

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.006.014

辽东山区人工红松冠长率影响因子研究

刘奇峰¹, 陈东升², 冯 健³, 高慧淋^{1*}

(1. 沈阳农业大学林学院, 辽宁沈阳 110866; 2. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091;
3. 辽宁省林业科学研究院, 辽宁沈阳 110032)

摘要: [目的] 建立包含林木竞争、地形(坡度、坡向、坡位)的不同林层的辽东山区人工红松冠长率模型, 研究不同竞争水平及地形对冠长率的影响, 比较林层间的冠长率差异, 为辽东山区红松人工林经营奠定基础。[方法] 以辽宁省清原县大边沟林场红松人工林为研究对象, 基于冠长率基础模型, 通过再参数化方法引入竞争因子, 采用哑变量方法进一步引入地形因子, 选取对模型贡献最大的地形因子, 最终建立包含竞争、地形变量的不同林层间的人工红松冠长率哑变量模型, 模拟了各因子对人工红松冠长率的影响。[结果] 与基础模型相比, 引入林木竞争、地形因子坡向的不同林层冠长率模型 R^2_a 提升了 0.113, $RMSE$ 降低了 0.012, 竞争、坡向、林层对冠长率模型的贡献率 ($MSER$) 分别为 14.14%、2.25%、0.16%。冠长率随林木胸径的增大而减小, 随林木竞争水平的增大而增大。随林木竞争水平的增大, 冠长率随树高变化规律由负增长逐渐转为正增长。经 F 检验, 不同坡向、林层之间冠长率差异显著, 变化规律为阴坡>半阳坡>阳坡, 在林层间表现为上林层>下林层。[结论] 地形与林木竞争因子显著影响人工红松冠长率, 坡向是对人工红松冠长率影响最大的地形因子。本研究构建的包含地形与林木竞争的冠长率模型精度较高, 为辽东山区红松人工林经营管理及生长量预估提供参考。

关键词: 红松; 坡向; 竞争水平; 再参数化; 冠长率

中图分类号: S718.42

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2022)06-0127-08

树冠是树木与周围环境相互作用的重要场所, 光合作用、呼吸作用、蒸腾作用等一系列与树木生长密切相关的生理活动都发生在树冠中^[1]。冠长率(CR)是活冠长与树高的比值, 是树冠结构的重要组成因子之一^[2], 可用于评估树木健康程度、木材质量、火灾发生的风险^[1,3-4]。此外, 冠长率还可以间接反映树木的光合能力、竞争能力以及林木之间的相对优势地位^[5-7]。冠长率常作为重要预测变量加入到林木生长模型中, 以改善模型拟合效果^[8-9]。然而, 在野外调查时, 由于林层结构复杂, 冠长率往往无法精准且省时省力的测量^[10-11], 因此构建冠长率模型具有重要意义。

冠长率可以表达为树木大小、竞争、立地因子

的函数^[12]。胸径、树高反映了树木的发育阶段, 因此可以解释大部分冠长率的变异。林木竞争反映了树木获取光资源以及空间资源的能力, 也是影响树木冠长率的重要因子, 预测单木冠长率会因缺失竞争变量而产生高估或低估的拟合结果^[13-14]。立地特征一般用坡度、坡向、坡位、海拔等生态因子表示, 由于林木所处的立地条件不同, 进而影响树木的生长^[15]。除此之外, 为研究不同林层的冠长率变化规律, Sharma 等^[16]以哑变量的形式将林层作为解释变量加入冠长率模型中, 结果表明, 林层的加入显著提升了模型拟合优度, 不同林层间的冠长率具有较大差异。目前已多个学者对冠长率模型进行构建并已取得较好结果^[12,16-17], 但由于数据缺

乏，探讨冠长率随不同地形因子变化规律的研究较少。地形影响林木的生长与分布^[2]，研究不同地形条件下林木冠长率之间的差异，对了解林木生长规律具有重要意义。分别构建不同地形条件下的冠长率模型比较复杂且不利于应用，而使用哑变量处理分类变量的方法为模型合并提供了可能的途径^[18]，目前在林业中得到了广泛应用^[19-20]

红松 (*Pinus koraiensis* Siebold and Zucc.) 在辽东山区分布广泛，作为地带性顶级群落主要树种之一，有着重要的经济与生态价值^[21]。然而，关于辽东山区红松人工林单木冠长率模型的研建还比较缺乏。因此，本研究基于辽宁省清原县大边沟林场 64 块固定样地每木检尺数据，构建了基于林木竞争、地形因子的不同林层的人工红松冠长率预估模型，选取对红松单木冠长率影响较大的地形因子，分析冠长率随林木大小、竞争、林层、地形的变化规律，为辽东山区红松人工林森林生长动态预估奠定基础。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区域位于辽宁省清原县大边沟林场 (41°51'~42°00' N, 124°59'~125°18' E)。大边沟林场在辽宁东部，属于中低山地区，海拔范围为 500~700 m。夏季炎热多雨，冬季寒冷干燥，属于温带季风性气候，年降水量 700~800 mm，主要集中在夏季。土壤以暗棕壤和棕壤为主，适合针阔叶树生长。森林植被由天然次生林与人工林组成，人工林占森林植被的大多数，以红松、落叶松 (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) 等针叶树种为主。

1.2 数据来源

2020 年 6 月在清原县大边沟林场选取 10~55 a 不同年龄段的红松人工林，共设置 64 块标准地，标准地面积大小为 0.06 hm² (20 m × 30 m)。对标准地内的所有树木进行每木检尺，分别测量所有树木胸径、树高、冠幅、第一活枝高等林木因子，同时记录各样地坡度、坡位、坡向等地形因子，去除异常数据，共获得 2 640 株测量数据，按 3:1 的比例对 2 640 株红松每木检尺数据进行随机取样，1 980 株用于建模，660 株用于模型检验。建模和检验数据的具体信息见表 1。

2 研究方法

2.1 基础模型选取及再参数化

通过查阅国内外文献选出 6 个非线性模型形式作为冠长率候选模型，如表 2 所示。

将对冠长率影响最大的胸径以及树高因子作为自变量，采用最小二乘法对 6 个模型分别进行拟合。采用调整后的决定系数 (R^2_a)、均方根误差 ($RMSE$)、平均绝对误差 (MAE)、平均绝对百分比误差 ($MAPE$) 对 6 个模型的拟合结果进行评价与检验，选取 R^2_a 最大、 $RMSE$ 、 MAE 、 $MAPE$ 最小的作为最优基础模型。评价以及检验指标如下：

$$R^2_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) \quad (1)$$

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

表 1 红松人工林单木因子统计

Table 1 Statistics of individual tree characteristics of *Pinus koraiensis* plantation

数据 Data	变量 Variable	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV/%
建模数据 Fitting data	年龄 Age/a	10	55	28	14	50
	胸径 D/cm	0.8	47.1	17.4	9.5	55
	树高 H/m	1.1	29.8	10.7	5.1	48
检验数据 Validation data	冠长率 CR	0.23	0.96	0.68	0.16	23
	年龄 Age/a	10	55	29	14	50
	胸径 D/cm	1.2	43.0	17.8	9.2	52
	树高 H/m	0.7	25.5	11.1	5.1	46
	冠长率 CR	0.24	0.95	0.68	0.16	23

表2 冠长率候选模型

Table 2 Crown ratio candidate models

编号 Number	模型类型 Model type	表达式 Expression formula	参考文献 Reference
CR1	逻辑斯蒂	$CR = 1/(1 + e^{-\beta X})$	[11]
CR2	理查德	$CR = a/(1 + be^{-c\beta X})^{\frac{1}{m}}$	[6]
CR3	理查德	$CR = 1/(1 + e^{-\beta X})^{\frac{1}{2}}$	[22]
CR4	指数	$CR = e^{\beta X}$	[10]
CR5	指数	$CR = 1 - e^{-c\beta X}$	[23]
CR6	威布尔	$CR = a \times (1 - be^{-c\beta X^{\omega}})$	[6]

注: CR是冠长率, a 、 b 、 c 、 m 、 ω 是模型参数, a 、 b 、 c 均为1, $m=6$, $\omega=10$. β 为参数向量, X 为变量向量。

Note: CR is the crown ratio, a 、 b 、 c 、 m are the model parameters, a 、 b 、 c = 1, m = 6, ω = 10. β indicates the parameter vector and X indicates the vector of variables.

$$MAE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \right| \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (4)$$

式中: y_i 为第*i*株树的冠长率实际值, \hat{y}_i 为第*i*株树的冠长率估计值, \bar{y} 为冠长率观测值的平均值, p 为模型估计参数的个数, n 为样本数。

采用再参数化的方法将竞争指标-对象木的相对直径(Rd)代入到最优基础模型, 探究竞争对于冠长率的影响, Rd 的计算公式如下:

$$Rd = \frac{D_i}{D_g} \quad (5)$$

式中: Rd 是对象木的相对直径, D_i 是第*i*株树的胸径, D_g 是林分平均胸径。

根据实测数据将坡度按 $0\sim5^\circ$ 、 $5\sim15^\circ$ 、 $15\sim25^\circ$ 划分为3级, 将坡向按阴坡、阳坡、半阳坡划分为3级, 将坡位按上坡、中坡、下坡划分为3级, 采用国际林联划分标准, 将林层以林木优势高的 $2/3$ 作为分界点划分为上林层与下林层。将坡度、坡位、坡向作为哑变量分别加入到模型中, 依据 R^2_a 选取对冠长率模型影响最大的地形因子, 在此基础上将林层作为哑变量加入到模型中, 最终构建基于竞争、地形与林层的冠长率模型, 以CR4模型为例将坡向、林层作为哑变量可表示为:

$$CR = e^{(a_0 + a_1 \times F_l) + b \times D + (c_0 + c_1 \times Az_1 + c_2 \times Az_2) \times H} \quad (6)$$

式中: a_0 、 a_1 、 b 、 c_0 、 c_1 、 c_2 为模型参数, D 为胸径, H 为树高。 F_l 为区分林层的哑变量, 当 F_l 为0时代表上林层, 当 F_l 为1时代表下林层。

Az_1 、 Az_2 为区分坡向的哑变量, 当 Az_1 为1, Az_2 为0时代表阳坡, Az_1 为0, Az_2 为1时代表半阳坡, Az_1 为0, Az_2 为0时代表阴坡。

采用F统计指标检验引入哑变量前后模型是否有显著差异, 有显著差异表明不同地形因子与林层对冠长率有影响, 引入哑变量有意义, 采用MSE_R作为评价新增变量对模型贡献的评价指标。公式如下:

$$F = \frac{(SSE_{base} - SSE_{dumb}) / (df_{base} - df_{dumb})}{SSE_{dumb} / df_{dumb}} \quad (7)$$

$$MSE_R = \left(1 - \frac{MSE_i}{MSE_j} \right) \cdot 100 \quad (8)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p} \quad (9)$$

式中: SSE_{base} 和 SSE_{dumb} 分别是基础模型和哑变量模型的残差平方和; df_{base} 和 df_{dumb} 分别是基础模型和哑变量模型的自由度, MSE_i 为含有林分变量的冠幅模型均方误差, MSE_j 为未引入林分变量的基础模型均方误差。

3 结果分析

3.1 基础模型的选取

冠长率基础模型的拟合结果如表3所示, 由表3可以看出, 在引入胸径以及树高的情况下, 6个模型中CR4的 R^2_a 均最高, RMSE均最低, 效果最好, CR2次之, 模型的检验指标MAE、MAPE也体现出了与之相同的结果, 因此将CR4模型作为最优基础模型。通过再参数化方法引入Rd, 发现将参数c进行再参数化处理时效果最好($R^2_a=0.402$, RMSE=0.124, MESR=14.14%),

表3 冠长率候选模型拟合评估
Table 3 Fitting evaluation of crown ratio candidate models

模型 Model	建模数据 Fitting data		检验数据 Validation data	
	R^2_a	RMSE	MAE	MAPE/%
CR1	0.241	0.139	0.113	18.97
CR2	0.282	0.135	0.110	18.47
CR3	0.253	0.138	0.112	18.83
CR4	0.302	0.134	0.108	18.22
CR5	0.213	0.142	0.116	19.39
CR6	0.259	0.138	0.112	18.77

与 CR4 模型相比拟合效果大幅度提高, 说明竞争显著影响林木冠长率。经再参数化处理后的模型形式如下:

$$CR = e^{(a+b \times D + (c+d \times Rd) \times H)} \quad (10)$$

3.2 哑变量模型的构建

在模型 (10) 的基础上分别将坡度、坡向、坡位作为哑变量加入到模型中。采用 R^2_a 、RMSE 选取对模型贡献最大的地形因子, 并采用 F 统计指标检验与基础模型 (10) 的显著性差异, 加入

哑变量后模型的拟合优度指标及 F 检验如表 4 所示。结果表明, 将坡度作为哑变量加到参数 b 、将坡位、坡向加到参数 c 上效果均优于未加入哑变量的模型 (10)。从 F 统计指标检验结果来看, 加入哑变量后模型与模型 (10) 均有显著性差异。经比较, 将坡向作为哑变量的模型拟合效果以及检验效果优于坡度及坡位, 说明坡向是影响人工红松单木冠长率的最重要的地形因子。

表 4 哑变量模型拟合结果

Table 4 Fitting results of dummy variable models

引入哑变量的因子 Dummy variables	引入参数 Parameters	R^2_a	RMSE	MAE	MAPE/%	F值	P值	MSER/%
无	—	0.402	0.124	0.099	16.83	—	—	—
坡度	b	0.412	0.123	0.099	16.72	19.31	<0.01	
坡位	c	0.412	0.122	0.099	16.83	21.69	<0.01	
坡向	c	0.412	0.122	0.096	16.37	21.69	<0.01	2.25
坡向、林层	c, a	0.415	0.122	0.096	16.34	6.02	<0.01	0.16

为研究林层对冠长率的影响, 在含有坡向冠长率模型的基础之上, 进一步将林层作为哑变量引入到模型中, 拟合指标如表 4 所示。由表 4 可以看出, 将坡向、林层作为哑变量加到参数 c 、 a 上构建的模型显示出更好的拟合效果。F 统计检验结果表明, 加入林层哑变量后与未加入林层的模型差异显著 ($F=6.19$, $P<0.01$), 这说明林分竞争、地形与林层对模型贡献较大。最终模型参数估计值见表 5, 最终模型形式如下:

$$CR = e^{((a_0+a_1 \times F_l)+b \times D+((c_0+c_1 \times Az_1+c_2 \times Az_2)+d \times Rd) \times H)} \quad (11)$$

式中: a_0 、 a_1 、 b 、 c_0 、 c_1 、 c_2 、 d 为模型参数, D 为胸径, Rd 为相对直径, H 为树高。 F_l 为区分林层的哑变量, 当 F_l 为 0 时代表上林层, 当 F_l 为 1 时代表下林层。 Az_1 、 Az_2 为区分坡向的哑变量, 当 Az_1 为 0, Az_2 为 1 时代表半阳坡, 当 Az_1 为 1, Az_2 为 0 时代表阳坡, Az_1 为 0, Az_2 为 0 时代表阴坡。

表 5 哑变量模型参数估计结果

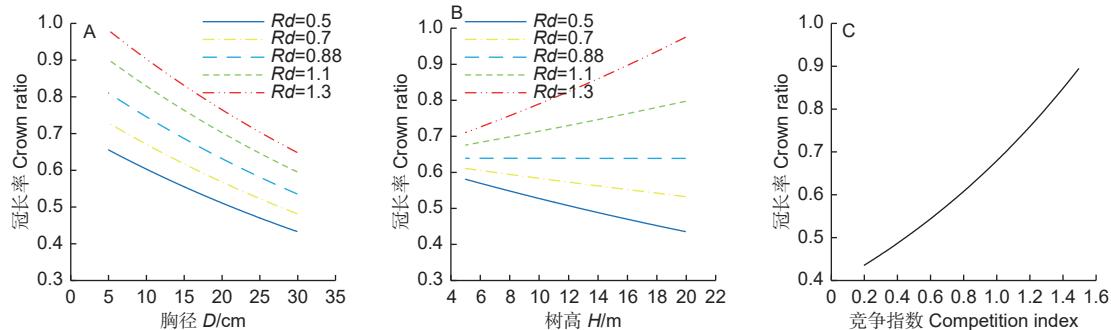
Table 5 Parameter estimation results of dummy variable model

模型 Model	指标 Index	参数 Parameters					
		a_0	a_1	b	c_0	c_1	c_2
哑变量模型	估计值	-0.093 5	-0.028 8	-0.008 1	-0.050 4	-0.006 1	-0.004 3
	标准误	0.013 4	0.009 8	0.001 8	0.002 5	0.001 0	0.000 9
	t值	-6.97	-2.94	-4.43	-20.38	-5.85	-4.73
	p值	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

3.3 坡向及林层对冠长率的影响

基于最终哑变量模型的参数, 分别模拟了冠长率随胸径、树高、对象木竞争水平 (Rd) 的变化规律 (图 1), 不同坡向及林层对冠长率的影响 (图 2, 3)。图 1A 为不同 Rd 水平的冠长率随胸

径变化曲线, 由图 1A 可知, 冠长率呈现随胸径的增大而减小的规律, 且并不随着 Rd 的变化而改变。由图 1B 可知, Rd 不同冠长率呈现出不同变化规律。 Rd 较小时, 冠长率随树高增加呈现减小的趋势, 随着 Rd 的增大, 冠长率减小的趋势逐渐

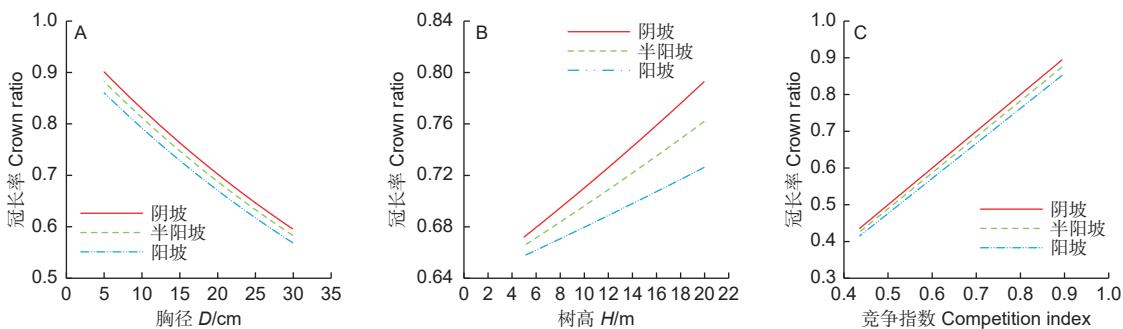


注: 图 A 表示当 $H=10.5 \text{ m}$ 时, 不同 Rd 值下冠长率随胸径变化曲线; 图 B 表示当 $D=19 \text{ cm}$ 时, 不同 Rd 值下冠长率随树高变化曲线; 图 C 表示 $D=19 \text{ cm}$, $H=11 \text{ m}$ 时, 冠长率随相对直径变化曲线

Note: Figure A shows the variation curve of crown ratio with D under different Rd values when $H = 10.5 \text{ m}$; Figure B shows the variation curve of crown ratio with H under different Rd values when $D = 19 \text{ cm}$; Figure C shows the variation curve of crown ratio with relative diameter when $D = 19 \text{ cm}$ and $H = 11 \text{ m}$

图 1 冠长率随林木因子及竞争因子变化规律

Fig. 1 Variation law of crown ratio with forest factors and competition factors

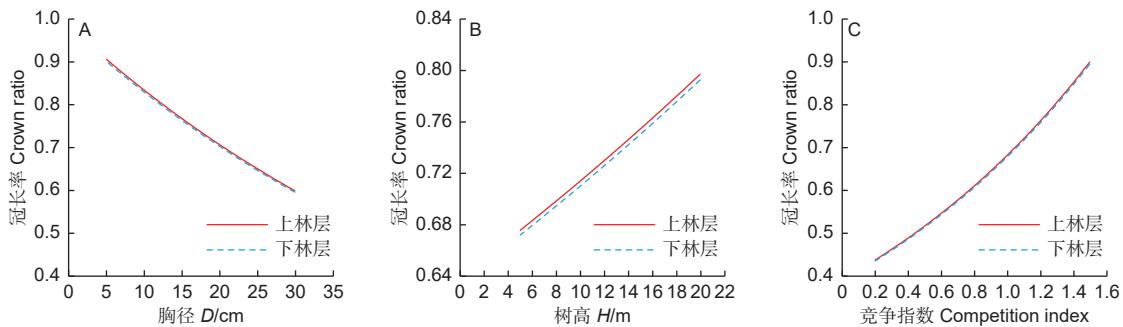


注: 图 A 表示 $H=10.5 \text{ m}$, $Rd=1.1$ 时不同坡向冠长率, 图 B 表示 $D=19 \text{ cm}$, $Rd=1.1$ 时不同坡向的冠长率, 图 C 表示 $D=19 \text{ cm}$, $H=11 \text{ m}$ 时不同坡向的冠长率

Note: Figure A shows the crown ratio in different slope aspects when $H = 10.5 \text{ m}$ and $Rd = 1.1$, figure B shows the crown ratio in different slope aspects when $D = 19 \text{ cm}$ and $Rd = 1.1$, and figure C shows the crown ratio in different slope aspects when $D = 19 \text{ cm}$ and $H = 11 \text{ m}$

图 2 不同坡向冠长率差异比较

Fig. 2 Comparison of crown ratio in different slope aspects



注: 图 A 表示 $H=10.5 \text{ m}$, $Rd=1.1$ 时上林层和下林层冠长率, 图 B 表示 $D=19 \text{ cm}$, $Rd=1.1$ 时上林层和下林层的冠长率, 图 C 表示 $D=19 \text{ cm}$, $H=11 \text{ m}$ 时上林层和下林层冠长率

Note: Figure A shows the crown ratio in upper and lower forest layers when $H = 10.5 \text{ m}$ and $Rd = 1.1$, figure B shows the crown ratio in upper and lower forest layers when $D = 19 \text{ cm}$ and $Rd = 1.1$, and figure C shows the crown ratio in upper and lower forest layers when $D = 19 \text{ cm}$ and $H = 11 \text{ m}$)

图 3 不同林层冠长率差异比较

Fig. 3 Comparison of crown ratio in different forest layers

变缓。随 Rd 进一步增大，冠长率随树高增加呈现增大的趋势。冠长率随对象木竞争水平的增大而增大（图 1C）。

图 2 与图 3 分别对不同坡向与林层冠长率之间的差异进行了比较。由图 2 与图 3 可知，不同林层与不同坡向之间冠长率随胸径、竞争、树高变化曲线均呈现相似规律，即当其他条件相同时，阴坡冠长率大于半阳坡大于阳坡，上林层冠长率大于下林层冠长率。

4 讨论

4.1 冠长率预估模型的构建

不同学者在构建冠长率模型时最终选取的模型也不尽相同，如 Fu 等^[17]采用逻辑斯蒂模型构建了黑龙江地区蒙古栎天然林单木冠长率模型；Li 等^[1]使用理查德模型构建了中国南方马尾松单木冠长率模型。本研究选取逻辑斯蒂模型、理查德模型、指数模型、威布尔模型共计 4 种模型的 6 种不同的形式进行比较最终选取基础模型。结果显示，指数模型形式的 CR4 拟合效果最好，理查德模型形式的 CR2 模型次之，有学者认为指数模型未能将冠长率预测值的范围限制在 0~1 之间，缺乏生物学意义^[1]，也有学者提出在极端情况下，指数模型的预测值才会超出范围，应用指数模型可以得到有意义的结果^[10]。本研究基于 CR4 模型的预测并未超出范围，因此将 CR4 模型作为基础模型。为探究不同林层及地形对冠长率的影响，本研究采用哑变量的方法将坡度、坡位、坡向加入到模型中，并选取对冠长率影响最大的地形因子，在其基础上进一步引入林层因子构建包含不同地形、林层的红松单木哑变量冠长率模型。结果显示坡向是对红松单木冠长率影响最大的地形因子，将坡向、林层作为哑变量加到模型中可以比较不同林层、坡向林木冠长率的差异^[24]，与引入哑变量前的模型相比， R^2_a 升高，RMSE 降低，在一定程度上提升了模型的预估效果。

4.2 冠长率与林木变量之间的关系

不同学者在构建冠长率模型时所引入的变量不同，但都综合考虑树木大小因子、竞争因子、地形因子以及林层因子^[12,16-17]。本研究使用 D 、 H 来代表树木大小因子，通过再参数化方法引入 Rd 来代表竞争因子，通过哑变量的方法加入坡向和林层来代表地形与林层因子，与前人研究一致。胸径是森

林调查时最易测得且最为精准的因子，本研究发现冠长率随着胸径的增大而减小，这与 Holdaway 的研究结果一致，Holdaway 研究发现红松在年龄较小时冠长率随着胸径的增大而减小^[25]。树高是预测冠长率的重要因子之一，以往的研究表明，冠长率随着树高的增大而减小^[1,12,26]，在本研究中最终模型的树高参数虽为负值，但在冠长率随树高变化规律模拟中发现，不同 Rd 值下，冠长率呈现不同的变化规律。随着 Rd 的增大，冠长率随树高增长由负增长逐渐转变为正增长。这说明当树木本身竞争能力弱时，受到竞争木的影响较大，而树木竞争能力强时，竞争木对其的影响较小^[27]，树高与冠长率之间达到平衡时可能代表植株为了应对相邻木的竞争而产生的适应机制^[28]。竞争与林木冠长率的形成密切相关，郭孝玉^[5]认为相邻木之间的竞争影响着树木整体的外貌形状，陈东升等^[29]研究发现，竞争对树冠下部枝条影响较大，遗传因素对树冠上部枝条影响较大。本研究结果表明，冠长率随着相对直径的增大而增大，这说明树木本身竞争能力越强，所受竞争越小冠长率越大，与以往研究结果一致^[12,30]。对不同坡向冠长率进行分析发现，阴坡冠长率大于半阳坡大于阳坡，这与郭明辉研究结果一致，郭明辉发现红松人工林阳坡红松单木生长率远低于阴坡，这是因为水分是红松生长最主要的限制因子，阳坡日照时数长温度高，土壤水分减少快，抑制了林木生长，而阴坡水分条件充足更适合红松生长^[31-32]。对不同林层的冠长率进行分析发现，不同林层林木冠长率呈现相同的变化趋势，上林层冠长率大于下林层，原因可能是林分郁闭后，林木为了获取光资源而将资源用到高生长上，树冠顶部高度增加使林冠分层，下层林木竞争能力较弱，下部枝条受竞争木的影响较大，因此冠长率较小^[29,33]。

5 结论

本研究采用哑变量模型的方法，引入林木大小因子、竞争因子、地形因子与林层因子构建辽东山区红松人工林冠长率模型，探讨了不同林层、坡向下冠长率的差异以及冠长率随林木大小因子、竞争因子的变化规律，模型精度较高，能有效预估辽东山区红松人工林林木冠长率，可以为辽东山区红松人工林经营管理以及生长量预估提供参考。

参考文献：

- [1] Li Y, Wang W, Zeng W S, et al. Development of crown ratio

- and height to crown base models for Masson pine in Southern China[J]. *Forests*, 2020, 11(11): 1216-1216.
- [2] 卢军, 李凤日, 张会儒, 等. 帽儿山天然次生林主要树种冠长率模型[J]. *林业科学*, 2011, 47(6): 70-76.
- [3] Cortini F, MacIsaac D, Comeau P. White spruce growth and wood properties over multiple time periods in relation to current tree and stand attributes[J]. *Forests*, 2016, 7(3): 49-66.
- [4] Kuprevicius A, Auty D, Achim A, et al. Quantifying the influence of live crown ratio on the mechanical properties of clear wood[J]. *Forestry*, 2013(3): 361-369.
- [5] 郭孝玉. 长白落叶松人工林树冠结构及生长模型研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [6] Soares P, Tome M. A tree crown ratio prediction equation for eucalypt plantations[J]. *Annals of Forest Science*, 2001, 58(2): 193-202.
- [7] Zhao D H, Kane M, BoRders B E. Crown ratio and relative spacing relationships for loblolly pine plantations[J]. *Open Journal of Forestry*, 2012, 2(3): 107-112.
- [8] Dickinson Y L, Battaglia M A, Asherin L A. Evaluation of the FVS-CR diameter growth model in structurally-heterogeneous ponderosa pine (*Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson) stands in the Southern Rockies, and potential modifications[J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 448: 1-10.
- [9] Sterba H, Blab A, Katzensteiner K. Adapting an individual tree growth model for Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) in pure and mixed species stands[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 159(1-2): 101-110.
- [10] Leites L P, Robinson A P, Crookston N L. Accuracy and equivalence testing of crown ratio models and assessment of their impact on diameter growth and basal area increment predictions of two variants of the Forest Vegetation Simulator[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, 39(3): 655-665.
- [11] Temesgen H, Lemay V, Mitchell S J. Tree crown ratio models for multi-species and multi-layered stands of southeastern British Columbia[J]. *Forestry Chronicle*, 2005, 81(1): 133-141.
- [12] Hasenauer H, Monserud R A. A crown ratio model for Austrian forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 1996, 84(1): 49-60.
- [13] 覃阳平, 张怀清, 陈永富, 等. 基于简单竞争指数的杉木人工林树冠形状模拟[J]. *林业科学研究*, 2014, 27(3): 363-366.
- [14] Thorpe H C, Astrup R, Trowbridge A, et al. Competition and tree crowns: A neighborhood analysis of three boreal tree species[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(8): 1586-1596.
- [15] 韩大校, 金光泽. 地形和竞争对典型阔叶红松林不同生长阶段树木胸径生长的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(1): 9-19.
- [16] Sharma R P, Vacek Z, Vacek S. Generalized nonlinear mixed-effects individual tree crown ratio models for Norway spruce and European beech[J]. *Forests*, 2018, 9(9): 555-555.
- [17] Fu L Y, Zhang H Y, Lu J, et al. Multilevel nonlinear mixed-effect crown ratio models for individual trees of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) in Northeast China[J]. *Plos One*, 2015, 10(8): e0133294.
- [18] 王金池, 邓华锋, 冉啟香, 等. 基于哑变量的云南松蓄积生长模型[J]. *森林与环境学报*, 2017, 37(4): 453-458.
- [19] 石振威, 曾思齐, 刘发林, 等. 基于地形与竞争因子的青冈栎次生林树高哑变量模型研究[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(1): 196-202 + 272.
- [20] 曹梦, 潘萍, 欧阳勋志, 等. 基于哑变量的闽楠天然次生林单木胸径和树高生长模型研究[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(5): 88-96.
- [21] 段光爽, 王秋燕, 宋新宇, 等. 竞争环境下红松单木树高与胸径的相对生长关系[J]. *林业科学*, 2020, 56(10): 105-112.
- [22] 段光爽, 李学东, 冯岩, 等. 华北落叶松天然次生林树高曲线的混合效应模型[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(2): 163-169.
- [23] Popoola F S, Adesoye P O. Crown ratio models for *Tectona grandis* (Linn. f) stands in Osho Forest Reserve, Oyo State, Nigeria[J]. *Journal of Forest & Environmental Science*, 2012, 28(2): 63-67.
- [24] Dyer M E, Burkhart H E. Compatible crown ratio and crown height models[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, 17(6): 572-574.
- [25] Holdaway M R. Modeling tree crown ratio[J]. *The Forestry Chronicle*, 1986, 62(5): 451-455.
- [26] 袁慧, 杜超群, 赵小涛, 等. 基于混合效应的湖北杉木冠长率模型[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(4): 31-37.
- [27] Adame P, Hynynen J, Cañellas I, et al. Individual-tree diameter growth model for rebollo oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) coppices[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 255(3): 1011-1022.
- [28] 段仁燕, 王孝安, 黄敏毅. 太白红杉径向生长的预测模型[J]. *广西植物*, 2009, 29(2): 212-216.
- [29] 陈东升, 孙晓梅, 李凤日. 落叶松人工林枝条直径和长度的非线性混合模型[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(6): 74-80.
- [30] Carr S, Larocque G R, Luckai N, et al. Effect of competition on individual white spruce production in young boreal mixedwood forests[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2020, 50(8): 726-735.
- [31] 郭明辉. 森林培育措施对红松人工林径向生长性质的影响[J]. *林业科学*, 2003, 39(5): 100-104.
- [32] 严恩萍, 林辉, 洪奕丰, 等. 杉木人工林叶面积指数估测及影响因子分析[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(4): 75-81.
- [33] Mäkelä A, Valentine H T. Crown ratio influences allometric scaling in trees[J]. *Ecology*, 2006, 87(12): 2967-2972.

Influencing Factors on the Crown Ratio of Korean Pine Plantation in Eastern Liaoning Province

LIU Qi-feng¹, CHEN Dong-sheng², FENG Jian³, GAO Hui-lin¹

(1. College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang, 110866, Liaoning, China; 2. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Liaoning Academy of Forestry Sciences, Shenyang 110032, Liaoning, China)

Abstract: [Objective] To study the effects of different competition levels and topography on the canopy length and compare the forest layers, the crown ratio model considering competition and topographic (slope, slope aspect and slope position) variables of *Pinus koraiensis* plantation in eastern area of Liaoning province was developed. [Method] The crown ratio model was developed by incorporating competition index and topographic variable using re-parameterization and dummy variable methods. and the specific topographic variable expressing the largest contribution was selected. The effect of competition and topographic variable on the crown ratio was simulated. [Result] Compared with the basic model, the R^2_a for the final model incorporating competition, topographic variable and forest layer increased by 0.113, $RMSE$ decreased by 0.012. The contributions of competition, slope aspect and forest layer to the crown ratio model were 14.14%、2.25%、0.16%, respectively. The crown ratio decreased with the increase of D and increased with the increase of forest competition. With the increase of the competition, the crown ratio turned from negative growth to positive growth with tree height increasing gradually. The F test showed that there were significant differences in crown ratio between different slope aspects and forest layers, and the change rule was shady slope > semi-sunny slope > sunny slope and upper forest layer > lower forest layer. [Conclusion] Topography and forest competition factors significantly affect the crown ratio, and slope aspect is the most important topographic factor affecting the crown ratio of individual tree of *Pinus koraiensis* plantation. The crown ratio model based on topography and forest competition has high accuracy and provides a reference for the management and growth prediction of *Pinus koraiensis* plantation in eastern area of Liaoning Province.

Keywords: *Pinus koraiensis*; slope aspect; competition; re-parameterization; crown ratio

(责任编辑：彭南轩)