

长白落叶松叶面积回归模型及比叶面积估计

解雅麟¹, 雷相东^{1,2*}, 王海燕¹, 秦倩倩¹, 李翔¹

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091)

摘要: [目的]以吉林省汪清林业局金沟岭林场40株10~40年生生长白落叶松的健康针叶为研究对象,建立叶面积回归模型并估计其比叶面积。[方法]通过WinSEEDLE种子和针叶图像分析系统获取长白落叶松50束共150针的针叶面积、长度、宽度以及周长,再分别烘干至恒质量获得叶片干质量。建立以叶长 L 、叶宽 W 、叶周长 P 和叶片干质量 X 为自变量,叶面积 LA 为因变量的一元、二元和三元线性、指数和幂函数回归模型,并用平均误差、总体相对误差、平均系统误差、平均预估误差和均方根误差等统计量来评价模型误差和拟合优度。采用算术平均法、比估计法和最小二乘法计算比叶面积,并对3种方法的方差进行比较,获取最优估算值。[结果]一元、二元和三元模型均以指数函数最佳,模型分别为 $LA = 5.929 e^{1.313W}$ ($R^2 = 0.858$), $LA = 6.194 e^{(0.023L + 0.637W)}$ ($R^2 = 0.936$)和 $LA = 6.445 e^{(0.021L + 0.598W + 18.067X)}$ ($R^2 = 0.941$)。[结论]算术平均法获取的比叶面积的精度最高,该方法得到的长白落叶松的比叶面积为 $8.026 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

关键词:长白落叶松; 叶面积模型; 比叶面积; WinSEEDLE

中图分类号:S711

文献标识码:A

文章编号:1001-1498(2019)04-0057-07

近年来,植物的功能性状及其影响因子受到各界广泛关注^[1-2]。叶片作为植物与周围环境接触面积最大的器官,其性状的变化对了解植物生长发育及采取相应适应性决策有很大帮助^[3]。叶面积(LA)是衡量植被冠层结构的重要指标^[4]。测定方法主要分为直接测量法和间接测量法。前者主要有透明方格纸法、打孔测定法和剪纸法等;后者主要是通过计算机模型软件的方法获得^[5-6]。直接测量法只能获取叶片的上下表面积,常被用于阔叶树种。而间接测量法如WinSEEDLE种子和针叶图像分析系统软件,因其方便快捷、易于操作,正在被广泛使用。与叶面积相关的另一个指标,比叶面积(SLA)是指单位干质量的叶片面积^[7-8],是植物生理生态学研究叶片性状的首选指标^[9-10]。但比叶面积在实际生活中不易获取,针叶植物或无叶片植物很难测定比叶面积。本研究中比叶面积主要通过3种方法计算获得:1)算术平均法,2)比估计法,3)最小二乘法^[5]。目前,国内相关研究多集中在杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook)^[11-12]、灌木^[13-15]、草本植物^[15-17]和

木本植物^[18-19]等。

长白落叶松(*Larix olgensis* Henry)是我国东北地区三大针叶林用材树种之一。叶线形或倒披针状条形,叶片短而细窄,具有旱生叶的形态特征,叶面积较小。目前有关长白落叶松针叶面积测算的研究如孙志虎等^[20]利用针叶扫描后的图像,将扫描后的叶片轮廓及白纸上已画好的图形跟踪为多边形,利用ArcGIS软件准确求出2类多边形面积(针叶面积和已知面积的多边形),采用比例的方法换算出落叶松针叶的叶面积。李娜等^[21]先采用平台扫描仪结合ImageJava软件的方法对叶面积较大的叶片测算叶面积,再借助LI-COR公司研制的Li-3000A叶面积仪对叶面积较小的叶片测算叶面积。比叶面积的研究也较少,如宋林等^[22]通过留取解析木的部分针叶,基于解析木的针叶生物量及解析木胸径建立了单木针叶生物量模型,再结合每木检尺来测算比叶面积;而李娜等^[21]、全先奎等^[23]是将实测的总叶面积结合叶干质量来直接计算比叶面积,但结果都不一致。

WinSEEDLE是加拿大Regent公司开发的一种专

收稿日期:2018-12-26 修回日期:2019-04-01

基金项目:全国森林经营科技支撑科研专项任务“吉林汪清试点采育兼顾作业法研究及示范”(基金号:169201531-1)

* 通讯作者:雷相东,研究员。E-mail:xdlei@caf.ac.cn

为扫描和测量种子或针叶而设计的图像分析系统,通过分段计算种子或针叶的横断面积而得到长度、宽度、周长和面积等指标。常用于测量形状弯曲不规则的种子或叶片。因此,本研究以长白落叶松为对象,基于 WinSEEDLE 软件,首先建立了针叶面积估计模型,然后比较了 3 种比叶面积的估算方法,为长白落叶松经营和相关研究提供基础参数。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区金沟岭林场位于吉林省汪清县境内东北部(130°05'~130°19'E,43°17'~43°25'N),属长白山系。地貌属低山丘陵,海拔 300~1 200 m,坡度一般在 5°~25°。林区属季风型气候,全年平均气温为 3.9℃左右,多年平均年降水量 600~700 mm。土壤主要是玄武岩中低山暗棕壤类型,平均厚度在 40 cm 左右。该区域森林类型丰富,属于长白山植物区系。

1.2 WinSEEDLE 系统简介

WinSEEDLE 系统由专业版图像分析软件、

STD4800 扫描仪和样品固定装置 3 部分组成。在测量时先预热扫描仪,后启动 WinSEEDLE 图像分析系统,将叶片样本均匀、无接触地放入样品盘中,然后置于扫描仪内进行图像扫描,获得的叶片图像将自动进入图像分析系统。通过系统对叶片图像的检测和分析,可数字化叶片形态学指标,系统自动统计叶片数量,测量单个叶片(或样本平均)长度、宽度、周长、曲度、表面积(或投影面积)和体积等参数。

1.3 叶片的采集和处理

2018 年 8 月,采用典型取样方法从 40 株林龄在 10~40 年的长白落叶松上不同方位(东、西、南、北)、不同部位(枝条前部、中部和后部)采集健康的针叶 50 束共 150 针。用精度为 1/10 000 g 电子天平称取每个针叶的鲜质量,利用中国林科院资源信息研究所的 WinSEEDLE 种子和针叶图像分析系统求取每个针叶的面积、长度、宽度以及周长。然后置于烘箱在 90℃ 下杀青 10 min,之后在 80℃ 下烘干至恒质量^[24-25]。针叶面积、干质量、长度、宽度以及周长统计量见表 1。

表 1 长白落叶松针叶参数统计量

Table 1 The statistics of needle parameters of *Larix olgensis*

统计量 Statistics	针叶面积 Needle area/mm ²	干质量 Dry mass/mg	长度 Length/mm	宽度 Width/mm	周长 Perimeter/mm
最大值 Maximum	84.54	13.1	61.69	2.24	145.09
最小值 Minimum	8.75	0.7	21.18	0.45	47.39
平均值 Average	32.39	4.2	35.77	1.19	81.49
标准差 Standard deviation	17.67	2.0	9.69	0.36	22.92

1.4 研究方法

1.4.1 叶面积回归模型的选择 首先对长白落叶松针叶面积及针叶长、叶宽、叶干质量和叶周长分别进行 Pearson 相关性分析,观察其间是否存在相关关系。分别建立针叶叶面积与叶长、叶宽、叶周长和叶干质量之间的一元、二元和三元回归模型,用于在没有 WinSEEDLE 种子和针叶图像分析系统软件时快速估测叶面积。基于长白落叶松针叶面积与叶长、叶宽、叶周长和叶干质量的散点图,分别采用线性、指数和幂函数三类模型进行拟合(表 2)。随机选取 80% 的数据建模,20% 数据进行模型检验,模型计算用 SPSS18.0 软件完成。

1.4.2 模型的评价与检验 本研究通过计算决定系数(R^2),平均误差(ME)、总体相对误差(TRE)、平均系统误差(MSE)、平均预估误差(MPE)和均方根误差(RMSE)6 种统计量来检验回归模型的误差和拟合优度^[26-28]。在这 6 项指标中, R^2 、ME 和 RMSE 是

表 2 针叶面积回归模型

Table 2 Regression models for needle area estimation

模型 Model	回归方程 Regression equation
一元线性函数	$LA = ax + b$
一元指数函数	$LA = ae^{bx}$
一元幂函数	$LA = ax^b$
二元线性函数	$LA = ax_1 + bx_2 + c$
二元指数函数	$LA = ae^{(bx_1 + cx_2)}$
二元幂函数	$LA = ax_1^b x_2^c$
三元线性函数	$LA = ax_1 + bx_2 + cx_3 + d$
三元指数函数	$LA = ae^{(bx_1 + cx_2 + dx_3)}$
三元幂函数	$LA = ax_1^b x_2^c x_3^d$

注: a, b, c, d 为参数; LA 为叶面积, x 为自变量,包括叶长 L ,叶宽 W ,叶周长 P ,叶干质量 X 。

回归模型的最常用指标,反映了模型的拟合优度; TRE 和 MSE 是反映拟合效果的重要指标,二者都应该控制在一定范围内(如 $\pm 3\%$ 或 $\pm 5\%$),趋于 0 时效果最好; MPE 是反映模型预估精度的核心指标,据此可以评价模型是否达到预期的精度要求。

1.4.3 比叶面积的计算 分别采用算术平均法(式1)、比估计法(式2)和最小二乘法(式3)3种方法来计算比叶面积,并比较选取精度最高的方法。采用比叶面积估计量的方差大小判断3种方法的好坏,即比叶面积估计量的方差越小,其精度越高^[28-29]。将比叶面积和叶长、叶宽、叶周长、叶干质量和叶面积进行Pearson相关性分析,观察它们之间是否存在相关关系。

$$SLA = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{LA_i}{X_i}}{n} \quad (1)$$

$$SLA = \frac{\sum_{i=1}^n LA_i}{\sum_{i=1}^n X_i} \quad (2)$$

$$SLA = \frac{\sum_{i=1}^n LA_i \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \quad (3)$$

式中: n 为所测叶子片数, LA_i 为第*i*片叶子的叶面积, X_i 为第*i*片叶子的干质量。

2 结果与分析

2.1 长白落叶松针叶面积与各变量之间的回归模型

2.1.1 模型的拟合 长白落叶松针叶面积与叶长、叶宽、叶周长和叶干质量之间呈极显著正相关关系(相关系数介于0.797~0.908, $P < 0.01$)。表3是用总针叶的80%即120针叶进行以针叶面积为因变量,以叶长、叶宽、叶周长和叶干质量分别作为自变量的一元线性、指数和幂函数回归方程的模拟结果。从拟合结果可以看出:以叶宽为自变量时,指数方程的决定系数最高,达到0.858。以叶干质量为自变量时,3个方程的决定系数普遍不高,决定系数最大值仅0.645。所有估测模型的总体相对误差均在6.50%以内。以上所有模型的平均误差和均方根误差均较小($ME < 1.93 \text{ mm}^2$, $RMSE < 14.18 \text{ mm}^2$),且平均系统误差均不大。但鉴于以上模型无论自变量取值如何,叶面积估测精度均有待提高,因此考虑建立以针叶面积为因变量,叶长、叶宽、叶周长和叶干质量为自变量的二元和三元回归方程。

表3 针叶面积与针叶各变量之间的一元回归方程

Table 3 Univariate regression equations between needle area and each needle variable

序号 Number	回归方程 Regression equation	调整后的 R^2 Adjusted R^2	平均误差 ME/mm^2	总体相对误差 $TRE/\%$	平均系统误差 $MSE/\%$	平均预估误差 $MPE/\%$	均方根误差 $RMSE/\text{mm}^2$
1	$LA = 1.677L - 27.293$	0.822	-0.01	-0.04	3.32	3.62	7.84
2	$LA = 6.009e^{0.043L}$	0.677	1.46	4.68	5.30	3.63	7.84
3	$LA = 0.078L^{1.665}$	0.657	1.29	4.09	3.94	3.58	7.74
4	$LA = 44.652W - 20.476$	0.802	0.00	0.00	-6.77	3.82	8.26
5	$LA = 5.929e^{1.313W}$	0.858	0.53	1.66	1.97	3.82	8.25
6	$LA = 23.665W^{1.462}$	0.831	1.14	3.60	2.40	3.81	8.24
7	$LA = 0.708P - 25.211$	0.837	0.03	0.08	2.74	3.47	7.51
8	$LA = 6.325e^{0.018P}$	0.691	1.93	6.28	6.81	3.61	7.80
9	$LA = 0.022P^{1.637}$	0.678	1.67	5.37	5.44	3.49	7.55
10	$LA = 7.209.152X + 2.374$	0.645	0.00	0.00	0.32	5.12	11.07
11	$LA = 12.549e^{193.388X}$	0.573	1.29	4.12	6.28	6.56	14.18
12	$LA = 3.638.091X^{0.870}$	0.602	1.91	6.21	5.67	5.27	11.40

表4仅列举了2组效果最优的二元线性、指数和幂函数回归方程。从表中可以看出:二元回归方程的决定系数均较一元回归方程有很大提高。其中,以叶长、叶宽为自变量的回归方程的决定系数最优(介于0.936~0.968)。所有模型的总体相对误差和平均系统误差均较小,且平均误差和均方根误差也较小(ME 在 $\pm 2\%$ 以内, $RMSE < 5.30 \text{ mm}^2$),可以看出:以上回归模型无论自变量如何选取,叶面积

估测精度均较高。为了验证是否三元回归方程精度更高,下一步需要进行三元回归方程的建模。

表5列举了2组效果最优的三元线性、指数和幂函数回归方程。从表中可以看出:三元回归方程的决定系数普遍较高,介于0.939~0.974之间,均优于一元和二元回归方程。其中,以叶长、叶宽、叶干质量为自变量的线性回归方程的决定系数最优,为0.974。从误差统计量可看出:无论自变量如何选

择,回归模型的结果总体上高估了叶面积。同时,各误差统计量均较小(ME 在 $\pm 2\%$ 以内, $RMSE < 4.56$ mm^2),可见三元回归方程预估的叶面积更加准确。

表4 针叶面积与针叶变量组合之间的二元回归方程

Table 4 Binary regression equation between needle area and combination of needle variables

序号 Number	回归方程 Regression equation	调整后的 R^2 Adjusted R^2	平均误差 ME/mm^2	总体相对误差 $TRE/\%$	平均系统误差 $MSE/\%$	平均预估误差 $MPE/\%$	均方根误差 $RMSE/\text{mm}^2$
1	$LA = 1.023L + 25.895W - 34.765$	0.968	0.02	0.05	0.75	1.52	3.30
2	$LA = 6.194e^{(0.023L + 0.637W)}$	0.936	-0.81	-2.42	-4.69	2.20	4.76
3	$LA = 0.817L^{0.977}W^{0.883}$	0.966	-0.13	-0.41	-1.81	1.60	3.45
4	$LA = 24.979W + 0.437P - 32.757$	0.966	-0.02	-0.07	0.17	1.58	3.42
5	$LA = 6.517e^{(0.620W + 0.010P)}$	0.931	-1.77	-5.13	-7.03	2.45	5.30
6	$LA = 0.417W^{0.858}P^{0.948}$	0.961	-0.17	-0.51	-2.02	1.71	3.69

表5 针叶面积与针叶变量组合之间的三元回归方程

Table 5 Ternary regression equation between needle area and combination of needle variables

序号 Number	回归方程 Regression equation	调整后的 R^2 Adjusted R^2	平均误差 ME/mm^2	总体相对误差 $TRE/\%$	平均系统误差 $MSE/\%$	平均预估误差 $MPE/\%$	均方根误差 $RMSE/\text{mm}^2$
1	$LA = 0.944L + 22.932W + 1.096.935X - 33.000$	0.974	-0.01	-0.03	0.82	1.37	2.96
2	$LA = 6.445e^{(0.021L + 0.598W + 18.067X)}$	0.941	-0.71	-2.12	-4.47	2.11	4.56
3	$LA = 2.175L^{0.892}W^{0.806}X^{0.120}$	0.971	-0.12	-0.38	-1.76	1.48	3.20
4	$LA = 21.746W + 0.401P + 1.201.993X - 31.035$	0.973	-0.01	-0.03	0.38	1.40	3.02
5	$LA = 6.790e^{(0.564W + 0.009P + 22.743X)}$	0.939	-1.30	-3.83	-5.92	2.23	4.81
6	$LA = 1.342W^{0.764}P^{0.861}X^{0.140}$	0.968	-0.08	-0.25	-1.70	1.55	3.35

2.1.2 模型检验 为了验证以上回归模型的适用性,用剩下的20%数据对各模型分别进行检验,计算总体相对误差 TRE 和平均系统误差 MSE ,其结果见表6。由误差项可以看出,三元回归模型的各误差统计量较一元和二元回归小,三元回归方程预估的叶面积更加稳定且准确。综合模型拟合及检验的各误差统计量,且考虑到线性方程的外推能力较差,在误差统计量相差不大的情况下,优先选择幂函数形式的非线性模型。由此得到:对于一元回归模型而言,以叶宽 W 为自变量时,估测效果最佳,即 $LA = 5.929e^{1.313W}$ 。对于二元回归模型而言,以叶长 L 、叶宽 W 为自变量时,估测效果最佳,即 $LA = 6.194e^{(0.023L + 0.637W)}$ 。对于三元回归模型而言,以叶长 L 、叶宽 W 和叶干质量 X 为自变量时的估测模型效果最佳,即 $LA = 6.445e^{(0.021L + 0.598W + 18.067X)}$ 。综上所述:长白落叶松针叶面积 LA 与叶长 L 、叶宽 W 和叶干质量 X 之间的估测模型效果为最优,即 $LA = 6.445e^{(0.021L + 0.598W + 18.067X)}$ 。

2.2 比叶面积

表7是算术平均法、比估计法和最小二乘法3种方法所得到的比叶面积及其方差。3种方法所得到的方差相近。其中,以算术平均法计算获得的比叶面积估计值的方差最小,精度最高。由此,本研究

表6 针叶面积与针叶变量之间的回归模型检验

Table 6 Validation of regression models between the needle area and needle variables

回归方程 Regression equation	序号 Number	总体相对误差 $TRE/\%$	平均系统误差 $MSE/\%$
一元回归模型 Unitary regression models	1	-4.50	-2.00
	2	4.81	6.28
	3	1.13	2.09
	4	-4.23	0.13
	5	3.64	3.15
	6	0.51	0.18
	7	-1.79	-0.19
	8	9.95	10.05
	9	5.27	5.55
	10	2.17	4.46
	11	11.64	12.38
	12	7.58	9.33
二元回归模型 Binary regression models	1	-4.16	-2.96
	2	-1.60	-3.30
	3	-2.35	-3.36
	4	-2.71	-2.16
	5	-2.54	-4.56
	6	-1.02	-2.46
三元回归模型 Ternary regression models	1	-3.27	-1.50
	2	-0.79	-2.52
	3	-1.67	-2.50
	4	-1.71	-0.54
	5	-0.79	-2.83
	6	-0.11	-1.31

得到长白落叶松的比叶面积为 $8.026 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。长白落叶松针叶比叶面积与叶长、叶宽、叶周长和叶面积之间呈极显著正相关关系(相关系数在 $0.379 \sim 0.417$ 之间, $P < 0.01$), 与叶干质量呈极显著负相关关系(相关系数为 -0.157 , $P < 0.01$)。

表7 比叶面积的估计值及其方差

Table 7 Estimated value of SLA and its variance

项目 Items	算术平均法 Arithmetic average method	比估计法 Ratio estimation method	最小二乘法 The least square method
SLA / ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	8.026	7.813	7.680
SLA 的方差 Variance of SLA	8.134	8.180	8.255
SLA 的标准差 Standard deviation of SLA	2.852	2.860	2.873

3 讨论

本研究基于 WinSEEDLE 种子和针叶图像分析系统软件对长白落叶松人工林针叶面积及比叶面积进行研究。建立的叶面积模型决定系数基本在 0.7 左右,与以往学者研究结果相似^[5,12]。除了叶面积与针叶干质量之间的一元回归模型决定系数相对较低,仅 0.6 左右,所有模型的拟合及检验统计量相近,说明模型结果具有稳定性及可靠性。用算术平均法、比估计法和最小二乘法 3 种方法获取的比叶面积分别为 8.026 、 7.813 和 $7.680 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。经方差检验发现,算术平均法获取的比叶面积的精度最高。因此,本研究区中长白落叶松的比叶面积为 $8.026 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

宋林等^[22]对三江平原丘陵区的 55 株 13 ~ 40 年生长白落叶松人工林解析木留取部分针叶,得到解析木的针叶生物量及胸径,建立了单木针叶生物量模型,再结合每木检尺,求算比叶面积。由于同林分的多个样本之间比叶面积具有较大差异,因此将 $12.93 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为长白落叶松比叶面积的点估计, $[12.23, 13.63] \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为 95% 的区间估计。李娜等^[21]随机选取 3 株不同施氮处理及不同水分处理的 1 年生长白落叶松幼苗,运用 LI-COR 公司研制的 LI-3000A 叶面积仪测定叶面积,发现长白落叶松幼苗比叶面积为 $12.767 \pm 4.39 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。全先奎等^[23]随机选取不同水热条件的 3 株 30 年生长白落叶松标准木,每株标准木选取冠层上部向阳的当年生枝新生针叶 3 簇,测定其针叶水分利用效率及其相关因子,其中得到长白落叶松比叶面积为

$13.513 \pm 8.11 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。本研究结果与以上研究有一定差异,其原因可能在于:本研究的区域为长白山区,与以上研究的长白落叶松生长区域不同;人为取样方法也不同,如:宋林等先确定了不同林龄长白落叶松样地所处林分阳生叶及阴生叶的位置(林缘阳光是否直射),进而选取位于 3 株不同样木上的代表性样枝 3 枝;而全先奎等是选取冠层上部向阳的当年生叶片,然后不同处理分别取针叶 0.03 g 测定叶面积。

而对于其它针叶树种,如:夏国威^[30]以甘肃省小陇山林区 3 年生、8 年生和 20 年生日本落叶松人工林为研究对象,发现林龄、取样月份和冠层发育是影响日本落叶松比叶面积的重要因素,得到日本落叶松比叶面积在 $6.846 \sim 13.897 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。刘宁^[31]设置了林窗和林冠下 2 种光照环境,并林下更新华北落叶松,测量树种的比叶面积,得到华北落叶松的比叶面积为 $7.565 \pm 0.82 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Fellner 等^[32]研究发现欧洲落叶松的比叶面积是 $11.7 \pm 2.8 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

有相关研究表明,在郁闭林内进行的更新,落叶植物与常绿植物相比有着较高的比叶面积^[33-34]。通常来讲,生活在相对贫瘠的环境中的植物具有较小的比叶面积,而将更多的干物质投入用于抵御不良环境^[35]。而长白落叶松人工林土壤易酸化,肥力不高,随着时间推移可供林分利用的资源相对较少,此生境中落叶松比叶面积值相对较低是落叶松适应贫瘠环境的结果。胡耀升等^[36]通过研究发现:比叶面积随演替的发生和进行呈显著增加趋势($P < 0.05$)。同时,比叶面积与海拔、坡位和土壤全氮含量均呈显著正相关关系,与其他影响因子无显著相关关系。比叶面积反映了物种在长期进化过程中对其生存环境的适应特征。因此,应根据区域选择适合的比叶面积。

本研究的采样地点仅限于一个林场,采用典型抽样的方法进行取样,研究结果受采样地点林分情况和针叶位置的影响,下一步可扩大采样范围,探讨环境因子和发育阶段对叶面积值的影响。

4 结论

通过 WinSEEDLE 软件获得单个针叶的多个形态指标,建立了长白落叶松针叶面积与叶长、叶宽等形状属性及针叶干质量之间的一元、二元和三元回归模型。通过检验发现:以叶宽 W 为自变量时, LA

= $5.929e^{1.313W}$ 的估测效果最佳;以叶长 L 、叶宽 W 为自变量时, $LA = 6.194e^{(0.023L+0.637W)}$ 的估测效果最佳;以叶长 L 、叶宽 W 和叶干质量 X 为自变量时, $LA = 6.445e^{(0.021L+0.598W+18.067X)}$ 的估测模型效果最佳。经方差检验发现算术平均法获取的比叶面积的精度最高。因此,本研究区长白落叶松的比叶面积为 $8.026 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,且针叶比叶面积随着叶长、叶宽、叶周长和叶面积的增加而增加,呈极显著正相关关系,与叶干质量呈极显著负相关关系。

参考文献:

- [1] Chapin F S, Zavaleta E S, Eviner V T, et al. Consequences of changing biodiversity[J]. Nature, 2000, 405(6783): 234-242.
- [2] Hooper D U, Chapin F S, Ewel J J, et al. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge[J]. Ecological Monographs, 2005, 75(1): 3-35.
- [3] Lavorel S, Garnier E. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail[J]. Functional Ecology, 2010, 16(5): 545-556.
- [4] Kim J H, Lee J W, Ahn T I, et al. Sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) canopy photosynthesis modeling using 3D plant architecture and light ray-tracing [J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7(887): 1321.
- [5] 刁 军, 国 红, 卢 军, 等. 油松针叶面积估计模型及比叶面积的研究[J]. 林业科学研究, 2013, 26(2): 174-180.
- [6] 谭 峰, 高艳萍. 基于图像的植物叶面积无损测量方法研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 170-173.
- [7] Evans J, Poorter H. Photosynthetic acclimation of plants to growth irradiance: The relative importance of SLA and nitrogen partitioning in maximizing carbon gain[J]. Plant, Cell & Environment, 2001, 24(8): 755-767.
- [8] Cunningham S A, Summerhayes B, Westoby M. Evolutionary divergences in leaf structure and chemistry, comparing rainfall and soil nutrient gradients[J]. Ecological Monographs, 1999, 69(4): 569-588.
- [9] Rosbakh S, R Mermann C, Poschlod P. Specific leaf area correlates with temperature: new evidence of trait variation at the population, species and community levels[J]. Alpine Botany, 2015, 125(2): 79-86.
- [10] Weraduwege S M, Chen J, Anozie F C, et al. The relationship between leaf area growth and biomass accumulation in *Arabidopsis thaliana*[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 167-188.
- [11] 彭 曦, 闫文德, 王凤琪, 等. 基于叶干质量比的杉木比叶面积估算模型的构建[J]. 植物生态学报, 2018, 42(2): 209-219.
- [12] 李 凯, 项文化. 湘中丘陵区 12 个树种比叶面积、SPAD 值和种子干质量的比较[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(5): 213-218.
- [13] 王子奇, 查天山, 贾 昕, 等. 油蒿光合参数季节动态及其与叶氮含量和比叶面积的关系[J]. 生态学杂志, 2017, 36(4): 916-924.
- [14] 任 昱, 卢 琦, 吴 波, 等. 不同模拟增雨下白刺比叶面积和叶干物质含量的比较[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4707-4715.
- [15] 林 华, 陈双林, 郭子武, 等. 苦竹叶片性状及其异速生长关系的密度效应[J]. 林业科学研究, 2017, 30(4): 617-623.
- [16] 刘铁梅, 邹 薇, 刘铁芳, 等. 不同冬油菜品种比叶面积的多因子分析[J]. 作物学报, 2006, 32(7): 1083-1089.
- [17] 李玉霖, 崔建垣, 苏永中. 不同沙丘生境主要植物比叶面积和叶干物质含量的比较[J]. 生态学报, 2003, 25(2): 304-311.
- [18] 曹林青, 钟秋平, 罗 帅, 等. 干旱胁迫下油茶叶片结构特征的变化[J]. 林业科学研究, 2018, 31(3): 136-143.
- [19] 陶骏骏, 王海晖, 姚奉奇, 等. 木本植物叶片热值测试和分析[J]. 林业科学研究, 2018, 31(2): 48-54.
- [20] 孙志虎. 长白落叶松人工用材林长期生产力维持的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.
- [21] 李 娜. 落叶松幼苗对干旱胁迫及氮添加的生理生态响应[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [22] 宋 林, 孙志虎. 长白落叶松人工林叶面积指数测定[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(9): 6-9.
- [23] 全先奎, 王传宽. 帽儿山 17 个种源落叶松针叶的水分利用效率比较[J]. 植物生态学报, 2015, 39(4): 352-361.
- [24] Chen B, Fu Z, Pan Y, et al. Single leaf area measurement using digital camera image[C]// International Conference on Computer & Computing Technologies in Agriculture. Springer Berlin Heidelberg, 2011, 345: 525-530.
- [25] Waring R H, Schroeder P E, Oren R. Application of the pipe model theory to predict canopy leaf area[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1982, 12(3): 556-560.
- [26] Diao J, Lei X D, Hong L X, et al. Single leaf area estimation models based on leaf weight of eucalyptus in southern China[J]. Forest Research, 2010, 21(1): 73-76.
- [27] Diao J, Lei X, Hong L, et al. Estimating single leaf area of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* using leaf length and width [C]// Third International Symposium on Plant Growth Modeling. IEEE, Beijing, China, 2010.
- [28] 唐守正. 生物数学模型的统计学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [29] 曾伟生, 唐守正. 立木生物量方程的优度评价和精度分析[J]. 林业科学, 2011, 47(11): 106-113.
- [30] 夏国威. 日本落叶松人工林冠层光合生产力研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [31] 刘 宁, 张芸香, 郭晋平, 等. 华北落叶松-白杆混交林下更新幼苗幼树的功能特性[J]. 林业科学, 2010, 46(7): 22-29.
- [32] Fellner H, Dirnberger G F, Sterba H. Specific leaf area of European Larch (*Larix deciduas* Mill.): [J]. Trees, 2016, 30(4): 1237-1244.
- [33] Sterck F J, Poorter L, Schieving F. Leaf traits determine the growth - survival trade - off across rain forest tree species[J]. The A-

merican Naturalist, 2006, 167(5): 758–765.

- [34] Catoni R, Gratani L, Sartori F, *et al.* Carbon gain optimization in five broadleaf deciduous trees in response to light variation within the crown: correlations among morphological, anatomical and physiological leaf traits[J]. Acta Botanica Croatica, 2015, 74(1): 71–94.

- [35] Brian A, Nishanta R, David A, *et al.* Ecological strategies in California chaparral: interacting effects of soils, climate, and fire on specific leaf area[J]. Transactions of the Botanical Society of Edinburgh, 2011, 4(2–3):10.

- [36] 胡耀升, 么旭阳, 刘艳红. 长白山森林不同演替阶段比叶面积及其影响因子[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1480–1487.

Needle Area Regression Model and Specific Leaf Area Estimation of *Larix olgensis*

XIE Ya-lin¹, LEI Xiang-dong^{1,2}, WANG Hai-yan¹, QING Qian-qian¹, LI Xiang¹

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Research Institute of Forest Resources Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] A total of 50 healthy clusters about 150 needles were sampled from 40 *Larix olgensis* trees at the age of 10 to 40 years in Jingouling Forest Farm of Wangqing Forestry Bureau, Jilin Province, for the establishment of leaf area regression models and estimation of specific leaf area. [Method] The needle area, needle length, needle width and needle perimeter were obtained using WinSEEDLE software, and the needles were dried to a constant weight to obtain the needle dry mass. The unitary, binary and ternary regression models were established with needle length (L), needle width (W), needle perimeter (P) and needle dry mass (M) as independent variables and needle area (LA) as a dependent variable. Linear, exponential and power function models were used for fitting. The mean error, total relative error, mean system error, mean prediction error and root mean square error were used to verify the errors and evaluate the goodness of model fitting. The variance of arithmetic average method, ratio estimation method and the least square method was compared to obtain the specific leaf area of *Larix olgensis*. [Result] $LA = 5.929e^{1.313W}$ ($R^2 = 0.858$), $LA = 6.194e^{(0.023L + 0.637W)}$ ($R^2 = 0.936$) and $LA = 6.445e^{(0.021L + 0.598W + 18.067X)}$ ($R^2 = 0.941$) are proved to be the best unitary, binary and ternary regression models. [Conclusion] The arithmetic average method is the best for specific leaf area estimation of *L. olgensis* which is $8.026 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$.

Keywords: leaf area model; specific leaf area; *Larix olgensis*; WinSEEDLE

(责任编辑:彭南轩)