

梨冠网蝽数学形态特征的提取与分析*

潘鹏亮** 史洪中 尹新明 王国君 刘红敏

(信阳农林学院农学院, 信阳 464000)

摘 要 【目的】利用图像处理技术获取昆虫外部数学形态特征,并用于雌雄个体判别,对其远程鉴定具有重要意义。本研究的目的是通过对图像获取技术的研究,获得梨冠网蝽 *Stephanitis nash* Esaki et Takeya 雌雄个体差异的参数指标。【方法】利用中国农业大学 IPMist 实验室开发的 BugShape (v1.0) 软件对梨冠网蝽成虫的外部数学形态特征进行提取,并使用 SPSS (v22.0) 对数据进行分析。【结果】扫描分辨率高低对部分参数有显著影响,其中周长、中胸宽、中胸宽/腹宽等参数随着分辨率的增加而增大。软件自动测量参数(面积、等效圆半径、偏心率、紧凑度、圆弧度)和手动测量参数(中胸宽、腹宽、体长/中胸宽、体长/腹宽、中胸宽/腹宽)在雌雄个体间存在显著差异。在 4 800 dpi 时,手动测量梨冠网蝽的体长为 2.25 mm 左右,雌性成虫的中胸宽和腹宽分别比雄性成虫宽 0.02 mm 和 0.19 mm。在 1 200 dpi 分辨率下,利用手动测量参数对雌雄个体进行判别时,交叉验证判别正确率达 99%,仅使用自动测量参数进行判别时,交叉验证判别的正确率为 79%,而同时使用两类参数时,交叉验证判别正确率为 97%。【结论】利用图像处理技术对梨冠网蝽进行雌雄识别时扫描的最佳分辨率为 1 200 dpi,获取到的部分参数在雌雄个体间存在显著差异,可以作为判别其两性的参考指标。

关键词 梨冠网蝽, 形态特征, 雌雄鉴定, 数值分类, 远程识别

Measurement and analysis of morphometric features of *Stephanitis nashi* Esaki et Takeya (Hemiptera: Tingidae)

PAN Peng-Liang** SHI Hong-Zhong YIN Xin-Ming WANG Guo-Jun LIU Hong-Min

(College of Agronomy, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464000, China)

Abstract [Objectives] To identify diagnostic morphometric features of insect species that allow the sex of individuals to be reliably determined is of great importance to the remote identification of insect species using image processing techniques. The aim of this study was to use image acquisition technology to identify the parameters distinguishing female and male adults of the pear lace bug *Stephanitis nash* Esaki et Takeya. [Methods] Morphometric characteristics of adults were extracted using the software BugShape v1.0 developed by IPMist Lab. at China Agricultural University and the data were analyzed in SPSS v22.0. Images of adults were created with a flatbed scanner (Epson perfection v370) with a transparency adapter. Fifty samples of each gender were measured at three scanning resolutions (1 200 dpi, 2 400 dpi and 4 800 dpi). [Results] Scanning resolution had a positive effect on some parameters such as perimeter, mesothorax width (MW), and the mesothorax width /abdomen width (MW/AW) ratio, which increased with increasing resolution. Body length/abdomen width (BL/AW), and MW/AW ratios derived from both automatically measured (area, equivalent radius (ER), eccentricity, compactness and circularity), and manually measured variables (MW, AW, the body length/mesothorax width (BL/MW), significantly differed between female and male adults. At 4 800 dpi scanning resolution, the BL of the pear lace bug was about 2.25 mm and female MW and AW were 0.02 mm and 0.19 mm, respectively, longer than those of males using manually-measured parameters. At 1 200 dpi resolution, discriminant accuracy based on cross validation was 99% using manually measured variables to discriminate the sexes, and 79% using automatically measured variables. However, using both kinds of variables increased the accuracy to 97%. [Conclusion] 1 200 dpi is the best resolution for discriminating male and female

*资助项目 Supported projects: 河南省产业技术体系(大宗水果)项目(S2014-11-G03); 信阳农林学院校内青年教师基金项目(201401015)

**通讯作者 Corresponding author, E-mail: panzai-7@163.com

收稿日期 Received: 2016-12-12, 接受日期 Accepted: 2017-03-30

pear lace bugs with image processing technology. Some morphometric variables differ significantly between the two sexes, and can therefore serve as standard diagnostic criteria for sexing this species.

Key words *Stephanitis nashi*, morphological characteristics, gender identification, numerical taxonomy, remote recognition

外部形态特征是区分昆虫种类的主要指标,是昆虫分类学研究的主要内容之一。随着计算机技术和图像处理技术的出现,昆虫的数值分类得到快速发展(沈佐锐和于新文,1998)。利用昆虫全局几何形态特征、局部数值特征或色彩特征,可以实现某些昆虫种类的快速鉴定(赵汗青等,2002,2003a,2003b;刘芳等,2008;潘鹏亮等,2008;杨红珍等,2008,2011;蔡小娜等,2012,2016;苏筱雨等,2016)。与此同时,国内外相关研究人员开发出适用于不同昆虫的应用软件。如 Walker 在 1998 年开发了 Morphometrika,并被用于昆士兰果蝇 *Bactrocera tryoni* (Froggatt) 野生种群和人工繁育种群的差异(Gilchrist and Crisafulli, 2006)。英国自然历史博物馆开发的 DAISY (The Digital Automated Identification SYstem) 被应用于膜翅目、双翅目、鳞翅目以及蛛形纲节肢动物的鉴定中,误判率约为 5%(O'Neill, 2000; Watson *et al.*, 2003)。Rohlf 开发的 TPSDigS 可以数字化标本特征点和轮廓线等(<http://life.bio.sunysb.edu/morph/>),被很好地应用于水蜘蛛 *Torrenticola* (Becerra and Valdecasas, 2004)、果蝇 *Drosophila* (Klaczko and Bitnermathe, 1990; Moraes *et al.*, 2004)、小唇泥蜂 *Tachysphex* (Pretorius, 2005)、蝶类(潘鹏亮等,2008)和蛾类(蔡小娜等,2016)等的分类鉴定。Steinhage 等开发的 ABIS (Arbuckle *et al.*, 2002) 和 Tofilski (2004) 开发的 DrawWing 在黄蜂 *Dolichovespula* 种群鉴定和蜜蜂 *Apis* 育种 (MacLeod, 2008) 中被广泛应用。国内也有一些较成熟的昆虫远程鉴定系统和昆虫特征提取软件,比如中国农业大学 IPMist 实验室开发的 BugShape v1.0 就是其中之一,也成功应用于鳞翅目等昆虫的分类学研究(蔡小娜等,2013)。但与国外相比,应用范围和验证性论文略显不足。

梨冠网蝽 *Stephanitis nashi* Esaki *et* Takeya 属于半翅目 Hemiptera 网蝽科 Tingidae 昆虫,与其它种类的网蝽相比,其寄主范围广,不但为害梨、桃、苹果、樱桃等果树,也为害海棠、樱花等园林观赏树种(董立坤等,2008;邱强,2013),造成严重的经济损失。因此,利用图像处理和数字化等现代技术对该害虫进行种类或性别的准确识别显得十分重要。本研究拟利用计算机图像处理与分析技术,获取到梨冠网蝽数学形态特征,并试图对其雌雄成虫加以区分,筛选出最佳操作方法。其结果将为害虫种类远程识别奠定基础,将有利于对该害虫进行高效监测,提高对果树和园林害虫的防控效率。

1 材料与方法

1.1 试验用昆虫

梨冠网蝽 *S. nashi* 采自于河南省信阳市百花园海棠树,采集到的昆虫标本放入盛有无水乙醇的离心管中,带回室内在解剖镜下进行种类和雌雄鉴定。

1.2 图像获取方法

本研究中采用爱普生扫描仪(Epson Perfection V370)进行图像获取,并采用该扫描仪的透扫功能,参照前人的研究结果,设置 3 种不同的分辨率,即 1 200、2 400、4 800 dpi。每次随机挑选 50 头雌虫或雄虫进行批量扫描。标本放置时,以虫体背面向下平放在扫描仪玻璃板上,以便获取到虫体背面整体轮廓特征。同时,在相应分辨率下扫描测量用直尺,以获得梨冠网蝽相关参数的实际尺寸,并用于最终的数据分析。

1.3 数据采集与处理方法

利用中国农业大学 IPMist 实验室开发的 BugShape v1.0 软件对梨冠网蝽图片进行数学形态学特征的自动获取,对体长 (Body length,

BL) 中胸宽度(Mesothorax width, MW)、腹部宽度(Abdomen width, AW)进行手动测量,并计算出相应比值,作为雌雄判别的参数。利用单因素方差分析(One-way ANOVA) 独立样本 t -检验(Independent samples t -test) 典型判别分析(Discriminant analysis) 等方法分别对不同分辨率的影响、雌雄两性差异性和各类参数对雌雄个体判别正确率的影响进行了分析,所有运算均在 SPSS v22.0 中进行。

2 结果与分析

2.1 分辨率对各参数的影响

本试验利用扫描仪 3 种分辨率获取到梨冠网蝽清晰图片,并利用 BugShape v1.0 软件自动获取到 10 个几何形态特征参数、3 个手动测量参数和 3 个手动测量参数的比值。在方差分析之前,对所有参数进行了正态性检验和方差齐性检验,软件自动获取的梨冠网蝽参数,如周长、球状性和叶状性,以及手动测量参数中胸宽和体长/中胸宽(Body length/Mesothorax width, BL/MW) 的方差同质性检验 P 值小于 0.05。对此类数据进行布洛姆公式(Blom's formula) 正态转换后,对不同分辨率各参数进行单因素方差分析,结果表明面积($F=1.193$; $df=2$, 297; $P=0.305$) 短轴长度(Short axis length, SAL) ($F=2.011$; $df=2$,

297; $P=0.136$) 等效圆半径(Equivalent radius, ER) ($F=1.193$; $df=2$, 297; $P=0.305$) 偏心率($F=0.781$; $df=2$, 297; $P=0.459$)、叶状性($F=2.955$; $df=2$, 297; $P=0.054$)、圆形度($F=0.885$; $df=2$, 297; $P=0.414$) 腹宽($F=0.844$; $df=2$, 297; $P=0.431$) 体长/腹宽(Body length/Abdomen width, BL/AW) ($F=2.650$; $df=2$, 297; $P=0.072$) 差异不显著,而周长($F=71.061$; $df=2$, 297; $P<0.001$) 长轴长度(Long axis length, LAL) ($F=4.055$; $df=2$, 297; $P=0.018$) 紧凑度($F=80.579$; $df=2$, 297; $P<0.001$) 球状性($F=3.212$; $df=2$, 297; $P=0.042$) 体长($F=3.644$; $df=2$, 297; $P=0.027$) 中胸宽($F=16.317$; $df=2$, 297; $P<0.001$) 体长/中胸宽($F=4.643$; $df=2$, 297; $P=0.010$) 中胸宽/腹宽(Mesothorax width/Abdomen width, MW/AW) ($F=9.810$; $df=2$, 297; $P<0.001$) 差异达到显著水平。

从具体数据来看,周长、中胸宽、中胸宽/腹宽等参数的绝对值随着分辨率的提高有增加的趋势,紧凑度和体长/中胸宽等参数随分辨率的提高而降低,此类参数受分辨率影响较大。多重比较(LSD)的结果表明,在 1 200 dpi 分辨率下,梨冠网蝽周长、中胸宽和中胸宽/腹宽的值最低,紧凑度和体长/中胸宽的值最高,且与 2 400 dpi 和 4 800 dpi 下测量的值有显著差异(图 1)。

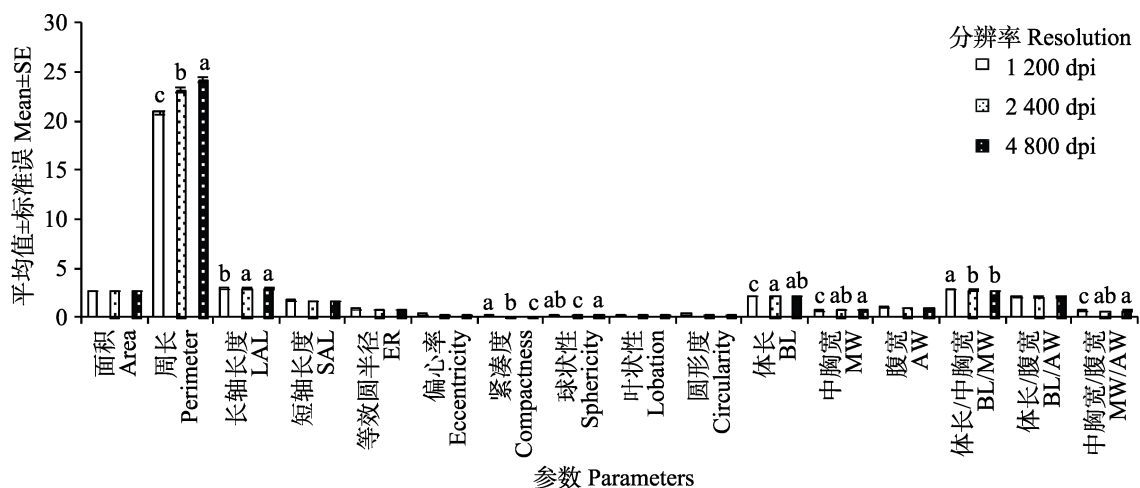


图 1 各参数在不同分辨率下的差异显著性

Fig. 1 Differential significance of parameters with different scanning resolutions

柱上标有不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Histograms with different small letters indicate significant difference at 0.05 level among treatments within one group.

2.2 雌雄个体在不同分辨率下各参数的差异

利用独立样本 t -检验分析了梨冠网蝽雌雄个体间的差异, 结果表明, 获取到的大多数参数在两个性别间均表现出显著差异。其中, 自动测量参数面积、等效圆半径、偏心率、紧凑度、圆形度和手动测量或计算参数中胸宽、腹宽、体长/中胸宽、体长/腹宽、中胸宽/腹宽在 3 个分

辨率下雌雄个体间差异均达到显著水平, 而其它参数受分辨率的影响差异显著性略有不同。在 1 200 dpi 下, 短轴长度和球状性在梨冠网蝽雌雄个体间差异不显著; 在 2 400 dpi 下, 周长、长轴长度、叶状性和体长差异不显著; 而在 4 800 dpi 下, 周长、长轴长度和体长差异不显著 (图 2)。

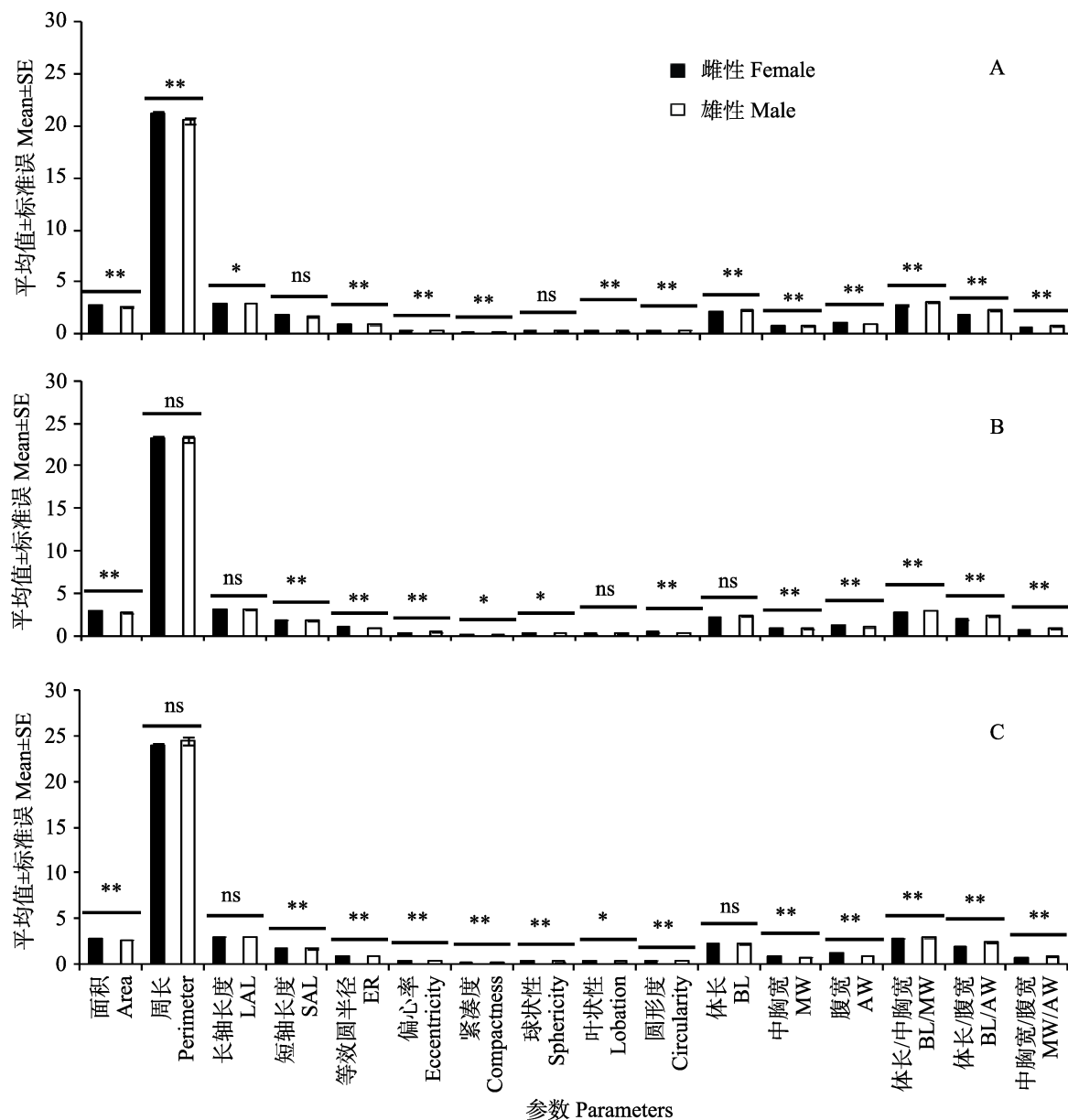


图 2 雌雄成虫各参数在不同分辨率下的差异显著性

Fig. 2 Differential significance of parameters from female and male adults with different scanning resolutions

A. 分辨率 1 200 dpi; B. 分辨率 2 400 dpi; C. 分辨率 4 800 dpi. **: $\alpha=0.01$, *: $\alpha=0.05$, ns: 不显著。

A. 1 200 dpi; B. 2 400 dpi; C. 4 800 dpi. **: $\alpha=0.01$, *: $\alpha=0.05$, ns: no significant.

从具体数据可以看出,在较高分辨率下(4 800 dpi),梨冠网蝽雌雄成虫的连翅体长(长轴长度)分别为(3.04 ± 0.09) mm 和(3.02 ± 0.11) mm,雌雄个体间相差 0.02 mm 左右。雌雄成虫连翅体宽(短轴长度)分别为(1.82 ± 0.06) mm 和(1.75 ± 0.10) mm,相差 0.07 mm 左右。而雌雄成虫实际的中胸宽度分别为(0.80 ± 0.02) mm 和(0.78 ± 0.03) mm,相差 0.02 mm;腹宽(腹部最宽处)雌雄分别为(1.14 ± 0.04) mm 和(0.95 ± 0.12) mm,相差 0.19 mm;但体长差异并不显著,雌雄均为 2.25 mm 左右。

2.3 雌雄个体判别准确性

利用不同类型的参数,通过典型判别分析对不同分辨率下梨冠网蝽雌雄个体进行了判别分析。结果表明,利用软件自动获取的 10 个参数进行雌雄个体判别时,正确率随着分辨率的提高而增加。最高分辨率与最低分辨率的原始判别正确率分别是 74%和 81%,而交叉判别的正确率分别为 73%和 79%,且雄性个体被误判的数量多于雌性个体。利用手动测量参数进行雌雄个体判别时,正确率有显著提升,且在 1 200 dpi 时,原始判别和交叉判别的正确率达到 99%,只有一头雌虫被误判。然而,当同时利用两类参数进行判别分析时,各分辨率下获取的参数对雌雄

个体的判别正确率差异不大,均在 96%以上。其中,1 200 dpi 时原始判别正确率为 100%,交叉判别的正确率为 97%(表 1)。

因此,在利用此类技术对梨冠网蝽进行雌雄识别时,分辨率设置为 1 200 dpi 效果最好。单独使用手动测量参数比单独使用软件自动获取参数效果好,而两类参数均参与其性别判定时,可以提高判别的稳定性和正确率。

3 结论

(1)不同分辨率对个别参数有显著影响,周长、中胸宽、中胸宽/腹宽等参数与分辨率大小有一定正相关性,而紧凑度和体长/中胸宽等参数与分辨率大小有一定负相关性。手动测量参数在 2 400 dpi 分辨率下与更高分辨率(4 800 dpi)差异不显著,而显著高于 1 200 dpi 下获取的参数。在最大光学分辨率(4 800 dpi)下,手动测量梨冠网蝽实际体长为 2.25 mm 左右,雌性成虫的中胸宽和腹宽分别比雄性成虫宽 0.02 mm 和 0.19 mm 左右。

(2)梨冠网蝽雌雄个体间在数学形态学特征上存在显著差异,其中软件自动测量参数,如面积、等效圆半径、偏心率、紧凑度、圆形度和手动测量参数,如中胸宽、腹宽、体长/中胸宽、体长/

表 1 不同分辨率下梨冠网蝽雌雄成虫聚类结果

Table 1 Classification results from female and male adults of *Stephanitis nashi* with different scanning resolutions

参数类型 Parameter types	分辨率(dpi) Resolutions	原始判别正确率 Original validation accuracy	误判个体 (♀/♂) Error judged samples	判别结果 (♀/♂) Correct judged samples	交叉判别正确率 Cross validation accuracy	误判个体 (♀/♂) Error judged samples	判别结果 (♀/♂) Correct judged samples
自动获取参数 Auto-extracted parameters	1 200	74%	11/15	54/46	73%	11/16	55/45
	2 400	77%	11/12	51/49	75%	12/13	51/49
	4 800	81%	5/14	59/41	79%	6/15	59/41
手动测量参数 Manual parameters	1 200	99%	1/0	49/51	99%	1/0	49/51
	2 400	94%	4/2	48/52	94%	4/2	48/52
	4 800	96%	1/3	52/48	92%	3/5	52/48
所有参数 All parameters	1 200	100%	0/0	50/50	97%	2/1	49/51
	2 400	98%	2/0	48/52	97%	2/1	49/51
	4 800	98%	1/1	50/50	96%	2/2	50/50

腹宽、中胸宽/腹宽在两个性别间存在显著差异, 可以作为判别其两性的主要参考指标。

(3) 利用软件自动获取参数对梨冠网蝽进行雌雄判别时, 正确率与分辨率存在一定的正相关关系, 交叉验证判别的正确率最高可达 79%, 且雄性个体被误判的机率较高。利用手动测量参数进行雌雄判别时, 正确率显著提高, 在 1 200 dpi 分辨率下, 交叉验证判别的正确率达 99%。使用两类参数进行判别时, 1 200 dpi 分辨率下交叉验证判别正确率达到 97%。因此, 使用该技术对梨冠网蝽进行雌雄识别时, 最佳分辨率为 1 200 dpi。

4 讨论

本研究使用扫描仪进行图像获取时设置了 3 个分辨率, 即 1 200、2 400、4 800 dpi, 主要考虑到以下几点: 一是 4 800 dpi 为本款扫描仪的最高光学分辨率, 在此分辨率下图像清晰度最佳。通常人们认为, 扫描时设定的分辨率越高, 得到的图像清晰度越高。而实际上扫描仪的分辨率分为光学分辨率和最大分辨率(插值分辨率), 在最大光学分辨率时得到的图像最清晰, 而高于最大光学分辨率后, 图像分辨率的提高是通过软件插值计算得到的, 不能增加图像的清晰度(张桂兰, 1999)。二是根据相关的报道, 一些软件, 比如 DrawWing (Tofilski, 2004) 在进行图像获取时要求扫描分辨率要达到 4 000 dpi, 但在进行分析时图像被转换为 2 400 dpi。还有一些关于处理大型动物图像的报道, 可以利用数码相机或摄像头获取, 要求 150 dpi 或更低的分辨率 (MacLeod, 2008)。三是本研究对象为梨冠网蝽, 其体长在 3 mm 以下, 未见对如此小型的昆虫进行相关的研究, 不清楚使用扫描仪能否获取到准确的数据。综合以上因素, 所以本文设置上述 3 种分辨率进行尝试性研究。本研究的结果证明, 使用扫描仪在 1 200 dpi 分辨率下获取到的图像可以被软件提取到其数学形态特征参数, 并可以用于区别其雌雄。

不同分辨率会对部分参数产生影响, 如周长、长轴长度、紧凑度、球状性、体长、中胸宽、

体长/中胸宽、中胸宽/腹宽等参数在不同分辨率下的差异达到了显著水平, 且周长、中胸宽、中胸宽/腹宽等绝对值会随着分辨率的增加而增大, 其中周长影响最大。这主要是因为在不同分辨率下梨冠网蝽图片边缘清晰度有差异, 周长的计算是通过边缘轮廓像素总点数决定的(于新文等, 2003)。在进行雌雄个体判别时, 面积、等效圆半径、偏心率、紧凑度、圆形度、中胸宽、腹宽、体长/中胸宽、体长/腹宽、中胸宽/腹宽等参数在 3 种分辨率下雌雄间差异均显著。然而, 后续的判别分析结果表明, 利用此技术对该害虫数学形态特征提取时, 并不是扫描时分辨率越高越好。因此, 根据结果分析, 本研究认为在较低分辨率下(1 200 dpi)获取到的数据用于梨冠网蝽雌雄鉴别时效果最佳。

通常情况下, 在昆虫特征获取方面对于较大型的昆虫进行图像处理与识别时采用提取局部或整体的颜色、纹理、形态等特征(刘芳等, 2008; 刘婷和赵惠燕, 2010; 竺乐庆等, 2010; 王建斌等, 2012; 徐源浩和齐焕芳, 2015), 而对于微小型昆虫数学形态特征提取的报道不多, 国内仅见到蚜虫(张建伟等, 2006)和白粉虱(牟少敏等, 2003)类昆虫计数软件开发应用的报道, 国外仅见到寄生蜂类(Villemant *et al.*, 2007)昆虫种类识别的报道。主要原因是此类昆虫由于个体较小, 通常人们会认为在对此类昆虫进行图像获取时对设备的要求较高。我们的研究结果证实, 小型昆虫的外部形态特征也可以通过图像处理与分析技术成功获取, 并能够应用于同种昆虫不同性别间的区分。其中, 部分软件自动测量参数(面积、等效圆半径、偏心率、紧凑度和圆形度)和手动测量参数(中胸宽、腹宽、体长/中胸宽、体长/腹宽、中胸宽/腹宽)在梨冠网蝽雌雄成虫的鉴别中起重要作用。如果利用该方法对更多微小型昆虫外部形态进行成功提取, 将会很大程度上拓宽此类技术应用的范围。因此, 我们认为基于数学形态特征的昆虫数字化技术能更好地与昆虫的远程识别, 甚至是和种群动态预测相结合, 能更好地服务于农业害虫的管理。

致谢: 中国农业大学彩万志教授在昆虫鉴定方面给予大力支持, 中国农业大学高灵旺副教授和沈佐锐教授在软件应用和论文写作方面提供了指导和建议, 在此一并感谢!

参考文献 (References)

- Arbuckle T, Schröder S, Steinhage V, Wittmann D, 2002. Biodiversity informatics in action: Identification and monitoring of bee species using ABIS. *Proc. 15th International Symposium Informatics for Environmental Protection*, Zurich. 425–430.
- Becerra JM, Valdecasas AG, 2004. Landmark superimposition for taxonomic identification. *Biological Journal of the Linnean Society*, 81(2): 267–274.
- Cai XN, Han X, Shen ZR, Huang DZ, Mi S, 2016. Digital classification of noctuid moths (Lepidoptera: Noctuidae) base on wings vein characteristics. *Journal of Environmental Entomology*, 38(2): 348–353. [蔡小娜, 韩旭, 沈佐锐, 黄大庄, 米爽, 2016. 基于蛾翅翅脉特征的夜蛾昆虫数字化分类研究 (鳞翅目: 夜蛾科). *环境昆虫学报*, 38(2): 348–353.]
- Cai XN, Huang DZ, Shen ZR, Gao LW, 2012. Feasibility of math-morphological characters of wings for classification and identification of noctuid moths (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 55(5): 596–605. [蔡小娜, 黄大庄, 沈佐锐, 高灵旺, 2012. 蛾翅数学形态特征用于夜蛾分类和鉴定的可行性研究. *昆虫学报*, 55(5): 596–605.]
- Cai XN, Huang DZ, Shen ZR, Gao LW, 2013. Research on artificial neural network method used for insects classification and identification: Principal component analysis and mathematical modeling. *Journal of Biomathematics*, 28(1): 23–33. [蔡小娜, 黄大庄, 沈佐锐, 高灵旺, 2013. 用于昆虫分类鉴定的人工神经网络方法研究: 主成分分析与数学建模. *生物数学学报*, 28(1): 23–33.]
- Dong LK, Li SQ, Xia WS, Jiang TP, Yang H, Zhang SC, Wang S, 2008. *Hubei Agricultural Sciences*, 47(6): 661–662. [董立坤, 李绍勤, 夏文胜, 蒋太平, 杨豪, 张顺昌, 王松, 2008. 武汉市园林植物网蝽种类及药剂防治. *湖北农业科学*, 47(6): 661–662.]
- Gilchrist AS, Crisafulli DCA, 2006. Using variation in wing shape to distinguish between wild and mass-reared individuals of Queensland fruit fly, *Bactrocera tryoni*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 119(2): 175–178.
- Klaczko LB, Bitnermathe BC, 1990. On the edge of a wing. *Nature*, 346(6282): 321.
- Liu F, Shen ZR, Zhang JW, Yang HZ, 2008. Automatic insect identification based on color characters. *Chinese Bulletin of Entomology*, 45(1): 150–153. [刘芳, 沈佐锐, 张建伟, 杨红珍, 2008. 基于颜色特征的昆虫自动鉴定方法. *昆虫知识*, 45(1): 150–153.]
- Liu T, Zhao HY, 2010. Recognition methods of natural enemies of *Aphis gossypii* Glover based on extraction of local features. *Computer Engineering and Design*, 31(16): 3712–3714. [刘婷, 赵惠燕, 2010. 基于局部特征提取的棉蚜天敌识别. *计算机工程与设计*, 31(16): 3712–3714.]
- MacLeod N, 2008. *Automated Taxon Identification in Systematics: Theory, Approaches and Applications*. London, UK: CRC Press. Taylor & Francis Group. 289–298.
- Moraes EM, Manfrin MH, Laus AC, Rosada RS, Bomfin SC, Sene FM, 2004. Wing shape heritability and morphological divergence of the sibling species *Drosophila mercatorum* and *Drosophila paranaensis*. *Heredity*, 92(5): 466–473.
- Mou SM, Sun YX, Zhu HM, Liu ZD, 2003. Studied on automated counting method of insect image. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 24 (S2): 426–427. [牟少敏, 孙永香, 朱红梅, 刘忠德, 2003. 昆虫图像的自动计数方法的研究. *仪器仪表学报*, 24(S2): 426–427.]
- O'Neill MA, 2000. DAISY: a practical tool for semi-automated species identification/MacLeod N (ed.). *Automated Taxon Identification in Systematics: Theory, Approaches, and Applications*. Boca Raton/ Florida: CRC Press/Taylor & Francis Group. 101–114.
- Pan PL, Shen ZR, Gao LW, Yang HZ, 2008. Development of the technology for auto-extracting venation of insects. *Entomotaxonomia*, 31(1): 72–80. [潘鹏亮, 沈佐锐, 高灵旺, 杨红珍, 2008. 昆虫翅脉特征自动获取技术的初步研究. *昆虫分类学报*, 30(1): 72–80.]
- Pan PL, Shen ZR, Yang HZ, Gao LW, Zhang JW, Xie M, 2008. Digital character extraction and primary analysis of venation of three Parnassian butterflies (Lepidoptera, Papilionidae). *Acta Zootaxonomica Sinica*, 33(3): 566–571. [潘鹏亮, 沈佐锐, 杨红珍, 高灵旺, 张建伟, 谢敏, 2008. 三种绢蝶翅脉数字化特征的提取及初步分析. *动物分类学报*, 33(3): 566–571.]
- Pretorius E, 2005. Using geometric morphometrics to investigate wing dimorphism in males and females of Hymenoptera: a case study based on the genus *Tachysphex* Kohl (Hymenoptera: Sphecidae: Larrinae). *Austral Entomology*, 44(2): 113–121.
- Qiu Q, 2013. *Color Atlas of Diagnosis and Treatment of Plant Diseases and Pests in Orchards*. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press. 119–121. [邱强, 2013. *果树病虫害诊断与防治彩色图谱*. 北京: 中国农业科学技术出版社. 119–121.]
- Shen ZR, Yu XW, 1998. Perspective and research of mathematical insect morphology and its application. *Acta Entomologica Sinica*, 41(S1): 142–150. [沈佐锐, 于新文, 1998. 昆虫数学形态学研

- 究及其应用展望. 昆虫学报, 41(S1): 142–150.]
- Su XU, Cai XN, Li Y, Shen ZR, Huang DZ, 2016. Using math-morphological characters of wings for classification and identification of eight species of Scarabaeidae. *Journal of China Agricultural University*, 21(7): 61–66. [苏筱雨, 蔡小娜, 李阳, 沈佐锐, 黄大庄, 2016. 利用翅的数学形态特征对 8 种金龟子进行分类鉴定. 中国农业大学学报, 21(7): 61–66.]
- Tofilski A, 2004. DrawWing, a program for numerical description of insect wings. *Journal of Insect Science*, (4): 1–5.
- Villemant C, Simbolotti G, Kenis M, 2007. Discrimination of *Eubazus* (Hymenoptera, Braconidae) sibling species using geometric morphometrics analysis of wing venation. *Systematic Entomology*, 32(4): 625–634.
- Wang JB, Fan XH, Gu JF, 2012. Application of mathematical morphology in identification of insects. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 16(4): 80–82. [王建斌, 樊新华, 顾建锋, 2012. 数学形态学在昆虫鉴定中的应用. 河北农业科学, 16(4): 80–82.]
- Watson A, O'Neill MA, Kitching IJ, 2003. Automated identification of live moths (Macrolepidoptera) using Digital Automated Identification SYstem (DAISY). *Systematics & Biodiversity*, 1(3): 287–300.
- Xu YH, Qi HF, 2015. Insect classification based on the theory of the ELM. *Electronic Science and Technology*, 28(3): 33–37. [徐源浩, 齐焕芳, 2015. 基于 ELM 理论的昆虫分类. 电子科技, 28(3): 33–37.]
- Yang HZ, Shen ZR, Li XT, 2011. Advances on automatic insect identification. *Sichuan Journal of Zoology*, 30(5): 834–838. [杨红珍, 沈佐锐, 李湘涛, 2011. 昆虫自动鉴定技术与展望. 四川动物, 30(5): 834–838.]
- Yang HZ, Zhang JW, Li XT, Shen ZR, 2008. Remote automatic identification system based on insect image. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 24(1): 188–192. [杨红珍, 张建伟, 李湘涛, 沈佐锐, 2008. 基于图像的昆虫远程自动识别系统的研究. 农业工程学报, 24(1): 188–192.]
- Yu XW, Shen ZR, Gao LW, Li ZH, 2003. Feature measuring and extraction for digital image of insects. *Journal of China Agricultural University*, 8(3): 47–50. [于新文, 沈佐锐, 高灵旺, 李志红, 2003. 昆虫图像几何形状特征的提取技术研究. 中国农业大学学报, 8(3): 47–50.]
- Zhang GL, 1999. Key performance indexes of flatbed scanners. *Printing Technology*, (11): 28–31. [张桂兰, 1999. 平台式扫描仪的主要性能指标. 印刷技术, (11): 28–31.]
- Zhang JW, Wang YM, Shen ZR, 2006. Novel method for estimating cereal aphid population based on computer vision technology. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, (9): 159–162. [张建伟, 王永模, 沈佐锐, 2006. 麦田蚜虫自动计数研究. 农业工程学报, (9): 159–162.]
- Zhao HQ, Shen ZR, Yu XW, 2002. On computer-aided insect identification through math-morphology features. *Journal of China Agricultural University*, 7(3): 38–42. [赵汗青, 沈佐锐, 于新文, 2002. 数学形态特征应用于昆虫自动鉴别的研究. 中国农业大学学报, 7(3): 38–42.]
- Zhao HQ, Shen ZR, Yu XW, 2003a. Use of math-morphological features in insect taxonomy. I. at the order level. *Acta Entomologica Sinica*, 46(1): 45–50. [赵汗青, 沈佐锐, 于新文, 2003. 数学形态学在昆虫分类学上的应用研究. . 在目级阶元上的应用研究. 昆虫学报, 46(1): 45–50.]
- Zhao HQ, Shen ZR, Yu XW, 2003b. Use of math-morphological features in insect taxonomy. II. At superfamily level. *Acta Entomologica Sinica*, 46(2): 201–208. [赵汗青, 沈佐锐, 于新文, 2003. 数学形态学在昆虫分类学上的应用研究. . 在总科阶元上的应用研究. 昆虫学报, 46(2): 201–208.]
- Zhu LQ, Zhang Z, Zhang PY, 2010. Image identification of insects based on color histogram and dual tree complex wavelet transform (DTCWT). *Acta Entomologica Sinica*, 53(1): 91–97. [竺乐庆, 张真, 张培毅, 2010. 基于颜色直方图及双树复小波变换(DTCWT)的昆虫图像识别. 昆虫学报, 53(1): 91–97.]