

我国八种臂金龟的几何形态学研究*

殷 凡^{1,2**} 佟一杰² 路园园² 田哲豪^{1,2} 白 明^{2***}

(1. 宁夏大学农学院, 银川 750021; 2. 动物多样性保护与有害动物防控重点实验室(中国科学院), 中国科学院动物研究所, 北京 100101)

摘 要 【目的】臂金龟亚科 Euchirinae 是金龟科 Scarabaeidae 中极具观赏性的一类甲虫。目前我国已记录 2 属 8 种, 分别是彩臂金龟属 *Cheirotonus* 6 种和棕臂金龟属 *Propomacrus* 2 种, 均被列为国家二级保护动物并录入 2021 版《国家重点野生动物名录》。我国分布的臂金龟亚科种类稀少, 且臂金龟亚科类群的生物学信息长期无法获取, 导致类群间较为系统的形态学信息的收集和分类学研究进展缓慢, 近缘种的鉴定工作存在很大的困难, 对海关及公安部门的查验工作造成一定阻碍。本研究基于几何形态学对我国臂金龟亚科雌、雄个体的多种形态特征进行定量分析, 揭示国内分布的 8 种臂金龟间的形态差异, 筛选出更多在我国臂金龟分类和鉴定工作中可用的形态特征, 同时为海关在臂金龟形态鉴定方面提供新思路。【方法】基于几何形态学量化臂金龟亚科 8 种的前足胫节外轮廓, 以及前胸背板和鞘翅的左侧外轮廓的形态学信息, 利用主成分分析、典型变量分析和判别函数分析分别对 8 种臂金龟雌、雄个体的 3 个特征进行比较, 探究种间雌、雄个体的形态差异, 筛选鉴别特征。【结果】基于主成分分析的结果, 发现臂金龟亚科前足胫节在类群间的形态变化集中于刺突及胫节的弯曲程度, 前胸背板变异部位在于后角的膨大及长宽比的缩小, 鞘翅的变异在于肩角的向外延伸、靠近小盾片处鞘翅的内缩及长宽比的缩小。典型变量分析及判别函数分析的结果表明: 雄性臂金龟的前足胫节的形态学信息在类群间具有更显著的差异, 测试组间的判别正确率达 100% 的测试组占全部测试组的 93% (26/28); 于占比最高的 2 个典型变量(CV1 和 CV2)所构成的形态空间中, 臂金龟 CV1 和 CV2 在 8 种雌性的鞘翅的形态数据的分布并无交集。【结论】前足胫节的形态学信息在 8 种雄性臂金龟的种间差异性更高, 鞘翅的形态信息更利于进行种间雌虫的区分, 几何形态学可以更好地挖掘出我国本土臂金龟亚科种间的形态差异并用于种间鉴定工作。

关键词 臂金龟; 几何形态学; 特征筛选; 前足胫节; 前胸背板; 鞘翅

The geometric morphometrics of eight Euchirinae species in China

YIN Fan^{1,2**} TONG Yi-Jie² LU Yuan-Yuan² TIAN Zhe-Hao^{1,2} BAI Ming^{2***}

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Key Laboratory of Zoological Systematics and Evolution, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract [Aim] Euchirinae is a subfamily of Scarabaeidae, or scarab beetles. At present, two genera and eight species of Euchirinae have been found in China. These include six species from the genus *Cheirotonus* and two species from the genus *Propomacrus*, all of which have been listed as national second-class protected animals in the 2021 edition of the ‘List of wild animals under priority conservation’. The species of the subfamily Euchirinae distributed in China are rare, and the biological information of the subfamily Euchirinae has been difficult to obtain for a long time, resulting in slow progress in the collection and taxonomic research of systematic morphological information between groups. The identification of closely related species is also very difficult, which poses certain obstacles to the inspection work of customs and public security departments. Based on geometric morphometrics, our study quantitatively analyzed the morphological characteristics of male and female

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划资助 (2022YFC2601200); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (32200354); 中国博士后科学基金第 71 批面上资助 (2022M713134); 国家林业和草原局动植物司-受保护昆虫类调查评估项目

**第一作者 First author, E-mail: yfzdhb@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: baim@ioz.ac.cn

收稿日期 Received: 2023-05-09; 接受日期 Accepted: 2023-07-02

Euchirinae samples in China, revealing the morphological differences among 8 species of Euchirinae distributed in China. We also screened additional morphological characteristics for classification and identification. This study offers innovative approaches for improving the customs inspection process. **[Methods]** Based on geometric morphometrics, we compared the outer contours of the protibia of eight species of Euchirinae, and the morphology of the left outer contours of the pronotum and elytron in both males and females, using principal component analysis (PCA), canonical variance analysis (CVA), and discriminant function analysis (DFA). The morphological differences between male and female individuals were analyzed, and the identification features recorded. **[Results]** Based on the PCA results, we found that the morphological changes of the protibia in the intergroup segment of Euchirinae were concentrated in the curvature of the spines and tibia. Whereas variation in the pronotum resulted from the expansion of the posterior horn and the reduction of the aspect ratio. Finally, we found elytron variation was due to extension of the shoulder angle, the interaction of the elytron near the scutellum, and a reduction in the aspect ratio. The CVA and DFA results showed a significant difference in the morphology of the male protibia between species. Of the test groups, 93% (26/28) achieved a 100% discriminant accuracy rate between test groups. Finally, CVA analysis showed there was no intersection between the elytron morphology of the eight female long-armed scarabs. **[Conclusion]** The morphological characteristics of the male protibia differed significantly between Euchirinae species. Furthermore, the elytrons of female samples exhibited stronger interspecific differentiation. Geometric morphometrics can facilitate the identification of morphological differences between Euchirinae species in China and be used for interspecific identification.

Key words Euchirinae; geometric morphometrics; character screening; protibia; pronotum; elytron

臂金龟属于鞘翅目 Coleoptera 金龟总科 Scarabaeoidea 金龟科 Scarabaeidae 臂金龟亚科 Euchirinae 昆虫 (白明, 2020), 目前全世界已知臂金龟亚科共计 3 属 16 种 (不含亚种) (Maquart *et al.*, 2020): 臂金龟属 (*Euchirus* Burmeister & Schaum, 1840) 2 种; 彩臂金龟属 (*Cheirotonus* Hope, 1840) 10 种; 棕臂金龟 (姬臂金龟) 属 (*Propomacrus* Newman, 1837) 4 种。我国已记录臂金龟 2 属 8 种, 分别是彩臂金龟属 6 种和棕臂金龟属 2 种。个体大且颜色艳丽, 长期以来作为非常珍惜的观赏昆虫被人们熟知。极高的观赏性以及庞大的收藏爱好者群体, 导致我国臂金龟常年面临被采捕和售卖的困境, 野外种群的数量锐减 (Yang *et al.*, 2020)。为了更好地对我国臂金龟进行保护, 我国已经将分布于国内的臂金龟全部 2 属 8 种列为国家二级保护动物并录入 2021 最新版的《国家重点保护野生动物名录》(国家林业和草原局和农业农村部, 2021) 中。然而海关和公安部门在防止臂金龟流失的实际应用场景中面临诸多问题: 分子生物学鉴定手段耗时、成本高、可重复性低、输出结果不够直观, 且由于国内分布的臂金龟均为受保护物种, 很难通过组织提取开展相关工作, 一些种群在形态上的差

异与线粒体序列上的差异程度不一致, 且形态学差异更为显著 (Berezki *et al.*, 2014; 李荣荣等, 2019)。形态学方面甲虫的鞘翅和前胸背板一直以来都是主要鉴别特征 (白明和杨星科, 2007; 杨红珍等, 2013), 臂金龟鞘翅斑纹的形状、大小、位置, 前胸背板刻点的密集程度、分布位置等是臂金龟传统分类的重要特征 (易传辉等, 2015)。臂金龟的前足异于其他甲虫类群, 在科级以上的阶元是非常重要的一个鉴别特征, 同时臂金龟的属间特征较为明显: 与彩臂金龟属相比, 棕臂金龟属前足胫节内侧有浓密的金色绒毛, 前足整体较短。传统分类学仅能对常见臂金龟物种例如阳彩臂金龟 *Cheirotonus jansonii* 和格氏彩臂金龟 *C. gestroi gestroi* 等进行较为准确的鉴定。然而, 因臂金龟种间形态趋同、种内个体间存在差异, 并且能够流通观察的标本量稀少及野外种群信息不明等原因影响, 依靠主观性强的传统分类学的定性分析手段很难对臂金龟近缘种间的连续性特征进行有效的区分, 导致臂金龟形态比较和系统厘定工作进展很慢 (Zelditch *et al.*, 2004; 李玲等, 2017)。几何形态学操作简便迅速、可重复性强、成本低且输出结果快, 可以排除其他因素干扰, 保留测试特征的纯形态的信息进行更为客

观和科学的形态研究,可以提高臂金龟物种鉴定准确率和时效性。此外,能够很大程度缓解应用部门专业人员打击珍惜臂金龟走私的压力。

20 世纪早期,对于生物形态的研究开始从定性描述向定量分析发展(白明等, 2014; 杨海东, 2016)。到 20 世纪 90 年代,随着现代化的统计方法及计算机的快速处理将传统的形态测量法带上了新的阶梯,形成了现在相对完善的几何形态学(佟一杰等, 2016; 佟一杰, 2017)。几何形态学通过标点分析法(Landmark analysis)和轮廓分析法(Outline analysis)将形态信息数字化并提取出来形成对应的形态空间中的构象,然后基于广义普氏分析(Generalized procrustes analysis, GPA)的叠印法(Superimposition method)将多个试验样本构象经过叠印形成一个一致的构象,去除非形态变异(如:样本的大小和方位)对分析的干扰,仅保留样本的形态特征的构象标点,在相应维度笛卡尔坐标系中坐标值作为变量进行统计分析,通过这些测量得到的微小的信息转变为数字信息进行统计学分析以达到形态特征间比较的目的(常琼琼等, 2018; 张勇等, 2019; 杜萍萍等, 2022)。因此几何形态学这种分析手段为臂金龟的种间形态特征的筛选提供了新的思路。目前几何形态学主要在昆虫中的鞘翅目、半翅目和双翅目等类群中进行形态学和生物地理学方面的研究(Sasakawa, 2016; Li et al., 2017; Jiménez-Martín et al., 2020),关于臂金龟的相关研究尚无。

本研究分别选取我国已记录的 8 种臂金龟雄性及雌性成虫典型的连续性特征,即前胸背板和鞘翅进行几何形态学分析,评估上述特征的形态学信息在种间的差异程度同时尝试挖掘上述特征在种间具有明显形态差异的部分进行后续更加聚焦的形态学研究;此外,选取臂金龟典型的形态特征:前足胫节进行分析,通过定量形态学手段量化前足胫节的形态信息进行种间差异分析。研究旨在评估不同形态特征在种间的分类学信息,通过主成分分析明确 8 种臂金龟的形变关键部位,筛选出易于区分臂金龟近缘种的特征,完善我国臂金龟的形态研究工作,为海关及

公安的查验工作提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料及图像获取

通过几何形态学分析手段对我国已记录的 8 种臂金龟进行形态特征的筛选,测试物种包括:巴氏彩臂金龟 *C. battareli*、察隅彩臂金龟 *C. terunumai*、阳彩臂金龟 *C. jansoni*、格氏彩臂金龟 *C. gestroi gestroi*、麦氏彩臂金龟 *C. macleayii*、台湾彩臂金龟 *C. formosanus*、村本棕臂金龟 *Propomacrus muramotoae* 和戴氏棕臂金龟 *P. davidi*。由于我国分布的彩臂金龟的珍稀性及个体间存在的形态上的差异情况,研究本着尽量获取到更多测试样本的原则,从中国科学院动物研究所标本馆藏、鞘翅目形态进化研究组的收藏、国外标本馆的标本借阅以及历史文献中所包含的形态信息四个方面对数据进行收集,研究涉及的测试特征均为标准背面观。将干制标本放入 60-80 °C 的热水中进行浸泡,回软约 0.5 h,待标本还软后即可用昆虫针将虫体固定在聚苯乙烯泡沫板上(防止虫体在解剖过程中移动)进行整姿,拍照获取标准背面观。将整姿过的虫体用数码相机(NIKON 5200D)拍摄不同景深的虫体背面观图像,拍摄后的图像通过 Helicon Focus (Version: 2.0) 软件叠加合成景深图像,最终得到一张清晰图片。针对样本量较少的物种选自正式发表的专著及论文中的标本照片(吴珑和吴珍泉, 2008; 陈麟等, 2016; 刘胜龙等, 2022)。经过整理,针对前足胫节的测试共计 241 头样本(雄性样本 173 头,雌性样本 68 头);前胸背板的测试共计 245 头样本(雄性样本 178 头,雌性样本 67 头);鞘翅的测试共计 293 头样本(雄性样本 210 头,雌性样本 83 头)。

1.2 形态信息的采集

通过 TPS-Util (Version: 1.64) 软件将图片集数字化,使用 TPS-Dig (Version: 2.05) 软件进行测试特征的形态学信息的提取。通过轮廓线法选取左前足胫节的外轮廓以及前胸背板和鞘

翅的左半边外轮廓的形态进行标定 (见图 1): 曲线 1 (Curve 1) 由前足胫节外侧基部为起点, 顺时针至内侧基部止; 曲线 2 (Curve 2) 由前胸背板前缘的中点起, 逆时针至前胸背板的后缘中点止; 曲线 3 (Curve 3) 由鞘翅的前缘与小盾片端部的交界处起, 逆时针至鞘翅侧缘端部止。前足胫节、前胸背板及鞘翅所绘轮廓线通过 TPS-Dig (Version: 2.05) 软件依据长度均分为 75/25/50 个半标点 (Semi-landmark, SLM) 并保存为 .tps 文件, 将 .tps 文件中的曲线标号以及半标点信息替换为标点信息以进行后续几何形态学分析 (Rohlf, 2015)。

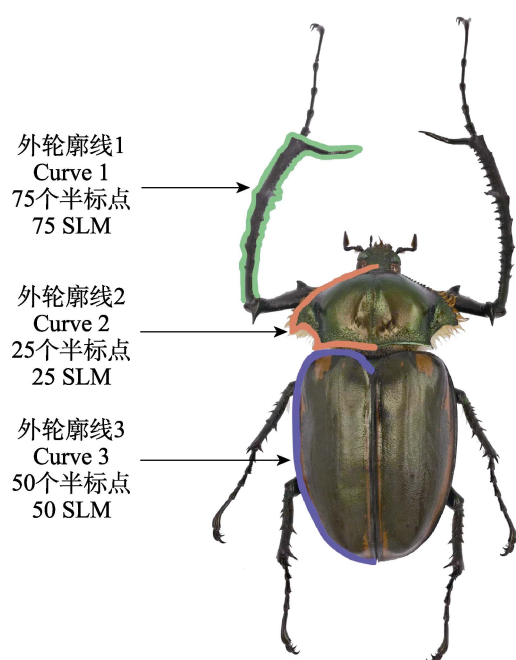


图 1 几何形态学分析中的测试曲线及半标点 (SLM) (图示为阳彩臂金龟)

Fig. 1 Description of the curves and semi-landmarks (SLM) used in the geometric morphometric analysis (*Cheirotonus jansoni*)

1.3 数据分析

通过 Morpho J (Version: 1.06a) 对臂金龟前足胫节、前胸背板和鞘翅形状差异进行几何形态学分析, 主成分分析 (Principal component analysis, PCA) 用于明确测试特征在臂金龟种间的形态变化情况, 筛选出测试特征的高变化区域; 典型变量分析 (Canonical variance

analysis, CVA) 和判别函数分析 (Deformation analysis, DFA) 用于可视化臂金龟种间的区分程度。

2 结果与分析

2.1 臂金龟前足胫节的几何形态学

2.1.1 前足胫节在种间的形态变异 基于 PCA, 雄虫前足胫节在 173 个样本间形态差异前 2 个主成分 (Principal component, PC) 分别占总变异的 54.713% 和 16.539%, 二者累计占总体变异的 71.252%。以第一主成分 (PC1) 作为横坐标, 第二主成分 (PC2) 作为纵坐标构建雄性前足胫节形态变异散点图 (图 2: A)。结合各类群的雄虫前足胫节形态信息在 PC 空间中的分布判断测试特征的主要形变情况: 沿 PC1 正方向的变化, 前足胫节中部刺有向内收缩的趋势, 胫节端部刺有伸长趋势, 胫节弯曲程度趋向更大; 沿 PC2 正方向的变化与 PC1 变化相似, 中部刺向内收缩, 总体上前足胫节长宽比增大, 弯曲程度更大。

基于 PCA, 雌虫前足胫节在 68 个样本间形态差异前 2 个 PC 分别占总变异的 43.815% 和 12.755%, 二者累计占总体变异的 56.570%。以 PC1 作为横坐标, PC2 作为纵坐标构建雌性前足胫节形态变异散点图 (图 2: D)。结合各类群的雌性前足胫节信息在 PC 空间中的分布判断测试特征的主要形变情况: 沿 PC1 正方向的变化: 雌性前足突起更加明显, 内缘和外缘都有向外延伸的趋势; 沿 PC2 正方向的变化与 PC1 正方向变化相似, 但胫节内缘外缘有向内缩的趋势。总体而言雌性前足胫节长宽比有减小趋势。

2.1.2 前足胫节的定量分析结果 基于 8 种雄性臂金龟前足胫节的形态信息进行 CVA, 以典型变量 1 (Canonical variate 1, CV1) 为横坐标, 典型变量 2 (Canonical variate 2, CV2) 为纵坐标构建典型变量空间进行分析。戴氏棕臂金龟、村本棕臂金龟、巴氏彩臂金龟、察隅彩臂金龟、麦氏彩臂金龟和阳彩臂金龟的雄虫无重叠, 格氏彩臂金龟、台湾彩臂金龟、巴氏彩臂金龟、察隅彩臂金龟和麦氏彩臂金龟的雌虫样本间有不同

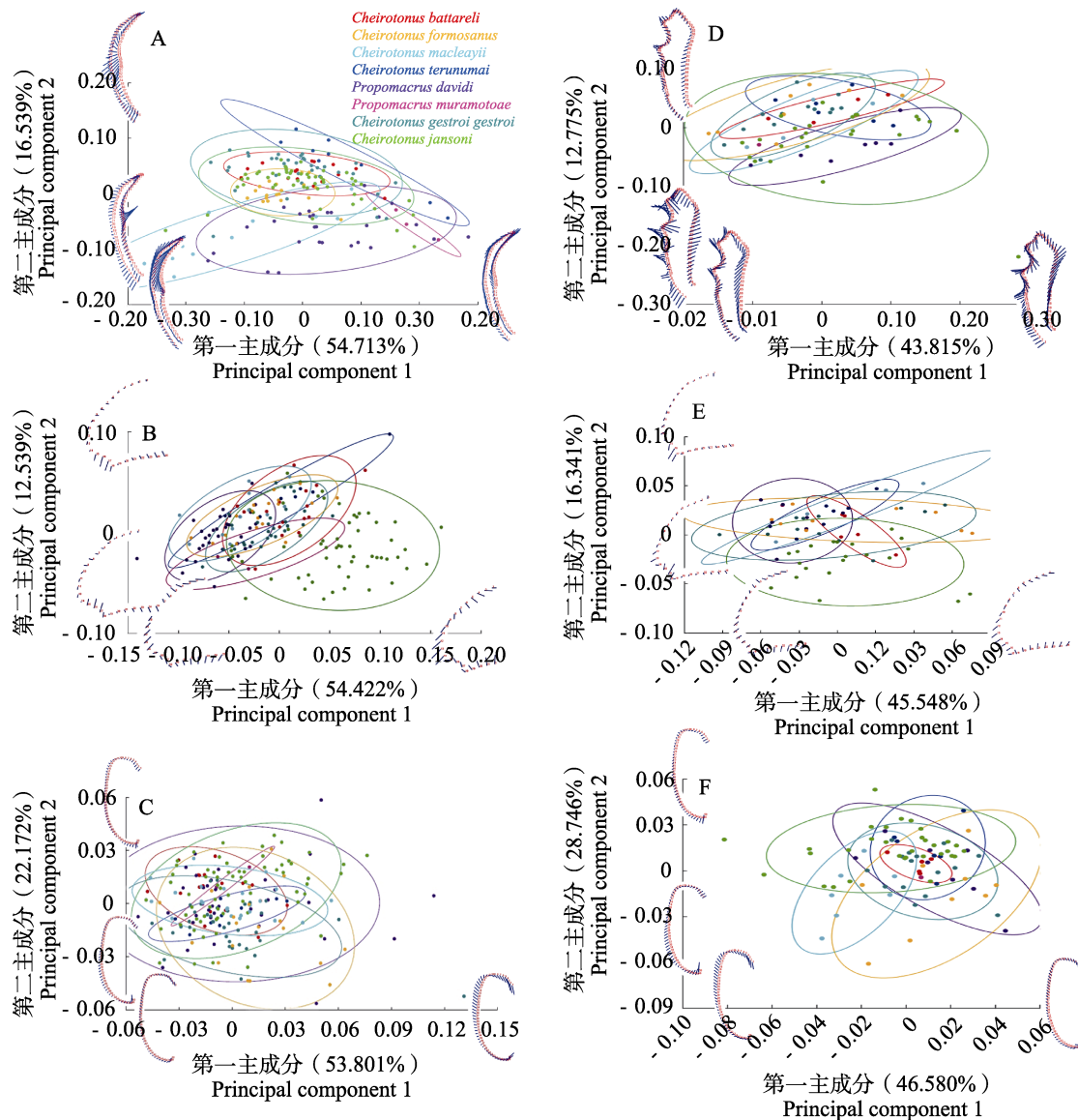


图 2 臂金龟亚科前足胫节、前胸背板和鞘翅主成分分析散点图

Fig. 2 The scatter plots of principal component of the protibia, pronotum and elytron of the Euchirinae

- A. 雄虫前足胫节主成分分析散点图; B. 雄虫前胸背板主成分分析散点图; C. 雄虫鞘翅主成分分析散点图;
 D. 雌虫前足胫节主成分分析散点图; E. 雌虫前胸背板主成分分析散点图; F. 雌虫鞘翅主成分分析散点图。
 A. The principal component analysis scatter plot of protibia of males; B. The principal component analysis scatter plot of pronotum of males; C. The principal component analysis scatter plot of elytron of males; D. The principal component analysis scatter plot of protibia of females; E. The principal component analysis scatter plot of pronotum of females; F. The principal component analysis scatter plot of elytron of females.

程度的重叠(图 3: A, D)。通过 CVA 得到了 8 个种的马氏距离及 P 值(迭代 10 000 次),由马氏距离 P 值结果可以看出, P 值小于 0.05 的测试组占 82%以上。结果表明,阳彩臂金龟和巴氏彩臂金龟成虫之间的距离最小(雄虫 9.762 6;雌虫 4.518 5),村本棕臂金龟和麦氏彩臂金龟

的雄虫间马氏距离最大(67.520 3),村本棕臂金龟和巴氏彩臂金龟的雌虫间马氏距离最大(15.334 5)。臂金龟成虫的 DFA 结果表明,8 种臂金龟种间区分度达 100%的占雄虫测试组的 93%(26/28),占雌虫测试组的 57%(16/28)。

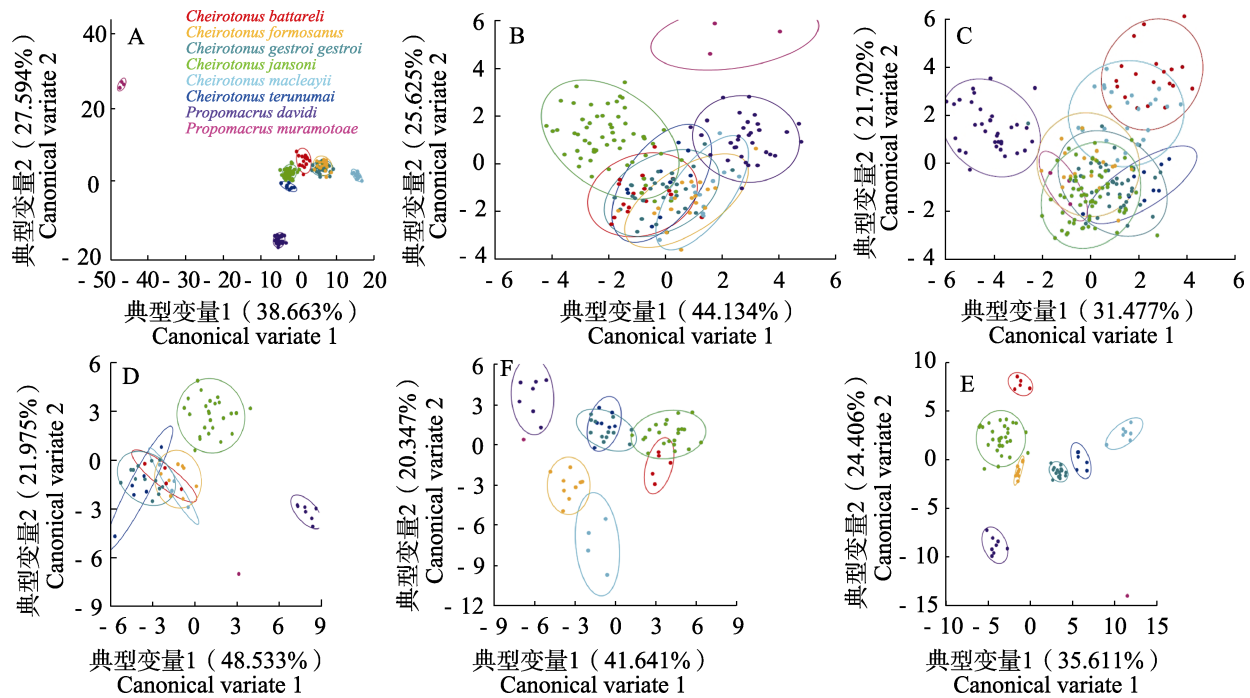


图 3 臂金龟亚科前足胫节、前胸背板和鞘翅典型变量分析散点图

Fig. 3 The scatter plots of canonical variables of the protibia, pronotum and elytron of the Euchirinae

A. 雄虫前足胫节典型变量分析散点图; B. 雄虫前胸背板典型变量分析散点图; C. 雄虫鞘翅典型变量分析散点图; D. 雌虫前足胫节典型变量分析散点图; E. 雌虫前胸背板典型变量分析散点图; F. 雌虫鞘翅典型变量分析散点图。

A. The canonical variables analysis scatter plot of protibia of males; B. The canonical variables analysis scatter plot of pronotum of males; C. The canonical variables analysis scatter plot of elytron of males; D. The canonical variables analysis scatter plot of protibia of females; E. The canonical variables analysis scatter plot of pronotum of females; F. The canonical variables analysis scatter plot of elytron of females.

2.2 臂金龟前胸背板的几何形态学分析

2.2.1 前胸背板在种间的形态变异 基于 PCA, 雄虫前胸背板在 178 个样本间形态差异前 2 个 PC 分别占总变异的 54.422% 和 12.539%, 二者累计占总体变异的 66.961%。以 PC1 作为横坐标, PC2 作为纵坐标构建前胸背板形态变异散点图 (图 2: B)。结合各类群的雄虫前胸背板信息在 PC 空间中的分布判断测试特征的主要形变情况: 沿 PC1 正方向, 前胸背板前缘和后缘皆向内收缩, 后前胸背板侧缘有向外延伸的趋势, 总体上前胸背板长宽比变小; 沿 PC2 正方向, 前胸背板后角和第二角之间向外延伸, 总体上前胸背板长宽比变小, 第二角和后角愈发明显。

经过 PCA, 雌虫前胸背板在 67 个样本间形态差异前 2 个 PC 分别占总变异的 45.548% 和 16.341%, 二者累计占总体变异的 61.890%。以 PC1 作为横坐标, PC2 作为纵坐标构建雌虫前胸

背板形态变异散点图 (图 2: E)。结合各类群的雌虫前胸背板信息在 PC 空间中的分布判断测试特征的主要形变情况: 沿 PC1 正方向, 前胸背板前缘后缘均有向内收缩的趋势, 侧缘和后角向外延伸突出, 总体上前胸背板长宽比变小; 沿 PC2 正方向, 前胸背板后角和第二角之间向外延伸, 总体上前胸背板后角和第二角更加突出, 雌虫前胸背板变异没有雄虫强烈但总体趋向一致。

2.2.2 前胸背板的定量分析结果 基于 8 种雄性臂金龟前胸背板的形态信息进行种间 CVA, 以 CV1 为横坐标, CV2 为纵坐标构建典型变量空间进行分析。巴氏彩臂金龟、台湾彩臂金龟、察隅彩臂金龟和麦氏彩臂金龟雄虫样本有较大幅度的重叠, 戴氏棕臂金龟、阳彩臂金龟和巴氏彩臂金龟雄虫样本无重叠; 阳彩臂金龟和巴氏彩臂金龟雌虫样本重叠; 格氏彩臂金龟与察隅彩臂金龟雌虫样本重叠; 麦氏彩臂金龟、台湾彩臂金

龟、戴氏棕臂金龟、村本棕臂金龟与其他 4 种臂金龟的雌虫样本分布不重合(图 3: B, E)。通过 CVA 得到了 8 个种的马氏距离及 P 值(迭代 10 000 次)。由马氏距离 P 值结果得出, 8 个种种间两两比较马氏距离 P 值小于 0.05 占 93%。结果表明, 村本棕臂金龟和台湾彩臂金龟的雄虫间马氏距离最大(8.643 7); 格氏彩臂金龟和巴氏彩臂金龟的雄虫间马氏距离最小(2.361 5); 村本棕臂金龟和巴氏彩臂金龟的雌虫间马氏距离最大(16.286 6); 阳彩臂金龟和巴氏彩臂金龟的雌虫间马氏距离最小(5.507 6)。臂金龟的 DFA 结果表明, 8 种臂金龟种间区分度达 100% 的占雄虫测试组的 86% (49/56), 占雌虫测试组的 57% (16/28)。

2.3 臂金龟鞘翅的几何形态学分析

2.3.1 鞘翅在种间的形态变异 基于 PCA, 雄虫鞘翅在 210 个样本间形态差异前 2 个 PC 分别占总变异的 53.801% 和 22.172%, 二者累计占总体变异的 76.973%。以 PC1 作为横坐标, PC2 作为纵坐标构建雄性鞘翅形态变异散点图(图 2: C)。结合各类群的雄虫鞘翅信息在 PC 空间中的分布判断测试特征的主要形变情况: 沿 PC1 正方向, 鞘翅前缘和向内收缩, 后缘变化不大, 鞘翅侧缘向外延伸突出, 总体上鞘翅长宽比有变小趋势; 沿 PC2 正方向, 鞘翅后缘和肩角处有向外伸展的趋势, 侧缘有向内收缩的趋势。结合前 2 个 PC 来看, 雄虫鞘翅长宽比变小, 肩角更加突出。

基于 PCA, 雌虫鞘翅在 83 个样本间形态差异前 2 个 PC 分别占总变异的 46.580% 和 28.746%, 二者累计占总体变异的 75.326%。以 PC1 作为横坐标, PC2 作为纵坐标构建雌虫鞘翅形态变异散点图(图 2: F)。各类群的雌虫鞘翅信息在 PC 空间中的分布判断测试特征的主要形变情况: 沿 PC1 正方向, 鞘翅外缘轻微向内收缩, 鞘翅长宽比有变大的趋势; 沿 PC2 正方向, 鞘翅前缘小盾片处轻微向内收缩, 鞘翅侧缘向内收缩, 后缘明显向外延伸。将 PC1 与 PC2 结合起来看, 雌虫鞘翅翅型长宽比变大。

2.3.2 鞘翅的定量分析结果 基于 8 种雄性臂金龟鞘翅的形态信息进行种间的 CVA, 以 CV1 为横坐标, CV2 为纵坐标构建典型变量空间分析。格氏彩臂金龟、阳彩臂金龟、台湾彩臂金龟、巴氏彩臂金龟、察隅彩臂金龟和麦氏彩臂金龟雌虫样本有不同程度的重叠, 8 种雌性臂金龟样本无重叠(图 3: C, F)。通过 CVA 得到了 8 个种的马氏距离及 P 值(迭代 10 000 次)。由马氏距离 P 值可以看出, 8 个物种间比较的马氏距离 P 值小于 0.05 占 85%。结果表明, 村本棕臂金龟和察隅彩臂金龟的雄虫间马氏距离最大(9.964 2), 格氏彩臂金龟和台湾彩臂金龟的雄虫间马氏距离最小(3.944 9), 村本棕臂金龟和巴氏彩臂金龟的雌虫间马氏距离最大(30.055 7), 阳彩臂金龟和台湾彩臂金龟的雌虫间马氏距离最小(7.918 9)。针对雄虫鞘翅的 DFA 结果表明, 8 种臂金龟种间区分度达到 100% 的占雄虫测试组的 63% (35/56)。

3 讨论

臂金龟亚科昆虫大多颜色各异, 具有很强的观赏价值, 针对臂金龟的研究始终不断(Young, 1989; 刘胜龙等, 2022)。当前针对臂金龟的研究表明种间的形态差异集中在前足的长短、刺突的数量及是否有毛, 吴珑和吴珍泉(2008)利用胫节外侧的刺突排列是否紧密对戴氏棕臂金龟指名亚种与其福建亚种进行区分, 同样地, Young(1989)在对世界臂金龟亚科进行研究时也用了前足胫节中部刺是否长于端部刺这一特征。然而, 臂金龟类群的前足胫节刺突的数量本身存在个体差异, 且缺乏形态学的验证, 导致上述特征在很多种间的分类工作中是否能够使用仍旧存疑(吴珑和吴珍泉, 2008; 刘胜龙等, 2022)。本研究通过几何形态学量化胫节外侧刺突并进行种间的形态差异比较, 确认了雄性臂金龟前足胫节的形态变化主要体现在中部刺的缩小、胫节表面的突起趋于平缓或消失, 雌性臂金龟前足胫节的突起趋向于平滑, 整体长宽比变小。此外, 研究通过主成分分析发现雄性臂金龟胫节向内弯曲的弧度趋向更大, 从定性分析角度证实了易传

辉等(2015)提出的我国分布的6种彩臂金龟属成虫前足胫节存在刺突及弯曲弧度上的不同的结论。刘胜龙等(2022)记录凤阳山阳彩臂金龟新纪录时,对其雌虫进行定性描述发现前胸背板的后角,向两边延伸,膨大呈现薄耳状(刘胜龙等,2022),同时Fujioka(2007)通过对村本棕臂金龟与同属土耳其棕臂金龟*P. bimucronatus*进行比较发现其前胸背板的后角的异化。这一点也与本研究通过PCA对臂金龟的前胸背板所进行的定量分析结果一致:臂金龟前胸背板的形态变化在雄性个体和雌性个体间表现一致,主要集中在后角的尖锐程度逐渐增高,前胸背板长宽比有变小趋势。本研究利用几何形态学分析手段排除了大小、颜色、花斑,仅对鞘翅翅型的形态变化进行分析,并揭示了雄性臂金龟鞘翅的形态变化主要在于在小盾片处向内凹陷;肩角有向外延伸的趋势;总体雄性臂金龟鞘翅长宽比趋向更小,雌性鞘翅长宽比有变大的趋势,弥补了传统分类学中以鞘翅斑纹及颜色为主要描述内容的性状评估中的不足。

研究通过CVA、DFA揭示了村本棕臂金龟、戴氏棕臂金龟、阳彩臂金、麦氏彩臂金龟、察隅彩臂金龟和巴氏彩臂金龟与其他2种臂金龟雄虫之间的显著的差异性,其中DFA量化了类群间的区分程度,明确了前足胫节可以对雄性臂金龟进行有效的分类(易传辉等,2015)。尽管雌虫没有达到雄虫在前足胫节的差异化程度,但仍可以在这两个典型变量所构建的空间内将村本棕臂金龟、戴氏棕臂金龟及阳彩臂金龟区分出。将臂金龟3个特征结合来看,在前2个典型变量空间中,我们可以将8种臂金龟雌虫完全区分,除格氏彩臂金龟和台湾彩臂金龟以外的6种臂金龟雄虫区分开;而针对这2种臂金龟雄虫,可通过采集地点进行区分,台湾彩臂金龟是台湾地区特有种。同时还可以根据其外部形态进行区分,格氏彩臂金龟翅肩具2较小黄斑,前胸背板刻点密集,而台湾彩臂金龟翅肩无黄斑且前胸背板刻点向外缘密集。

本研究利用几何形态学对臂金龟种群的形态变化进行研究,发现前足胫节、前胸背板和鞘

翅的形态在种间具有明显差异,表明臂金龟的前足胫节、前胸背板和鞘翅的形态变化可以作为种间分类的依据。同时说明几何形态学可以挖掘特征的形态学信息,并能够有效、客观、快速、低成本地进行臂金龟亚科的分类,实现臂金龟物种的种类鉴定。试验基于臂金龟种群3个形态特征的研究,对于前人的研究成果从定量形态学角度交易证实,同时克服了传统形态描述中单一变量与多变量比较的缺陷,使变异结果更加客观的呈现出来。此外,本研究中尚有不足之处:(1)由于臂金龟亚科皆为保护动物,难以收集雄虫生殖器,本研究尚未对雄虫生殖器进行几何形态学分析;(2)臂金龟亚科成虫前胸背板具刻点,已有研究表明种间的刻点有所差异,然而本研究通过二维几何形态学分析手段很难实现对前胸背板刻点的研究。在后续的研究中希望可以收集到更多的臂金龟雄虫外生殖器的形态图像,同时重建前胸背板的三维模型,通过三维几何形态学手段对物种间的形态差异进行分析。海关及公安系统在未来也可将本研究中所涉及到的臂金龟的3个形态特征的分析结果为模板,对截获昆虫进行拍照、标点、进行判别分析,进而快速高效地区分查验物种,提升我国本土珍稀昆虫的保护措施。

致谢:感谢中国科学院动物研究所甲虫形态与进化课题组为本研究提供的平台。感谢新疆大学生命科学与技术学院硕士李晓璇提供部分图片。

参考文献 (References)

- Bai M, 2020. Scarabaeoidea of Wuyi Mountain. Beijing: China Agricultural Science and Technology Publishing House Press. 73. [白明, 2020. 武夷山金龟志. 北京: 中国农业科学技术出版社. 73.]
- Bai M, Yang XK, 2007. Application of geometric morphometrics in biological researches. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(1): 143–147. [白明, 杨星科, 2007. 几何形态测量法在生物形态学研究中的应用. *昆虫知识*, 44(1): 143–147.]
- Bai M, Yang XK, Li J, Wang WC, 2014. Geometric morphometrics, a super scientific computing tool in morphology comparison (in Chinese). *Chinese Science Bulletin*, 59(10): 887–894. [白明, 杨星科, 李静, 王文成, 2014. 几何形态学: 关于形态定量比较的科学计算工具. *科学通报*, 59(10): 887–894.]
- Bereczki J, Tóth JP, Sramkó G, Varga Z, 2014. Multilevel studies on the two phenological forms of large blue (*Maculinea arion*)

- (Lepidoptera: Lycaenidae). *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 52(1): 32–43.
- Chang QQ, Jiang XH, Hou XH, 2018. Geometric morphometric analysis of wing shape variation among three important species of the genus *Culicoides* (Diptera: Ceratopogonidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(2): 288–293. [常琼琼, 蒋晓红, 侯晓晖, 2018. 基于几何形态学的三种库蠓翅的形态变化分析. 应用昆虫学报, 55(2): 288–293.]
- Chen L, Xiong HL, Li ZL, Li YH, Wang Y, 2016. Preliminary observation on morphology and life habit of *Cheirotonus jansoni*. *Hubei Agricultural Sciences*, 55(10): 2544–2546, 2550. [陈麟, 熊洪林, 李治林, 李玉红, 王艳, 2016. 阳彩臂金龟形态及生活习性的初步观察. 湖北农业科学, 55(10): 2544–2546, 2550.]
- Du PP, Tong YJ, Lu YY, Li XX, Li LL, Bai M, 2022. The taxonomic value of the epipharynx in the Aphodiinae. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(2): 358–374. [杜萍萍, 佟一杰, 路园园, 李晓璇, 李露露, 白明, 2022. 内唇在蜉金龟亚科中用于分属和分族的分类学价值. 应用昆虫学报, 59(2): 358–374.]
- Fujioka M, 2007. A new species of the genus *Propomacrus* newman, 1837 (Coleoptera, Scarabaeidae, Euchirinae) from Tibet, China. *Kogane*, 7(8): 99–102.
- Jiménez-Martín FJ, Cabrero FJ, Martínez-Sánchez A, 2020. Wing morphometrics for identification of forensically important blowflies (Diptera: Calliphoridae) in Iberian Peninsula. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 75: 102048.
- Li L, Dang HY, Ding SY, Zhan QB, Gao LL, Ma RY, Zhao ZG, Zhang LJ, 2017. A preliminary geometric morphometric analysis of wing shape variation among three important species of the genus *Bactrocera* (Diptera: Tephritidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(1): 84–91. [李玲, 党海燕, 丁三寅, 詹庆斌, 高玲玲, 马瑞燕, 赵志国, 张利军, 2017. 基于几何形态学对三种实蝇翅脉形态分析(Diptera: Tephritidae: Bactrocera). 应用昆虫学报, 54(1): 84–91.]
- Li RR, Zhang HF, Li SC, Bai M, 2017. Geometric morphometric analysis of *Eysarcoris guttiger*, *E. annamita* and *E. ventralis* (Hemiptera: Pentatomidae). *Zoological Systematics*, 42(1): 90–101.
- Li RR, Li M, Yan J, Zhang HF, Bai M, 2019. Intraspecific variation in *Eysarcoris aeneus* revealed by geometric morphometrics (Hemiptera: Pentatomidae). *Acta Entomologica Sinica*, 62(9): 1081–1089. [李荣荣, 李敏, 闫江, 张虎芳, 白明, 2019. 基于几何形态学的北二星蝽种内形态差异分析(半翅目: 蝽科). 昆虫学报, 62(9): 1081–1089.]
- Liu SL, Liu LJ, Wang D, Wu FS, Zhou SZ, 2022. A female description of *Cheirotonus jansoni* (Coleoptera, Euchiridae) from China. *Hubei Agricultural Sciences*, 61(1): 89–90. [刘胜龙, 刘玲娟, 王丹, 吴方树, 周世珍, 2022. 中国阳彩臂金龟 (鞘翅目, 臂金龟科) 雌虫记述. 湖北农业科学, 61(1): 89–90.]
- Maquart PO, Sin S, Chhorn S, Phak S, Phauk S, 2020. First record of *Cheirotonus parryi* Grey, 1848 (Coleoptera: Euchirinae) in Cambodia. *Cambodian Journal of Natural History*, 2: 31–33.
- People's Republic of China, 2021. Catalog of wildlife under key state protection. 2023/3/30. [国家林业和草原局, 农业农村部, 2021. 国家重点保护野生动物名录. 2023/3/30.]
- Rohlf FJ, 2015. The tps series of software. *Hystrix*, 26(1): 9–12.
- Sasakawa K, 2016. Utility of geometric morphometrics for inferring feeding habit from mouthpart morphology in insects: Tests with larval Carabidae (Insecta: Coleoptera). *Biological Journal of the Linnean Society*, 118(2): 394–409.
- Tong YJ, 2017. Whether the continuous characters include the taxonomic signals?—Make an example of the pronotum and elytra of the scarabs. Master dissertation. Urumqi: Xinjiang Agricultural University. [佟一杰, 2017. 连续性特征是否承载了分类学信号? —以金龟子前胸背板和鞘翅为例. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆农业大学.]
- Tong YJ, Yang HD, Ma DY, Bai M, 2016. Geometric morphometrics evaluation and adaptive evolution study of scarabaeine metendosternites. *Acta Entomologica Sinica*, 59(8): 871–879. [佟一杰, 杨海东, 马德英, 白明, 2016. 蜣螂后胸叉骨的几何形态学分析及其适应进化研究. 昆虫学报, 59(8): 871–879.]
- Wu L, Wu ZQ, 2008. *Propomacrus davidi fujianensis* sp.nov., a new euchirinae from Fujian (Coleoptera, Euchiridae). *Acta Zootaxonomica Sinica*, 33(4): 827–828. [吴珑, 吴珍泉, 2008. 福建地区褐臂金龟新亚种记录(鞘翅目, 臂金龟科). 动物分类学报, 33(4): 827–828.]
- Yang C, Zhu EJ, He QJ, Yi CH, Hu SJ, Wang XB, 2020. Complete mitochondrial genome of the endangered long-armed scarab *Cheirotonus gestroi* (Coleoptera: Euchiridae). *Mitochondrial DNA Part B Resources*, 5(1): 869–870.
- Yang HD, 2016. Geometric morphometrics evaluation of three-dimensional morphology of scarab hindwing articulations and the co-evolution study. Master dissertation. Urumqi: Xinjiang Agricultural University. [杨海东, 2016. 金龟子后翅关节骨片的三维几何形态学评估及与翅脉的共进化分析. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆农业大学.]
- Yang HZ, Cai XN, Li XT, Shen ZR, 2013. Application of geometric morphometrics in insect identification. *Sichuan Journal of Zoology*, 32(3): 464–469. [杨红珍, 蔡小娜, 李湘涛, 沈佐锐, 2013. 几何形态计量学在昆虫自动鉴定中的应用与展望. 四川动物, 32(3): 464–469.]
- Yi CH, Chen Y, He QJ, Zhou Y, Wang L, Chen XM, 2015. Morphometric characteristics study on *Cheirotonus gestroi* Pouillaud. *Journal of Northwest Forestry University*, 30(2): 154–157. [易传辉, 陈焱, 和秋菊, 周远, 王琳, 陈晓鸣, 2015. 格彩臂金龟 (*Cheirotonus gestroi* Pouillaud) 形态特征研究. 西北林学院学报, 30(2): 154–157.]
- Young RM, 1989. Euchirinae (Coleoptera: Scarabaeidae) of the world: Distribution and taxonomy. *The Coleopterists Bulletin*, 43(3): 205–236.
- Zhang Y, Ning Y, Duan C, Chang QQ, Hou XH, 2019. Geometric morphometric analysis on wing shape of three similar *Culicoides* species (Diptera: Ceratopogonidae). *Acta Parasitologica Et Medica Entomologica Sinica*, 26(4): 225–230. [张勇, 甯媛, 段琛, 常琼琼, 侯晓晖, 2019. 利用几何形态学工具探讨库蠓属三近似种翅形变异及其亲缘关系(双翅目: 蠓科). 寄生虫与医学昆虫学报, 26(4): 225–230.]
- Zelditch ML, Swiderski DL, Sheets HD, Fink WL, 2004. Morphometrics and systematics. *Geometric/Morphometrics for Biologists*. Amsterdam: Elsevier. 363–381.