

樟子松人工林树冠表面积及体积预估模型的研究

廖彩霞 李凤日

(东北林业大学 哈尔滨 150040)

摘 要 基于樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)人工林 6 块固定标准地 30 株枝解析数据,在分析树冠表面积和树冠体积与林分变量和林木变量的基础上,利用幂函数建立了树冠表面积(CSA)和树冠体积(CV)的预估模型,同时还对林木材积生长量与 CSA 和 CV 进行了相关分析。研究表明,樟子松人工林树冠表面积和树冠体积随着林木胸径、树高和冠长的增大而增大,林木材积生长量与树冠表面积和树冠体积均明显呈线性关系。不同林分条件的樟子松人工林 CSA 和 CV 随林分年龄和胸径的增大而增大,CSA 随林分密度的增大而减小,而 CV 与林分密度相关不紧密。林分树冠表面积和树冠体积预估模型的检验结果表明,两个模型的平均相对误差都在 $\pm 8\%$ 之内,预估精度均大于 91%,说明所建模型可以很好地预估樟子松人工林不同林分条件下的林木树冠表面积和树冠体积。

关键词 樟子松 树冠表面积 树冠体积 材积生长量

The Predicting Models of Crown Surface Area and Crown Volume for Mongolian Pine Plantation

LIAO Cai-Xia LI Feng-Ri

(Northeast Forestry University Harbin 150040)

Abstract Based on the branch analysis data of 30 sample trees from 6 permanent plots in Mongolian pine (*Pinus Sylvestris* var. *mongolica*) plantation, the predicting models of crown surface area and crown volume were developed according to power function as base model by analyzing the relationship between crown surface area and crown volume with stand and tree variables. Also, the correlation between volume increment with crown surface area and crown volume were analyzed. The result showed that crown surface area and crown volume are increasing with DBH, total height, and crown length and the volume increment of tree is significantly linear correlated with crown surface area and crown volume for Mongolian pine plantation. For different stand conditions, crown surface area and crown volume were increased with stand age and DBH. The crown surface area was decreased with stand density and the relationship between crown volume and stand density was not significant. The predicting models of crown surface area and crown volume developed in this paper were evaluated. The test results indicated that relative mean errors in predicted stand attributes were less than $\pm 8\%$ and the estimated precisions of the stand variables were all greater than 91% for each model. Therefore, the models developed in this paper are suitable for estimating the crown surface area and crown volume under different stand conditions for Mongolian pine plantation.

Key words *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; crown surface area; crown volume; volume increment

树冠结构既是树木生长及其与环境相互作用、反馈调节的综合结果,也是经营措施对树木生长产生影响的具体表现,研究树冠结构是理解树木生理生态过程的基础,也是实现从叶片到林分不同尺度生理生态学过程转换的关键^[1]。树冠结构主要指树冠层中的枝条数量、分枝特性、叶面积及其分布,以及冠长、冠表面积、冠体积等因子在空间上的分布。树冠大小可直接影响林木的同化作用,它是预估树木生长量的基本依据之一。因此,在许多生长和收获模型中均把树冠大小作为重要的因子。生长模型中引入树冠变量可以提高模型的预估精度^[2]。树冠的发育还受各种经营措施的影响,如能定量的描述这种对树冠发育的作用,则能更好的从理论上解释和估计经营措施对树木或林分所产生的效果,有利于确定合理的经营措施^[3]。同时,树冠体现了树木进行光合作用的面积和有机物传输的距离,反映了光合作用效率,故树冠变量有助于解释树木生长的结果。

由于树冠结构存在着明显的时间和空间变异性,对树冠结构的定量描述存在着极大的困难。但国内外仍有许多学者研究了树冠结构模型,如 Xiao; Brown; Mizunaga; Samantha; 刘兆刚; 肖锐等人^[4-9]。近年来,有人开始研究树冠结构与树木生产力的关系。周国模^[10]等研究了雷竹林冠层特性与叶片的空间分布;梁军等^[11]通过分析生长指标与树冠特性间的相关关系,认为 1-69 杨 6 年生时的树冠体积和单株叶面积对单株生物量和单株材积影响较大,冠层疏密度对单株生物量年生长量和单株材积年生长量影响较大,呈负相关。

本文以黑龙江省佳木斯市孟家岗林场樟子松人工林作为研究对象,通过枝解析的方法分析了树冠表面积和树冠体积与林分变量和林木变量的关系,利用幂函数建立了樟子松人工林不同林分条件

下树冠表面积和树冠体积的预估模型,同时还对林木材积生长量与树冠表面积和树冠体积进行了相关分析,为进一步研究林分生长模型及经营模型提供理论基础。

1 研究地概况、资料来源及整理

1.1 研究地概况

本研究地区为黑龙江省佳木斯市孟家岗林场,其地理坐标为 130°32'42" ~ 130°52'36"E, 46°20'30" ~ 46°30'50"N。该林场地处完达山西麓余脉,以低山丘陵为主,坡度较为平缓,大部分坡度在 10° ~ 20° 之间,平均海拔 250 m。气候属东亚大陆性季风气候,年平均气温 2.7℃,极端最高气温 35.6℃,最低气温 -34.7℃,≥10℃ 年积温 2 547℃,年平均降水量 550 mm,全年日照时数 1 955 h,无霜期 120 d 左右。土壤类型主要以暗棕壤为主,还有少量的白浆土、草甸土、沼泽土及泥炭土的分布。植被属小兴安岭-张广才岭亚区。天然林主要树种有蒙古栎(*Q. mongolica*)、黑桦(*Betula davurica* P.)、山杨(*Populus davidiana* D.)、白桦(*Betula platyphylla* S.)、人工林主要树种为落叶松(*Larix* sp.)、红松(*Pinus koraiensis* S.)和樟子松(*Pinus sylvestris* L. var. *mongolica*)。该林场天然林面积为 3 597 hm²,蓄积为 407 340 m³;人工林面积为 9 482 hm²,蓄积为 1 005 400 m³。

1.2 资料收集与整理

2005 年 8 ~ 9 月,在孟家岗林场不同林分条件的樟子松人工林中设置了 6 块固定标准地。在标准地内进行每木定位(确定 x, y 坐标)并逐株测定胸径、树高、第一活枝高和冠幅等主要测树因子(见表 1)。每块标准地根据每木检尺结果进行归类,并按径阶由小到大的顺序采用等断面径级标准木法将林木分为 5 级,计算各径级的平均直径及平

表 1 各标准地主要测树因子一览表

Table 1 Summary of stand variables for sample plots

样地号 No. of plot	样地面积(ha) Plot area	林分年龄(a) Stand age	平均胸径(cm) Mean diameter	平均树高(m) Mean height	平均冠长(m) Mean crown length	优势木高 Dominant height(m)	地位指数 Site index	每公顷株数(N·ha ⁻¹) Number of trees per hectare
501	0.05	45	19.3	21.20	6.28	17.3	13.62	1640
502	0.05	33	11.0	10.00	3.89	16.1	7.76	3840
503	0.05	43	20.3	16.50	10.03	18.3	10.84	1100
504	0.04	31	13.8	11.80	4.83	16.2	9.63	2025
505	0.06	47	30.2	21.00	7.43	19.5	13.24	450
506	0.05	38	19.6	16.10	5.92	16.8	11.33	1220

均高,以此为标准在标准地外选择 5 株标准木作为枝解析样木。枝解析的具体做法详见肖锐等^[9]。各标准地枝解析样木主要测树因子的统计量详见表 2。

表 2 各枝解析样木主要测树因子(样木数 = 30)

Table 2 Summary of tree variables for branch analysis (No. of trees = 30)

变量 Variable	平均值 Mean value	标准差 S. D.	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value
年龄 Age(a)	39.13	5.95	31	47
胸径 DBH(cm)	19.52	6.48	8.20	34.50
树高 Height(m)	16.46	4.10	9.95	22.45
冠长 Crown length(m)	6.65	1.64	3.70	10.1
树冠表面积 CSA(m ²)	268.01	223.43	36.87	760.54
树冠体积 CV(m ³)	123.46	132.48	6.18	474.42

2 研究方法

2.1 单木树冠表面积和体积的计算

各标准地中各枝解析样木树冠表面积和体积的计算方法同刘兆刚等人^[8]。

2.2 树冠表面积及体积的预估模型

由于全树冠表面积(CSA)、树冠体积(CV)与胸径(D)、树高(H)和冠长(CL)紧密相关,因此本文采用幂函数分别建立林木树冠表面积和树冠体积的预估方程:

$$CSA = a_0 \cdot D^{a_1} \cdot H^{a_2} \cdot C_L^{a_3} \quad (1)$$

$$CV = b_0 \cdot D^{b_1} \cdot H^{b_2} \cdot C_L^{b_3} \quad (2)$$

式中:D—胸高直径;H—树高; C_L —冠长($C_L = H - H_b$); H_b —枝下高;CSA—全树冠表面积;CV—全树冠体积; $a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3$ 为待估参数。

2.3 单株材积生长量与树冠表面积、树冠体积的关系

通过分析樟子松人工林 30 株解析木数据,发现林木材积生长量(Z_V)与树冠表面积(CSA)、树冠体积(CV)呈直线关系,这与他人研究结果相同。因此,本文利用一元线性回归模型建立了材积生长量(Z_V)与树冠表面积(CSA)和树冠体积(CV)的关系模型:

$$Z_V = c_0 + c_1 CSA \quad (3)$$

$$Z_V = d_0 + d_1 CV \quad (4)$$

式中: Z_V —单株材积生长量;CSA—全树冠表面积;CV—全树冠体积; c_0, c_1, d_0, d_1 为待估参数。

3 结果与讨论

3.1 树冠表面积、树冠体积与林木变量的关系

根据实测的 30 株解析样木的数据,计算出每株解析样木的树冠表面积(CSA)和树冠体积(CV),并对 CSA、CV 与胸径、树高、冠长、冠幅这几个变量的相关关系进行了分析,发现全树冠表面积与胸径的相关指数最大($R^2 = 0.8822$),其次为冠幅($R^2 = 0.7857$)、冠长($R^2 = 0.66813$)和树高($R^2 = 0.6000$)。同样,树冠体积与胸径的相关指数也最大($R^2 = 0.9182$),其次为冠幅($R^2 = 0.87513$)、冠长($R^2 = 0.82458$)、树高($R^2 = 0.72871$)。树冠表面积、树冠体积与林木变量的相关关系见图 1~4。

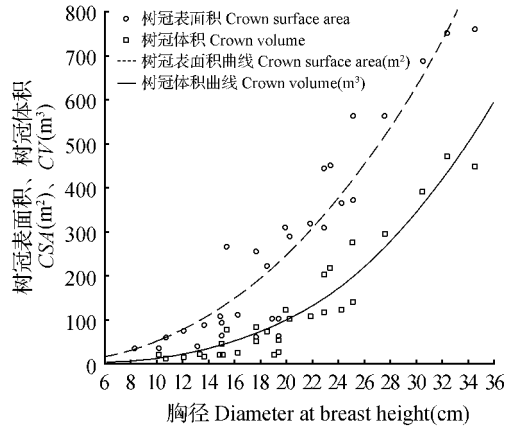


图 1 树冠表面积、树冠体积与胸径的相关关系

Fig. 1 Relationships between the crown surface area, crown volume and DBH

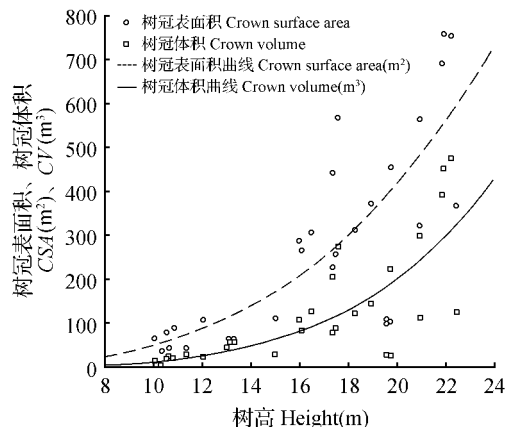


图 2 树冠表面积、树冠体积与树高的相关关系

Fig. 2 Relationships between the crown surface area, crown volume and height

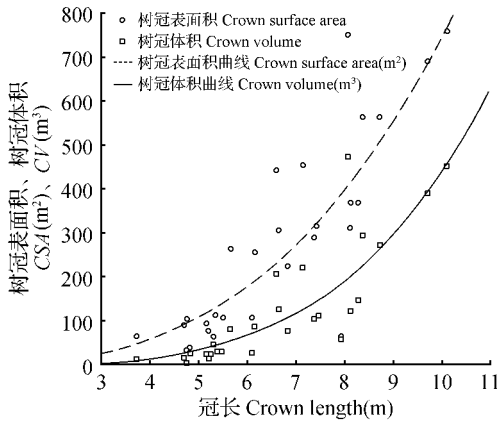


图3 树冠表面积、树冠体积与冠长的相关关系

Fig. 3 Relationships between the crown surface area , crown volume and crown length

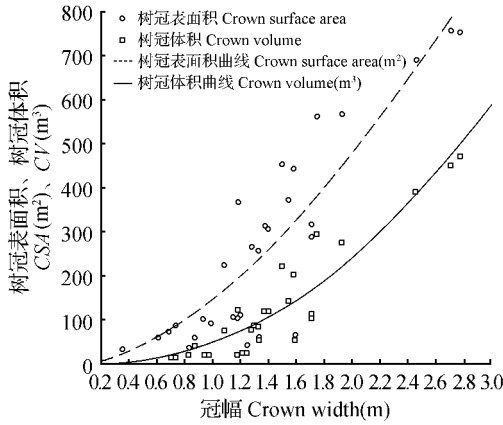


图4 树冠表面积、树冠体积与冠幅的相关关系

Fig. 4 Relationships between the crown surface area , crown volume and crown width

从图1~图4可以看出,树冠表面积、树冠体积均随胸径、树高、冠长、冠幅的增大而增大,呈幂函数关系。但是,在以胸径(D)、树高(H)、冠长(CL)和冠幅(CW)作为自变量建立树冠表面积、树冠体积的预估方程时,发现在自变量中存在自相关现象,在模型中引进冠幅这一变量时,冠幅的参数

检验无法通过。因此,最终以胸径、树高和冠长这3个自变量分别建立了樟子松人工林树冠表面积、树冠体积的预估方程:

$$CSA = 0.165552 \cdot D^{2.053026} \cdot H^{0.34561} \cdot C_L^{0.092585} \quad n = 30 \quad R^2 = 0.8840 \quad RSS = 167900.9 \quad (5)$$

$$CV = 0.026082 \cdot D^{3.586145} \cdot H^{-0.552327} \cdot C_L^{-0.473247} \quad n = 30 \quad R^2 = 0.9224 \quad RSS = 39488.4 \quad (6)$$

从模型(5)和(6)的相关系数 R^2 来看,模型(6)拟合的更好,说明树冠体积受胸径、树高、冠长的影响更大。

3.2 不同林分林木树冠表面积和体积的预估模型及检验

为了预估不同林分条件的樟子松人工林树冠表面积和体积,基于模型(1)和模型(2)式,采用再参数化的方法建立了全树冠表面积和体积的预估模型。具体做法是,利用模型(1)或(2),分别标准地估计模型的参数值,并分析各参数与林分条件(林分年龄 t)、地位指数(SI)、每公顷株数(N)以及优势木高(HD)的相关关系。将林分条件的各因子及其变换因子作为自变量,分别与树冠表面积模型(1)中的参数 a_0 、 a_2 以及树冠体积模型(2)中的参数 b_0 、 b_2 建立回归关系,分别代入模型(1)和模型(2)式,并进行0.05显著水平下的 t 检验,最后得到下面的最优方程:

$$CSA = e_0 \cdot D^{e_1} \cdot H^{e_2+e_3 \cdot t+e_4 \cdot HD+e_5 \cdot \ln SI+e_6 \cdot \ln N} \cdot C_L^{e_7} \quad (7)$$

$$CV = f_0 \cdot D^{f_1} \cdot H^{f_2+f_3 \cdot \ln t+f_4 \cdot HD} \cdot C_L^{f_5} \quad (8)$$

式中: CSA 为全树冠表面积; CV 为全树冠体积; D 为胸高直径; H 为树高; C_L 为冠长; HD 为优势木高; t 为林分年龄; SI 为地位指数; N 为每公顷株数; e_0 e_1 e_2 e_3 e_4 e_5 e_6 e_7 f_0 f_1 f_2 f_3 f_4 f_5 为待估参数。

利用30株样木数据,采用非线性最小二乘法分别拟合模型(7)、(8)式中的参数,并进行了参数检验。模型拟合结果见表3和表4。

表3 树冠表面积预估模型(7)参数的估计值与拟合统计量($n=30$)

Table 3 Parameter estimates and fitting statistics for crown surface area predicting model (7) ($n=30$)

参数 Parameter	估计值 Estimated value	标准误 Standard error	t -值 t -value	P -值 P -value	剩余残差平方和 (RSS)	剩余标准差 (Sy. x)	相关指数 (R^2)
e_0	0.28718	0.05574	0.5152	0.04612			
e_1	1.16313	0.37749	3.0812	0.00546			
e_2	18.69806	3.54198	5.2790	0.00003			
e_3	0.10908	0.03303	3.3026	0.00324	40261.273	42.779	0.9722
e_4	-0.58477	0.13471	-4.3408	0.00026			
e_5	-2.35837	0.57716	-4.0861	0.00049			
e_6	-0.88678	0.16800	-5.2786	0.00003			
e_7	0.44350	0.27506	1.6128	0.01211			

表 4 树冠体积预估模型(8)参数的估计值与拟合统计量(n=30)

Table 4 Parameter estimates and fitting statistics for crown volume predicting model (8) (n=30)

参数 Parameter	估计值 Estimated value	标准误 Standard error	t-值 t-value	P-值 P-value	剩余残差平方和 (RSS)	剩余标准差 (Sy.x)	相关指数 (R ²)
f ₀	0.000 03	0.000 10	2.763 3	0.047 80			
f ₁	2.172 47	0.735 58	2.953 4	0.006 93			
f ₂	9.161 73	4.285 04	2.138 1	0.042 90	30 630.853	35.725	0.939 8
f ₃	-2.154 35	0.898 73	-2.397 1	0.024 67			
f ₄	0.117 76	0.048 95	2.405 7	0.024 21			
f ₅	-0.352 99	0.415 12	-0.850 3	0.040 36			

由表 3 和表 4 可知,模型(7)和(8)的剩余标准差分别为 42.8 m² 和 35.7 m³,而相关指数分别高达 0.972 2 和 0.939 8,说明方程(7)和方程(8)拟合的效果良好。模型的拟合参数检验结果表明,模型(7)和(8)中的各参数在 0.05 显著水平下均差异显著($p < 0.05$),说明树冠表面积(CSA)与胸径(D)、树高(H)、冠长(CL)、优势木高(HD)、林分年龄(t)、地位指数(SI)以及每公顷株数(N)都有关,而树冠体积(CV)与胸径(D)、树高(H)、冠长(CL)、优势木高(HD)以及林分年龄(t)有关。由模型(7)和(8)的参数估计值来看,树冠表面积(CSA)和树冠体积(CV)随林分年龄、胸径的增大而增大,揭示了树冠结构的复杂程度和对空间的占据能力;而 CSA 随林分密度、立地指数的增大而减小,表明林分越密,越不利于光能的利用;CV 则与林分密度无关,与立地指数呈反比。

为验证所建模型(7)和(8)有效性,将 6 块枝解析样地中计算出的各样木树冠表面积(CSA)、树冠体积(CV)作为实测值,将模型计算的各样木 CSA 和 CV 作为理论值进行了预估误差及 0.05 显著水平下的置信椭圆 F 检验,各样地检验结果见表 5。

表 5 樟子松人工林树冠表面积预估模型(7)和树冠体积预估模型(8)的检验结果*

Table 5 Test results of crown surface area (7) and volume estimating model (8) for Mongolian pine plantation

变量 Variable	CSA	CV
平均误差 M.E	-2.78	-7.60
平均绝对误差 MAE	29.87	25.81
平均相对误差 MRE(%)	0.89	-7.72
系统误差 SE(%)	-1.04	-6.16
精度 Precision(%)	95.08	91.28
F 值 F-value	0.070 0	0.853 7
显著性 Significance	不显著	不显著

*注 $F_{0.05}(2, 28) = 3.34$ ns 表明在 0.05 显著水平下差异不显著, $p < 0.05$ ns means not significant $p < 0.05$

从表 5 可以看出,树冠表面积模型(7)的预估效果明显好于树冠体积模型(8)。各样木 CSA 的平均相对误差为 0.89%,而 CV 的平均相对误差为 -7.72%;CSA 的系统误差为 -1.04%,而 CV 的系统误差为 -6.16%。从精度检验中可以看出检验精度很高,均大于 91%。置信椭圆 F 检验结果表明,在 0.05 显著水平下 CSA、CV 的预估值与实测值之间均差异不显著,说明模型具有良好的适用性。因此,利用这两个模型可以预估樟子松人工林不同林分条件下的树冠表面积和树冠体积。

3.3 林木材积生长量与树冠表面积、树冠体积的关系

利用 6 块样地中 30 株解析木数据,经分析发现林木材积生长量与树冠表面积和树冠体积都呈直线关系(见图 5)。利用 30 株解析木数据拟合模型(3)和模型(4),模型的参数估计值及检验结果见表 6 及图 5。

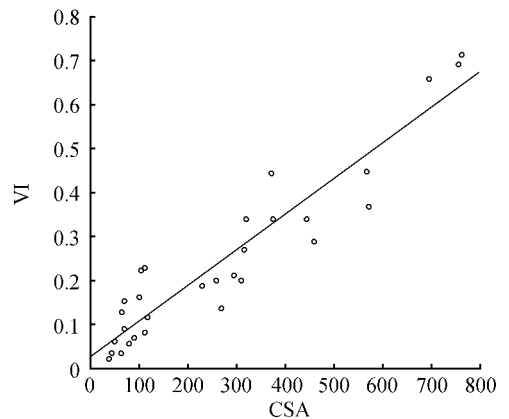


图 5 材积生长量与树冠表面积的回归关系

Fig. 5 Regression relation for volume increment and crown surface area

从表 6 可知,模型(3)和(4)的相关系数 r 均大于 0.93,说明两个方程的回归关系显著。同时,模型(3)和(4)的参数检验结果表明,在 0.05 显著

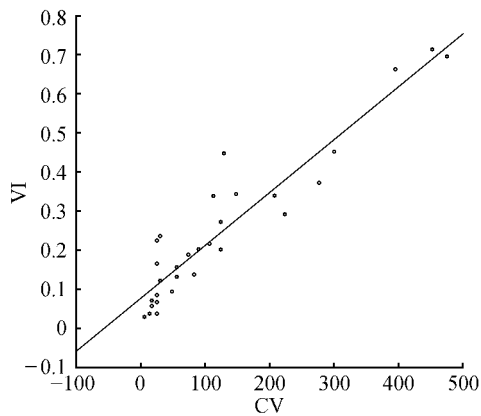


图6 材积生长量与树冠体积的回归关系

Fig. 6 Regression relation for volume increment and crown volume

表6 预估模型(3)和(4)的参数估计及检验结果($n=30$)Table 6 Parameter estimates and fitting results for predicting model (3) and (4) ($n=30$)

变量 Variable	回归方程 Regression equation	相关系数 r	参数 Parameter	估计值 Estimate	标准误 S. E.	t-值 t-value	P 值 P-level
CSA	$VI = 0.0292 + 0.0008 * CSA$	0.9398	c_0	0.0292	0.0193	1.5152	0.0141
			c_1	0.0008	0.0001	14.552	0.0000
CV	$VI = 0.078 + 0.0014 * CV$	0.9370	d_0	-0.0780	0.0172	4.5380	0.0000
			d_1	0.0014	0.0001	14.191	0.0000

(3)文中所建立的树冠表面积预估模型(7)和树冠体积的预估模型(8)的检验结果表明,模型(7)的预估效果明显好于模型(8),二者平均相对误差分别为0.89%和-7.72%,系统误差分别为-1.04%和-6.16%。但是,预估精度均大于91%,并通过了置信椭圆F检验。这说明所建模型预估精度高,具有良好的适用性。因此,利用这两个模型可以预估樟子松人工林不同林分条件下的树冠表面积和树冠体积。

(4)樟子松人工林林木材积生长量与树冠表面积以及树冠体积都呈线性关系,树冠表面积或树冠体积越大,林木材积生长量越大。

(5)本文所建立的林分树冠表面积和体积模型可以预估樟子松人工林不同林分条件下的林木树冠表面积和树冠体积,为进一步研究林分经营模型提供了基础。

参 考 文 献

- 刘艳艳. 樟子松人工林树冠结构的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.
- Sprinz P T, Burkhardt H E. Relationships between tree crown stem and stand characteristics in unthinned loblolly pine plantations [J]. Can J For Res, 1987, 17: 534-538.

水平下模型(3)和(4)的参数均通过了t-检验。说明了材积生长量分别与树冠表面积和树冠体积呈线性关系。

4 结 论

(1)樟子松人工林树冠表面积和树冠体积均随着林木胸径、树高和冠长的增大而增大,它们之间呈幂函数关系。

(2)不同林分条件的樟子松人工林树冠表面积(CSA)和树冠体积(CV)随林分年龄和胸径的增大而增大。CSA随林分密度的增大而减小,表明在年龄和立地条件下,林分越密树冠表面积越小,而CV与林分密度相关不紧密。

- 朱春全, 刘晓东. 集约与粗放经营杨树人工林树冠结构的研究[J]. 林业科学, 2000, 36(2): 61-65.
- Xiao Y, Jokela E J, White T L. Species differences in crown structure and growth performance of juvenile loblolly and slash pine [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 174: 295-313.
- Brown P L, Doley D, Keenan R J. Stem and crown dimensions as predictors of thinning responses in a crowned tropical rainforest plantation of *Flindersia brayleyana* F. Muell [J]. Forest Ecology and Management, 2004, 196: 379-392.
- Hiromi Mizunaga, Takahisa Umeki. The relationships between tree size and soatial distribution of foliage-mass within crowns of Japanese plantation [J]. Forest Ecology and Management, 2001: 129-140.
- Gill S J, Biging G S, Murphy E C. Modeling conifer tree crown radius and estimating canopy cover [J]. Forest Ecology and Management, 2000, 126: 405-416.
- 刘兆刚, 刘继明, 李凤日, 等. 樟子松人工林树冠结构的分形分析[J]. 植物研究, 2005, 25(4): 465-470.
- 肖锐, 李凤日, 刘兆刚. 樟子松人工林分枝结构的分析[J]. 植物研究, 2006, 26(4): 490-496.
- 周国模, 金爱武. 雷竹林冠层特性与叶片的空间分布[J]. 林业科学, 1999, 35(5): 17-21.
- 梁军, 徐锡增, 吕士行. I-69 杨生长过程分析和生长阶段划分[J]. 林业科学研究, 2000, 13(4): 343-348.