

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2013.06.007

王勇, 杜晓军, 招礼军, 等. 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 Y, Du XJ, Zhao LJ, et al. Leaf area regression analysis of five *Pyracantha* species[J]. *Guihaia*, 2013, 33(6):756—762

五种火棘属植物的叶面积回归分析

王 勇^{1,2}, 杜晓军^{1*}, 招礼军², 焦志华³, 安明态⁴(1. 中国科学院植物研究所 植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; 2. 广西大学 林学院, 南宁 530004;
3. 中国矿业大学 化学与环境工程学院, 北京 100083; 4. 贵州大学 林学院, 贵阳 550025)

摘 要: 以采集于贵州、云南、广西、湖南等地的火棘、密花火棘、全缘火棘、细圆齿火棘和窄叶火棘共 5 种火棘属植物 26 401 个成熟叶样为材料, 利用 WinFOLIA 软件测量叶的多项形态指标并与叶面积进行 11 种模拟方程回归分析。结果表明: 五种火棘属植物的叶面积(LA)与叶长×叶宽(LW)相关性最高, 幂函数方程、三次方程、二次方程和线性方程能较好拟合其关系, 且均以幂函数方程的解释程度最高(R^2 均大于 0.970), 5 个物种的幂函数方程分别为 $LA = 0.743(LW)^{0.936}$ 、 $LA = 0.748(LW)^{0.936}$ 、 $LA = 0.742(LW)^{0.955}$ 、 $LA = 0.732(LW)^{0.952}$ 、 $LA = 0.766(LW)^{0.954}$ 。这说明基于叶长×叶宽的叶面积幂函数方程能很好地来模拟五种火棘属植物的叶面积。

关键词: 火棘属; 叶面积; 叶形; 回归分析; 幂函数方程**中图分类号:** Q948.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2013)06-0756-07

Leaf area regression analysis of five *Pyracantha* species

WANG Yong^{1,2}, DU Xiao-Jun^{1*}, ZHAO Li-Jun²,
JIAO Zhi-Hua³, AN Ming-Tai⁴(1. *State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China*; 2. *College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China*; 3. *School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China*; 4. *Forestry College of Guizhou University, Guiyang 550025, China*)

Abstract: Leaf is an important plant organ for transpiration and photosynthesis. Accurate and non-destructive methods for estimating leaf area are critical to many related studies. In order to get the accurate regression functions to estimate leaf area of *Pyracantha* species, 26401 mature leaf samples, from five species (*Pyracantha fortuneana*, *P. densiflora*, *P. atalantioides*, *P. crenulata*, *P. angustifolia*) in Guizhou, Yunnan, Guangxi, Hunan provinces in China, were collected in 2010 and 2011. Leaf analysis software of WinFOLIA was used to measure leaf indices such as leaf area (LA), leaf blade length (L), leaf horizontal width (W), leaf perimeter (LP), leaf vertical length (VL); then LW, L/W, LL and WW were also obtained. Regression analyses between LA and these leaf shape indices of these five species were carried out by using 11 models including power, cubic, quadratic, linear, logarithmic, inverse, compound, S, growth, exponential, logistic model. The results were as follows: leaf area can be modeled better with LW than other indices; leaf area can be modeled better with LW by power, cubic, quadratic and linear models, and power function is the fittest model ($R^2 > 0.970$); Power models for five *Pyracantha* species were $LA = 0.743(LW)^{0.936}$, $LA = 0.748(LW)^{0.936}$, $LA = 0.742(LW)^{0.955}$, $LA = 0.732(LW)^{0.952}$ and $LA = 0.766(LW)^{0.954}$ respectively. This study high-

收稿日期: 2013-06-10 修回日期: 2013-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(31070554); 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB403207)

作者简介: 王勇(1985-), 男, 湖南怀化人, 在读博士研究生, 从事森林生态学和生态恢复研究, (E-mail) wy7185299@126.com。

*通讯作者: 杜晓军, 博士, 主要从事森林生态学与生物多样性研究, (E-mail) xjdu@ibcas.ac.cn。

light that power model of leaf area based on $L \times W$ can be better used to non-destructively estimate leaf area of five *Pyracantha* species.

Key words: *Pyracantha*; leaf area; leaf shape; regression analysis; power function

叶的长、宽、面积等形态特征在一定程度上是对环境的适应性反应(王洋等,2009;赵桂范,2010)。叶面积不仅与植物光合作用能力、抗旱能力、蒸腾作用能力有着密切联系,也是评价环境因子效应的重要指标,因此怎样准确测定叶面积显得尤为重要。测量叶面积的方法很多,较常用的方法有仪器法、纸绘法、数字图像处理法和回归分析法等(陈圣林等,2006;Cristofori *et al.*,2007;戴志聪等,2009;夏善志等,2009)。回归分析方法因能非破坏性的测定或获得植物叶面积而越发受到关注。

回归分析法是利用叶面积与其他指标(如叶长、宽、重量等)之间的相关性进行回归分析并获得回归模型的系数,从而用于估测叶面积。叶面积回归分析时的一般步骤:首先采集一部分叶,然后使用一定方法计算出这一部分叶的各种指标,如叶长、叶宽、叶周长、叶面积等以及由这些指标计算出的其他组合指标,最后利用这些指标对相应叶面积进行拟合得到叶面积拟合方程并对其进行检验,确定叶面积的估测方程。在叶面积的回归分析中,一般使用叶长、叶宽或叶长 \times 叶宽作为叶面积测定指标(柯娴氩等,2009;Kumar,2009),已发展出很多叶面积模型,常用的模型有线性模型、二次方模型、三次方模型和幂函数模型等(Young *et al.*,2007;游巍斌等,2008;Timothy *et al.*,2010;朱宏光等,2010;Chattopadhyay *et al.*,2011;Selamat *et al.*,2012)。

火棘属植物作为我国南部的常见灌木,在水土保持等生态环境方面有着不可忽视的作用。由于火棘属植物叶形较小,对叶面积的直接测定较困难,本文尝试利用回归分析方法来无损估测火棘属植物的叶面积。

1 材料与方 法

1.1 材料

火棘属(*Pyracantha*)为蔷薇科的常绿灌木或小乔木,单叶互生具有叶柄,边缘有圆钝锯齿、细锯齿或全缘,共有 10 种,产于亚洲东部至欧洲南部,中国分布有 7 种(中国植物志编辑委员会,1974)。2010 年 10 月和 2011 年 1 月在贵州、云南、广西、湖南采集火棘、密花火棘、全缘火棘、细圆齿火棘和窄

叶火棘 5 种火棘属植物叶样,每株采集 30~50 个成熟叶,共采集到 578 株 26 401 个有效叶样用于本研究,其中火棘 182 株 8 136 片、密花火棘 52 株 2 458 片、全缘火棘 160 株 7 430 片、细圆齿火棘 84 株 3 986 片、窄叶火棘 100 株 4 391 片。

1.2 方法

把采集到的叶样利用 ImageJ 1.46(<http://rsb.info.nih.gov/ij/download.html>)处理为 8 位黑白二值图像后,利用叶分析软件(WinFOLIA 2004a, Regent Instruments Inc., Québec, Canada)计算得到五种火棘属植物叶面积(leaf area: LA)、叶周长(leaf perimeter: LP)、叶宽(与主脉垂直的叶片最大宽度, leaf horizontal width: W)、叶长(叶尖到叶片基部的垂直最大长度, leaf blade length: L)和叶垂直长(叶尖到叶柄基部的垂直最大长度, leaf vertical length: VL),并且计算叶长/叶宽(L/W)、叶长 \times 叶宽(LW)、叶长 \times 叶长(LL)、叶宽 \times 叶宽(WW);对 5 种火棘属植物叶面积与叶周长、叶宽、叶长、垂直长的相关性进行皮尔逊相关性分析(Pearson correlation analysis);以各叶形指标对叶面积做回归分析,确定最适合五种火棘属植物叶面积的回归方程。

每个物种随机抽取 100 个叶样用于本研究的模拟方程检验,其余叶样用于方程模拟,即用周长、叶宽、叶长、垂直长、叶长 \times 叶宽、叶长 \times 叶长、叶宽 \times 叶宽与叶面积建立线性(Linear: $y = b_0 + b_1 x$)、二次方(Quadratic: $y = b_0 + b_1 x + b_2 x^2$)、三次方(Cubic: $y = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3$)、复合函数(Compound: $y = b_0 (b_1)^x$)、生长函数(Growth: $y = e^{(b_0 + b_1 x)}$)、对数函数(Logarithmic: $y = b_0 + b_1 \ln x$)、S 形曲线(S: $y = e^{(b_0 + b_1/x)}$)、指数函数(Exponential: $y = b_0 e^{b_1 x}$)、逆函数(Inverse: $y = b_0 + b_1/x$)、幂函数(Power: $y = b_0 x^{b_1}$)、逻辑斯蒂函数(Logistic: $y = (1/u + b_0 b_1 x)^{-1}$)共 11 种模拟方程。其中, b_0 , b_1 , b_2 , b_3 均为待确定的参数。数据分析使用 SPSS 13.0(SPSS, Chicago, IL, USA)和 Excel 2003。

2 结果与分析

2.1 五种火棘属植物叶形指标及相关性分析

五种火棘属植物各项叶指标如表 1 所示,其中

火棘叶面积、周长、叶宽、叶长和垂直长的平均值均最大,密花火棘的周长、叶长、垂直长平均值最小,窄叶火棘的叶面积和叶宽平均值最小。

五种火棘属植物叶面积与叶周长、叶宽、叶长、垂直长的皮尔逊相关性分析结果见表2。五种火棘属植物的叶面积与各个叶指标间存在极显著相关

性,其中与叶长×叶宽的相关性最高,皮尔逊相关系数均在0.983以上;与周长的相关性次之,皮尔逊相关系数介于0.904~0.939之间;而与叶长/叶宽的相关性最低,皮尔逊相关系数均小于0.260;其余各项叶指标的皮尔逊相关系数在0.765~0.939之间。这说明在这五种火棘属植物的叶面积与叶长×叶宽

表1 五种火棘属植物的各项叶形指标

Table 1 Leaf indices of five *Pyracantha* species

物种 Species	样本数 ^a Sample No.	叶形指标 Leaf index (Mean±SE)				
		叶面积 LA (cm ²)	周长 LP (cm)	叶宽 W (cm)	叶长 L (cm)	垂直长 VL (cm)
火棘 <i>Pyracantha. fortuneana</i>	8036	1.456±0.008	5.596±0.017	0.920±0.002	2.135±0.007	2.380±0.008
密花火棘 <i>P. densiflora</i>	2358	1.070±0.010	4.542±0.023	0.837±0.004	1.688±0.009	1.842±0.010
全缘火棘 <i>P. atalantoides</i>	7330	1.172±0.008	4.827±0.018	0.829±0.003	1.834±0.007	2.021±0.008
细圆齿火棘 <i>P. crenulata</i>	3886	1.422±0.013	5.504±0.029	0.903±0.004	2.104±0.012	2.322±0.012
窄叶火棘 <i>P. angustifolia</i>	4291	1.004±0.006	4.899±0.018	0.661±0.002	1.967±0.008	2.104±0.008

注:此处每个物种样本数未包括用于模拟方程检验的100个叶样。

表2 五种火棘属植物叶面积与其他叶形指标的 Pearson 相关性分析

Table 2 Pearson correlation analysis between leaf area and other leaf indices of five *Pyracantha* species

物种 Species	叶周长 LP	叶宽 W	叶长 L	垂直长 VL	叶长/叶宽 L/W	叶长×叶宽 LW	叶宽×叶宽 WW	叶长×叶长 LL
火棘 <i>Pyracantha. fortunea</i>	0.918	0.910	0.899	0.896	0.253	0.983	0.920	0.896
密花火棘 <i>P. densiflora</i>	0.939	0.933	0.923	0.924	0.243	0.988	0.938	0.915
全缘火棘 <i>P. atalantoides</i>	0.929	0.877	0.914	0.908	0.225	0.984	0.765	0.914
细圆齿火棘 <i>P. crenulata</i>	0.918	0.900	0.893	0.875	0.204	0.986	0.913	0.886
窄叶火棘 <i>P. angustifolia</i>	0.904	0.827	0.868	0.866	0.250	0.989	0.840	0.876

注:相关性在0.001水平上均显著(双尾检验) Note: Correlation is significant at the 0.001 level (2-tailed).

或周长之间有望建立较好的回归方程。

2.2 五种火棘属植物的叶面积回归分析

五种火棘属植物的周长、叶宽、叶长、垂直长、叶长×叶宽、叶宽×叶宽、叶长×叶长分别与叶面积进行11种方程拟合,七种叶形指标的最适回归方程均为幂函数方程或三次方程(表3、图1)。五种植物叶面积以叶长×叶宽为指标进行的回归分析时 R^2 均最高(均大于0.970),且最适回归方程均为幂函数方程;以周长为指标的回归(R^2 介于0.836~0.906之间),且周长的叶面积回归方程均为三次方程;这说明用叶长×叶宽的幂函数方程能更好地来估算叶面积,用周长的三次方程也能较好地来估算叶面积。5个物种的幂函数方程分别为火棘 $LA = 0.743(LW)^{0.936}$, $R^2 = 0.974$;密花火棘 $LA = 0.748(LW)^{0.936}$, $R^2 = 0.979$;全缘火棘 $LA = 0.742(LW)^{0.955}$, $R^2 = 0.981$;细圆齿火棘 $LA = 0.732(LW)^{0.952}$, $R^2 = 0.981$;窄叶火棘 $LA = 0.766(LW)^{0.954}$, $R^2 = 0.981$ 。

五种火棘属植物的叶面积与叶长×叶宽的幂函数方程、三次方程、二次方程和线性方程的 R^2 值均

在0.966以上(表4),三次方程、二次方程和线性方程的 R^2 比幂函数方程的要低,但也可以用来模拟或预测相应植物的叶面积。

2.3 五种火棘属植物叶面积的最适回归方程检验

利用每个物种各100个随机抽取叶样,以叶长×叶宽为指标的叶面积幂函数回归方程进行检验,结果显示,五种火棘属植物的叶面积实测值与回归方程预测值之间的差异较小(图2:a-e),叶面积实测值与预测值之间的差异值93%以上在其均值 $d \pm 2SD$ 范围之内(d 为叶面积实测值与预测值之间差异值的均值,SD为叶面积实测值与预测值之间差异值的标准差)(图3:a-e),幂函数方程能很好地模拟或预测这些植物的叶面积。叶面积实测值与预测值用曼-惠特尼检验(Mann-Whitney Test)、摩西检验(Moses Test)、柯尔莫哥洛夫斯米尔诺夫检验(Kolmogorov-Smirnov Test)、瓦尔德沃尔福茨检验(Wald-Wolfowitz Test)进行差异性检验,火棘的 P 值分别为0.712、0.500、0.994、0.803,密花火棘的 P 值分别为0.541、0.760、0.699、0.665,全缘火棘的 P 值分别为0.893、0.833、0.994、1.000,细圆齿火棘的

表 3 五种火棘属植物叶面积模型
Table 3 Regression model for leaf area of five *Pyracantha* species

物种 Species	指标 Index	方程 Equation	模型摘要 Model summary					参数估计 Parameter estimate			
			R ²	F	df1	df2	sig.	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃
火棘 <i>Pyracantha fortuneana</i>	LP	三次方程	0.866	17 350.202	3	8 032	0.000	0.602	-0.198	0.074	-0.002
	W	三次方程	0.847	14 840.039	3	8 032	0.000	-0.319	1.223	0.401	0.319
	L	幂函数方程	0.836	41 091.418	1	8 034	0.000	0.468	1.438		
	VL	幂函数方程	0.823	37 404.277	1	8 034	0.000	0.399	1.441		
	LW	幂函数方程	0.974	302 608.716	1	8 034	0.000	0.743	0.936		
	WW	幂函数方程	0.854	46 826.298	1	8 034	0.000	1.605	0.929		
	LL	幂函数方程	0.836	41 091.405	1	8 034	0.000	0.468	0.719		
密花火棘 <i>P. densiflora</i>	LP	三次方程	0.906	7 557.248	3	2 354	0.000	0.878	-0.475	0.145	-0.007
	W	幂函数方程	0.893	19 666.974	1	2 356	0.000	1.428	1.867		
	L	幂函数方程	0.867	15 311.967	1	2 356	0.000	0.464	1.526		
	VL	幂函数方程	0.865	15 071.293	1	2 356	0.000	0.398	1.558		
	LW	幂函数方程	0.979	112 161.760	1	2 356	0.000	0.748	0.936		
	WW	幂函数方程	0.893	19 667.425	1	2 356	0.000	1.428	0.933		
	LL	幂函数方程	0.867	15 311.863	1	2 356	0.000	0.464	0.763		
全缘火棘 <i>P. atalantioides</i>	LP	三次方程	0.894	20 635.553	3	7 326	0.000	0.687	-0.312	0.100	-0.004
	W	三次方程	0.853	14 187.421	3	7 326	0.000	0.836	-2.592	4.233	-0.898
	L	三次方程	0.847	13 475.556	3	7 326	0.000	0.051	0.148	0.278	-0.022
	VL	三次方程	0.842	13 020.356	3	7 326	0.000	0.041	0.174	0.191	-0.007
	LW	幂函数方程	0.981	378 509.067	1	7 328	0.000	0.742	0.955		
	WW	幂函数方程	0.853	42 453.270	1	7 328	0.000	1.528	0.909		
	LL	三次方程	0.847	13 490.381	3	7 326	0.000	0.163	0.308	-0.008	0.000
细圆齿火棘 <i>P. crenulata</i>	LP	三次方程	0.872	8 776.947	3	3 882	0.000	1.003	-0.431	0.113	-0.004
	W	幂函数方程	0.840	20 452.856	1	3 884	0.000	1.587	1.808		
	L	幂函数方程	0.816	17 226.439	1	3 884	0.000	0.457	1.443		
	VL	幂函数方程	0.781	13 831.941	1	3 884	0.000	0.398	1.435		
	LW	幂函数方程	0.981	198 059.767	1	3 884	0.000	0.732	0.952		
	WW	幂函数方程	0.840	20 452.652	1	3 884	0.000	1.587	0.904		
	LL	幂函数方程	0.816	17 226.478	1	3 884	0.000	0.457	0.722		
窄叶火棘 <i>P. angustifolia</i>	LP	三次方程	0.836	7 302.497	3	4 287	0.000	0.585	-0.232	0.080	-0.003
	W	三次方程	0.709	3 477.366	3	4 287	0.000	-0.672	4.139	-4.666	3.275
	L	三次方程	0.768	4 743.042	3	4 287	0.000	0.343	-0.054	0.216	-0.014
	VL	三次方程	0.765	4 650.308	3	4 287	0.000	0.199	0.140	0.107	0.001
	LW	幂函数方程	0.981	220 198.184	1	4 289	0.000	0.766	0.954		
	WW	三次方程	0.709	3 474.067	3	4 287	0.000	0.168	2.005	-0.595	0.484
	LL	三次方程	0.769	4 769.881	3	4 287	0.000	0.367	0.144	0.003	0.000

P 值分别为 0.951、0.892、1.000、0.128, 窄叶火棘的 P 值分别为 0.992、0.677、0.967、0.160; 四种检验中的 P 值均大于 0.05, 说明实测值与预测值之间无显著差异。

2.4 适合全部五种火棘属植物整体叶面积的回归方程预测

对基于叶长×叶宽的适合全部五种火棘属植物整体叶面积模型的分析(图 1:f, 表 4), 结果表明, 幂函数方程、三次方程、二次方程和线性方程都有较高的 R^2 值, 其中幂函数方程的 R^2 值最高, 适合全部五种火棘属植物整体叶面积的幂函数方程为 $LA = 0.746(LW)^{0.940}$, $R^2 = 0.980$ 。同样的利用上述检验所用的 500 个叶样进行检验, 检验发现实测值与预

测值之间无显著差异(图 2:f、图 3:f)。对适合全部五种火棘属植物叶面积实测值与预测值用曼-惠特尼检验、摩西检验、柯尔莫哥洛夫斯米尔诺夫检验、瓦尔德沃尔福威茨检验进行差异性检验, 全部五种火棘属植物的 P 值分别为 0.883、0.835、0.863、0.550, 均大于 0.05, 说明实测值与预测值之间无显著差异。幂函数方程能用来模拟或预测基于叶长×叶宽的全部五种火棘属植物整体叶面积。

3 结论与讨论

在五种火棘属植物的叶面积回归分析中, 相对于叶宽、垂直长、叶宽×叶宽、叶长×叶长来说使用

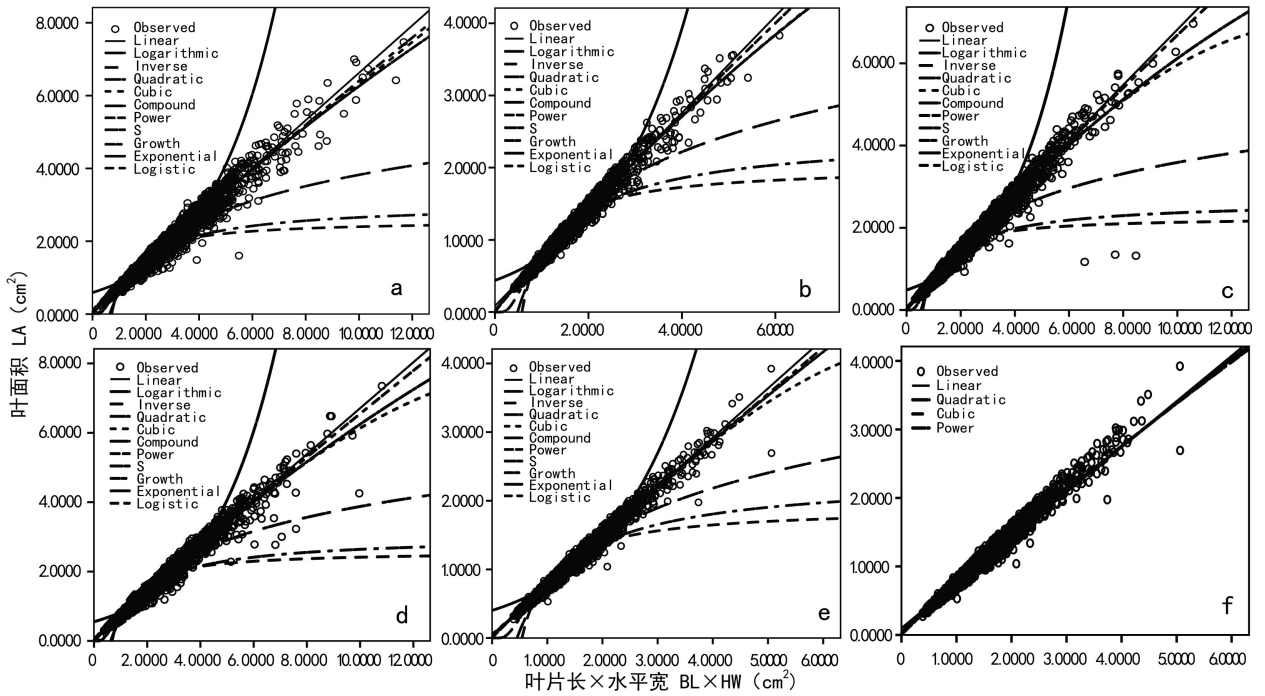


图 1 五种火棘属植物叶面积与叶长×叶宽的关系 a. 火棘; b. 密花火棘; c. 全缘火棘; d. 细圆齿火棘; e. 窄叶火棘; f. 五种火棘属植物所有叶样。

Fig. 1 Relationship of leaf area and leaf blade length×leaf horizontal width of five *Pyracantha* species a. *P. fortune*; b. *P. densiflora*; c. *P. atalantioides*; d. *P. crenulata*; e. *P. angustifolia*; f. All leaf samples of five *Pyracantha* species.

表 4 以叶长×叶宽为基础的五种火棘属植物叶面积模型

Table 4 Leaf area model of five *Pyracantha* species based on leaf blade length×leaf horizontal width (LW)

物种 Species	方程 Equation	模型摘要 Model summary					参数估计 Parameter estimate			
		R^2	F	df1	df2	sig.	b_0	b_1	b_2	b_3
火棘 <i>Pyracantha. fortuneana</i>	线性方程	0.966	230 300.858	1	8 034	0.000	0.112	0.651		
	二次方程	0.967	118 469.913	2	8 033	0.000	0.052	0.702	-0.008	
	三次方程	0.967	79 046.466	3	8 032	0.000	0.035	0.722	-0.014	0.000
	幂函数方程	0.974	302 608.716	1	8 034	0.000	0.743	0.936		
密花火棘 <i>P. densiflora</i>	线性方程	0.976	95 083.084	1	2 356	0.000	0.085	0.669		
	二次方程	0.977	49 952.875	2	2 355	0.000	0.025	0.741	-0.018	
	三次方程	0.977	33 288.121	3	2 354	0.000	0.023	0.744	-0.019	0.000
	幂函数方程	0.979	112 161.76	1	2 356	0.000	0.748	0.936		
全缘火棘 <i>P. atalantioides</i>	线性方程	0.969	226 991.375	1	7 328	0.000	0.078	0.674		
	二次方程	0.971	121 582.247	2	7 327	0.000	0.003	0.752	-0.014	
	三次方程	0.971	81 209.039	3	7 326	0.000	0.022	0.725	-0.004	-0.001
	幂函数方程	0.981	378 509.067	1	7 328	0.000	0.742	0.955		
细圆齿火棘 <i>P. crenulata</i>	线性方程	0.972	133 056.973	1	3 884	0.000	0.084	0.662		
	二次方程	0.973	69 505.093	2	3 883	0.000	0.012	0.726	-0.010	
	三次方程	0.973	46 419.245	3	3 882	0.000	0.035	0.698	-0.001	-0.001
	幂函数方程	0.981	198 059.767	1	3 884	0.000	0.732	0.952		
窄叶火棘 <i>P. angustifolia</i>	线性方程	0.979	197 238.424	1	4 289	0.000	0.049	0.718		
	二次方程	0.979	99 761.239	2	4 288	0.000	0.021	0.756	-0.011	
	三次方程	0.979	66 813.319	3	4 287	0.000	0.054	0.691	0.025	-0.006
	幂函数方程	0.981	220 198.184	1	4 289	0.000	0.766	0.954		
五种火棘属植物所有叶样 All leaf samples of five <i>Pyracantha</i> species	线性方程	0.971	872 478.609	1	26 399	0.000	0.097	0.663		
	二次方程	0.972	456 639.258	2	26 398	0.000	0.035	0.722	-0.011	
	三次方程	0.972	304 439.929	3	26 397	0.000	0.031	0.727	-0.012	0.000
	幂函数方程	0.980	1 264 526.342	1	26 399	0.000	0.746	0.940		

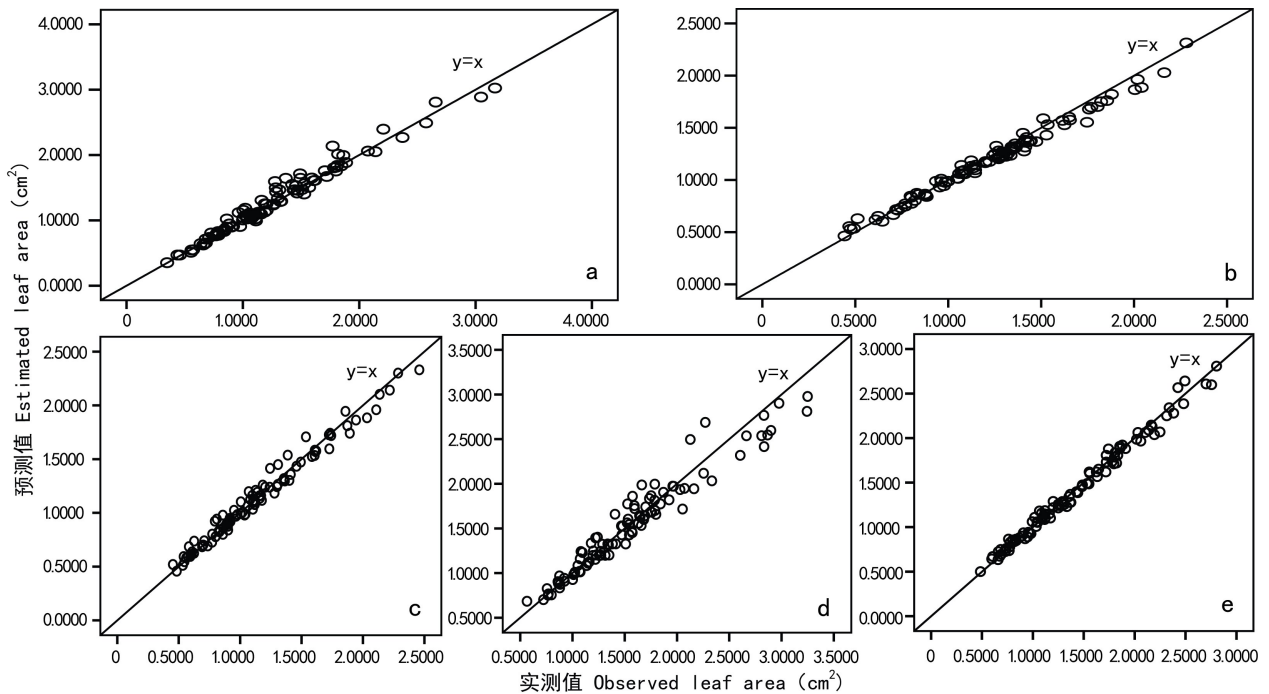


图 2 五种火棘属植物叶面积实测值与预测值之间的关系 a. 火棘; b. 密花火棘; c. 全缘火棘; d. 细圆齿火棘; e. 窄叶火棘; f. 五种火棘属植物所有检测叶样。

Fig. 2 Relationship of observed leaf area and estimated leaf area of five *Pyracantha* species a. *Pyracantha. fortunea*; b. *P. densiflora*; c. *P. atalantioides*; d. *P. crenulata*; e. *P. angustifolia*; f. All leaf samples of five *Pyracantha* species.

叶长×叶宽和周长来拟合叶面积的方程拟合程度都相对要高,且用叶长×叶宽比用周长来拟合叶面积方程一般要好些(表 3),并且叶的周长指标在实际中不容易获得,因而利用叶长×叶宽来估测五种火棘属植物叶面积更为实用和可靠。用叶长×叶宽估计五种火棘属植物叶面积的幂函数方程、三次方程、二次方程和线性方程都有较高的 R^2 值(表 4),虽然这几种方程的 R^2 存在着一定差异但是差异不大,几种拟合方式都能较好的估计叶面积,故可认为基于叶长×叶宽的幂函数方程、三次方程、二次方程和线性方程都可用来计算五种火棘属植物叶面积;不管是单个物种的叶面积回归方程还是适合全部五种火棘属植物整体叶面积的方程,幂函数方程都拟合最好,用来估算或预测这些物种叶面积也最为可靠,可以作为非破坏性方法获得这些物种叶面积的优先选择模型。无损或非破坏性是回归分析方法测定或获得植物叶面积的优点,特别是在植物叶不规整的情况下优势更为明显(邓旭等,2009)。本研究与其他人的叶面积预测模型有着类似的结果,都是以叶长×叶宽为基础的叶面积拟合方程效果最好(Peksen, 2007; Tsialtas *et al.*, 2008; Giuffrida *et al.*, 2011; Pompelli *et al.*, 2012)。常见的几种叶面积模

型中线性方程由于其方程简单、计算便捷且拟合程度较好而被广泛使用(Kumar *et al.*, 2010; Bakhsandeh *et al.*, 2011),本研究中基于叶长×叶宽的五种火棘属植物线性方程的 R^2 均达到了 0.966 以上(表 4),表明线性方程也能用来估计五种火棘属植物的叶面积。

在获得叶长、叶宽、叶长×叶宽等各种指标后,选用哪种方程、哪些叶形指标估测的植物叶面积更可靠需要对不同模型进行比较(赵燕等,2010;李先明等,2011;谢安德等,2011);与本研究一样已有研究显示用叶长与叶宽综合指标比用单一叶长、叶宽指标来估测叶面积的可靠性要高(Kandiannan *et al.*, 2009; 朱宏光等,2010)。

本研究中所采集的叶样均为成熟叶,未采集分析幼叶或各个发展阶段的叶片;本研究获得的五种火棘属植物叶面积回归方程(如幂函数方程等)虽对成熟叶的叶面积估测比较可靠,但能否用于各个发展阶段的叶面积计算,还有待进一步研究。

致谢 感谢李镇清研究员提出的修改意见和建议;感谢郑玉龙、刘聪聪、王璐娜、栗广宇参与了样品采集和图像处理工作。

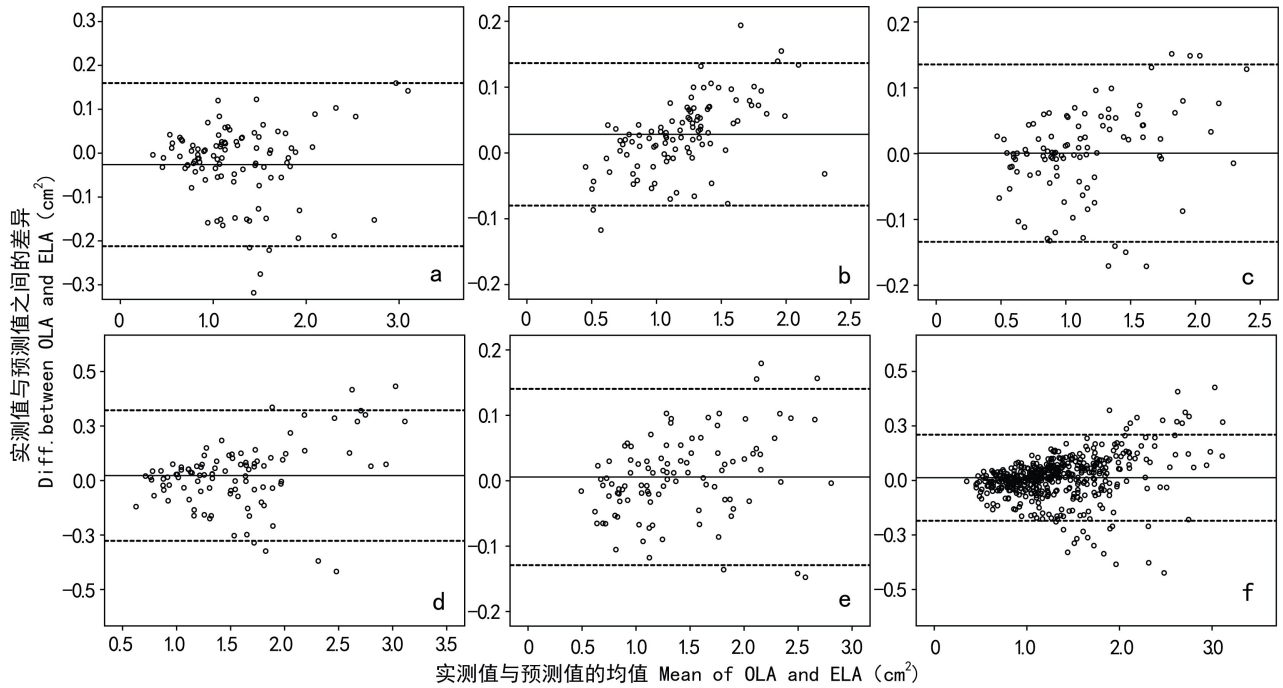


图3 叶面积实测值与预测值之间差异值与其均值的关系 a. 火棘; b. 密花火棘; c. 全缘火棘; d. 细圆齿火棘; e. 窄叶火棘; f. 五种火棘属植物所有检测叶样。中间实线为叶面积实测值与预测值之间差异值的均值 \bar{d} , 两端的参考线为差异均值 $\bar{d} \pm 2SD$, SD 为叶面积实测值与预测值之间差异值的标准差。

Fig. 3 Differences between observed leaf area (OLA) and estimated leaf area (ELA) vs. the mean of OLA and ELA a. *Pyracantha fortuneana*; b. *P. densiflora*; c. *P. atalantioides*; d. *P. crenulata*; e. *P. angustifolia*; f. All leaf samples of five *Pyracantha* species. The solid line is the mean of the differences. The broken lines are limits of agreement, calculated as $\bar{d} \pm 2SD$; where \bar{d} = the mean of the differences and SD = the standard deviation of the differences.

参考文献:

中国植物志编辑委员会. 1974. 中国植物志(第36卷)[M]. 北京: 科学出版社: 179—186

Bakhsandeh E, Kamkar B, Tsialtas JT. 2011. Application of linear models for estimation of leaf area in soybean *Glycine max* [J]. *Photosynthetica*, **49**(3): 405—416

Chattopadhyay S, Tikader A, Das NK. 2011. Nondestructive, simple, and accurate model for estimation of the individual leaf area of some (*Persea bombycina*) [J]. *Photosynthetica*, **49**(4): 627—632

Chen SL(陈圣林), Wu ZH(吴志华), Ma SJ(马生健). 2006. Measuring methods of *Eucalypt* leaf area with digital image processing technology(基于数字图像处理的桉树叶面积分析) [J]. *Eucalypt Sci & Technol* (桉树科技), **23**(1): 6—10

Cristofori V, Youssef R, Emilio MG, et al. 2007. A simple model for estimating leaf area of hazelnut from linear measurements [J]. *Sci Hortic*, **113**: 221—225

Dai ZC(戴志聪), Du DL(杜道林), Si CC(司春灿). 2009. A method to exactly measure the morphological quantity of leaf using scanner and Image J Software(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]. *Guihaia* (广西植物), **29**(3): 342—347

Deng X(邓旭), Wang J(王娟), Tan JC(谭济才). 2009. Test and regression analysis of leaf area of *Ambrosia artemisiifolia* L.(豚草叶面积测定与回归分析) [J]. *Weed Sci* (杂草科

学), **4**: 35—37

Giuffrida F, Roupheal Y, Toscano S, et al. 2011. A simple model for nondestructive leaf area estimation in bedding plants [J]. *Photosynthetica*, **49**(3): 380—388

Kandiannan K, Parthasarathy U, Krishnamurthy KS, et al. 2009. Modeling individual leaf area of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) using leaf length and width [J]. *Sci Hortic*, **120**: 532—537

Ke XD(柯焯焱), Zhou Q(周庆), Su ZY(苏志尧). 2009. Modeling for nondestructive leaf area measurement of four subtropical plants in south china(我国南方四种植物的叶面积无损测定) [J]. *Guangdong For Sci & Technol* (广东林业科技), **25**(6): 39—44

Kumar R. 2009. Calibration and validation of regression model for non-destructive leaf area estimation of saffron (*Crocus sativus* L.) [J]. *Sci Hortic*, **122**: 142—145

Kumar R, Sharma S. 2010. Allometric model for nondestructive leaf area estimation in clary sage (*Salvia sclarea* L.) [J]. *Photosynthetica*, **48**(2): 313—316

Li XM(李先明), Qin ZQ(秦仲麒), Tu JF(涂俊凡), et al. 2011. Establishment of regressive equation for leaf area of 7 early-mature pear cultivars(7个早熟梨品种叶面积回归方程的建立) [J]. *Acta Agric Jiangxi* (江西农业学报), **23**(5): 36—39

Peksen E. 2007. Non-destructive leaf area estimation model for faba

(下转第 869 页 Continue on page 869)