基于相对扭曲分析的十八种夜蛾（鳞翅目：夜蛾总科）前翅形态分析*

蔡小娜[1**] 安凤娇[1] 韩祝华[1] 周 洲[2] 潘鹏亮[2***]

（1. 河北金融学院统计与数据科学学院，保定 071000；2. 信阳农林学院农学院，信阳 464000）

摘 要 **【目的】**以 18 种夜蛾昆虫为研究对象，利用相对扭曲分析对成虫前翅的几何形态特征进行研究，并利用相对扭曲矩阵对其数字化分类进行探索。**【方法】**首先，利用普氏叠加分析消除非形状因素的影响，进而得到每种夜蛾地标点的分布图；接着，采用单因素方差分析验证地标点数据的差异性；然后，利用相对扭曲分析对蛾翅进行几何形态分析，同时得到相对扭曲矩阵作为夜蛾昆虫分类识别的参数；再利用主成分分析对蛾翅形态差异性进行分析；最后采用判别分析构建分类函数，并对测试样本进行识别。**【结果】**普氏叠加分析直观展示了每种夜蛾普氏叠加后的地标点分布情况；相对扭曲分析实现了夜蛾种间差异的可视化，通过扭曲图可看出 18 种夜蛾蛾翅形态的差异，同时分析出同种夜蛾的肘脉 Cu_1、Cu_2 和臀脉 2A 与翅外缘交叉点在纵向上存在细微差别；测试样本的判别结果正确率为 91.11%。**【结论】** 相对扭曲分析不仅可以有效揭示夜蛾前翅形态的差异性和相似性，而且能够作为数字化分类的参数指标，为昆虫自动化分类提供更丰富的特征依据。

关键词 夜蛾；蛾翅；相对扭曲分析；几何形态

Morphological analysis of the forewings of eighteen species of noctuids (Lepidoptera: Noctuoidea) based on relative warp analysis

CAI Xiao-Na[1**] AN Feng-Jiao[1] HAN Zhu-Hua[1] ZHOU Zhou[2] PAN Peng-Liang[2***]

(1. School of Statistics and Data Science, Hebei Finance University, Baoding 071000, China;
2. College of Agronomy, Xinyang Agricultural and Forestry University, Xinyang 464000, China)

Abstract **[Aim]** To evaluate the potential for the digital classification of 18 species of noctuid moths based on geometric, morphological characteristics of their forewings. **[Methods]** Initially, Procrustes superimposition analysis was employed to eliminate the influence of non-shape factors, thereby obtaining distribution maps of landmark points for each species of noctuid. Subsequently, one-way ANOVA was used to verify the variability of the landmark point data. Relative twist analysis was then used to analyze the geometric morphology of the moth wings, and relative twist matrices were obtained as parameters for the identification and classification of each species. Principal component analysis was utilized to analyze morphological differences among moth wings. Finally, discriminant analysis was employed to construct a classification function and identify test samples. **[Results]** Procrustes superimposition analysis visually demonstrated the distribution of landmark points after superimposition for each species of noctuid. Relative twist analysis facilitated the visualization of interspecific differences among species. The twist plots revealed subtle differences in the wing morphology of the 18 noctuid species, and revealed longitudinal differences in the intersection points of the elbow veins Cu_1, Cu_2, and the hind vein 2A, with the outer edge of the wing among the same species. The accuracy of the discriminant results for the test samples was 91.11%. **[Conclusion]** Relative twist analysis not only effectively revealed differences and similarities in the forewing morphology of noctuid moths,

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金资助项目（31870638）；河南省高等学校重点科研项目（23A210028）；河北省教育厅青年拔尖项目（BJ2026098）

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

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

收稿日期 Received：2026-01-23；接受日期 Accepted：2026-04-12

but also serves as a parameter indicator for digital classification, providing a richer basis for automated insect classification.

Key words noctuid; moth wings; relative warp analysis; geometric morphology

昆虫纲 Insecta 是动物界中种类和数量最丰富的类群，已知约 100 万种，广泛分布于全球。作为最早具备飞行能力的群体，其翅的结构对生存至关重要，对昆虫躲避天敌、觅食、求偶、迁飞、抵御外界环境产生了重要影响。因此，昆虫翅形研究对其分类、系统发育及进化均有重要意义（Rainford *et al.*，2014；闻慧，2015）。鳞翅目 Lepidoptera 是昆虫纲的第二大目，蛾类约占鳞翅目种类的 90%（戚慕杰等，2021），夜蛾昆虫隶属于鳞翅目夜蛾总科 Noctuoidea，其幼虫多以植物为食，在农林业生态系统中常被视为重要害虫类群（陈培育等，2025）。

20 世纪早期，形态学研究从定性分析转向定量分析，对相应特征进行测量、计算与分析，称为形态测量学（白明和杨星科，2007）。80 年代，形态学分析取得突破，能够将形态结构数值化，并消除位置、大小和方向带来的影响，保留几何信息，Rohlf 和 Marcus（1993）将这项新的分析形态学的方法称为几何形态测量学。随着数字化技术的发展，几何形态测量学作为一种对形状变化进行量化分析的方法，已在昆虫的分类鉴定、系统发育以及形态学特征描述等领域得到广泛应用。顾佳怡（2024）利用几何形态测量学和统计方法，分析了天牛后翅形态特征在亚科间、族间、属间的差异性。温慧（2024）利用几何形态测量学对小叶蝉族 Typhlocybini 前翅形态变化规律进行了分析，并进行了分类研究。刘士宜和张婷婷（2024）借助几何形态学分析了 7 种指突水虻翅脉的形态。陆相宜等（2022）通过几何形态测量学对直翅目进行了分析。蔡小娜等（2019a）对天蛾右前翅进行了几何形态分析，并实现了天蛾昆虫的数字化分类。邓维安等（2019）通过几何形态测量学发现不同种类蚱的前胸背板存在差异。Janczyk 等（2021）利用几何形态测量学对马耳他蜜蜂 *Apis mellifera ruttneri* 进行了分类鉴定。Li 等（2022）对黄蜂进行了几何形态测量学分类。Sadeghi 等（2009）通过对蜻蜓目欧洲 10 个种群的翅形进行形态分析，探讨了亚种间的关系。Güler 等（2006）借助几何形态测量学方法探讨了切叶蜂科 Megachilidae 属级和种级的亲缘关系。刘梅（2015）采用几何形态测量学对双角蝎蛉属 *Dicerapanorpa* 进行了系统发育分析。

在当前夜蛾昆虫的研究领域中，几何形态测量学的应用主要聚焦于两个方面。其一，在夜蛾昆虫的分类研究方面，几何形态测量学发挥着重要作用，且多数情况下昆虫的分类研究是直接将地标点（Landmarks）坐标作为重要的分类指标（蔡小娜等，2015，2019b）。其二，针对夜蛾形态特征的分析，现阶段此领域的相关研究多着重于对夜蛾幼虫特定部位的几何形态分析（Niveyro and Benítez，2019）。此外，值得注意的是，在运用几何形态测量学对昆虫形态的研究中，相对扭曲分析的应用尚显不足。鉴于上述现状，本文以 18 种夜蛾昆虫作为模式研究对象，运用相对扭曲分析对其成虫右前翅的形态特征进行研究，并进一步探讨相对扭曲矩阵在夜蛾昆虫数字化识别中的可行性。本研究旨在为完善夜蛾昆虫的几何形态研究提供有价值的参考，并为昆虫自动化分类体系提供新的可用的特征依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

利用黑光灯诱集法捕获夜蛾昆虫并制成标本，采集地点为北京市延庆区、河北省保定市、河北省易县清西陵等地。为了更加深入的探究相对扭曲分析方法在夜蛾前翅形态分析中的应用，本研究选用隶属于 11 个属，共计 18 种夜蛾作为试验昆虫，其中涵盖翅形特征具有高度相似性的类群，如地夜蛾属 *Agrotis* 的夜蛾昆虫。每种夜蛾 30 个样本，以右前翅为试验材料，利用化学浸泡法（蔡小娜等，2019a）得到蛾翅脉标本，并形成研究模式标本图像库，夜蛾标本名录见表 1。

表 1　试验所用 18 种夜蛾
Table 1　18 noctuid species for experiment

属 Genus	种类 Species
红棕灰夜蛾属 *Sarcopolia*	红棕灰夜蛾 *Sarcopolia illoba*
客来夜蛾属 *Chrysorithrum*	客来夜蛾 *Chrysorithrum amata*
嘴壶夜蛾属 *Oraesia*	鸟嘴壶夜蛾 *Oraesia excavata*
陌夜蛾属 *Trachea*	黑环陌夜蛾 *Trachea melanospila*
	陌夜蛾 *Trachea atriplicis*
焰夜蛾属 *Pyrrhia*	焰夜蛾 *Pyrrhia umbra*
后夜蛾属 *Trisuloides*	白斑后夜蛾 *Trisuloides c-album*
裳夜蛾属 *Catocala*	鸽光裳夜蛾 *Catocala columbina*
	栎裳夜蛾 *Catocala dissimilis*
	显裳夜蛾 *Catocala deuteronympha*
	宁裳夜蛾 *Catocala nymphaeoides*
	鸱裳夜蛾 *Catocala patala*
地夜蛾属 *Agrotis*	小地老虎 *Agrotis ipsilon*
	黄地老虎 *Agrotis segetum*
	八字地老虎 *Agrotis c-nigrum*
铃夜蛾属 *Helicoverpa*	棉铃虫 *Helicoverpa armigera*
秘夜蛾属 *Mythimna*	光腹夜蛾 *Mythimna turca*
拟粘夜蛾属 *Pseudaletia*	寡夜蛾 *Pseudaletia pallidicosta*

1.2　形态数据获取

利用 tpsUtil（Version：1.64）软件对蛾翅样本图像进行分析，生成包含图片信息的 tps 文件。然后，利用软件 tpsDig（Version：2.05）打开该 tps 文件，并按特定顺序在蛾翅脉图像上标记出具有代表性的地标点，从而获取相应的坐标数据，以此作为夜蛾翅脉图像的形态数据。这些地标点主要取自翅室周围的交叉点及蛾翅外缘的部分交点（蔡小娜等，2016），具体选取策略如下：首先将径脉 R_1 基部交叉点确定为起始地标点，然后沿顺时针方向依次选取围绕翅室分布的 7 个翅脉交叉点作为后续地标点（Landmarks 1-7）；自径脉与翅外缘交叉点处起，按顺时针方向选取 8 个翅脉交叉点作为地标点（Landmarks 8-15）。以焰夜蛾 *Pyrrhia umbra* 为例，所选取的地标点位置分布如图 1 所示。

1.3　数据分析

1.3.1　普氏叠加分析　提取的初始地标点坐标值中包含了许多非形状因素，如标本放置的位置、方向、坐标系的选取（原点、刻度）及大小等，普氏叠加分析是利用普氏距离（对应地标点之间距离的平方和）尽量缩小不同形态之间的差异，来消除非形状因素等多余的信息（Rohlf，1999）。

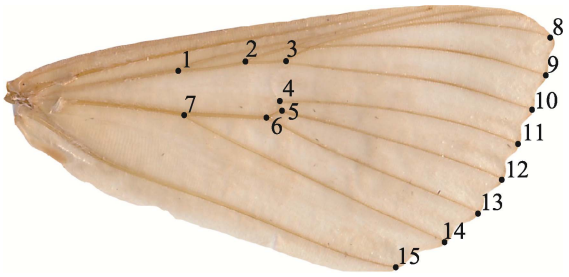

图 1　焰夜蛾右翅地标点分布图
Fig. 1　Landmarks locations on the right wing of *Pyrrhia umbra*

1.3.2　相对扭曲分析　利用软件 tpsRelw 对 18 种夜蛾右前翅的平均构型图坐标数据进行相对扭曲分析，揭示夜蛾蛾翅种间形态特征的变化趋势。

1.3.3　多元统计分析　单因素方差分析公式为 $F=\frac{\bar{S}_A}{\bar{S}_E}=\frac{S_A}{s-1}\Big/\frac{S_E}{n-s}$（1），其中 S_A 为效应平方和，S_E 为误差平方和，s 为因素水平，n 为样本总和，通过单因素方差分析检验各地标点数据在不同物种间是否存在显著性差异。主成分分析用于确定蛾翅种间的形态变化情况，并对地标点数据进行降维处理，同时绘制出 18 种夜蛾的分布图。将样本分成两部分进行判别分析，每种夜蛾选取 20 个样本，共计 360 个样本构建判别 模型；剩余样本对所建立的模型进行测验，验证相对扭曲矩阵数据用于夜蛾昆虫分类识别的有效性和可靠性。

2　结果与分析

2.1　夜蛾前翅的几何形态分析

2.1.1　普氏叠加分析　利用普氏叠加分析得到每种夜蛾的平均构型图以及地标点的散点图与向量图，如图 2 所示（以焰夜蛾为例）。图 2（A）展示了焰夜蛾 30 个样本在各地标点处的分布情况，图 2（B）表示其向量图，其中向量箭头的长度反映了每种夜蛾在该点处偏离质心的程度。

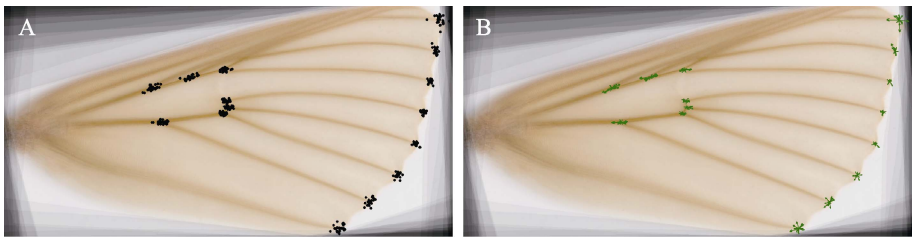

图 2 焰夜蛾 30 个样本右翅地标点普氏叠加图

Fig. 2 Procrustes superposition diagram of landmarks on the right wing from 30 samples of *Pyrrhia umbra*

A. 焰夜蛾 30 个样本的地标点散点图；B. 焰夜蛾 30 个样本的地标点的向量图。

A. Scatter plot of landmarks for 30 samples of *P. umbra*; B. Vector plot of landmarks for 30 samples of *P. umbra*.

由图 2 可以看出通过普氏叠加分析，每种夜蛾对应的地标点都排列在了质心的周围，直观展示了每种夜蛾普氏叠加后的地标点分布情况。

2.1.2 相对扭曲分析 利用软件 tpsSuper 进行普氏叠加分析，得到 18 种夜蛾的平均构型图，再对其进行相对扭曲分析，参数设置为 $x=1$，$y=2$，$\alpha=0$，可得到每种夜蛾相对扭曲值所构成的矩阵，进而为 18 种夜蛾的数字化分类提供数据支持。

借助前两个相对扭曲值作为二维平面上的坐标轴，可以确定每种夜蛾在该平面上的位置，并得到 18 种夜蛾在形状空间中的二维分布图，如图 3 所示。同时，可得到每种夜蛾的相对扭曲图，如图 4（A-R）所示。图 3 和图 4（A-R）展示了 18 种夜蛾蛾翅形态的细微差别和种间关系的相似性。从图 4（A、B、C、G、I、M、N 和 O）可以看出，白斑后夜蛾 *Trisuloides c-album*、八字地老虎 *Agrotis c-nigrum*、小地老虎 *Agrotis ipsilon* 和黄地老虎 *Agrotis segetum* 在相对扭曲方向上呈现出一定的相似性，栎裳夜蛾 *Catocala dissimilis*、显裳夜蛾 *Catocala deuteronympha*、宁裳夜蛾 *Catocala nymphaeoides* 和鸱裳夜蛾 *Catocala patala* 的相对扭曲变化也比较接近。这些结果与夜蛾在图 3 中的相对位置关系相互印证，进一步证实了相对扭曲分析在揭示夜蛾形态特征方面的有效性。总体来看，18 种夜蛾昆虫的相对扭曲图存在明显的差异，通过相对扭曲分析可以将这 18 种夜蛾昆虫区分开来，很好地实现了种间差异的可视化。

2.1.3 蛾翅的形态差异 对 18 种夜蛾昆虫右前翅的地标点坐标数据进行主成分分析，共生成

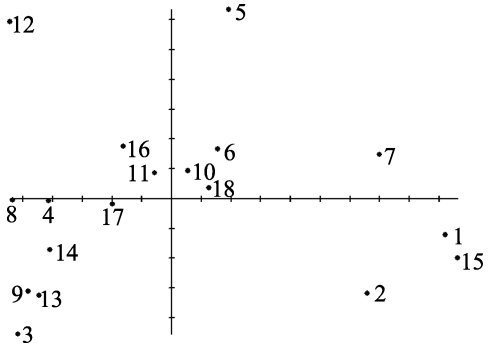

图 3 18 种夜蛾 15 个地标点平均构型图数据在形状空间中的二维分布图

Fig. 3 Two dimensional distribution map of average configuration data of 15 landmarks of 18 species of noctuids in shape space

1：白斑后夜蛾 *Trisuloides c-album*；2：八字地老虎 *Agrotis c-nigrum*；3：鸱裳夜蛾 *Catocala patala*；4：鸽光裳夜蛾 *Catocala columbina*；5：黑环陌夜蛾 *Trachea melanospila*；6：红棕灰夜蛾 *Sarcopolia illoba*；7：黄地老虎 *Agrotis segetum*；8：客来夜蛾 *Chrysorithrum amata*；9：栎裳夜蛾 *Catocala dissimilis*；10：棉铃虫 *Helicoverpa armigera*；11：陌夜蛾 *Trachea atriplicis*；12：鸟嘴壶夜蛾 *Oraesia excavata*；13：宁裳夜蛾 *Catocala nymphaeoides*；14：显裳夜蛾 *Catocala deuteronympha*；15：小地老虎 *Agrotis ipsilon*；16：焰夜蛾 *Pyrrhia umbra*；17：光腹夜蛾 *Mythimna turca*；18：寡夜蛾 *Pseudaletia pallidicosta*. 图 5 同。The same for Fig.5.

30 个主成分，其中前两个主成分解释了 96.98% 的形状变异，见表 2。其中第一主成分（PC1）占 87.79%，第二主成分（PC2）占 9.19%，前两个主成分可以用来解释 18 种夜蛾在蛾翅地标点上的主要差异。

主成分载荷矩阵中的载荷值是各个变量与对应主成分的相关系数，可以解释原始变量对主成分的重要性。第二主成分的载荷矩阵见表 3，

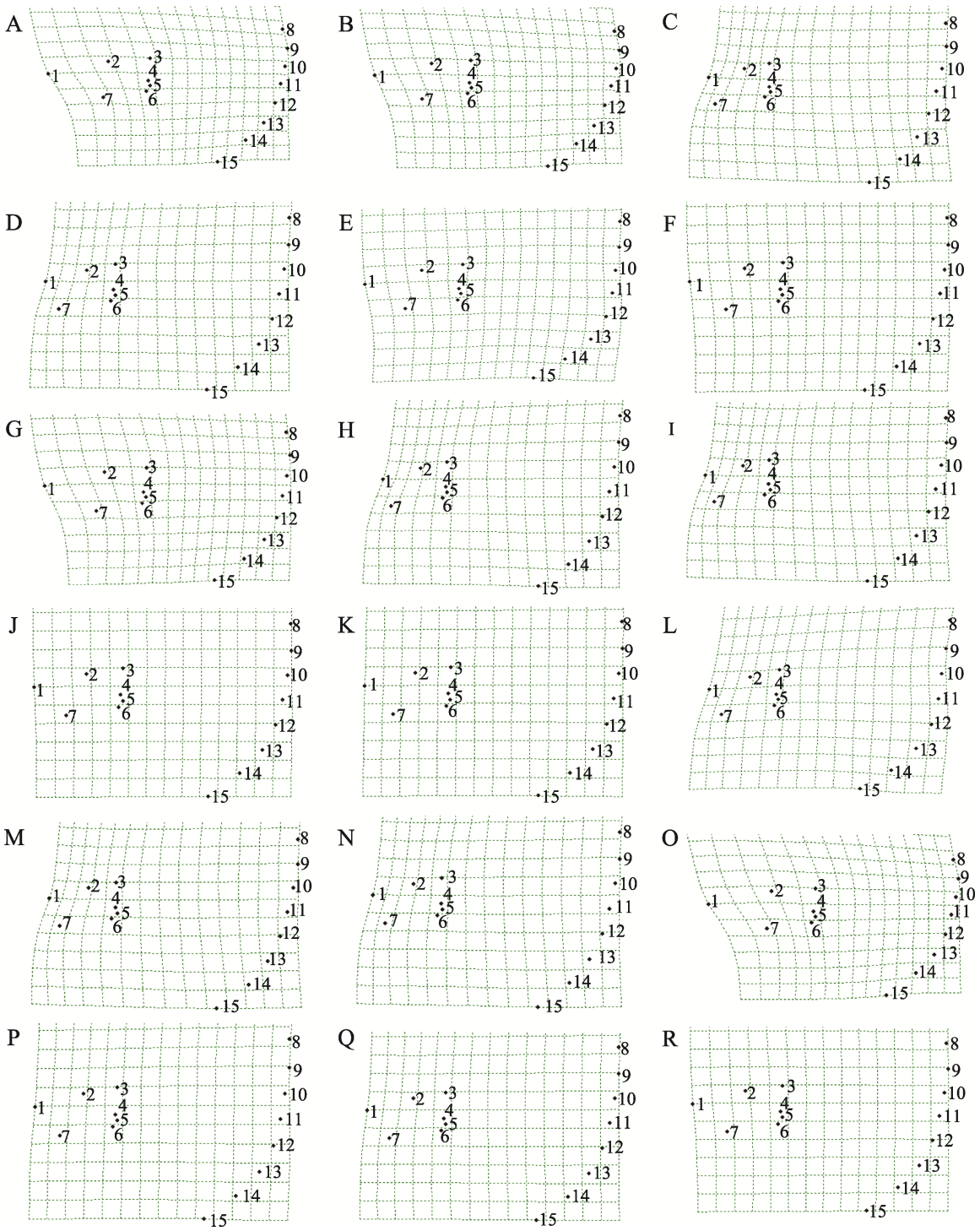

图 4　18 种夜蛾右前翅的相对扭曲图

Fig. 4　Deformation grids of the right forewing of 18 species of noctuids

A. 白斑后夜蛾 *Trisuloides c-album*；B. 八字地老虎 *Agrotis c-nigrum*；C. 鸱裳夜蛾 *Catocala patala*；D. 鸽光裳夜蛾 *Catocala columbina*；E. 黑环陌夜蛾 *Trachea melanospila*；F. 红棕灰夜蛾 *Sarcopolia illoba*；G. 黄地老虎 *Agrotis segetum*；H. 客来夜蛾 *Chrysorithrum amata*；I. 栎裳夜蛾 *Catocala dissimilis*；J. 棉铃虫 *Helicoverpa armigera*；K. 陌夜蛾 *Trachea atriplicis*；L. 鸟嘴壶夜蛾 *Oraesia excavata*；M. 宁裳夜蛾 *Catocala nymphaeoides*；N. 显裳夜蛾 *Catocala deuteronympha*；O. 小地老虎 *Agrotis ipsilon*；P. 焰夜蛾 *Pyrrhia umbra*；Q. 光腹夜蛾 *Mythimna turca*；R. 寡夜蛾 *Pseudaletia pallidicosta*.

图中的数字 1-15 同图 1。Numbers 1-15 are same as Fig. 1.

表 2 第一、第二主成分的特征值及贡献率

Table 2 Eigenvalues, cumulative of the first and second principal components

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalues	方差贡献率（%） Variance contribution rate (%)	累计贡献率（%） Cumulative contribution rate (%)
1	26.337 1	87.790 3	87.790 3
2	2.757 5	9.191 8	96.982 0

据表 3 可以看出，第二主成分对应的 *y*15、*y*14 和 *y*13 在第二主成分中占较大比重，即地标点 13、14、15 纵轴方向上的特征在第二主成分上的载荷较大。说明这些特征与第二主成分相关程度较高。

以第一主成分 PC1 和第二主成分 PC2 为坐标轴，绘制 18 种夜蛾形态变异的散点图，如图 5 所示。由图 5 可以看出不同夜蛾种类能够被明显的区分开，说明利用第一主成分 PC1 和第二主成分 PC2 能够实现 18 种夜蛾的分类识别，同时发现对于同一种夜蛾昆虫来说，在第一主成分 PC1 上呈现聚集状态，而在第二主成分 PC2 方向上较为分散。结合表 3 的结果，这说明同一种夜蛾昆虫的肘脉 Cu_1、Cu_2 和臀脉 2A 与翅外缘交叉点在纵向上存在差异，而蛾右前翅其它位置的地标点特征在种内差异不明显。

表 3 第二主成分载荷矩阵

Table 3 Matrix of the second principal components

地标点 Landmarks	第二主成分 Second principal component	地标点 Landmarks	第二主成分 Second principal component	地标点 Landmarks	第二主成分 Second principal component
*x*1	- 0.21	*x*6	- 0.18	*x*11	- 0.07
*y*1	- 0.16	*y*6	- 0.07	*y*11	0.37
*x*2	- 0.22	*x*7	- 0.27	*x*12	- 0.05
*y*2	- 0.09	*y*7	- 0.17	*y*12	0.45
*x*3	- 0.22	*x*8	- 0.11	*x*13	- 0.03
*y*3	- 0.04	*y*8	0.25	*y*13	0.59
*x*4	- 0.18	*x*9	- 0.09	*x*14	- 0.02
*y*4	- 0.05	*y*9	0.28	*y*14	0.77
*x*5	- 0.17	*x*10	- 0.08	*x*15	0.00
*y*5	- 0.06	*y*10	0.31	*y*15	0.91

2.2 多元统计分析

2.2.1 蛾翅地标点差异性分析 利用 tpsRelw 软件对普氏叠加后的 18 种夜蛾昆虫 540 个样本进行分析，得到各地标点的效应平方和 S_A 与误差平方和 S_E，如表 4 所示。根据夜蛾样本数量信息，已知 $s = 18$，$n = 540$，将其代入公式（1），计算得到各个地标点的 *F* 值见表 4。通过查 *F* 分布表知，在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 与 $\alpha = 0.01$ 下，*F* 值分别为 $F_{0.05}(9,290)=1.88$ 和 $F_{0.01}(9,290)=2.41$。对比表 4 可知在 $\alpha = 0.05$ 与 $\alpha = 0.01$ 显著性水平下的 *F* 值均小于各地标点的 *F* 值，可知 18 种夜蛾的 15 个地标点均具有显著差异（$P<0.01$），甚至极显著差异。这说明所选取的 15 个地标点的拓扑位置在不同夜蛾间是有差异的，同时为后续分析提供了支撑。

2.2.2 判别分析 对 18 种夜蛾 360 个样本的相对扭曲矩阵进行判别分析，得到判别函数的累计贡献率，见表 5。由表 5 可知前 4 个判别函数已能够解释所有变异的 86.51%，因此，构建 4 个标准化典型判别函数，用于 18 种夜蛾的分类识别。判别函数表达式具体为：

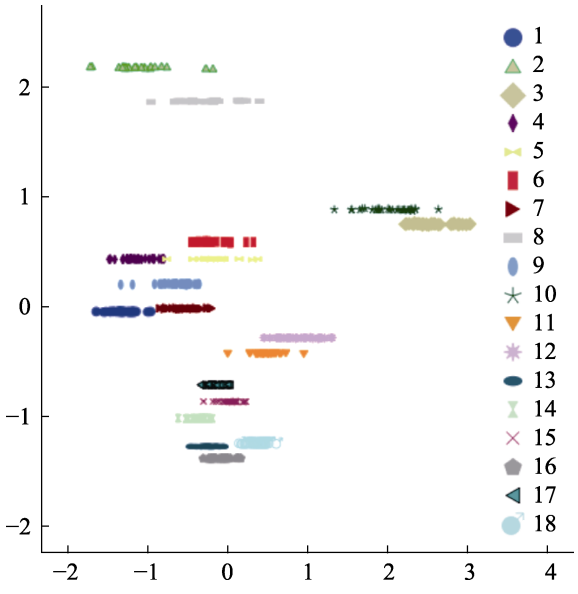

图 5　18 种夜蛾分布图

Fig. 5　Distribution of 18 different species of Noctuidae

$$y_1 = 1.2x_1 + 0.24x_2 + 0.09x_3 + 0.14x_4 + 0.37x_6 + 0.06x_7 + 0.08x_8 - 0.21x_9 + 0.26x_{10} + 0.04x_{11} + 0.35x_{12} + 0.04x_{13} + 0.13x_{14} - 0.06x_{15} - 0.01x_{16} + 0.13x_{17} + 0.14x_{18} + 0.02x_{19} + 0.05x_{20} + 0.09x_{21} - 0.1x_{22} - 0.05x_{23} + 0.08x_{24} + 0.01x_{25} + 0.13x_{26};$$

$$y_2 = 0.05x_1 - 1.06x_2 + 0.92x_3 - 0.15x_4 - 0.22x_5 - 0.39x_6 - 0.47x_7 - 0.18x_8 + 0.98x_9 - 0.12x_{10} + 0.52x_{11} + 0.35x_{12} + 0.15x_{13} - 0.17x_{14} - 0.18x_{15} + 0.03x_{16} - 0.05x_{17} + 0.07x_{18} + 0.12x_{19} + 0.09x_{20} + 0.07x_{21} - 0.18x_{22} - 0.01x_{23} + 0.05x_{24} - 0.07x_{26};$$

$$y_3 = -0.03x_1 + 0.69x_2 + 0.89x_3 - 0.18x_4 + 0.47x_5 + 0.49x_6 + 0.22x_7 - 0.01x_8 + 0.02x_9 + 0.11x_{10} + 0.28x_{11} + 0.12x_{12} - 0.18x_{13} - 0.29x_{14} + 0.15x_{15} - 0.09x_{16} - 0.14x_{17} - 0.06x_{18} - 0.12x_{19} - 0.02x_{20} - 0.04x_{21} - 0.1x_{22} - 0.04x_{23} + 0.1x_{24} - 0.07x_{25} - 0.16x_{26};$$

$$y_4 = -0.03x_1 + 0.23x_2 + 0.05x_3 + 0.02x_4 - 0.52x_5 - 0.06x_6 - 0.27x_7 + 0.49x_8 + 0.37x_9 + 0.8x_{10} - 0.81x_{11} + 0.44x_{12} - 0.3x_{13} + 0.14x_{14} - 0.16x_{15} - 0.31x_{16} + 0.17x_{17} + 0.14x_{19} + 0.06x_{20} + 0.01x_{21} - 0.07x_{22} - 0.02x_{23} - 0.08x_{24} + 0.06x_{25} - 0.01x_{26}。$$

其中 x_i 表示第 i 个相对扭曲值，y_j 表示第 j 个判别函数。

利用剩余的 180 个测试样本对判别函数模型进行验证，判别结果见表 6。由表 6 可知，每

表 4　单因素方差分析结果

Table 4　Results of one-way variance analysis

地标点 Landmarks	效应平方和 S_A Efficacy sum of square	误差平方和 S_E Error sum of square	F 值 F-value	P 值 P-value
1	0.001 62	0.000 04	1 191.272 06	0.000
2	0.000 13	0.000 03	129.218 51	0.000
3	0.000 23	0.000 03	210.470 98	0.000
4	0.000 14	0.000 01	639.698 05	0.000
5	0.000 15	0.000 01	851.546 03	0.000
6	0.000 18	0.000 01	699.961 63	0.000
7	0.000 23	0.000 02	347.724 20	0.000
8	0.000 11	0.000 32	10.237 57	0.000
9	0.000 06	0.000 11	17.508 79	0.000
10	0.000 03	0.000 03	25.913 58	0.000
11	0.000 01	0.000 01	50.167 36	0.000
12	0.000 02	0.000 03	15.607 71	0.000
13	0.000 02	0.000 07	10.468 51	0.000
14	0.000 11	0.000 12	25.919 69	0.000
15	0.000 14	0.000 08	50.546 95	0.000

表 5 判别函数的特征值及贡献率

Table 5 The eigenvalues and contribution rates of discriminant functions

判别函数 Discriminant function	特征值 Eigenvalue	方差贡献率（%） Variance contribution rate (%)	累计贡献率（%） Cumulative contribution rate (%)
判别函数 1 Discriminant function 1	34.66	56.54	56.54
判别函数 2 Discriminant function 2	9.89	16.13	72.67
判别函数 3 Discriminant function 3	5.57	9.09	81.76
判别函数 4 Discriminant function 4	2.91	4.75	86.51

表 6 分类结果

Table 6 Classification results

种类 Species	正确数 Correct number	错误数 Wrong number	总和 Total	正确率（%） Correct rate (%)
白斑后夜蛾 *Trisuloides c-album*	9	1	10	90
八字地老虎 *Agrotis c-nigrum*	10	0	10	100
鸱裳夜蛾 *Catocala patala*	10	0	10	100
鸽光裳夜蛾 *Catocala columbina*	5	5	10	50
黑环陌夜蛾 *Trachea melanospila*	10	0	10	100
红棕灰夜蛾 *Sarcopolia illoba*	10	0	10	100
黄地老虎 *Agrotis segetum*	10	0	10	100
客来夜蛾 *Chrysorithrum amata*	7	3	10	70
栎裳夜蛾 *Catocala dissimilis*	9	1	10	90
棉铃虫 *Helicoverpa armigera*	10	0	10	100
陌夜蛾 *Trachea atriplicis*	8	2	10	80
鸟嘴壶夜蛾 *Oraesia excavata*	10	0	10	100
宁裳夜蛾 *Catocala nymphaeoides*	9	1	10	90
显裳夜蛾 *Catocala deuteronympha*	10	0	10	100
小地老虎 *Agrotis ipsilon*	10	0	10	100
焰夜蛾 *Pyrrhia umbra*	8	2	10	80
光腹夜蛾 *Mythimna turca*	10	0	10	100
寡夜蛾 *Pseudaletia pallidicosta*	9	1	10	90

种测试夜蛾的识别情况，其中鸽光裳夜蛾 *Catocala columbina* 被误判的数量较多，有 4 头鸽光裳夜蛾被误判为焰夜蛾，1 头被误判为棉铃虫 *Helicoverpa armigera*。测试样本的判别正确率为 91.11%，由此可以看出相对扭曲矩阵作为夜蛾昆虫的分类参数是可行的。

3 结论与讨论

本研究利用普氏叠加分析对夜蛾翅脉地标点数据进行处理，消除了样本摆放位置、大小等地标点所含的非形状因素信息的干扰，为后续对夜蛾样本形状的分析和数字识别奠定了坚实基础。通过普氏叠加分析，不同夜蛾样本的形状能够在一个共同的坐标系统下进行比较和分析，同时获取了每种夜蛾的平均翅型图、散点图和向量图，直观显示了每种夜蛾样本地标点的分布及偏离质心的情况，解决了传统形态测量中由非形状因素干扰导致的形状差异判定偏差问题。

相对扭曲分析是几何形态测量学中的一种重要方法。相对扭曲分析是几何形态测量学中的一种重要方法，它能够将抽象的形状差异转化为直观的图形，同时能够捕捉到传统分析方法可能

遗漏的细微形状变化，例如微小的弧度调整或局部的形状扭曲等。本研究将其应用于夜蛾昆虫右前翅的形态差异分析，通过前两个相对扭曲值确定了 18 种夜蛾在二维空间中的分布位置，并得到了清晰的相对扭曲图，实现了 18 种夜蛾种间差异的可视化，研究发现隶属于同一属的夜蛾在变化趋势上具有相似性，如隶属于地夜蛾属的小地老虎、黄地老虎和八字地老虎。同时，研究首次发现同种夜蛾昆虫在肘脉 Cu_1、Cu_2 和臀脉 2A 与翅外缘交叉点的纵向上存在细微差异，其它位置的地标点特征在种内差异不明显，这为形态学研究提供了更为精细和全面的视角。

相对扭曲分析既能够借助直观的图像形式展示形状变化的情况，又可获取相应的数据作为支撑，在昆虫分类与识别工作中发挥作用。其中相对扭曲矩阵（Relative warp matrix）在昆虫分类中具有潜在应用价值，它所蕴含的几何形变参数能够有效区分不同蛾翅翅脉形态差异，可为蛾类昆虫自动化分类体系提供新的可用的特征依据。目前，几何形态测量学在昆虫分类研究中的应用，多直接采用地标点坐标数据开展分析（殷凡等，2024；潘鹏亮等，2025），相对扭曲矩阵在昆虫分类中的应用研究略显不足。相对扭曲矩阵的作用在本研究中首次得到了重视，通过对夜蛾科 18 种夜蛾的判别分类研究，测试样本的判别结果显示识别正确率为 91.11%，充分验证了利用相对扭曲矩阵进行数字化分类的可行性与可靠性，这也说明相对扭曲矩阵包含了足够的信息来区分不同的夜蛾种类，这为未来昆虫自动化分类系统提供了新的技术思路与特征依据。

本研究虽已取得阶段性成果，但仍存在一定局限性与不足。一是样本数量相对有限，未能覆盖夜蛾昆虫的大部分种类以及种内变异类型。后续研究可进一步拓展夜蛾昆虫的种类与数量，构建更全面的夜蛾形态数据库，优化分类模型以提升其泛化能力与适应性。二是针对鳞翅目昆虫翅脉图像的获取，因其翅脉图像的获取需预先进行鳞片去除处理，这使得对此类昆虫翅脉进行几何形态测量学分析相对繁琐。随着科技的发展，未来可优化翅脉图像的采集方法，简化几何形态测量学分析流程。

昆虫翅的特征是昆虫分类学，尤其是传统分类学的重要指标，对蛾翅脉开展几何形态剖析同样具有一定意义。这不仅可为物种鉴定提供技术支撑，更能为探索蛾类昆虫的系统发育、适应性进化等提供新的视角。相较于传统形态识别方法对专家经验的依赖，以及易受主观因素干扰的局限，几何形态测量法能有效排除非形状因素的干扰，可有效提升物种尤其是近缘种鉴定的准确性与可靠性。

目前，在昆虫形态特征分析和数字化分类研究领域，几何形态测量学的应用已较为普遍。与数学形态学相较，二者各有优势和局限。几何形态测量学（白明和杨星科，2007；陆相宜等，2022）主要是基于地标点（Landmarks）数据，可全面分析昆虫形态的拓扑结构，它能捕捉到研究对象整体形状及局部的细微变化。数学形态特征（潘鹏亮等，2017；Akram，2024）的提取过程较简单灵活，但研究范畴仅局限于外部形态轮廓特征的刻画。在今后的研究中，可以尝试将两者有机结合、优势互补，构建更为完善的昆虫形态研究体系。

几何形态测量学在生物物种的分类鉴定、亲缘关系以及形态学分析等领域有着广泛的应用。在日后的研究中，可利用几何形态测量学进一步对蛾翅形态特征进行分析，并与生态数据相结合，深入探究蛾类昆虫对不同生态环境的适应机制，阐释其与生态位的关系。此外，还可进一步深入探究昆虫形态的进化、翅型功能形态学等相关研究，为理解形态进化如何影响昆虫的生态适应性提供新的视角。

参考文献 (References)

Akram M, 2024. Study on the flight ability of *Lymantria dispar asiatica* and modelling its potential distribution. Doctor dissertation. Beijing: Beijing Forestry University. [Akram M, 2024. 舞毒蛾飞行能力研究及其潜在分布区模拟. 博士学位论文. 北京: 北京林业大学.]

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.]

Chen PY, Zhou XJ, Yin ZG, Zhao Q, Shen JD, Huang JR, 2025. Population dynamics of important noctuidae pests in Nanyang City from 2021-2023. *Journal of Environmental Entomology*, 47(6): 1823–1832. [陈培育, 周晓静, 阴志刚, 赵倩, 申坚定, 黄建荣, 2025. 2021-2023 年南阳地区重要夜蛾科害虫成虫的种群动态. 环境昆虫学报, 47(6): 1823–1832.]

Cai XN, Huang DZ, Shen ZR, Gao LW, 2015. Application of wings vein characteristics on mathematics identification of noctuid moths (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of China Agricultural University*, 20(5): 188–193. [蔡小娜, 黄大庄, 沈佐锐, 高灵旺, 2015. 蛾翅翅脉特征在夜蛾昆虫数学分类学中的应用. 中国农业大学学报, 20(5): 188–193.]

Cai XN, Huang DZ, Shen ZR, Gao LW, 2016. Research on geometric morphometric method used for insects classification and identification: Relative warp analysis. *Journal of Biomathematics*, 31(2): 254–262. [蔡小娜, 黄大庄, 沈佐锐, 高灵旺, 2016. 用于昆虫分类鉴定的几何形态计量学方法研究:相对扭曲分析. 生物数学学报, 31(2): 254–262.]

Cai XN, Su XY, Huang DZ, Shen ZR, 2019a. Digital classification of sphingid moths adults (Lepidoptera: Sphingidae) based on geometric morphometry. *Scientia Silvae Sinicae*, 55(1): 38–46. [蔡小娜, 苏筱雨, 黄大庄, 沈佐锐, 2019a. 基于几何形态测量学的天蛾科成虫数字化分类. 林业科学, 55(1): 38–46.]

Cai XN, Zhang RN, Li Y, Li J, Huang DZ, 2019b. Application of landmarks on digital classification of noctuid moths (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Environmental Entomology*, 41(1): 106–112. [蔡小娜, 张若楠, 李阳, 李晶, 黄大庄, 2019b. 地标点法在夜蛾昆虫数字化分类中的应用研究. 环境昆虫学报, 41(1): 106–112.]

Deng WA, Yao DH, Gu B, 2019. Morphometrics analysis on the pronotum of tetrigoidea. *Journal of Hechi University*, 39(2): 1–7. [邓维安, 姚大亨, 谷博, 2019. 蚱类昆虫前胸背板几何形态测量学分析. 河池学院学报, 39(2): 1–7.]

Gu JY, 2024. A research of hindwing of longhorn beetles based on geometric morphometric. Master dissertation. Jingzhou: Yangtze University. [顾佳怡, 2024. 基于几何形态测量学的天牛后翅形态研究. 硕士学位论文. 荆州: 长江大学.]

Güler Y, Aytekn AM, Cagatay N, 2006. Systematical studies on Anthidiini (Hymenoptera: Megachilidae): Ageometric morphometric approach. *Acta Entomologica Sinica*, 49(3): 474–483.

Janczyk A, Meixner MD, Tofilski A, 2021. Morphometric identification of the endemic Maltese honey bee (*Apis mellifera* Ruttneri). *Journal of Apicultural Research*, 60(1): 157–164.

Li LF, Shih PJ, Zhang XQ, Peng C, Li DQ, Ren D, 2022. Geometric morphometric analysis of two genera confirm three new wasps from the mid-Cretaceous of Myanmar (Hymenoptera: Aulacidae). *Cretaceous Research*, 13(10): 50–57.

Liu M, 2015. Morphological variation of *Dicerapanorpa magna* (Chou) and phylogeny of *Dicerapanorpa* (Mecoptera: Panorpidae) based on geometric morphometric analysis of wings. Master dissertation. Yangling: Northwest A&F University. [刘梅, 2015. 基于翅几何形态测量学分析的大双角蝎蛉形态变异及双角蝎蛉属系统发育研究(长翅目: 蝎蛉科). 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]

Liu SY, Zhang TT, 2024. A preliminary geometric morphometric analysis of wing shape variation among seven important species of the genus *Ptecticus* (Diptera: Stratiomyidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 61(6): 1239–1249. [刘士宜, 张婷婷, 2024. 基于几何形态学对七种指突水虻翅脉形态分析. 应用昆虫学报, 61(6): 1239–1249.]

Lu XY, Bian X, Deng WA, 2022. Geometric morphometrics and its application in Orthoptera. *Journal of Guangxi Normal University* (*Natural Science Edition*), 40(5): 342–353. [陆相宜, 边迅, 邓维安, 2022. 几何形态测量学及其在直翅目研究中的应用. 广西师范大学学报(自然科学版), 40(5): 342–353.]

Pan PL, Zhang FM, Hong F, Guo SB, Zhou Z, Qiao L, Yin J, Geng SB, 2025. Geometric analysis of morphological variation between different body color biotypes of *Halyomorpha halys*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 62(1): 211–227. [潘鹏亮, 张方梅, 洪枫, 郭世保, 周洲, 乔利, 尹健, 耿书宝, 2025. 不同体色茶翅蝽成虫外部形态结构变化的几何形态学分析. 应用昆虫学报, 62(1): 211–227.]

Pan PL, Shi HZ, Yin XM, Wang GJ, Liu HM, 2017. Measurement and analysis of morphometric features of *Stephanitis nashi* Esaki *et* Takeya (Hemiptera: Tingidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(3): 522–529. [潘鹏亮, 史洪中, 尹新明, 王国君, 刘红敏, 2017. 梨冠网蝽数学形态特征的提取与分析. 应用昆虫学报, 54(3): 522–529.]

Qi MJ, Sun H, Zuo XH, Li HH, 2021. Annual report of new taxa for Chinese Lepidoptera in 2020. *Biodiversity Science*, 29(8): 1035–1039. [戚慕杰, 孙浩, 左兴海, 李后魂, 2021. 中国鳞翅目新物种 2020 年度报告. 生物多样性, 29(8): 1035–1039.]

Rohlf FJ, Marcus LF, 1993. A revolution morphometrics. *Trends in*

Ecology & Evolution, 8(4): 129–132.

Rohlf FJ, 1999. Shape statistics: Procrustes superimpositions and tangent spaces. *Journal of Classification*, 16(2): 197–223.

Rainford JL, Hofreiter M, Nicholson DB, Mayhew PJ, 2014. Phylogenetic distribution of extant richness suggests metamorphosis is a key innovation driving diversification in insects. *PLoS ONE*, 9(10): 1–7.

Niveyro S, Benítez HA, 2019. Interspecific larvae competence and mandible shape disparity in cutworm pest complex (Lepidoptera: Noctuidae). *Zoologischer Anzeiger*, 283(5): 207–212.

Sadeghi S, Adriaens D, Dumont HJ, 2009. Geometric morphometric analysis of wing shape variation in ten European populations of *Calopteryx splendens* (Harris, 1782) (Zygoptera: Calopterygidae). *Odonatologica*, 38(4): 341–357.

Wen H, 2015. Study on the wing outline diversity, distribution patterns and evolutionary trends of owlflies (Insecta: Neuroptera: Ascalaphidae). Doctor dissertation. Beijing: China Agricultural University. [闻慧, 2015. 蝶角蛉翅形多样性、地理分布格局与演化趋势研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学.]

Wen H, 2024. Geometric morphometric analysis of forewing apical area venation of typhlocybini (Hemiptera: Cicadellidae: Typhlocybinae). Master dissertation. Yangling: Northwest A&F University. [温慧, 2024. 小叶蝉族前翅端区脉序几何形态测量学研究(半翅目: 叶蝉科: 小叶蝉亚科). 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]

Yin F, Tong YJ, Lu YY, Tian ZH, Bai M, 2024. The geometric morphometrics of eight Euchirinae species in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 61(6): 1230–1238. [殷凡, 佟一杰, 路园园, 田哲豪, 白明, 2024. 我国八种臂金龟的几何形态学研究. 应用昆虫学报, 61(6): 1230–1238.]