类型	模型类型	R^2	RMSE	MAD	P
建模数据	林分断面积	0.902 7	0.161 0	0.150 6	0.959 0
	林分蓄积	0.901 3	0.602 5	0.223 1	0.965 0
检验数据	林分断面积	0.869 8	0.243 7	0.152 0	0.918 6
	林分蓄积	0.934 9	0.694 2	0.421 4	0.936 8

对传统回归方法和哑变量模型方法的断面积、蓄积的估计结果进行对比(图 2)。从图 2 可以看出，相对于传统回归方法，哑变量模型方法的断面积、蓄积估计值的散点分布更接近实测值的趋势线，说明哑变量模型方法对模型数据的拟合效果更好。

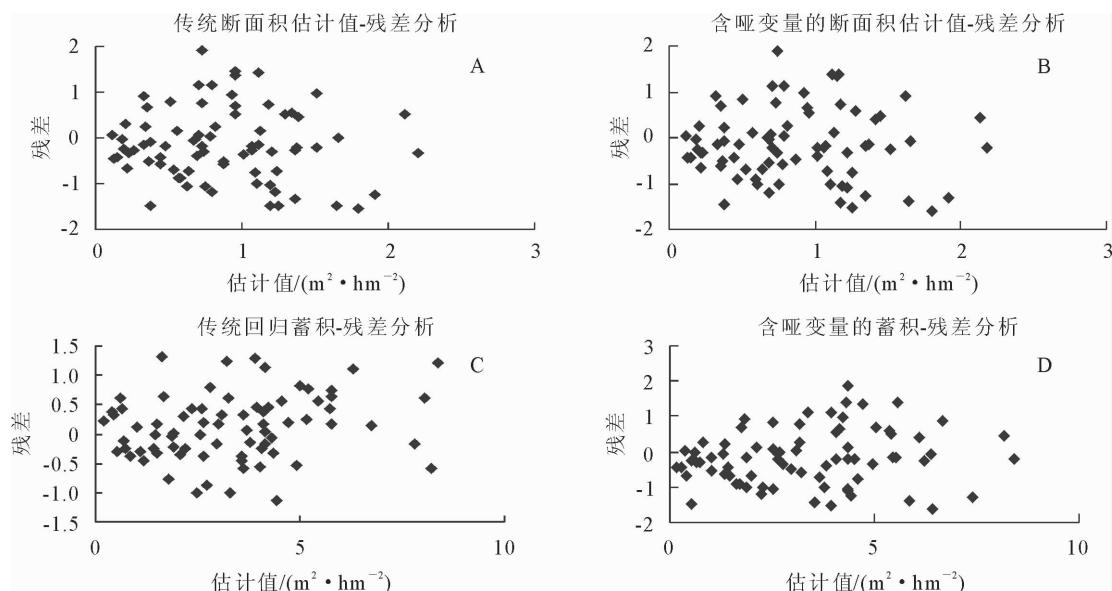


图 1 传统回归方法和哑变量模型方法的断面积、蓄积残差分析

Fig. 1 Residual analysis of traditional regression method and dummy variables model on basal area and volume

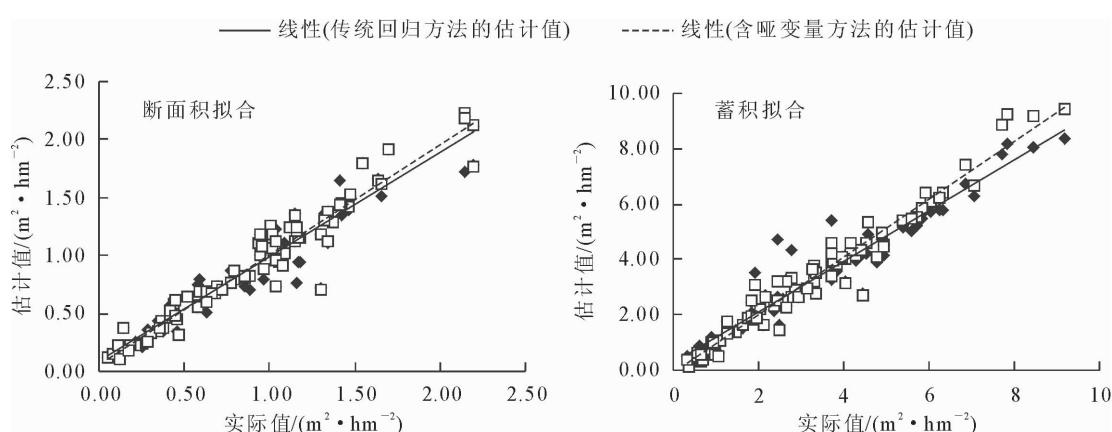


图 2 传统回归方法与哑变量模型方法的断面积、蓄积实测值和估计值对比

Fig. 2 Comparison of measured value and estimated value of traditional regression method and dummy variables model on basal area and volume

由于哑变量模型方法估计的残差平方和只是略小于传统回归方法估计的残差平方和,所以图 1 中两者差别很小。

3 结论与讨论

以 Schumacher 和 Richards 模型为原型,引入林分密度指数、林分每公顷株数、地位指数、和林分断面积等因子,分别建立了北京市油松人工林的林分断面积和蓄积生长预估模型,经检验,油松林分断面积和蓄积生长模型的预估效果都较好,预估精度在 87% 以上。在林分断面积生长模型方面,模型 3 的确定系数和预估精度较高,这说明林分密度指数比每公顷株数更适合作为密度指标来突出林分断面积生长变化的规律,因此为最优的模型。而林分蓄积生长模型方面,模型 8 的确定系数和预估精度最

高,这说明林分断面积比林分密度指数更适合作为密度指标来突出林分蓄积量生长变化的规律。因此为最优的蓄积生长模型,而且在渐进值参数中加入密度指标的 Schumacher 模型(式(7)和式(8))的拟合效果要稍高于 Richard 模型(式(5)和式(6))。

在前面最优的林分断面积、蓄积生长模型中,引入哑变量,将间伐林分和未间伐林分合并,用统一的模型来表达,这样既减少了工作量,又解决了不同林分合并建模不相容的问题。前面的研究结果显示,引入哑变量后的断面积和蓄积生长模型的确定系数 R^2 都有所提高,都在 0.900 0 以上,预估精度也稍有提高,都在 95% 以上,各项误差也相应减少了,并对模型进行了检验,各个模型的确定系数都在 0.850 0 以上,预测精度都在 90% 以上。相对于传统回归方法,哑变量模型方法的断面积、蓄积估计值

的散点分布更接近实测值的趋势线,说明模型的拟合效果较好。

从前面的研究中可以看出,林分密度指标选取的不同,林分断面积、蓄积量的预估效果也会有差异。从油松林分断面积、蓄积量最优模型的预估结果来看,希望在以后的生长模型中,运用林分断面积和林分密度指数密度指数,作为密度指标来对林分蓄积量和林分断面积模型进行模拟预估。在今后油松间伐林分的下一步研究中,将考虑更多的随机因素或其他经营管理措施对模拟林分生长的影响,从而为油松林分森林经营管理提供理论基础。

参考文献:

- [1] 段勘,马履一,贾黎明,等.北京地区油松人工林树冠竞争因子的测算与分析[J].东北林业大学学报,2012,40(3):14-18.
DUAN J,MA L Y,JIA L M,*et al.* Analysis and calculation of crown competition factor in *Pinus tabulaeformis* plantations in Beijing[J]. Journal of Northeast for Forestry University,2012, 40(3):14-18. (in Chinese)
- [2] 侯磊,张硕新,陈云明,等.林分密度对人工油松林下植物的影响[J].西北林学院学报,2013,28(3):46-52.
HOU L,ZHANG S X,CHEN Y M,*et al.* Impact of stand density on the vegetation under artificial *Pinus tabulaeformis*[J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(3):46-52. (in Chinese)
- [3] 高东启,邓华锋,蒋益.油松林分断面积生长预估模型研究[J].西南林业大学学报,2015,35(1):42-46.
GAO D Q,DENG H F,JIANG Y. Forecast models research of stands basal area growth for *Pinus tabulaeformis*[J]. Journal of Southwest for Forestry University,2015,35(1):42-46. (in Chinese)
- [4] 王勇,王鑫梅,牟洪香,等.哑变量在燕山地区华北落叶松人工林生长模型中的应用[J].东北林业大学学报,2014,42(10): 44-49,64.
WANG Y,WANG X M,MOU H X,*et al.* Application of dummy variable in the growth model of *Larix principis-rupprechtii* plantations in Yanshan region[J]. Journal of Northeast Forestry University,2014,42(10):44-49,64. (in Chinese)
- [5] 张雄清,雷渊才,陈新美,等.组合预测法在林分断面积生长预估中的应用[J].北京林业大学学报,2010,32(4):6-11.
ZHANG X Q,LEI Y C,CHEN X M. Application of forecast combination in prediction of stand basal area[J]. Journal of Beijing Forestry University,2010,32(4):6-11. (in Chinese)
- [6] 卢军,张会儒,李凤日.大兴安岭天然林林分生长模型研究[J].林业资源管理,2011(3):33-37.
LU J,ZHANG H R,LI F R. Natural forest stand growth models for Daxing'anling Mountains [J]. Forestry Resources Management ,2011(3):33-37. (in Chinese)
- [7] 李忠国,孙晓梅,陈东升,等.基于哑变量的日本落叶松生长模型研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2011,39(8): 69-74.
LI Z G,SUN X M,CHEN D S,*et al.* Dummy variables model of increment of *Larix kaempferi* [J]. Journal of Northwest A&F University:Nat. Sci. Edi. ,2011,39(8):69-74. (in Chinese)
- [8] 李春明,杜纪山,张会儒.抚育间伐对森林生长的影响及其模型研究[J].林业科学研究,2003,16(5):636-641.
LI C M,DU J S,ZHANG H R. Study on the effect of thinning on forest growth and its model[J]. Forest Research ,2003,16 (5):636-641. (in Chinese)
- [9] 杜纪山,唐守正.抚育间伐对林分生长的效应及其模型研究[J].北京林业大学学报,1996,16(1):80-84.
DU J S,TANG S Z. Study on the effect of thinning on stand growth and its model[J]. Journal of BeiJing Forestry University,1996,16(1):80-84. (in Chinese)
- [10] 岳永杰,余新晓,李钢铁,等.北京松山自然保护区蒙古栎林的空间结构特征[J].应用生态学报,2009,20(8):1811-1816 .
YUE Y J,YU X X,LI G T,*et al.* Spatial structure of *Quercus mongolica* forest in Beijing Songshan Mountain Nature Reserve[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2009,20(8): 1811-1816. (in Chinese)
- [11] BAILEY R L,WARE K D. Compatible basal area growth and yield model for thinned and unthinned stands [J]. Canadian Journal Forest Research,1983(13):563-571.
- [12] MURRAY D M,VON G K. Relationships between the diameter distributions before and after thinning [J]. Forest Science,1991,37(2):552-559.
- [13] PIENAAR L V,SHIVER B D. Basal prediction and projection equations for pine plantations[J]. Forest Science,1986,32 (3):626-633.
- [14] 杜纪山,唐守正.杉木林分断面积生长预估模型及其应用[J].北京林业大学学报,1998,20(4):4-8.
DU J S,TANG S Z. Basal area growth prediction of Chinese fir stands and its application[J]. Journal of Beijing Forestry University,1998,20(4):4-8. (in Chinese)
- [15] 李春明,杜纪山,张会儒.间伐林分的断面积生长模型研究[J].林业资源管理,2004(3):52-55.
LI C M,DU J S,ZHANG H R. Study on basal area growth model for thinned stands[J]. Forestry Resources Management ,2004(3):52-55. (in Chinese)
- [16] 李春明,杜纪山,张会儒.抚育间伐对人工落叶松断面积和蓄积生长的影响[J].林业资源管理,2007(3):90-93.
LI C M,DU J S,ZHANG H R. Study on the growth trend of the basal area and volume of *Larix olgensis* plantation[J]. Forestry Resources Management ,2007(3):90-93. (in Chinese)
- [17] 高东启,邓华锋,程志楚,等.蒙古栎间伐林分和未间伐林分生长模型研究[J].中南林业科技大学学报,2014,34(2):50-54.
GAO D Q,DENG H F,CHENG Z C,*et al.* Study on growth models for thinned and un-thinned stands of *Quercus mongolica*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2014,34(2):50-54. (in Chinese)
- [18] 曾伟生,唐守正.利用度量误差模型方法建立相容性立木生物量方程系统[J].林业科学研究,2010,23(6):797-803.
ZENG W S,TANG S Z. Using measurement error modeling method to establish compatible single-tree biomass equations system[J]. Forestry Research,2010,23(6):797-803.
- [19] 郑冬梅,曾伟生.用哑变量方法构建东北落叶松和栎类分段地

- 上生物量模型[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(6): 23-27.
- ZHENG D M, ZENG W S. Using dummy variable approach to construct segmented above-ground biomass models for larch and oak in northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(6): 23-27. (in Chinese)
- [20] 符利勇, 唐守正, 张会濡, 等. 东北地区两个主要树种地上生物量通用方程构建[J]. 生态学报, 2015, 35(1): 150-157.
- FU L Y, TANG S Z, ZHANG H R, et al. Generalized above-ground biomass equations for two main species in northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1): 150-157. (in Chinese)
- [21] 杜纪山, 唐守正, 王洪良. 天然林区小班森林资源数据的更新模型[J]. 林业科学, 2000, 36(2): 26-32.
- DU J S, TANG S Z, WANG H L. Update models of forest resources data for subcompartments in natural forest [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36(2): 26-32. (in Chinese)
- [22] 贺娴娜. 北京山区油松人工林林分结构与生长模拟研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [23] 杜纪山, 唐守正. 林分断面积生长模型研究评述[J]. 林业科学, 1997, 10(6): 599-606.
- DU J S, TANG S Z. Review on the growth model of stand basal area[J]. Forest Research, 1997, 10(6): 599-606. (in Chinese)
- [24] 罗梅, 郑小贤. 八达岭辽东栎、油松混交林空间结构及其多样性[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(9): 55-58.
- LUO M, ZHENG X X. Study of spatial structure and species diversity of *Quercus liaotungensis*-*Pinus tabulaeformis* mixed stand in Badaling forest farm[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(9): 55-58. (in Chinese)
- [25] 胡焕香, 余济云, 李俊, 等. 湖北桂花林场檫木次生林单木生长模型的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(4): 61-65.
- HU H X, SHE J Y, LI J, et al. Study on individual tree growth model of *Sassafras tsumu* secondary forest on *Osmanthus* forest farm in Hubei Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(4): 61-65. (in Chinese)
- [26] 唐守正. 广西大青山马尾松全林分整体生长模型及其应用[J]. 林业科学, 1991(4): 8-21.
- TANG S Z. Overall growth model and its application in the whole stand for *Pinus* in Mount Daqing, Guangxi[J]. Forest Research, 1991(4): 8-21. (in Chinese)
- [27] 李希菲, 唐守正, 王松龄. 大岗山实验局杉木人工林可变密度收获表的编制[J]. 林业科学, 1988, 1(4): 382-389.
- LI X F, TANG S Z, WANG S L. Preparation of Chinese fir plantation in Dagangshan experiment bureau of the variable density yield table[J]. Forest Research, 1988, 1(4): 382-389. (in Chinese)
- [28] 邓成. 林分生长和收获模型整体化研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2008.
- [29] 高东启, 邓华锋, 王海宾, 等. 基于哑变量的蒙古栎林分生长模型[J]. 东北林业学报, 2014, 42(1): 61-64.
- GAO D Q, DENG H F, WANG H B, et al. Dummy variables models in *Quercus mongolica* growth[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(1): 61-64. (in Chinese)
- [30] 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)

(上接第 216 页)

- [15] 杨晓玲, 丁文魁, 董安祥. 河西走廊气候资源的分布特点及其开发利用[J]. 中国农业气象, 2009, 30(Supp.): 1-5.
- YANG X L, DING W K, DONG A X. Distribution and utilization of climatic resources in Gansu corridor[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(Supp.): 1-5. (in Chinese)
- [16] 叶恭银. 植物保护学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007: 171-175.
- [17] 吴东辉, 尹文英, 陈鹏. 刈割活动对松嫩草原碱化羊草草地土壤线虫群落的影响[J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 180-187.
- WU D H, YIN W Y, CHEN P. Effect of mowing practice on soil nematode community in alkalinized grasslands of *Leymus chinensis* in Songnen Plain[J]. Biodiversity Science, 2007, 15(2): 180-187. (in Chinese)
- [18] 张大治, 安玉英, 张志高. 宁夏黄河湿地蝗虫区系组成分析[J]. 昆虫知识, 2007, 44(6): 890-895.
- ZHANG D Z, AN Y Y, ZHANG Z G. Analysis of the fauna composition of grasshoppers in Yellow River wetland of Ningxia[J]. Chinese Bulletin of Entomology, 2007, 44(6): 890-895. (in Chinese)
- [19] 李丽丽, 赵成章, 殷翠琴. 黑河上游天然草地蝗虫物种丰富度与地形关系的 GAM 分析[J]. 昆虫学报, 2011, 54(11): 1312-1318.
- LI L L, ZHAO C Z, YIN C Q. Species richness of grasshoppers (Orthoptera: acrididae) on natural grasslands in relation with topography in the upper reaches of Heihe river, western China analyzed with generalized additive models (GAMs) [J]. Acta Entomologica Sinica, 2011, 54(11): 1312-1318. (in Chinese)
- [20] 颜忠诚, 陈永林. 内蒙古锡林河流域不同生境中蝗虫种类组成的分析[J]. 昆虫学报, 1997, 40(3): 271-275.
- YAN Z C, CHEN Y L. Compositions of grasshopper species of different habitats in Xilin river district, Inner Mongolia[J]. Acta Entomologica Sinica, 1997, 40(3): 271-275. (in Chinese)