

6种西番莲属(*Passiflora*)植物叶面积经验模型构建

吴凤婵¹, 李安定^{2,3}, 蔡国俊², 谭仲廷¹, 杨 瑞^{1*}

(¹贵州大学林学院, 贵阳 550025; ²贵州科学院贵州省山地资源研究所, 贵阳 550001;
³贵州科学院贵州省生物研究所, 贵阳 550009)

摘要:【目的】构建6种西番莲属植物最优叶面积(LA)经验模型,为这6种西番莲属植物生理生态及栽培技术等方面的研究提供理论基础,初步探讨LA模型构建的一般规律。【方法】以6种西番莲属植物叶片为研究材料,采用计算机图像法测量各树种叶片长(L)、叶片宽(W)、叶片面积(LA),并以LA为因变量,L、W及LL、WW、LW为自变量,选取12种目标模型,分别构建各物种LA经验模型,选取其中2个叶形相似、叶长宽比相近的西番莲属植物合并建模,并对这些模型进行评估以筛选出最优LA经验模型。【结果】6种西番莲属植物的最优LA经验模型分别为:紫果西番莲:LA=0.529 L^{1.141}W^{0.868};樟叶西番莲:LA=0.828 L^{0.933}W^{1.054};尤卡坦西番莲:LA=0.665 L^{0.665}W^{1.367};西番莲:LA=0.559 L^{1.154}W^{0.797};龙珠果:LA=0.763 L^{0.64}W^{1.327};玛格丽特女士西番莲:LA=0.6 L^{0.213},6种西番莲属植物的最优LA经验模型预测精度范围为91.28%~95.54%,紫果西番莲与玛格丽特女士西番莲合并构建的最优LA模型的预测精度为(92.08±0.56)%。【结论】构建LA经验模型预测这6种西番莲属植物LA预测精度均在90%以上,说明构建LA经验模型预测这6种西番莲科西番莲属植物的LA是可靠的;2种叶形相似、叶长宽比相近的西番莲属植物合并建模,得到的模型预测精度较高,初步表明叶形相似、叶长宽比相近的植物合并建模预测LA具有一定的可行性。

关键词:西番莲属;叶面积;经验模型;分类拟合

中图分类号:S667.9

文献标志码:A

文章编号:1009-9980(2021)09-1600-11

Construction of empirical models for leaf area estimation in six *Passiflora* species

WU Fengchan¹, LI Anding^{2,3}, CAI Guojun², TAN Zhongting¹, YANG Rui^{1*}

(¹College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; ²Institute of Mountain Resources, Guizhou Academy of Science, Guiyang 550001, Guizhou, China; ³Guizhou Biological Institute, Guizhou Academy of Science, Guiyang 550009, Guizhou, China)

Abstract:【Objective】*Passiflora* belongs to the Passifloraceae, most species of which belong to perennial vines. Edible passionflower is cultivated widely, and is mainly produced abroad in North America, South America, Australia, Malaysia and southern Africa and other countries and regions. Passionflower and the dominant companion species can be mutually beneficial and symbiotic, adapt to the environment, growing rapidly, and have high yield. Cultivating excellent varieties of passionflower as an economic fruit tree in rocky desertification areas can promote the development of local industries. At present, there are few studies on the construction of empirical models for estimation of leaf area of *Passiflora* plants. The size and distribution of plant leaf area (LA) directly affect the ability of leaves to intercept sunlight, carry out carbon utilization and gain the productivity of plant communities. LA is often used as a basic parameter to measure plant photosynthesis capacity, and is used in plant physiology, pathology, and crop breeding, agriculture and forestry production and management, model estimation,

收稿日期:2021-01-26 接受日期:2021-06-18

基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2020]1Y015号、黔科合服企[2019]4004-2、黔科合平台人才[2017]5720-003);国家自然科学基金(31960576);贵州科学院青年基金(黔科院J字[2018]19号)

作者简介:吴凤婵,女,研究方向为林业生理生态。Tel:18685526738,E-mail:1006899764@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel:13608507646,E-mail:yr553017@163.com

etc. Simple, fast and accurate detection of leaf area is of great significance for guiding the reasonable high-density planting, the adjustment of population structure, variable fertilization and precise sprinkling irrigation to obtain high yield. This paper aimed to construct the optimal leaf area estimation model for 6 species in *Passiflora*. The empirical model for leaf area estimation can provide basic parameters for studying the physiological ecology and cultivation techniques for Passifloraceae *Passiflora*. **【Methods】** In this study, six species of Passifloraceae *Passiflora*, i.e., *P. edulis*, *P. yucatanensis*, Lady Margaret, *P. foetida*, *P. caerulea* and *P. laurifolia* served as the research samples and these plants were planted in Kedu Town Passion Fruit Production and Academic Research Base, Guizhou Province Mountain Resources Research Institute in March 2020. In August 2020, sample plants were randomly selected with the same growth vigor from each species, good-growing branches were randomly selected from each tree, and about 200 sample mature leaves with typical characteristics and without pests and diseases were picked up from each tree species on 2th, 4th, 6th, 8th and 10th internodes from the end of the branches. After the sample leaves were collected, they were marked, packaged and brought back to the laboratory. Place the leaf flat on an Epson850 scanner and scan it to obtain the leaf image. Use the Digimizer digital image method to measure the leaf length, width and area. Take the maximum length of the leaf as L, the approximate maximum width of the leaf as W, and the area as LA. Select 12 target models, including linear and non-linear equations, respectively, to construct LA empirical models for each species. Select two species with similar leaf shapes to merge modeling, and screen and evaluate these models, so as to select the basis for the optimal empirical model. The optimal empirical model was selected according to the R^2 , AIC and RMSE values of each empirical model. The optimal empirical model was selected as the model with the R^2 closest to 1, minimum AIC and RMSE values. When the best AIC difference between the first two empirical models is less than 2, the model with the smaller RMSE value is selected as the optimal empirical model. In order to further evaluate the reliability of the empirical model, the predicted value of LA is calculated based on the optimal empirical model, and the distribution of its residuals is analyzed. When the distribution is approximately normal and most residual points fall within ± 3 times of the standard deviation of the residual average if the empirical model is within the range of the measured value of LA as y and the predicted value as x to test the fitting effect of the regression equation. According to the closeness of the slope of the regression line to 1, the size of the intercept and the coefficient of determination R^2 , the degree of agreement between the predicted value and the actual value is determined. At the same time, based on the optimal experience model, the prediction accuracy of each species LA is calculated. **【Results】** The results showed that the R^2 of leaf area modeling for each species was higher, and the optimal LA empirical model for each species were: *P. edulis*: $LA=0.529L^{1.141}W^{0.868}$; *P. laurifolia*: $LA=0.828L^{0.933}W^{1.054}$; *P. yucatanensis*: $LA=0.665L^{0.665}W^{1.367}$; *P. caerulea*: $LA=0.559L^{1.154}W^{0.797}$; *P. foetida*: $LA=0.763L^{0.64}W^{1.327}$ and Lady Margaret: $LA=0.6L^{0.213}$. The optimal LA empirical model of each species is the optimal independent variable to construct the LA empirical model. Each model meets various evaluation criteria, such as *P. edulis*, *P. laurifolia*, *P. yucatanensis*, *P. caerulea*, *P. foetida* and Lady Margare. The prediction accuracy of the optimal empirical model is $91.28\% \pm 0.58\%$, $94.35\% \pm 0.63\%$, $95.54\% \pm 0.27\%$, $92.59\% \pm 1.62\%$, $96.88\% \pm 1.34\%$ and $94.25\% \pm 0.78\%$. The leaf surface parameters of two species with similar aspect ratios were merged and modeled, and the two species with similar leaf length and width ratios were *P. edulis* and Lady Margaret. The leaf surface parameters of two species with similar leaf length and width ratios were merged and modeled. The optimal empirical model predicted LA with accuracy of $92.63\% \pm 0.81\%$, and the optimal model for combined modeling is $LA=0.52L^{1.195}W^{0.822}$. **【Conclusion】** The LA empirical model was constructed to predict

the LA of 6 species in Passifloraceae *Passiflora* and the LA prediction accuracy reached more than 90%. LA is reliable, two species with similar leaf shapes and leaf length-to-width ratios can be combined and modeled, and the model accuracy is ($92.63 \pm 0.81\%$). The construction of the LA empirical model can classify the leaves according to the leaf shape and leaf length-to-width ratio, and build the LA model with certain reliability. Using 6 species of *Passiflora* plants in the Passifloraceae as research materials, the computer image method is used to measure the leaf length (L), leaf width (W), and leaf area (LA) of each species, with LA as the dependent variable and L, W and LL, WW, LW as the independent variables. Twelve target models are selected, the LA estimation empirical model for each species is constructed respectively, two species with similar leaf shapes are selected and combined for modeling, and these models are screened and evaluated. With a view to constructing an empirical model for estimating the optimal LA of 6 species of *Passiflora* plants in the Passifloraceae, it will provide a basic theory for the study on *Passiflora* plants in the Passifloraceae, and will preliminary discuss the general rules of LA model construction. The results show that the optimal empirical models of the six species: *P. edulis*: $LA=0.529 L^{1.141}W^{0.868}$; *P. yucatanensis*: $LA=0.828 L^{0.933}W^{1.054}$; Lady Margaret: $LA=0.665 L^{0.665}W^{1.367}$; *P. foetida*: $LA=0.559 L^{1.154}W^{0.797}$; *P. caerulea*: $LA=0.763L^{0.64}W^{1.327}$ and *P. laurifolia* : $LA=0.6 L^{0.213}$. The optimal LA empirical model of each species corresponds to the optimal independent variable of the LA empirical model. Studies have shown that the LA empirical model is constructed to predict the LA of these 6 species of *Passiflora* plants in the Passifloraceae, and the LA prediction accuracy is above 90%, indicating that the LA empirical model is reliable. The combined modeling of two species with similar leaf shape and leaf length-to-width ratio yields a model prediction accuracy of $92.63\% \pm 0.81\%$, which preliminarily shows that the combined modeling of tree species with similar leaf shape and leaf length-to-width ratio has certain reliability to predict LA.

Key words: *Passiflora*; Leaf area; Empirical model; Classified fitting

叶片是植物光合作用的重要器官。叶片大小对植物光能利用、水分蒸腾、生长和衰老、干物质积累及经济效益有着显著的影响,叶面积作为植物功能性状的重要指标,已广泛应用于评价植物生态适应性、碳同化能力等多方面^[1-2]。测算植物叶面积的方法有多种,常用的LA测量方法有称质量法、方格纸法、LA仪法等,这些经典方法目前技术成熟,但操作复杂、费时费力且为破坏性测定,无法用于长期监测叶片生长状况^[2-3]。计算机图像处理技术在不断普及和提高,其处理步骤简单,操作实时,破坏性小,LA测定结果准确,已广泛应用于农业和林业的各领域^[4-8],已有对葡萄^[9-10]、木薯^[11]、火棘^[12]、枣^[13]、棉花^[4]、竹类^[14]、杉木^[15]等植物的研究。近年来,LA经验模型构建的研究不再仅限于一种植物叶片单独构建模型,而是尝试多种类植物合并构建通用模型。张萌等^[13]对8个枣树品种进行合并构建LA模型,结果表明8个枣树品种可合并建模,无需针对单个品种进行建模,施月园等^[16]对8个阔叶树种按不同生长期和不同叶长宽比分类进行合并建模并用2种灌木

进行验证,结果表明对不同叶生长期的叶片需构建不同经验模型来预测LA,以8个阔叶树种的叶长宽比为分类标准对多种阔叶树进行合并建模是可行的。

西番莲属(*Passiflora*)为西番莲科(Passifloraceae)内最大的一个属,约有500个种,均为草本或木质藤本多年生植物,其中可以食用的有60余种,且大量实验证明西番莲属植物提取物有药用价值^[17]。近几年西番莲属的紫果西番莲(又名百香果)作为重要的水果产业在全国迅速推广,种植面积和鲜果产量正逐年增加。在喀斯特山区,西番莲与优势伴生种能互利共生、适应环境、生长迅速、产量高,培育西番莲优良品种作为经济果树可促进地方产业发展^[18]。笔者在本研究中选取的是引种到贵州栽培适应性较好的6种西番莲属植物,6种植物叶片形态差异显著,其中紫果西番莲*P. edulis*、樟叶西番莲*P. laurifolia*作为水果在全国被广泛推广栽培,尤卡坦西番莲*P. yucatanensis*和西番莲*P. caerulea*、玛格丽特女士西番莲*Passiflora* ‘Lady Margaret’、龙珠果*P. foetida*花叶观赏性较好可作为观赏植物繁育研

究。目前,关于西番莲属植物叶面积估算经验模型构建的研究甚少,对藤本植物叶面积模型构建的研究同样较少,对于多种植物合并构建通用模型的分类标准也有待进一步探讨。

本研究选取6种西番莲属植物为对象,使用计算机软件统计叶片的形态参数(叶长,叶宽)、叶面积,参考前人的研究成果,选取4个模型方程和不同的形态参数为自变量组合,每个树种构建12个常用线性、非线性LA经验模型,根据数学方法,筛选出最优LA经验模型,并对最优经验模型的预测精度进行评价。笔者在本研究中构建6种西番莲属植物叶面积估算经验模型,便于田间快速测定叶面积,为这6种西番莲属植物的植物学、生态学研究提供基础参数;同时为研究栽培品种的生长规律、精准栽培管理技术等提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地概况

研究区域位于黔南平塘县克度镇(106°50'32"~107°11'47"E,25°38'19"~25°59'9"N),该区域位于贵州南部,属中亚热带岩溶喀斯特地貌,平均海拔708 m,属中亚热带季风湿润气候区,冬暖夏凉,光照适宜,热量丰富,雨量充盈,无霜期长,年均温16.7 °C、年均降水量1217 mm。

1.2 方法

1.2.1 研究材料 以西番莲科西番莲属的紫果西番莲、尤卡坦西番莲、玛格丽特女士西番莲、龙珠果、西番莲、樟叶西番莲6种植物为对象,2020年3月将幼苗种植于贵州省山地资源研究所克度镇百香果产学研基地,种植搭架采用直立柱单层架,按株行距为200 cm×200 cm,定植穴深(H)不低于40 cm、直径(D)不低于40 cm,每穴中加入4 kg有机肥和0.5 kg过磷酸钙,与土混匀,覆土厚度约5 cm,定植后保持土壤含水量在60%~70%为宜,雨天及时清沟排涝。

1.2.2 样本采集与数据收集 以6种西番莲属植物为研究对象,2020年8月,新梢生长速度放缓,参照张钰等^[9]的方法每种植物随机选取5株,生长健壮,长势基本一致、无病虫害的植株,每株树上随机抽选长势良好的枝条,从枝条末端按照2、4、6、8、10……叶序摘取无病虫害、特征典型的叶片,每株树上采集约40枚叶片,每个物种共采集不少于200枚的样叶^[9]。样叶采集后,平整放入装有冰袋的保鲜盒防

止叶片卷曲、皱缩,标记封装带回实验室。将叶片平整置于Epson850扫描仪上扫描,获得叶片图像,6个物种叶片获取的图像数量为218~261,使用Digimizer数字图像法^[3]测量叶片长、宽、面积,将叶片的最大长度作为L,叶片的近似最大宽度作为W,叶面积记为LA。

1.2.3 经验模型的构建 在各树种所有样叶数据中,随机选取75%的数据用于构建预测LA经验模型,剩余25%的数据用于评估经验模型的预测精度。本研究共选取12个叶面积目标模型,如表1所示。用加权最小二乘法解出方程系数并进行计算得出叶面积拟合面积模型,使用SPSS、Origin等软件计算方程参数、制图表。

表1 叶面积目标模型

Table 1 Leaf area target model

模型序号 Model order	自变量 Independent variable	模型 Model Model	模型序号 Model order	自变量 Independent variable	模型 Model Model
1	L	$y=aL+b$	7	W	$y=aW^b$
2	W	$y=aW+b$	8	LL	$y=aLL^b$
3	LL	$y=aLL+b$	9	WW	$y=aWW^b$
4	WW	$y=aWW+b$	10	LW	$y=aLW^b$
5	LW	$y=aLW+b$	11	L;W	$y=aL+bW$
6	L	$y=aL^b$	12	L;W	$y=aL^bW^c$

1.2.4 最优经验模型的筛选 最优经验模型的筛选依据各经验模型的R²、AIC值及RMSE值来判定:选择R²最接近1、AIC值和RMSE值最小的模型为最优经验模型;当选择最优的前2个经验模型间AIC的差值小于2时,选择RMSE值较小的模型为最优经验模型。决定系数(R²)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和AIC(Akaike information criterion)赤池信息准则,各参数计算公式如下^[16,19]:

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^n(y_i-f_i)^2}{\sum_{i=1}^n(y_i-\bar{y})^2} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(y_i-f_i)^2}{n}} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

$$AIC=2K+n[\ln 2\pi \frac{\sum_{i=1}^n(y_i-f_i)^2}{n}+1] \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

式中y为实测值,f为预测值,n为样本数,K为经验模型中参数的个数;n为样本数;y_i为第i个样本的实测值;f_i为第i个样本的预测值。

1.2.5 最优经验模型的评估检验 基于最优经验模型计算得到LA的预测值,分析其残差的分布情况,当近似正态分布且大部分残差点落在残差平均值±3倍标准差的范围内时,认为该经验模型可靠、合理^[16,19]。

为进一步评估经验模型的可靠性,利用剩余25%的数据进行线性回归分析,基于筛选出的最优模型计算,以LA实测值为y,预测值为x,检验回归方程的拟合效果。根据回归线斜率与1接近程度、截距的大小以及决定系数R²,来判定预测值和实际值的吻合程度。同时基于最优经验模型,计算各树种LA的预测精度(FC),计算公式如下:

$$FC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 - abs \frac{(y_i - f_i)}{y_i}) \times 100\%$$

式中y为实测值,f为预测值,n为样本数,y_i为第i个样本的实测值;f_i为第i个样本的预测值;n为样本数;abs表示绝对值函数。

2 结果与分析

2.1 叶片形态参数分析

本文研究的各种西番莲属植物叶片形态特征如图1所示,6种植物的叶片形态各不相同,对本次取样的各物种叶片形态参数统计分析(表2),紫果西番莲的叶面积、叶长、叶宽变异系数均是最大,叶面积变异系数最小的是尤卡坦西番莲,叶长变异系数最小的是龙珠果,叶宽变异系数最小的是玛格丽特女士西番莲。

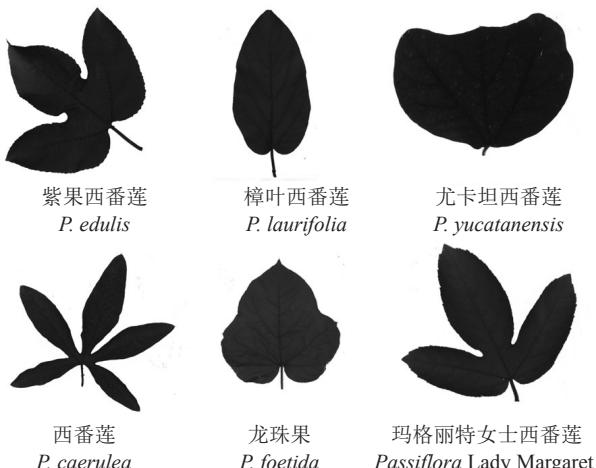


图1 6种西番莲属植物叶片形态

Fig. 1 Leaf morphology of 6 *Passiflora* plants

表2 6种西番莲属植物叶片的叶长、叶宽、叶面积统计

Table 2 Statistics of Leaf Length (L), Leaf Width (W), Leaf area (LA) for six *Passiflora* species

种名 Species	L/cm		W/cm		L/W		LA/cm ²	
	平均值±标准差 Mean±SD	变异系数 CV/%	平均值±标准差 Mean±SD	变异系数 CV/%	平均值±标准差 Mean±SD	变异系数 CV/%	平均值±标准差 Mean±SD	变异系数 CV/%
紫果西番莲 <i>P. edulis</i>	13.93±3.68 Aa	26.43	16.44±3.08 Aa	24.82	0.85±0.14 Cc	16.47	132.34±63.65 Aa	48.09
樟叶西番莲 <i>P. laurifolia</i>	12.57±2.64 Bb	20.99	6.79±1.84 Ee	27.12	1.90±0.30 Aa	15.79	68.18±27.55 Bb	40.40
尤卡坦西番莲 <i>P. yucatanensis</i>	4.70±0.93 Ee	19.95	8.01±1.19 Dd	22.29	0.58±0.05 Ee	8.62	32.79±11.23 Dd	34.25
西番莲 <i>P. caerulea</i>	7.94±1.66 Dd	20.96	11.31±2.52 Bb	22.29	0.71±0.07 Dd	9.86	44.79±18.63 Cb	41.59
龙珠果 <i>P. foetida</i>	8.91±1.60 Cc	17.86	9.63±2.02 Cc	20.94	0.93±0.06 Bb	6.45	65.30±25.59 Bb	39.18
玛格丽特女士西番莲 <i>Passiflora</i> Lady Margaret	8.78±1.68 Cc	19.14	10.23±1.79 Cc	17.48	0.86±0.06 Cc	6.98	50.24±21.81 Cb	43.41

注:同列不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$);同列不同大写字母表示差异极显著($p < 0.01$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level; Different capital letters in the same column indicate extremely significant difference at 0.01 level.

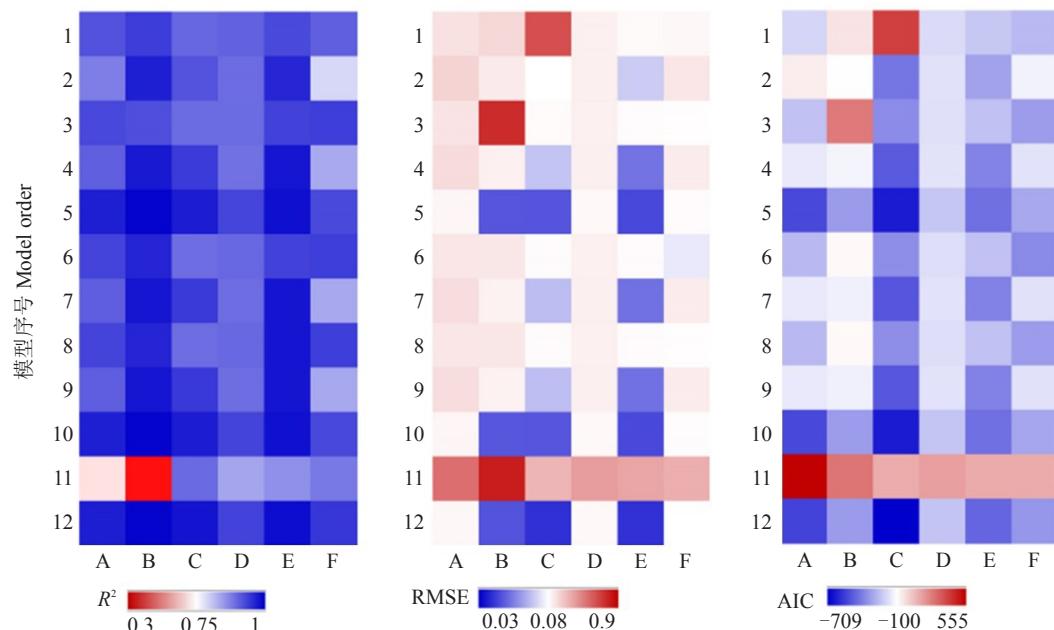
2.2 最优经验模型的构建

6种植物叶面参数拟合12种目标模型的系数和精度如表3和图2所示,各拟合模型的R²、RMSE和AIC值分别介于0.327~0.997 0、0.039 5~0.808 2、-708.26~554.69,除紫果西番莲和樟叶西番莲叶面

积参数拟合模型11的决定系数小于0.9,其他拟合模型的决定系数均大于0.9。各物种最优叶面积估算模型各项参数、模型精度如表4所示,前5种植物的最优模型方程都是 $y=L^bW^c$,最后一种植物玛格丽特女士西番莲的最优自变量是L;并且本研究选取

表3 6种西番莲属植物叶面积经验模型参数
Table 3 Parameter of empirical models for leaf area of six *Passiflora* species

模型序号 Model order	紫果西番莲 <i>P. edulis</i>		樟叶西番莲 <i>P. laurifolia</i>		尤卡坦西番莲 <i>P. yucatanensis</i>		西番莲 <i>P. caerulea</i>		龙珠果 <i>P. foetida</i>		玛格丽特女士西番莲 <i>Passiflora Lady Margaret</i>	
	a	b/c	a	b/c	a	b/c	a	b/c	a	b/c	a	b/c
1	12.604	-55.729	6.073	-14.403	10.865	-18.148	9.012	-29.084	13.834	-60.538	10.075	-39.878
2	10.520	-53.771	12.050	-15.456	7.791	-30.458	6.383	-29.410	10.867	-40.835	8.182	-36.910
3	0.581	3.049	0.392	2.569	1.173	5.659	0.635	1.415	0.831	-4.627	0.614	0.197
4	0.431	1.590	1.428	0.355	0.517	-1.650	0.316	1.373	0.629	4.160	0.440	0.023
5	0.534	-0.881	0.774	-0.136	0.823	1.009	0.470	0.022	0.740	-1.017	0.545	-1.668
6	0.894	1.849	0.418	1.974	2.575	1.626	0.881	1.859	0.537	2.164	0.600	2.013
7	0.525	1.935	1.898	1.855	0.357	2.153	0.446	1.873	0.975	1.839	0.368	2.077
8	0.894	0.924	0.418	0.987	2.575	0.813	0.881	0.930	0.537	1.082	0.600	1.006
9	0.525	0.967	1.898	0.928	0.359	1.075	0.446	0.936	0.975	0.919	0.368	1.039
10	0.506	1.008	0.786	0.996	0.956	0.968	0.528	0.974	0.678	1.016	0.395	1.063
11	9.920	-4.014	4.100	-5.010	-3.944	5.549	0.721	2.354	6.172	-0.661	0.060	3.774
12	0.529	1.141/0.867	0.828	0.933/1.054	0.665	0.665/1.367	0.559	1.154/0.799	0.763	0.64/1.327	0.495	1.671/0.401



A. 紫果西番莲;B. 樟叶西番莲;C. 尤卡坦西番莲;D. 西番莲;E. 龙珠果;F. 玛格丽特女士西番莲。

A. *P. edulis*; B. *P. laurifolia*; C. *P. yucatanensis*; D. *P. caerulea*; E. *P. foetida*; F. *Passiflora Lady Margaret*.

图2 6种西番莲属植物叶面积不同模型模拟精度决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE, cm^2)和AIC信息准则(AIC)热图

Fig. 2 Heat maps for validation coefficients of determination coefficient (R^2), root mean square error (RMSE) and Akaike information criterion (AIC) for each model in six *Passiflora* species

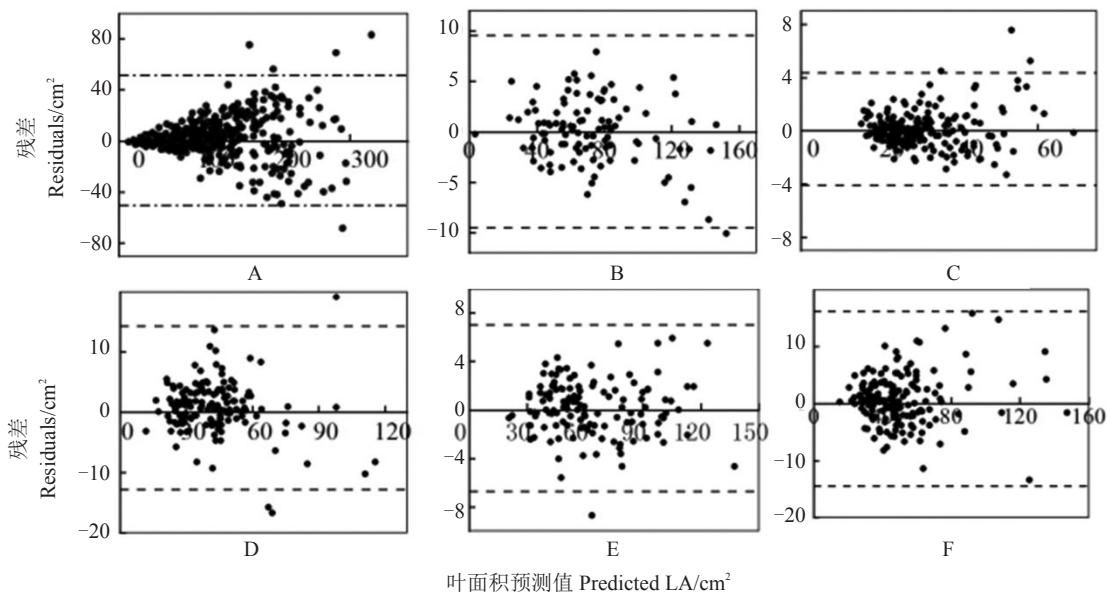
表4 6种西番莲属植物最优叶面积经验模型
Table 4 The optimal empirical models for leaf area of six *Passiflora* species

种名 Species	模型方程 Model	自变量 Independent variable	参数 Parameter		决定系数 R^2	均方根误差 RMSE	赤池信息准则 AIC
			a	b/c			
紫果西番莲 <i>P. edulis</i>	$y=aL^bW^c$	L;W	0.529	1.141/0.867	0.971 1	0.107 4	-548.863 5
樟叶西番莲 <i>P. laurifolia</i>	$y=aL^bW^c$	L;W	0.828	0.933/1.054	0.997 0	0.046 5	-337.240 9
尤卡坦西番莲 <i>P. yucatanensis</i>	$y=aL^bW^c$	L;W	0.665	0.665/1.367	0.980 8	0.039 5	-708.259 1
西番莲 <i>P. caerulea</i>	$y=aL^bW^c$	L;W	0.559	1.154/0.799	0.934 4	0.103 5	-238.544 7
龙珠果 <i>P. foetida</i>	$y=aL^bW^c$	L;W	0.763	0.640/1.327	0.988 1	0.039 7	-467.465 8
玛格丽特女士西番莲 <i>Passiflora Lady Margaret</i>	$y=aL^b$	L	0.600	2.013	0.940 1	0.075 7	-377.094 6

的目标模型有线性方程与非线性方程,6种植物的最优拟合模型均为非线性方程。此外,6个物种的最优叶面积模型计算出的预测值和所对应的残差均呈正态分布(图3),分别有98%、99%、98%、97%、

99%、98%的残差点分布在残差平均值 ± 3 倍标准差的范围内,初步表明本研究所构建的最优LA经验模型预测叶面积是可靠的。

2.3 最优经验模型的评估



A. 紫果西番莲;B. 樟叶西番莲;C. 尤卡坦西番莲;D. 西番莲;E. 龙珠果;F. 玛格丽特女士西番莲。

A. *P. edulis*; B. *P. laurifolia*; C. *P. yucatanensis*; D. *P. caerulea*; E. *P. foetida*; F. *Passiflora* Lady Margaret.

图3 LA 的残差分布

Fig. 3 Residuals plot of LA

为进一步评估这些最优经验模型的可靠性,基于筛选出的最优模型计算6种西番莲属植物LA的预测值,以LA实测值为y,预测值为x,检验回归方程的拟合效果,如图4所示,图中虚线为 $y=x$ 直线方程,6种植物的LA预测值与实测值的回归分析方程基本趋近于该直线方程,紫果西番莲、樟叶西番莲、尤卡坦西番莲、西番莲、龙珠果、玛格丽特女士西番莲LA预测值与实测值的回归分析方程的决定系数 R^2 分别为0.926 3、0.988 5、0.982 4、0.933 4、0.990 8、0.955 6,均接近于1,进一步表明这些最优经验模型的可靠性较高。

2.4 最优经验模型的检验

基于构建筛选出的最优经验模型,用剩下25%的叶片参数预测6种西番莲属植物LA并计算预测精度,如图5所示,紫果西番莲、樟叶西番莲、尤卡坦西番莲、西番莲、龙珠果、玛格丽特女士西番莲的预测精度分别为 $(91.28 \pm 0.58)\%$, $(94.35 \pm 0.63)\%$, $(95.54 \pm 0.27)\%$, $(92.59 \pm 1.62)\%$, $(96.88 \pm 1.34)\%$, $(94.25 \pm 0.78)\%$;结果表明,基于叶片结构参数,利用

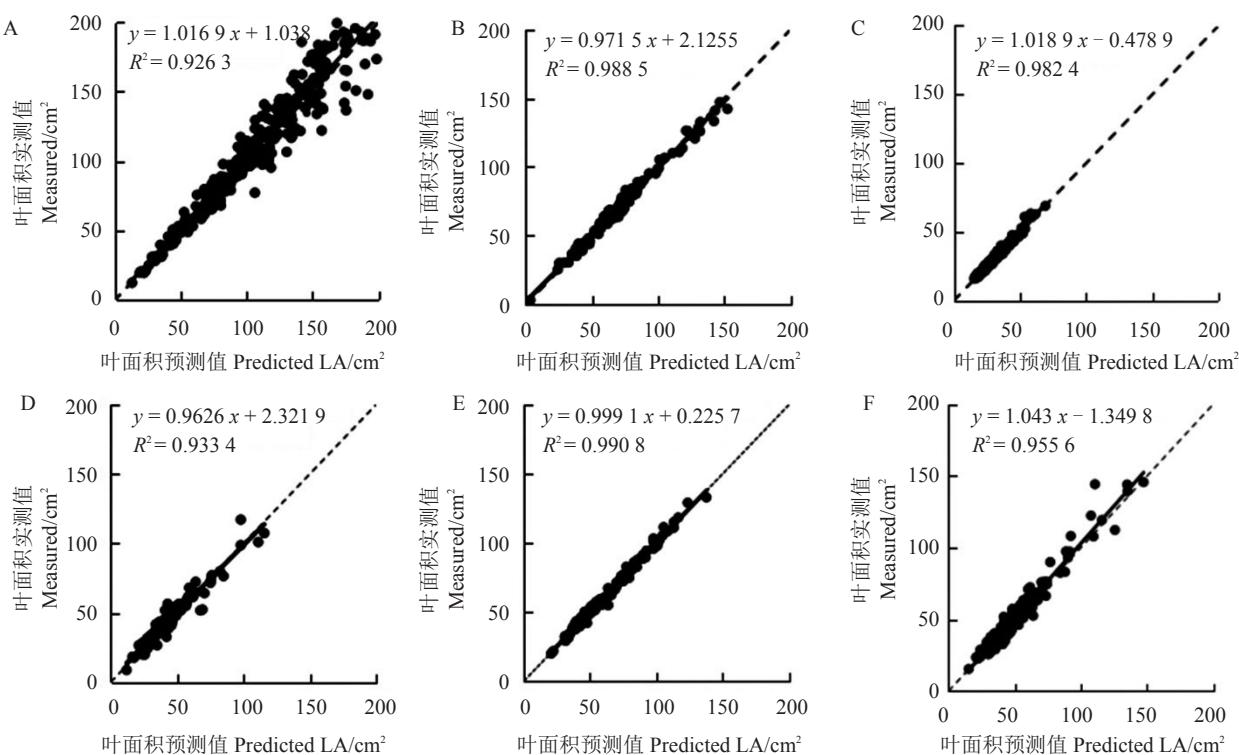
LA估算经验模型在非破坏性条件下测定这6种西番莲属植物的叶面积具有较高的精度。

2.5 叶形相似植物合并构建LA经验模型

选取叶形相似、叶长宽比相近的紫果西番莲、玛格丽特女士西番莲的叶面参数合并建模,建模结果如表5所示,2个树种叶面参数合并建模所得的各目标模型精度都较高,其中最优LA经验模型为模型12,与分别建模时的最优经验模型为同一个目标模型,最优经验模型预测LA的精度为 $(92.08 \pm 0.56)\%$,该模型预测紫果西番莲LA的预测精度为 $(91.24 \pm 0.63)\%$,预测玛格丽特女士西番莲的预测精度为 $(92.63 \pm 0.81)\%$ 。紫果西番莲与玛格丽特女士西番莲合并建模的预测精度与分别建模的最优经验模型的预测精度无显著差异,表明这两个西番莲属植物合并建模可行,预测LA可靠。

2.6 叶片合并及分类构建LA经验模型的适用性

选取 $y=aL^bW^c$ 方程将6种西番莲属植物的叶片合并拟合构建LA模型,将得到的模型分别预测这6种西番莲属植物叶片,预测精度如表6合并模型这

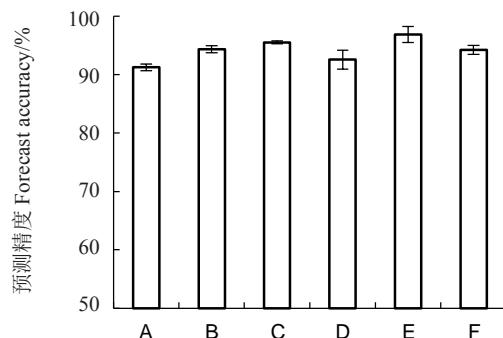


A. 紫果西番莲; B. 樟叶西番莲; C. 尤卡坦西番莲; D. 西番莲; E. 龙珠果; F. 玛格丽特女士西番莲。

A. *P. edulis*; B. *P. laurifolia*; C. *P. yucatanensis*; D. *P. caerulea*; E. *P. foetida*; F. *Passiflora* Lady Margaret.

图4 LA预测值与实测值的回归分析

Fig. 4 Regression analysis of LA predicted value and measured value



A. 紫果西番莲; B. 樟叶西番莲; C. 尤卡坦西番莲; D. 西番莲; E. 龙珠果; F. 玛格丽特女士西番莲。

A. *P. edulis*; B. *P. laurifolia*; C. *P. yucatanensis*; D. *P. caerulea*; E. *P. foetida*; F. *Passiflora* Lady Margaret.

图5 各物种叶面积经验模型的预测精度

Fig. 5 Forecast accuracy of empirical model of leaf area of these plant species

一列所示,结果显示紫果西番莲和樟叶西番莲预测精度较高,仅低于最优LA模型2.05%和0.98%,其他4种植物的预测精度相对较低,低于最优LA模型9.71%~25.04%,初步表明将植物按照科属分类构建通用模型的适用范围较小。

表5 叶形相似树种合并构建叶面积模型

Table 5 Leaf area model of similar tree species combined

模型序号 Model order	参数 Parameter		决定系数 R^2	均方根误差 RMSE	赤池信息准则 AIC
	a	b/c			
1	12.330	-55.876	0.916	0.169	-356.669
2	10.294	-54.516	0.865	0.214	-118.756
3	0.586	2.160	0.937	0.146	-502.647
4	0.433	0.877	0.906	0.178	-304.414
5	0.535	-0.979	0.968	0.105	-838.685
6	0.776	1.900	0.939	0.143	-520.951
7	0.476	1.969	0.907	0.178	-304.768
8	0.776	0.950	0.939	0.143	-520.951
9	0.476	0.985	0.907	0.178	-304.768
10	0.492	1.014	0.968	0.105	-837.957
11	6.101	0.073	0.886	0.336	334.709
12	0.520	1.195/0.822	0.969	0.102	-862.142

参考施月园等^[19]的方法,将6种西番莲属植物按叶片长宽比分类建模,6种西番莲属植物的叶片长宽比中位数为0.855,将这6种西番莲属植物的叶片分为叶片长宽比大于0.855和小于0.855两类构建模型,其中紫果西番莲、尤卡坦西番莲、西番莲为叶

表 6 3 种 LA 模型构建方式模型预测精度

Table 6 Comparison of prediction accuracy of three LA model construction methods

L/W	种名 Species	长宽比分类模型 Length-width ratio classification model	单独模型 Optimal model	合并模型 Combined model
<0.855	紫果西番莲 <i>P. edulis</i>	(88.04±0.82)%	(91.28±0.58)%	(89.23±1.26)%
	尤卡坦西番莲 <i>P. yucatanensis</i>	(79.56±0.31)%	(95.54±0.27)%	(70.50±0.64)%
	西番莲 <i>P. caerulea</i>	(77.46±3.20)%	(92.59±1.62)%	(77.80±1.97)%
>0.855	龙珠果 <i>P. foetida</i>	(81.81±1.03)%	(96.88±1.34)%	(85.78±1.57)%
	玛格丽特女士西番莲 <i>Passiflora Lady Margaret</i>	(90.29±1.43)%	(94.25±0.78)%	(84.54±1.37)%
	樟叶西番莲 <i>P. laurifolia</i>	(94.58±0.60)%	(94.35±0.63)%	(93.37±0.60)%

片长宽比小于 0.855, 樟叶西番莲、玛格丽特女士西番莲、龙珠果为叶片长宽比大于 0.855, 选取 $y=aL^bW^c$ 方程构建模型, 将这两个模型分别预测 6 种西番莲属植物叶片 LA, 预测精度如表 6 长宽比分类模型这一列所示, 在叶片长宽比大于 0.855 的植物中, 分类拟合的 LA 模型对玛格丽特女士西番莲和樟叶西番莲的预测精度较高, 玛格丽特女士西番莲的预测精度仅低于其最优 LA 模型预测精度的 3.96%、而樟叶西番莲的预测精度比其 LA 最优模型的预测精度还要高 0.23%, 但分类拟合的 LA 模型对龙珠果的预测精度相对较低, 低于其 LA 最优模型 15.07%; 在长宽比小于 0.855 的植物中, 分类拟合的 LA 模型对紫果西番莲的预测精度较高, 仅低于其 LA 最优模型 3.24%, 而对其他 2 种植物的预测精度较低, 低于 LA 最优模型 15.13%~15.98%。结果与施月园等^[19]的研究中, 基于叶长宽比将树种分类后构建 LA 模型是可行的这一结论有所不同, 本研究将植物按叶长宽比分类构建 LA 模型与单独构建的最优 LA 模型相比适用性较差。

3 讨 论

叶面积作为植物生理生态研究中重要的基本参数, 构建叶面积估算模型已广泛应用于农林业研究中, 笔者在本研究中选取 6 种西番莲属植物为研究对象构建 LA 经验模型, 选取 4 个常用的数学模型方程, 以叶片长、宽及相关组合为自变量, 分别构建各物种 LA 经验模型并筛选出最优的模型, 结果表明, 构建筛选出的 LA 模型能够准确可靠地预测这 6 种植物的 LA。殷淑燕等^[20]发现叶的增长更多的是呈现一个倒“S”形, 利用幂函数预测 LA 效果更好。L、W 和 LW 与 LA 均有很高的相关性, 在构建预测 LA 的模型中常采用 L、W 和 LW 作为自变量, 许多研究进一步证实了这些观点, 本研究中, 6 种西番莲属植

物叶面积模型均为幂函数, 前 5 种植物的最优自变量都是 L 和 W, 最后 1 种植物玛格丽特女士西番莲的最优自变量是 L, 施月园等^[19]构建小兴安岭 8 种阔叶树在不同叶生长期的叶面积经验模型, 得到的经验模型最优自变量均为 LW 或 L 与 W, LW 与 LA 的拟合方程决定系数 R^2 值最高, 纪蒙等^[21]研究发现, 由各树种不同冠层和 2 组树种不同冠层叶片构建的经验模型中, LA 经验模型的最优叶片参数通常也为 LW 或 L 与 W。

巫娟等^[14]对毛竹 LA 与各项叶片参数进行相关性分析, 结果同样显示 LW 与 LA 相关性最高 ($r=0.993$); 五味子、枣、红树和春榆的模型构建有相同的结论^[12, 22-24]。除针叶植物外, 其他植物叶片的 L 和 W 按一定比例同时生长, 且有较高的相关性, 大部分的植物同时利用 L 和 W 来预测 LA 比仅利用单一指标更可靠, 精度更高^[23]; 测定 2 个叶面参数的工作量是测定一个叶面参数的 2 倍, 本文研究所构建的模型, 单变量构建模型的 R^2 也较高, 在实践应用过程中, 为提高工作效率, 可以考虑使用单变量构建的 LA 模型。

张萌等^[13]将 8 个枣树品种的叶面参数合并构建 LA 估算模型, 筛选出的枣树单叶面积模型精度较高, 可满足各品种叶片面积估算, 无需针对单个品种独立建模; 而在本研究中将 6 种西番莲属植物叶片形态参数进行合并建模, 得到的模型对这 6 种植物的预测精度范围为 77.80%~93.37%, 结果表明根据植物分类系统建立叶面积模型并不适用于本研究的这 6 种植物, 前人已有研究表明以品种作为分类依据, 适用范围过小^[15]。

胡晓静等^[25]的研究表明, 每个树种通常具有较稳定的叶长宽比, 可能是因为叶长宽比是由遗传基因所控制, 不容易随环境而改变, 所以每个树种都有较稳定的叶片形状。施月园等^[19]对小兴安岭 8 种阔

叶树在不同叶生长期的叶片分别构建LA经验模型,并根据叶长宽比对8种阔叶树进行分类构建模型,研究结果表明,以叶长宽比为分类标准对多种阔叶树进行分类是可行的,但在本研究的研究对象中,玛格丽特女士西番莲与紫果西番莲叶形较为相似、叶长宽比相近,选取这2种植物叶面参数合并建模,结果显示合并建模的模型预测精度同样也较高。但是将6种西番莲属植物按照叶长宽比大于0.855和小于0.855分成两类构建LA模型分别预测这6种植物LA,结果表明,分类构建的模型预测尤卡坦西番莲和西番莲LA预测精度远低于单独构建模型的预测精度,由此可见仅按照叶长宽比将植物分类构建模型并不适用于这6种西番莲属植物。这一结果可能是因为本研究选取的6种西番莲属植物叶片形态差异较大,西番莲属植物不同于木本植物,木本植物可以根据季节判断叶片的发育阶段,西番莲属植物叶片发育快速,本研究缺少对不同叶片大小不同叶片发育时期分类拟合的研究。在分类构建模型时除按照叶长宽比分类拟合,还应考虑叶片的形态及生长发育的阶段以及植物的生活型、生态习性。

4 结 论

基于数字图像法统计西番莲科西番莲属植物LA和叶片参数,构建6种西番莲植物LA经验模型并筛选出最优LA经验模型,最优LA经验模型预测6种西番莲属植物LA精度均超过90%,说明构建经验模型预测这6种西番莲科西番莲属植物的LA是可靠的。叶形相似、叶长宽比相近的西番莲属植物合并构建LA模型预测精度较高,初步表明将叶片根据叶形、叶长宽比进行分类构建LA模型预测LA具有一定的可行性。

参考文献 References:

- [1] CHRISTOPHER Y S W, JOHN A. The photochemical reflectance index provides an optical indicator of spring photosynthetic activation in evergreen conifers[J]. *The New Phytologist*, 2015, 206(1): 196-208.
- [2] RENATA B, RAFAEL V, ROSE M. A simple and non-destructive model for individual leaf area estimation in citrus[J]. *Fruits*, 2010, 65(10): 269-275.
- [3] 李乐,钟迪,贾宝军,胡靖扬,刘常富,于立忠.蒙古栎叶面积的数字图像法测定[J].西北林学院学报,2016,31(6):96-103.
LI Le, ZHONG Di, JIA Baojun, HU Jingyang, LIU Changfu, YU Lizhong. Determination of leaf area of *Quercus mongolica* by digital image method[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(6): 96-103.
- [4] 张选,彭小峰,刘素华,彭延.一种利用Image J软件对棉花叶面积进行测量的方法[J].新疆农垦科技,2019,42(10):36-37.
ZHANG Xuan, PENG Xiaofeng, LIU Suhua, PENG Yan. A method for measuring cotton leaf area using Image J software[J]. *Science and Technology of Xinjiang Agricultural Reclamation*, 2019, 42(10): 36-37.
- [5] 田青,曹致中,张睿.基于数码相机和Auto CAD软件测定园林植物叶面积的简便方法[J].草原与草坪,2008(3):25-28.
TIAN Qing, CAO Zhizhong, ZHANG Rui. A simple method for measuring leaf area of garden plants based on digital camera and Auto CAD software[J]. *Grassland and Turf*, 2008(3): 25-28.
- [6] 吴飞.园林树木异形叶面积CAD矢量法测量技术研究[J].安徽农业科学,2008,36(35):15441-15443.
WU Fei. Study on measuring technology of abnormal leaf area of garden trees by CAD vector method[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(35): 15441-15443.
- [7] 戴志聪,杜道林,司春灿.用扫描仪及Image J软件精确测量叶片形态数量特征的方法[J].广西植物,2009,29(3):342-347.
DAI Zhicong, DU Daolin, SI Chuncan. A method to exactly measure the morphological quantity of leaf using Scanner and Image J software[J]. *Guizhou Botany*, 2009, 29(3): 342-347.
- [8] 王静文,刘弘.基于Snake模型的植物叶片面积计算方法[J].计算机工程,2013,39(1):234-238.
WANG Jingwen, LIU Hong. Computing method of plant leaf area based on Snake model[J]. *Computer Engineering*, 2013, 39(1): 234-238.
- [9] 张钰,钟海霞,潘明启,张付春,伍新宇,李疆.马奶子葡萄叶面积评估模型的建立[J].新疆农业科学,2020,57(1):63-68.
ZHANG Yu, ZHONG Haixia, PAN Mingqi, ZHANG Fuchun, WU Xinyu, LI Jiang. Establishment of evaluation model for leaf area of grape[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2020, 57(1): 63-68.
- [10] LIVY W, TIMOTHY E M. Nondestructive leaf area estimation of 'Niagara' and 'De Chaunac' grapevines[J]. *Scientia Horticulturae*, 2003, 98(4):493-498.
- [11] ZANETTI S, PEREIRA F, SARTORI A. Leaf area estimation of cassava from linear dimensions[J]. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 2017, 89(3):1729-1736.
- [12] 王勇,杜晓军,招礼军,焦志华,安明态.五种火棘属植物的叶面积回归分析[J].广西植物,2013,33(6):756-762.
WANG Yong, DU Xiaojun, ZHAO Lijun, JIAO Zhihua, AN Mingtai. Leaf area regression analysis of five *Pyrotropis* species[J]. *Guizhou Botany*, 2013, 33(6): 756-762.
- [13] 张萌,张德安,鲁晓燕,杨伟伟.枣树叶面积估算模型构建[J].果树学报,2020,37(12):1964-1973.
ZHANG Meng, ZHANG Dean, LU Xiaoyan, YANG Weiwei. Establishment of leaf area estimation model in jujube trees[J]. *Journal of Fruit Science*, 2020, 37(12): 1964-1973.
- [14] 巫娟,胡妹珍,茅思雨,邹凯,郑淇元,邱啟璜,施建敏.基于叶片

- 形态的毛竹单叶面积模型[J]. 林业科学, 2020, 56(8):47-54.
WU Juan, HU Shuzhen, MAO Siyu, ZOU Kai, ZHENG Qi-yuan, QIU Qihuang, SHI Jianmin. *Moso bamboo* single leaf area model based on leaf morphology[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, 56(8):47-54.
- [15] 彭曦, 闫文德, 王光军, 赵梅芳. 杉木叶形态特征与叶面积估算模型[J]. 生态学报, 2018, 38(10):3569-3580.
PENG Xi, YAN Wende, WANG Guangjun, ZHAO Meifang. Leaf morphological characteristics and leaf area estimation model for *Cunninghamia lanceolata*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(10):3569-3580.
- [16] 施月园, 王彦君, 金光泽, 刘志理. 小兴安岭 8 种阔叶树在不同叶生长期的叶面积经验模型[J]. 林业科学, 2019, 55(9):22-30.
SHI Yueyuan, WANG Yanjun, JIN Guangze, LIU Zhili. Empirical model for leaf area of eight broad leaf species in different leaf growth periods[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(9):22-30.
- [17] 陈媚, 刘迪发, 徐丽, 姚碧娇, 李祥恩, 符小琴, 高玲. 西番莲研究进展[J]. 中国南方果树, 2020, 49(6):182-190.
CHEN Mei, LIU Difa, XU Li, YAO Bijiao, LI Xiang'en, FU Xiaoqin, GAO Ling. Advances in research on passion fruit[J]. *South China Fruits*, 2020, 49(6):182-190.
- [18] 董万鹏, 李安定, 张建利, 龙秀琴. 喀斯特峰丛洼地西番莲逸生生境和生态位特征[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(8): 1305-1311.
DONG Wanpeng, LI Anding, ZHANG Jianli, LONG Xiuqin. Characteristics of wild habitat and ecological niche of *Passiflora edulis* in karst peak cluster depression[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, 31(8): 1305-1311.
- [19] 王彦君, 金光泽, 刘志理. 小兴安岭 2 种阔叶树种叶面积和叶干质量经验模型的构建[J]. 应用生态学报, 2018, 29(6):1745-1752.
WANG Yanjun, JIN Guangze, LIU Zhili. Construction of empirical models for leaf area and leaf dry mass of two broadleaf species in Xiaoxing'an Mountains, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(6):1745-1752.
- [20] 殷淑燕, 刘玉成. 大头茶构件种群生物量及叶面积动态[J]. 植物生态学报, 1997, 21(1):85-91.
YIN Shuyan, LIU Yucheng. Biomass and leaf area dynamics of modular populations in *Gordonia acuminata*[J]. *Acta Plant Ecolog*, 1997, 21(1):85-91.
- [21] 纪蒙, 王彦君, 金光泽, 刘志理. 阔叶红松林 6 种阔叶树单个叶片叶面积和叶干质量的垂直变异及模型构建[J]. 应用生态学报, 2019, 30(5):1667-1678.
JI Meng, WANG Yanjun, JIN Guangze, LIU Zhili. Vertical variation and model construction of area and dry mass for a single leaf from six broad leaved trees in mixed broadleaved-Korean pine forests[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(5):1667-1678.
- [22] ROUPHAEL Y, COLLA G, FANASCA S, KARAM F. Leaf area estimation of sunflower leaves from simple linear measurements[J]. *Photosynthetica*, 2007, 45(2):306-308.
- [23] 邢世岩, 孙霞, 李可贵, 有祥亮. 银杏叶生长发育规律研究[J]. 林业科学, 1997, 33(3):267-273.
XING Shiyan, SUN Xia, LI Kegui, YOU Xiangliang. Study on the growth and development of *Ginkgo biloba* leaves[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1997, 33(3):267-273.
- [24] 卜海东, 顾蔚, 齐永平, 王砧之. 基于图像处理华中五味子叶面积的回归测算[J]. 植物生理学通讯, 2008, 44(3):543-547.
BU Haidong, GU Wei, QI Yongping, WANG Zhezhi. Regressive estimation of leaf area of *Schisandra sphenanthera* Rehd. et Wils. based on image processing[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2008, 44(3):543-547.
- [25] 胡晓静, 张文辉, 何景峰. 秦岭南坡栓皮栎实生苗的构型分析[J]. 林业科学, 2015, 51(9):157-164.
HU Xiaojing, ZHANG Wenhui, HE Jingfeng. Structural analysis of *Quercus variabilis* seedlings on the southern slope of Qinling Mountains[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(9):157-164.

欢迎订阅 2022 年《河北果树》

《河北果树》是河北省果树学会主办的果树专业技术期刊, 中国核心期刊(遴选)数据库、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊、中国期刊全文数据库、中文科技期刊数据库收录期刊、河北省优秀科技期刊。主要刊登落叶果树的品种资源、栽培管理、病虫防治、储藏加工等方面的新成果、新技术、新知识和新信息, 开设栏目有专题论述、试验研究、经验交流、百花园、工作历、广告与信息。本刊特色是通俗易懂、科学实用、技术先进、内容丰富、信息量大、可读性强、发行面广。读者对象为果树科研和推广人员、农林院校师生、各级涉农领导和广大果农。本刊国内外公开发行, 季刊, 每

季首月 15 日出版, 国际标准大 16 开 64 页, 彩色四封, 每期定价 5.00 元, 全年 4 期共 20.00 元。欢迎广大果农和果树科技工作者订阅, 同时真诚欢迎投稿和发布广告。可到当地邮局(所)订阅, 邮发代号 18-247。未能从邮局订上本刊的读者, 全年都可随时直接汇款至编辑部订阅, 免费邮寄。编辑部尚有 2004-2021 年期刊可邮购。

地址: 河北省昌黎果树研究所《河北果树》编辑部, 邮编: 066600, 电话: 0335-2987632(兼传真), QQ: 2567147533, E-mail: hbgsbjb@sohu.com, 2567147533@qq.com。