

文章编号: 0455-2059(2015)05-0705-06

一种基于标志点的叶片几何形态分析方法

宋佳¹, 侯盟², 鲁四海², 李俊清¹, 杜芳¹

1. 北京林业大学林学院, 北京 100083
2. 兰州大学生命科学学院, 兰州 730000

摘要: 以川滇高山栎叶片为例, 介绍基于叶片标志点的Morpho J软件对叶片形态进行分析的方法. 通过采集叶片标志点及普氏叠印法处理, 将叶片形态特征量化, 并创建叶形“形态空间”, 通过“形态模型”检验叶片形态之间的差异性. 该方法将叶形量化, 使得叶形与其它特征之间的耦合研究成为可能.

关键词: 叶片形态; 川滇高山栎; 标志点; 几何形态分析

中图分类号: Q944; TP319

文献标识码: A

DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2015.05.019

Geometric morphological analysis of leaves based on landmarks

Song Jia¹, Hou Meng², Lu Si-hai², Li Jun-qing¹, Du Fang¹

1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
2. School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: An analytical method of geometric morphology was introduced by using the Morpho J software based on the leaf landmarks on the evergreen oak species *Quercus aquifolioides*. This method could collect the landmarks of the leaves and implement a Procrustes superimposed algorithm to quantify leaf morphology and eventually create a leaf “shape space” (morphospace). We investigated the morphological differences between leaves with the “shape model” and concluded that the quantification of leaf shapes makes it possible to associate leaf shapes with other characteristics.

Key words: leave shape; *Quercus aquifolioides*; landmark; geometric morphological analysis

对植物进行分类是植物研究中的第一步, 也是相当重要的一步^[1]. 植物的叶、花、果实、种子等外部特征常被作为分类的主要依据, 但相比而言, 叶片具有易采集、易储存等特点, 因此常作为植物分类中最直接、有效的依据^[2]. 外部的生长环境和内部遗传基因的共同作用常会导致植物叶片形态的相似性与差异性, 形态变异丰富的叶片会给物种鉴定带来困难. 传统的叶片特征识别方法主要为手工测量多个变量, 包括叶长、叶宽等线性尺寸以及叶脉数、叶缘锯齿数等数量指标等, 并依此描述叶片的形态差异^[2]; 高三基等^[3]选取叶长、叶宽、周长等特征研究了甘蔗(*Saccharum officinarum*)的叶片形态, 发现这些特征在品种间差异明显, 并可聚类为4种类型; 盛宝龙等^[4]对不同银

杏(*Ginkgo biloba* L.)品种的标准叶的叶宽、叶长、叶面积、叶柄长、叶基角等性状进行了比较, 发现可以利用标准叶区分银杏品种类型; 李梅等^[5]采用直尺和量角仪获取辽东栎(*Quercus liaotungensis*)叶片形态指标, 用来反映辽东栎种群叶性状表型变异. 虽然传统测量方法所获得的叶片性状指标在一定程度上为叶片识别提供了依据, 但由于存在耗时长、测量效率低、无法避免主观性、大小和形状不能分开分析等局限性, 因此难以为鉴定物种提供准确依据^[6-7].

随着现代测量技术的发展, 结合计算机的叶形分析技术得到了广泛应用. 祁享年等^[8]基于叶片特征辅助植物识别模型以及提取叶缘锯齿等特征, 提出了计算机辅助植物分类与识别的系统; 傅

收稿日期: 2015-07-14; 修回日期: 2015-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(D010104); 北京市科技新星项目(Z151100000315056)

作者简介: 杜芳(1981-), 女, 甘肃兰州人, 讲师, 博士, e-mail: dufang325@bjfu.edu.cn, 研究方向为种群遗传学、森林生态学, 通信联系人.

弘等^[9]阐述了一种基于人工神经网络的叶脉提取方法;朱静等^[10]通过对叶片图像进行变换、平滑和分割等编辑处理,实现了叶形状及叶缘特征的结果输出;王晓峰等^[1]采用了一种新的移动中值中心超球分类器,利用提取的植物叶片形状特征对20多种植物叶片进行快速识别;贺鹏等^[11]基于综合提取的8种叶片形状和纹理特征,利用概率神经网络分类器识别了30种植物叶片形态.国外的叶片识别研究起步较早,1986年Ingrouille等^[12]提取了27种叶形特征,用主成分分析方法对橡树进行了分类;Mc Donald等^[13]通过形态学图像处理的方法对植物叶片进行纹理分析后进行识别;Guyer等^[14]通过提取17种叶片形状特征,对40余种植物进行了分类;Kremer等^[15]利用线性测量和3种多元统计分析方法,研究了混生的夏栎(*Quercus robur*)和岩生栎(*Quercus petraea*)叶片形态的差异;Fortini等^[16]通过提取并测量叶基形状、叶柄及叶片长度等基本的叶片形态指数,对3种同域杂交的白栎树种叶片特性差异进行了区分.上述研究是在传统测量基础上利用计算机等新技术对叶片识别方法的改良,在一定程度上弥补了传统叶片测量的一些弊端,但仍属于传统测量的范畴,依然存在以下问题:较难评估线性尺寸的同源性,有些指标(最大宽度)不能作为同源性状;相同的距离数据可以从不同形态叶片中获取;由于不能保存变量间几何关系,因此不能生成图形代表线性尺寸.这样叶片形态某些方面的特征就会丢失,从而对结果造成影响^[6].

几何形态测量法是在研究对象形态结构上根据一定的原则选取标点或轮廓线,转换为2维或3维坐标系中的点阵,并利用这些点阵代表形态结构的信息,然后利用叠印法对原始坐标进行转化,剔除大小以及方位因素,使得所有样本投射到相同空间中,而具有可比性^[7].与传统的形态测量相比,该方法克服了仅仅依靠线性尺寸、角度、指数等指标来描述个体差异的缺点^[17].近年来基于标志点的几何形态测量逐渐应用到植物叶片形态研究中,主要通过分析标志点的相对位置,并以所形成的点的集合来模拟叶片轮廓及表面,将叶片形状量化.由于该方法在量化植物叶片细小的形状差异,并将差异可视化方面具有一定的优势^[18],在国外得到了较为广泛的应用.Jensen^[19]首次使用几何形态测量方法研究了北美一些栎树的亲缘关系,基于叶片标志点,他采用旋转拟合的方法,通过生成线性特征及角度比较不同栎类间叶片的形

态差异;Jensen等^[20]又基于标志点的几何形态测量方法研究了枫属树种叶形差别及不同枫属树种之间的杂交情况;Viscosi等^[21]介绍了基于叶片标志点分析叶片形态的方法,其研究表明植物叶片适合用标志点的方法进行分析.

目前国内基于标志点几何形态测量的方法大多集中在昆虫学、动物学等方面^[22-23],在植物叶片形状分化方面的研究尚未见报道.本研究通过查阅有关资料^[18,24],以川滇高山栎(*Quercus aquifolioides*)叶片为例,介绍了基于叶片标志点使用Morpho J软件进行叶片形态分析的方法.该方法首先通过使用tps系列或Image J软件获取叶片图像标志点,并将这些标志点数字化,然后使用Morpho J软件对获取的叶形数据进行分析.

1 标志点数据获取模块

1.1 标本整理、图像获取

将采集到的川滇高山栎叶片平整保存,对每个居群进行编号,用分辨率为300 dpi的扫描仪对叶脉较为清晰的叶背面进行扫描,保存图片.

1.2 软件获取

Image J(<http://rsbweb.nih.gov/ij/download.html>)是一款应用较为成熟的图像处理软件,除了基本的图像操作外,还能进行图片的区域和像素统计,间距、角度计算,以及进行傅里叶变换等操作.本研究采用Image J提取叶片标志点以及外形轮廓.安装之前需要下载landmark选择插件(<http://bigwww.epfl.ch/thevenaz/pointpicker/>).

将Image J软件包解压后,将Point Picker的文件夹复制到Image J文件夹中子文件夹Plugins中,打开Image J,在菜单栏中找到“Plugins”点击找到“install”后,点击加载“Point Picker”的压缩包.

1.2.1 确定标志点

启动Image J,选择“File”→“Import”→“Image Sequence”,选定并打开一张叶片图像后,操作步骤如下:打开“Point Picker”,选择“Plugins”→“Point-Picker”,在出现的工具条上选择带“+”钢笔头形状的工具在叶片的右侧标点(可用放大镜工具调整图像大小).给每一片叶子标点的时候务必按照统一的顺序,如果想调整顺序可以选择带“▲”的钢笔头形状的工具(标志点位置参照Viscosi等^[21]).当标好所有的点之后,点击输出图标(纸张形状),然后点击“show”选项,选中所有数据后,复制并粘贴到Excel中,空出最上一行和最下一行.

在电子表格中,标志点的 x 坐标值和 y 坐标值分别为第2、3列,在 x 坐标值数列的上方一行输入文本“LM(landmarker)=”,其后为标志点的数目(比如:LM=11),并在 x 坐标值数列的下方一行输入文本“ID(样本数据名称)=”,后跟分类群的名字(比如:ID=pop15_T1_L1),然后关闭数据窗口,点击返回按钮(显微镜图标)并打开下一张图片.重复以上步骤直到标完所有图片.

1.2.2 标志点坐标的格式转化

用于后续叶形分析软件Morpho J的输入文件类型包括TPS、text等格式,所以在进行分析数据之前需要将标志点的坐标数据文件转化成Morpho J支持的文件类型.步骤为:在Excel中选中并复制第2、3列,从第1行“LM=11”到最后一行“ID= pop17_T1_L5”所有的数据.然后创建一个文本研究档,并把该数据复制进去、保存.本研究以川滇高山栎的3个居群,每个居群各1棵树,每棵树5片树叶的形态的数据为例.

1.2.3 生成轮廓坐标

Morpho J中叶片轮廓图的生成需要另外导入一个“outline”文件,生成该文件之前需要叶轮廓上点的坐标.步骤为:选择“Analyze”→“Set Measurements”→“Invent Y Coordinates”;打开图像,并用放大镜调整到合适大小;选择多边形选择工具,在每片叶片相同的地方点击该工具进行叶轮廓的选取(若删除点可点击Alt键,添加点可点击Shift键并移动点到合适位置);轮廓绘制完成后,保存为坐标文件:“File”→“Save as”→“XY Coordinates”.

2 Morpho J叶形分析模块

Morpho J(http://www.flywings.org.uk/Morpho_J_page.htm)是一款几何形态分析软件,在国外应用较为广泛,其基于普氏叠印法去除2维或3维标志点坐标的非形态变异后,可以进行许多重要类型的几何形态分析,包括识别离群值,生成协方差矩阵,进行主成分分析、典型变量分析等分析操作,同时可以对形状变化的统计结果形成可视化的图形.

2.1 导入文件数据

安装并打开Morpho J后,在“File”中选择“Create New Project”创建一个新的项目,在出现的对话框中给该项目和数据库命名(比如“aquifolioides landmarks”),并选择“TPS”文件类型,找到在“查找”中选择预处理的文件.

叶片标本上标点的位置、取向和比例等非形态的变化会直接导致分析的相关变化,因此必须除去非形态变异对分析的干扰,一些非形态变异的干扰一旦去除,形态变异的变量就可以用来比较不同叶片样本间的差异,另外图形化的相互比较也可实现.该过程通常通过叠印法完成,本研究使用普氏叠印法去除非形状变异,步骤为:在“Project Tree”中选定要处理的数据后,选择“Preliminaries”→“New Procrustes Fit”,在弹出框中选择“Align by principal axes”后点击“Perform Procrustes Fit”.

2.2 检验离群值

检验数据中是否存在因测量误差或其它原因导致的离群值通常是非常重要的,此时可以在“Preliminaries”菜单中选择“Find Outliers”,在弹出框的左下方“Included”中显示每个个体偏离平均值的数值,此时可根据偏差大小找到离群值并选择排除或保留.

2.3 数据分类

通常要将数据库中某些信息进行统计分析,比如单独分析每个居群,此时就需要对数据库中的信息进行提取并重新分类.选择“Preliminaries”→“Extract New Classifier from ID String”.在“Name for new classifier”框中给新的分类命名,这里命名“pop”.根据“Identifier strings”中个体字符所显示居群名称有5个字符长,从第1个字符到第5个字符,因此“First character”为1,“Last character”为5.点击“Execute”.当提取新的分类后可以在“Preliminaries”下选择“Edit Classifier”检查并编辑结果.此时可以建立新的子样本用于分析,步骤为:选择“Preliminaries”→“subdivide dataset by”,可根据实际情况选择想要分析的居群.

2.4 主成分分析

主成分分析是将原变量重新组合成一组新的互相无关的几个综合变量,同时通过降维以发现影响形态特征主导因子的方法.这里使用主成分分析一方面可以用来发现潜在的离群值,另一方面还可以找出叶形态变化的主要特征,并且作为一种分类分析用于样本分析及检测^[23].

进行主成分分析之前首先要创建叠印后的叶形态坐标的协方差矩阵.点击“Preliminaries”→“Generate Covariance Matrix”;在“data types”框中选择“Procrustes coordinates”后点击“Execute”按钮.此时无任何可视的变化出现.然后可以进行主成

分分析以显示不同的叶片在几何空间上的异同. 点击“Variation”→“Principal Components Analysis”; 在出现的“graphics”窗口上点击“PC scores”, 然后在散点图(图1a)上右击鼠标可编辑图像, 比如选择“Label Data Points”, 可对所有点进行标识. 另外分析结果显示在“result”中, 右击可选择输出结果.

2.5 典型变量分析

典型变量分析是一种多元统计分析方法, 其通过利用多个变量构造一组新变量, 即典型变量, 然后进行若干个迭代, 选择出最大限度地描述处理间差异的几个典型变量. 在叶形分析中, 这些具有不同数值的典型变量就可以检测更好地区分不同群体的叶形特征. 步骤为: 选择“Comparison”→“Canonical Variate Analysis”, 在出现的对话框中的“Classifier variables”使用之前提取的新的分类变量 pop(居群)用于分析, 最后在复选框中可根据实际情况选择是否进行置换检验. 点击“Execute”进行分析. 之后在“Graphic”菜单中可查看形态可视化结果, “Results”菜单中则显示分析结果.

2.6 几何空间中的形态可视化操作

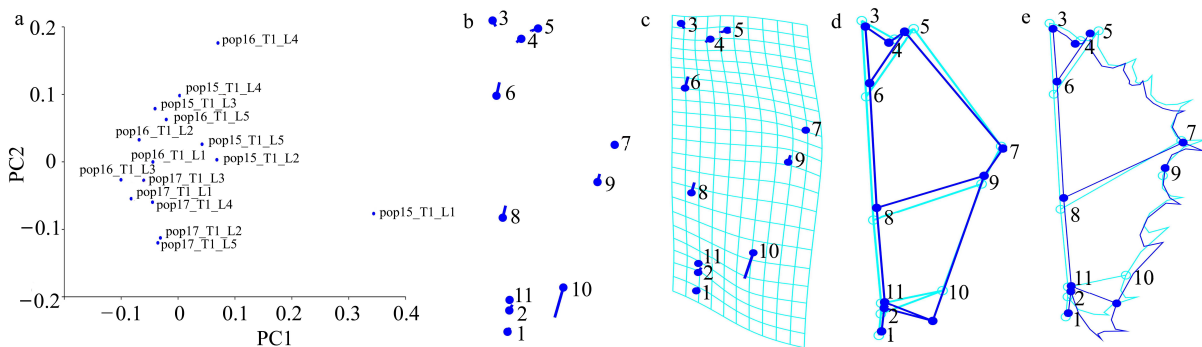
为了形象地表示与统计分析结果相关联的形态变化, Morpho J 提供了4种主要的图形显示结果图, 分别为: 棒棒糖图、转换网格图、扭曲轮廓图以及线框图. 4种图都表示从叶形的平均形态到

目标形态的形态变化. 这4种图形在主成分分析等其它分析后可生成, 这里以主成分分析生成该4种图形为例介绍相关创建方法.

棒棒糖图(图1b)可显示标志点位置的改变. 进行主成分分析后就会在“PC shape changes”窗口下自动生成PC1的棒棒糖图.

变形网格图的创建(图1c): 基于薄版样条的变形的矩形网格可显示形态变化, 比如想要知道主成分分析散点图中 pop16_T1_L3 个体相对于其它个体的形态(注意到它位于PC1轴上-0.10的位置). 欲使该位置在形态空间上可视化, 需要返回到“PC shape changes”框中, 然后右击背景选择: “Change type of graph”→“Transformation Grid”; 再右击选择“Set Scale Factor”设置为-0.10(pop16_T1_L3)的参数. 另外通过弹出菜单可改变水平和垂直网格线的数量.

线框图是标志点之间的连线的集合, 可帮助研究者观测标志点的结构配置. 使用 Morpho J 软件创建叶线框图(图1d)过程如下: 选择“Preliminaries”→“create or edit wireframe”, 在出现图型背景中右击鼠标可以调整图形的方向. 编辑线框, 即在标志点之间进行划线, 有两种方法: 可以点击图中的一个标志点, 然后拖拽到另一个标志点上; 在右边下滑菜单中选择要连线的两个点然后点击“Link landmarks”. 点击“Delete link”可删除线段.



a PC1 与 PC2 的散点图; b 叶形棒棒糖图(基于 PC1), 该图表示带蓝线的标志点的位置的改变, 每条线以初始形状(通常是平均形状)的标志点位置的点为起点, 线的长度和方向表示每个标志点从初始形状到目标形状的移动; c 叶形变化网格图(基于 PC1), 其中的蓝线表示 pop16_T1_L3 的标志点(蓝棒的末端)与川滇高山栎平均形态(带数字的蓝点)的差异. 网格的弯曲类似于将川滇高山栎的平均形态变形为 pop16_T1_L3 个体; d 叶形变化线框图(基于 PC1), 其中浅蓝色的线表示初始形状, 深蓝色的线表示目标形状; e: 叶形轮廓图(基于 PC1)

图 1 叶形分析可视化图像

Figure 1 Visualization images of morphological analysis of leaves

扭曲轮廓图同样利用薄版样条, 不同于矩形网格的是它需要使用生物结构的外形轮廓, 然后由量化得到的外形轮廓数据生成. 要创建叶轮

廓图(图1e)首先要将上述获得的叶轮廓坐标数据转化为 Morpho J 中所需的轮廓文件格式, 该步需要在电子表格中编辑. 该轮廓文件具有3列, 第1

列为所需的曲线段数量(这里共有5条),其中“0”表示标志点(这里共有11个),第1条曲线段则标记为“1”,第2条为“2”,依次类推,第2、3列为曲线段上各个点的 x 、 y 的坐标.想要使得所得图像更加精确,可以增加线段上点的数量以及线段的数量.然后把编辑好的数据转成纯文本格式导入到Morpho J中,步骤为:选择“File”→“import Outline File”,在“Graphics”下的“PC shape changes”框中右击选择“Change the Type of Graph”→“Warped Outline Drawing”.

最后可以在“Preliminaries”菜单选择“Set Options for Shape Graphs”,对这些图形包括颜色在内的特定的选项进行设置.

如果想要基于PC2建立形态差异的模型,在“PC shape changes”中右键找到“Choose PC to Display”选择PC2即可.

Morpho J软件除可以进行上述方法介绍的几种叶形分析外,还可以进行其它几种分析,如通过交叉验证用来较为可靠地区分不同组别的判别分析,以及若重复测量叶片形态,可以量化相对于生物特性影响的测量误差的普式方差分析,检验叶形与其它变量的协同关系的回归分析等.这些统计分析方法都极大丰富了Morpho J软件分析叶片形态的功能,使获得更详尽的叶形数据成为可能.

3 总结与展望

目前几何形态测量技术已经在医学、脊椎动物学、昆虫学等领域得到了较为广泛的应用,而对于植物的研究应用较少,且国内鲜有报道.本研究介绍了基于叶片标志点使用Morpho J软件分析植物叶片形态的基本方法.与传统测量法相比,该方法能够更加准确地对叶片形态进行量化分析,提供更加丰富的形态变异信息,避免了单一结构测量中信息量冗杂、不完整统计、模式单一、不够精细等问题^[25],能够找出较难发现的形态差异特征^[22],另外还能够以图形的形式直观表现形态的差异,它的应用有助于在描述生物多样性表型维度的许多重要方面提高科学严谨性,但是仍然存在比如需要手动选取标志点,导致数据不够准确,以及叶片标志点缺少普适性等问题.

植物叶片形态易受环境因素影响,使得同域分布的近缘种之间存在相似性,而异域分布的同种不同种群间却往往又存在较大差异,造成分类研究难度较大,运用几何形态分析可以找出叶片间细微的差别,能够更加有效地识别近缘植物种群,

有利于植物资源的保护,并且通过与分子生物学、种群遗传学、系统发育学等学科相结合,有助于发现叶形与遗传、进化的关系,比如Wei等^[26]测量了辽东栎(*Quercus liaotungensis*)和蒙古栎(*Quercus mongolica*)叶片的相关形态特征并结合分子数据研究,表明两者虽然存在杂交,但是在杂交区各自的形态依然是截然不同的.不同生境的植物叶片能够表现出不同的适应性结构,其变化特征常用于植物对环境的适应性研究^[27].李琪佳等^[28]通过对甘肃平凉崆峒山不同海拔梯度分布的辽东栎的生理形态和解剖形态进行测量表明,辽东栎比叶面积、毛基密度、气孔密度以及气孔长度等叶特征随海拔梯度产生相应适应性响应.目前对川滇高山栎叶片形态的研究只存在于解剖结构方面,没有叶形轮廓等表观特征的研究,遗传及不同海拔等环境因素是否会影响川滇高山栎叶片的表观特征目前还有待研究.因此本研究介绍的叶片形态的分析方法为今后川滇高山栎基于叶形的相关研究提供了新的参考依据.

参考文献

- [1] 王晓峰,黄德双,杜吉祥,等.叶片图像特征提取与识别技术的研究[J].计算机工程与应用,2006,42(3):190-193.
- [2] 潘晓星,杨天,穆立蕾.植物叶片特征数字化在植物识别上的应用[J].国土与自然资源研究,2014(1):79-81.
- [3] 高三基,罗俊,陈如凯,等.甘蔗品种(系)叶片形态特征数学分析[J].植物遗传资源学报,2002,3(3):21-25.
- [4] 盛宝龙,赵洪亮,马连宝,等.银杏叶片形态研究[J].植物遗传资源学报,2004,5(1):65-68.
- [5] 李梅,韩海荣,康峰峰,等.山西灵空山辽东栎种群叶性状表型变异研究[J].北京林业大学学报,2005,27(5):10-16.
- [6] 白明,杨星科.几何形态测量法在生物形态学研究中的应用[J].应用昆虫学报,2007,44(1):143-147.
- [7] 白明,杨星科,李静,等.几何形态学:关于形态定量比较的科学计算工具[J].科学通报,2014,59(10):887-894.
- [8] 祁享年,寿韬,金水虎.基于叶片特征的计算机辅助植物识别模型[J].浙江林学院学报,2003,20(3):281-284.
- [9] 傅弘,池哲儒,常杰,等.基于人工神经网络的叶脉信息提取-植物活体机器识别研究 I [J].植物学通报,2004,21(4):429-436.
- [10] 朱静,田兴军,陈彬,等.植物叶形的计算机识别系统[J].植物学报,2005,22(5):599-604.

- [11] 贺鹏, 黄林. 植物叶片特征提取及识别[J]. 农机化研究, 2008(6): 168–170.
- [12] Ingrouille M J, Laird S M. A quantitative approach to oak variability in some north London woodlands[J]. Lond Nat, 1986, 65: 35–46.
- [13] Mc Donald T, Chen Y R. Application of morphological image processing in agriculture[M]. Transactions of the Asae, 1990, 33(4): 1345–1352.
- [14] Guyer D E, Miles G E, Gaultney L D, et al. Application of machine vision to shape analysis in leaf and plant identification[J]. Transactions of the Asae, 1993, 36(1): 163–171.
- [15] Kremer A, Dupouey J L, Deans J D, et al. Leaf morphological differentiation between *Quercus robur* and *Quercu spetraeais* stable across western European mixed oak stands[J]. Annals of Forest Science, 2002, 59(7): 777–787.
- [16] Fortini P, Di Marzio P, Di Pietro R. Differentiation and hybridization of *Quercus frainetto*, *Q. petraea*, and *Q. pubescens* (Fagaceae): insights from macro-morphological leaf traits and molecular data[J]. Plant Systematics and Evolution, 2015, 301(1): 375–385.
- [17] Mitteroecker P, Gunz P. Advances in geometric morphometrics[J]. Evolutionary Biology, 2009, 36(2): 235–247.
- [18] Viscosi V, Cardini A. Leaf morphology, taxonomy and geometric morphometrics: a simplified protocol for beginners[J]. PLoS One, 2011, 6(10): 25630.
- [19] Jensen R J. Detecting shape variation in oak leaf morphology: a comparison of rotational-fit methods[J]. American Journal of Botany, 1990, 77(10): 1279–1293.
- [20] Jensen R J, Ciofani K M, Miramontes L C. Lines, outlines, and landmarks: morphometric analyses of leaves of *Acer rubrum*, *Acer saccharinum* (Aceraceae) and their hybrid[J]. Taxon, 2002, 51(3): 475–492.
- [21] Viscosi V, Fortini P, Slice D E, et al. Geometric morphometric analyses of leaf variation in four oak species of the subgenus *Quercus* (Fagaceae)[J]. Plant Biosystems, 2009, 143(3): 575–587.
- [22] 何锴, 白明, 万韬, 等. 白尾鼯(鼯科: 哺乳纲)下颌骨几何形态测量分析及地理分化研究[J]. 兽类学报, 2013, 33(1): 7–17.
- [23] 潘鹏亮, 沈佐锐, 杨红珍, 等. 3种绢蝶翅脉数字化特征的提取及初步分析[J]. 动物分类学报, 2008, 33(3): 566–571.
- [24] Klingenberg C P. Morpho J: an integrated software package for geometric morphometrics[J]. Molecular Ecology Resources, 2011, 11(2): 353–357.
- [25] Lawing A M, Polly P D. Geometric morphometrics: recent applications to the study evolution and development[J]. Journal of Zoology, 2010, 280(1): 1–7.
- [26] Wei Lai, Li Yue-fei, Zhang Han, et al. Variation in morphological traits in a recent hybrid zone between closely related *Quercus liaotungensis* and *Quercus mongolica* (Fagaceae)[J]. Journal of Plant Ecology, 2015, 8(2): 224–229.
- [27] 曹波, 刘玉冰, 刘美玲, 等. 河西走廊不同生境芦苇叶表皮微形态和解剖结构特征[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2013, 49(3): 370–376.
- [28] 李琪佳, 赵振瑞, 陈稳兴, 等. 甘肃平凉崆峒山不同海拔梯度辽东栎叶特性变化[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2015, 51(1): 13–19.

(责任编辑: 王春燕)

甘肃生态论坛专栏介绍

甘肃省位于青藏高原、蒙古高原和黄土高原交汇处,特殊的地理位置使其境内发育着结构、功能和过程迥异的各种生态系统,分布有高寒草甸、高寒草原、森林、荒漠等。随着生态文明建设的不断深入,甘肃省对中国的生态安全发挥着越来越重要的作用。但是长期以来,由于人口的压力过大、国民经济发展的需求增加,加上人们的生态意识薄弱,盲目开垦、乱砍乱伐、过度放牧、水源开采加剧、水分利用效率低下等行为造成了省内沙地面积增加、水土流失加剧、高原湿地面积萎缩、黄河水源补给能力衰减等生态系统退化现象。甘肃省生态学会围绕甘肃省以及中国西部地区重大生态问题进行科学研究及学术交流,通过咨询培训、新技术推广,加强生态文明建设,推动甘肃省及西部地区生态环境的改善。本着对地方生态安全和经济建设负责任的态度,组织省内从事生态教学、科研和技术推广的人员,每年针对甘肃省的一个生态问题进行专门的研讨,本专栏的文章是2015年度“甘肃生态论坛”评出的部分优秀论文。