

中国黯螽属前翅几何形态测量学分析*

庞思瑜** 黄振勇 边 迅***

(广西师范大学, 珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室, 桂林 541006)

摘 要 【目的】本研究对黯螽的右前翅进行定量分析, 探讨将翅脉及翅室用于黯螽属 *Anabropsis* 昆虫分类的可行性。【方法】选 13 种黯螽的右前翅翅脉、脉序进行主成分分析、判别分析和聚类分析。【结果】(1) 主成分分析显示, 13 种黯螽属昆虫的前右翅翅脉差异主要集中在 Sc、R、Rs、CuA 和 A 脉; (2) 典型变量分析能够将 13 种昆虫区分开; (3) 5 类数据的判别分析中, 基于翅室测量值数据联合数据集的判别效果较好, 而基于翅形态测量值进行判别的正确率最低; (4) 在聚类分析中, 除了马关黯螽 *Anabropsis* (*Pteranabropsis*) *maguanensis* 和卡氏黯螽 *Anabropsis* (*Pteranabropsis*) *carli* 与 *Carnabropsis* 亚属聚在一起外, 其余各亚属的物种均分别聚在一起, 与形态划分结果一致。【结论】翅的形态特征可作为黯螽属分类的辅助依据。

关键词 黯螽属; 几何形态测量学; 主成分分析; 典型变量分析; 判别分析

Geometric morphometric analysis of the tegmina of the genus *Anabropsis* in China

PANG Si-Yu** HUANG Zhen-Yong BIAN Xun***

(Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection, Ministry of Education, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China)

Abstract [Aim] To investigate the value of the tegmen for taxonomic research on the genus *Anabropsis*. [Methods] The right tegmen veins and cells of thirteen *Anabropsis* species were quantitatively analyzed using principal component analysis (PCA), canonical variable analysis (CVA), discriminant analysis, and cluster analysis. [Results] (1) Principal component analysis showed that differences among the 13 species were mainly in the veins Sc, R, Rs, CuA and A. (2) Canonical variable analysis accurately distinguished all 13 species. (3) Discriminant analysis of five datasets (including the dataset combining wing morphometric data and cell measurement values) was the most discriminant; accuracy of discrimination based on tegmen measurement values was the lowest. (4) Except for *Anabropsis* (*Pteranabropsis*) *maguanensis* and *Anabropsis* (*Pteranabropsis*) *carli*, which clustered with *Anabropsis* (*Carnabropsis*), species from each subgenus clustered together, a result consistent with the classical morphological classification. [Conclusion] In summary, the morphological characteristics of the tegmen can serve as auxiliary evidence for the classification of *Anabropsis*.

Key words *Anabropsis*; geometric morphometric; principal component analysis; canonical variable analysis; discriminant analysis

几何形态测量学 (Geometric morphometrics) 是一种将生物个体与生物类群之间的形态差异量化为数字信息进行分析, 以提供更加完整的形态变异信息, 从而寻找生物形态变化的范围和规

律的比较形态学研究方法 (Kaliontzopoulou *et al.*, 2007)。将生物体形态量化与数字化, 不仅可以弥补传统形态测量学受生物体尺寸、定向等影响的不足, 还可以使形态细微变化更加直观的

*资助项目 Supported project: 基于形态及分子数据的中国黯螽族分类及系统发育研究 (32360126)

**第一作者 First author, E-mail: pangsiyu0820@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: xunbian2010@163.com

收稿日期 Received: 2025-04-28; 接受日期 Accepted: 2026-04-22

展现出来(白明和杨星科, 2007)。昆虫是无脊椎动物中唯一具有翅的类群, 其坚固的结构为几何形态测量学研究提供了基础(Aytekin *et al.*, 2007)。运用几何形态学研究昆虫翅轮廓及翅脉特征, 不仅能减少形态特征的判断误差, 还能为分类鉴定及近缘类群的系统发育研究提供重要证据(Sadeghi *et al.*, 2009)。潘鹏亮等(2008)通过 Draw Wing 和 TpsDig 软件分析了 7 种蝴蝶前翅翅脉交点间的距离, 并进行了分类研究。张晶晶等(2014)用几何形态测量学对 4 种蜻蜓前、后翅的翅型和翅脉进行量化分析, 表明该方法对于蜻蜓的种类划分是可行和有效的。温光华等(2015)基于几何形态测量研究了 5 种常见稻蝗的前、后翅形态变化, 发现基于前、后翅形态变化的分类结果与传统分类研究结果一致, 其可作为种间分类和进化研究的依据。Sontigun 等(2017)基于几何形态测量学分析了泰国 2 种丽蝇的翅形态, 发现翅形态可成为该分类群在属和种水平上分类的有用工具。张秀秀等(2017)利用形态测量学对秦岭地区中华蜜蜂 *Apis cerana cerana* 5 个地理种群前、后翅形态差异进行了分析, 发现存在较明显的种群间差异。李玲等(2017)利用几何形态学对离腹寡毛实蝇属 *Bactrocera* 3 个种的翅脉进行定量分析, 证明利用翅脉特征可以将物种区分开来。蒋昕等(2023)对宽广蜡蝉属 *Pochazia* 和广翅蜡蝉属 *Ricania* 这两个近缘属的前翅进行了主成分分析和典型变量分析, 结果表明前翅翅脉及翅轮廓特征能够用于近缘种的分类鉴定。由此可见, 几何形态测量学方法在昆虫分类鉴定中具有一定的可行性和应用价值。

黯螽属 *Anabropsis* 隶属于直翅目 Orthoptera 蝗螽科 Anostostomatidae 黯螽亚科 Anabropsinae。目前主要基于前胸背板、胸腹板突、前足胫节听器、肛侧板和雌雄下生殖板等特征对黯螽属进行物种鉴定和分类, 对于翅方面的研究较少。Ingrisch (2019) 认为翅长、翅面积及翅的长宽比在种间和种内容易发生变化, 特别是在一些广泛分布的种之间, 而翅脉在所有物种内都有普遍规律, 但是一些短翅种类的 M 脉或 Cu 脉分枝会

减少。同时, 他基于之前对蟋螽翅脉命名系统(Ingrisch, 2018)对部分黯螽的翅脉进行了定性描述, 认为物种之间的翅脉变化主要集中在 M 脉和 Cu 脉。为进一步探讨翅形态在黯螽属昆虫分类的可行性, 本研究选取了 13 种黯螽的右前翅进行定量分析。

1 材料与方法

1.1 研究材料

黯螽属昆虫的左右前翅对称, 本研究主要对右前翅进行形态测量分析, 昆虫标本(表 1)均来自于广西师范大学生命科学学院, 共 3 亚属 13 种 56 头。

1.2 研究方法

1.2.1 图像采集及处理 选取完整标本还软后取下右前翅, 将翅展平使其在同一平面上, 使用数码相机 Nikon D7100 进行微距拍摄。挑选出清晰的图片, 利用 Adobe Photoshop 2018 软件调整图片比例, 使各图的比例尺大小相同, 图片大小在 3-5 M 左右, 输出保存。

1.2.2 数据获取及处理

1.2.2.1 翅形态测量值的获取 使用 ImageJ 软件测量前翅的长度、宽度、周长和面积, 并计算出圆度和展弦比(徐炜桢等, 2019)。翅长为翅基部到端部的直线距离(mm); 翅宽为翅前缘到翅后缘最大宽度(mm), 并计算长宽比。通过多边形选择工具, 描出翅的轮廓, 测量出周长(mm)和面积(mm^2), 将测量结果输入到 Excel 2016 中, 使用如下公式分别计算前翅的圆度和展弦比: 圆度= $4\pi \times \text{面积} \div \text{周长}^2$; 展弦比= $\text{翅长}^2 / \text{翅面积}$ 。

1.2.2.2 翅室测量值的获取 将前翅导入 Wing Gram 1.0 软件(Eshghi *et al.*, 2022), 输入比例(单位: Pixel), 获得所有翅室的面积、周长和最大宽度。然后, 在 Excel 2016 中以面积为 150 Pixel、周长为 10 Pixel 和最大宽度为 2 Pixel 为间距, 统计各组中的频数, 计算各组的频数与翅室总数的比值。

表 1 本研究所用黯螽昆虫标本
Table 1 The specimens of the genus *Anabropsis* used in this study

属名 Genus	亚属 Subgenus	物种 Species	标本数 Sample number
黯螽属 <i>Anabropsis</i>	缺翅黯螽亚属 <i>Anabropsis (Apteranabropsis)</i>	越北黯螽 <i>Anabropsis (Apteranabropsis) tonkinensis</i>	6
		隆线黯螽 <i>Anabropsis (Carnabropsis) carnarius</i>	6
		小凹黯螽 <i>Anabropsis (Carnabropsis) crenatis</i>	7
		挂墩黯螽 <i>Anabropsis (Carnabropsis) guadun</i>	4
		纵裂黯螽 <i>Anabropsis (Carnabropsis) incisa</i>	3
		渐暗黯螽 <i>Anabropsis (Carnabropsis) infusate</i>	3
		卡耐尔黯螽 <i>Anabropsis (Carnabropsis) karnyi</i>	1
		平行黯螽 <i>Anabropsis (Carnabropsis) parallela</i>	5
		腾冲黯螽 <i>Anabropsis (Carnabropsis) tenchongensis</i>	2
	翼黯螽亚属 <i>Anabropsis (Pteranabropsis)</i>	卡氏黯螽 <i>Anabropsis (Pteranabropsis) carli</i>	6
		苍白黯螽 <i>Anabropsis (Pteranabropsis) falcata pallescens</i>	5
		马关黯螽 <i>Anabropsis (Pteranabropsis) maguanensis</i>	5
		斧尾黯螽 <i>Anabropsis (Pteranabropsis) falcata falcata</i>	3

1.2.2.3 几何形态数据的标准化处理 用 TpsUtil v1.47 软件将图片转换为.tps 格式，再导入 TpsDig v2.28 选取地标点（Rohlf, 2015）。地标点是指生物样本中同时具有生物学和几何形态信息同源性的点（Zelditch *et al.*, 2004）。选取地标点时，确保每张图片选取的地标点数量相同且同源对应。本研究选取翅脉的基点、分支点、端点共 24 个地标点[以卡氏黯螽 *Anabropsis (Pteranabropsis) carli* 为例]（图 1）。

1.3 数据分析

1.3.1 翅脉形态变化分析 将.tps 文件导入 MorphoJ v1.06d 软件（Klingenberg, 2011），使用广义普氏叠加法（Generalized procrustes analysis, GPA）进行普氏叠加，按主轴对齐，对

每个样本的地标点进行平移、旋转、缩放及重叠，以消除非形状因素的影响。对普氏叠加后获得的地标点数据进行主成分分析（Principal components analysis, PCA），基于前两个贡献率最大的主成分进行分析获得散点图。用 MorphoJ 软件进行薄板样条分析（Thin-plate spline, TPS），比较各样本间翅脉的形态差异。在 PCA 的基础上进行典型变量分析（Canonical variate analysis, CVA），得到散点图、马氏距离、普氏距离，并分析各物种之间翅脉形态是否具有显著差异。导出普氏距离并保存，以进行后续分析。

1.3.2 判别分析 判别分析是一种根据已知样本的测量数据计算出判别函数，再根据现有的判别标准比较分类未知样本的分析方法，常用的判别方法有 Bayes 判别法、Fisher 判别法、马氏距



图 1 氏黯蠹右前翅翅脉地标点

Fig. 1 Landmarks of right tegmen veins of *Anabropsis (Pteranabropsis) carli*

- 1: C 脉基点; 2: C 脉端点; 3: Sc 脉基点; 4: Sc 脉和 Sc1 脉交点; 5: Sc 脉和 Sc2 脉交点;
6: R 脉基点; 7: R 脉和 Rs 脉分支点; 8: M 脉基点; 9: M 脉分支点; 10: CuA 脉基点;
11: CuA 脉分支点; 12: CuP 脉基点; 13: A 脉基点; 14: Sc1 脉端点; 15: Sc2 脉端点;
16: Sc 脉端点; 17: R 脉端点; 18: Rs 脉端点; 19: M1 脉端点; 20: M2 脉端点;
21: CuA1 脉端点; 22: CuA2 脉端点; 23: CuP 脉端点; 24: A 脉端点。

- 1: Basal point of costal vein (C); 2: Endpoint of costal vein (C); 3: Basal point of subcostal vein (Sc);
4: Intersection of Sc and Sc1 veins; 5: Intersection of Sc and Sc2 veins; 6: Basal point of radius vein (R);
7: Branch point of R and Rs veins; 8: Basal point of media vein (M); 9: Branch point of M vein; 10: Basal point of anterior cubitus vein (CuA); 11: Branch point of CuA vein; 12: Basal point of posterior cubitus vein (CuP);
13: Basal point of anal vein (A); 14: Endpoint of Sc1 vein; 15: Endpoint of Sc2 vein; 16: Endpoint of Sc vein;
17: Endpoint of R vein; 18: Endpoint of Rs vein; 19: Endpoint of M1 vein; 20: Endpoint of M2 vein;
21: Endpoint of CuA1 vein; 22: Endpoint of CuA2 vein; 23: Endpoint of CuP vein; 24: Endpoint of A vein.

离判别法、距离判别分析法等(李建军等,2007)。利用 SPSS 22.0 软件分别对翅形态测量值数据(即翅的周长、面积、长宽比、圆度、展弦比)、翅室测量值数据(即翅室面积、周长和最大宽度)及联合数据集进行 Fisher 判别分析,比较各判别分析结果的准确度。

1.3.3 聚类分析 基于普氏距离数据,使用 NTSYS-pc 2.10 软件(Rohlf, 1987),采用非加权算术平均组对法(Unweighted pair-group method with arithmetic means, UPGMA)进行聚类分析,

得到能够直观反映各物种右前翅表型聚类。

2 结果与分析

2.1 右前翅翅脉几何形态测量学分析

2.1.1 基于普氏距离方差分析 对黯蠹属右前翅的几何形态数据进行普氏距离方差分析结果显示(表 2),各物种间右前翅翅脉差异显著($F=5.089$, $df=168$, $P<0.01$),可以进行后续的主成分分析和典型变量分析。

表 2 黯蠹属各物种间右前翅翅脉形态普氏距离单因素方差分析

Table 2 One-way ANOVA of Procrustes distance for right tegmen vein among species of *Anabropsis*

变异来源 Variable source	平方和 Sum of squares	df 值 df-value	均方 Mean square	F 值 F-value	P 值 P-value
组间 Between groups	0.88	12	0.073	5.087	0.000
组内 Within groups	2.25	156	0.014		
总数 Total	3.13	168			

2.1.2 主成分分析 主成分分析结果显示(图 2: A), 前两个主成分(PC1=64.559%和 PC2=10.222%)累积占约占总变异的 74.781%, 能够代表各样本之间的变化规律(表 3)。沿 PC1 正方向, 对黯螽属前翅影响较大的 3 个标点为: 16、

17 和 24, 翅的变异点主要发生在 Sc 脉端点、R 脉端点和 A 脉端点(图 2: B); 沿 PC2 正方向影响较大的 3 个标点为(图 2: C): 7、11 和 10, 翅的变异点主要发生在 R 脉和 Rs 脉分支点、CuA 脉分支点和 CuA 脉基点。

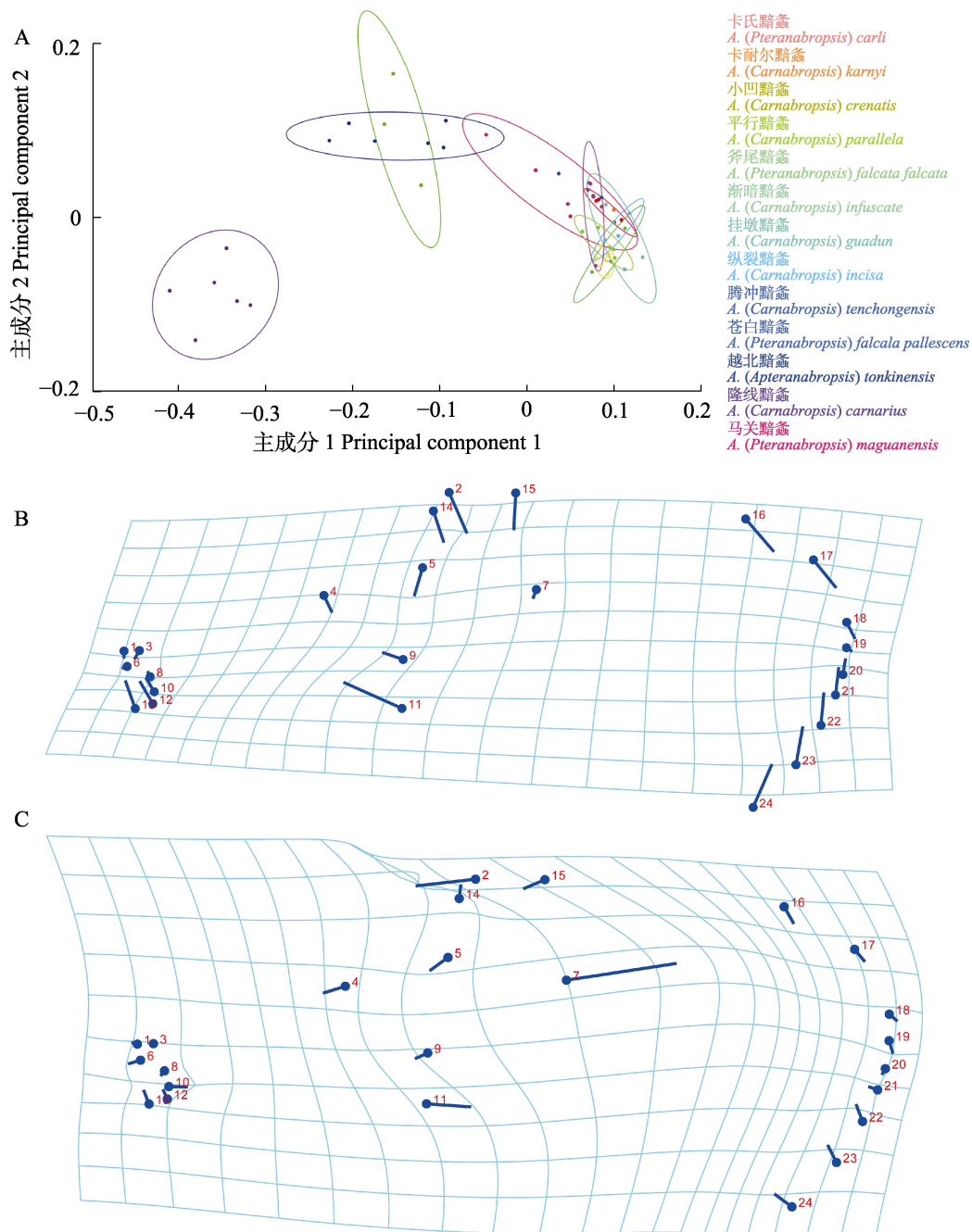


图 2 黯螽属右前翅翅脉形态变化主成分分析

Fig. 2 Principal component analysis of right tegmen vein morphological changes of *Anabropsis*

A: PC1 vs PC2 散点图; B: PC1 薄板样条; C: PC2 薄板样条。

A: The scatter diagram of PC1 vs PC2; B: Thin plate spline analysis of PC1; C: Thin plate spline analysis of PC2.

2.1.3 典型变量分析 在典型变量分析中, 前两个典型变量占总变量的 86.871%, 能够说明各样本之间的主要差异。图 3 显示, 除卡耐尔黯螽 *Anabropsis (Carnabropsis) karnyi* 与斧尾黯螽 *Anabropsis (Pteranabropsis) falcata falcata*、渐暗黯螽 *Anabropsis (Carnabropsis) infusate*、挂

墩黯螽 *Anabropsis (Carnabropsis) guadun*、纵裂黯螽 *Anabropsis (Carnabropsis) incisa*, 斧尾黯螽与渐暗黯螽、挂墩黯螽、纵裂黯螽, 渐暗黯螽与挂墩黯螽、纵裂黯螽、腾冲黯螽 *Anabropsis (Carnabropsis) tenchongensis* 没有明显差异以外 ($P>0.05$), 其他种之间的差异显著 ($P<0.05$)。

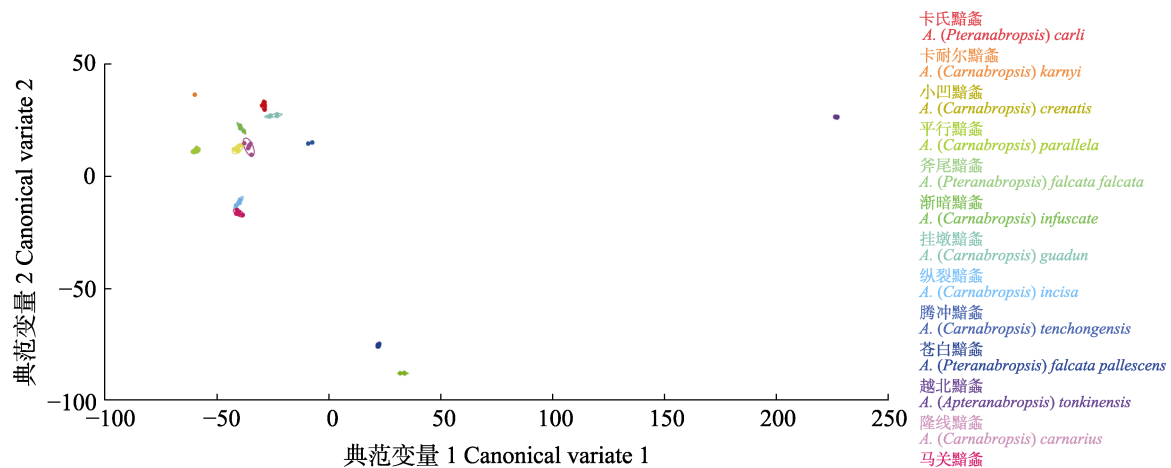


图 3 黯螽属右前翅翅脉典型变量分析散点图

Fig. 3 The scatter plots of canonical variables of the right tegmen vein of the *Anabropsis*

2.2 判别分析

2.2.1 基于翅形态测量值的判别分析 对 13 种黯螽昆虫右前翅形态测量值进行判别分析 (表 3), 其中前两个判别函数累积方差贡献率为 98.4%, 可以解释大部分样本的信息, 所有个体的综合判别准确率为 67.9%。在 13 种黯螽中, 腾冲黯螽 [*Anabropsis (Carnabropsis) tenchongensis*]、马关黯螽 *Anabropsis (Pteranabropsis) maguanensis*、斧尾黯螽、小凹黯螽 *Anabropsis (Carnabropsis) crenatis*、卡耐尔黯螽、越北黯螽 *Anabropsis (Apteranabropsis) tonkinensis* 的所有个体均能被正确鉴定; 卡氏黯螽 [*Anabropsis (Pteranabropsis) carli*, 80.0%] 和苍白黯螽 [*Anabropsis (Pteranabropsis) falcata pallescens*, 83.3%] 判别正确率很高, 渐暗黯螽的判别正确率为 66.7%; 纵裂黯螽 (33.3%)、挂墩黯螽 (25.0%) 和隆线黯螽 [*Anabropsis (Carnabropsis) carnarius*, 16.7%] 的判别率较低。

平行黯螽 [*Anabropsis (Carnabropsis) parallela*] 的判别正确率为 0, 分别有 2 个样本被误判为小凹黯螽、1 个样本被误判为纵裂黯螽、2 个样本被误判为挂墩黯螽, 说明平行黯螽的面积、周长、展弦比、圆度、长宽比, 与小凹黯螽、纵裂黯螽和挂墩黯螽的无明显差异, 不能通过判别分析所建立的函数进行分类。

2.2.2 基于翅室测量值的判别分析

2.2.2.1 基于翅室的面积、周长及最大宽分别进行判别分析 3 种类型数据的前两个判别函数函数的方差累积贡献率分别为 85.6%、83.0% 和 91.6% (表 3), 所有个体的综合判别率分别为 96.4%、87.5% 和 82.1%。在原始判别中, 对翅室面积进行判别的结果显示, 除卡氏黯螽和隆线黯螽正确判别率较低外 (分别为 80.0% 和 83.3%), 其余 11 个种的判别正确率均为 100%, 样本整体的判别正确率为 96.4%; 对翅室周长判别结果显示, 除小凹黯螽 (85.7%)、隆线黯螽 (83.3%)、卡氏黯螽 (80.0%)、马关黯螽 (80%)、平行

表 3 黯蝽属 13 个物种的判别正确率
Table 3 The correct rate of discriminant analysis of 13 species of *Anabropsis*

数据类型 Data type	判别正确率 (%) Discriminant accuracy (%)													样本 整体 Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
翅测量值 Wing measurement values	80.0	100	100	100	83.3	100	33.3	100	25.0	16.7	100	0	66.7	67.9
翅室面积 Wing cell area	80.0	100	100	100	100	100	100	100	100	83.3	100	100	100	96.4
翅室周长 Wing cell perimeter	80.0	100	80.0	100	100	85.7	66.7	100	75.0	83.3	100	80	100	87.5
翅室最大宽度 Wing cell maximum width	60.0	50	80.0	100	100	85.7	100	100	100	83.3	100	20	100	82.1
翅室面积、长度、宽度联合数据集 Combined dataset of wing cell area, length, and width	80.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98.2

1: 卡氏黯蝽 *Anabropsis (Pteranabropsis) carli*; 2: 腾冲黯蝽 *Anabropsis (Carnabropsis) tenchongensis*; 3: 马关黯蝽 *Anabropsis (Pteranabropsis) maguanensis*; 4: 斧尾黯蝽 *Anabropsis (Pteranabropsis) falcata falcata*; 5: 苍白黯蝽 *Anabropsis (Pteranabropsis) falcata pallens*; 6: 小凹黯蝽 *Anabropsis (Carnabropsis) crenatis*; 7: 纵裂黯蝽 *Anabropsis (Carnabropsis) incisa*; 8: 卡耐尔黯蝽 *Anabropsis (Carnabropsis) karnyi*; 9: 挂墩黯蝽 *Anabropsis (Carnabropsis) guadun*; 10: 隆线黯蝽 *Anabropsis (Carnabropsis) carnarius*; 11: 越北黯蝽 *Anabropsis (Apteranabropsis) tonkinensis*; 12: 平行黯蝽 *Anabropsis (Carnabropsis) parallela*; 13: 渐暗黯蝽 *Anabropsis (Carnabropsis) infusate*.

黯蝽 (80.0%)、挂墩黯蝽 (75.0%) 和纵裂黯蝽 (66.7%) 正确判别率较低外, 其余 6 个种的判别正确率均为 100%, 样本整体的判别正确率为 87.5%; 翅室最大宽度判别的结果显示 (表 3), 除小凹黯蝽 (85.7%)、隆线黯蝽 (83.3%)、马关黯蝽 (80.0%)、卡氏翅黯蝽 (60.0%)、腾冲黯蝽 (50.0%) 和平行黯蝽 (20.0%) 的判别正确率较低外, 其余 7 个种的判别正确率均为 100%, 样本整体的判别正确率为 82.1%。在三种数据中, 马关黯蝽、斧尾黯蝽、纵裂黯蝽和渐暗黯蝽所有个体均能被正确鉴定, 卡氏黯蝽 (60.0%)、腾冲黯蝽 (50.0%) 和平行黯蝽 (20.0%) 的翅室宽度的正确判别率最低。综上所述, 通过翅室面积进行判别的正确率最高, 翅室周长的判别正确率其次, 翅室最大宽度的判别正确率最低, 且通过翅室最大宽度数据不能对平

行黯蝽进行判别分类。
2.2.2.2 基于翅室面积、长度及最大宽度联合数据集的判别分析 对 13 种黯蝽 56 个样本的翅室面积、长度和宽度测量值联合数据集进行判别分析表明, 函数 1 和函数 2 的方差贡献率分别为 66.7% 和 11.7%, 累积贡献率为 78.4%。除卡氏黯蝽的判别正确率为 80.0% 外, 其余 12 个种的判别正确率均为 100%, 说明 13 种黯蝽属昆虫能够通过判别分析进行分类, 样本整体的判别正确率为 98.2%, 判别效果较好。

2.3 聚类分析

当系数为 0.33 时 (图 4), 越北黯蝽首先从基部分出, 其余 12 个种聚合为一个大的分支 I。在分支 I 中, 分支 II 和分支 III 形成姐妹群。在分支 III 中, 斧尾黯蝽和苍白黯蝽聚在一起; 分支 II 又分为分支 IV 和分支 V。分支 IV 分为两个姐妹

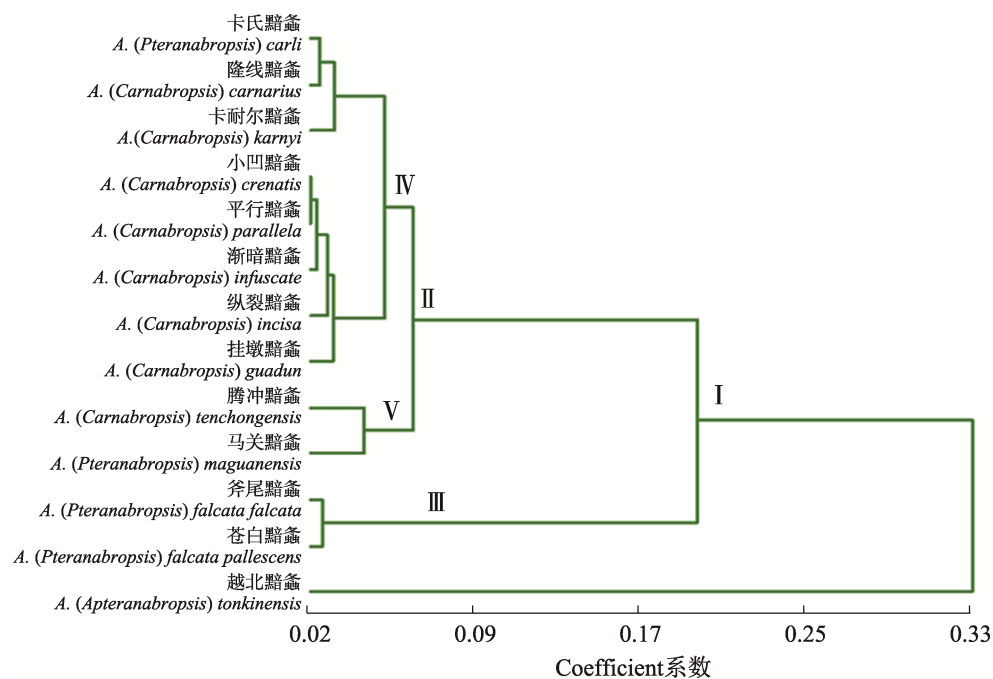


图 4 基于普氏距离的聚类分析系谱图

Fig. 4 Cluster analysis of the family tree of 13 species of *Anabropsis* based on Procrustes distance

群：挂墩黯螽、纵裂黯螽和渐暗黯螽首先作为基部分出，小凹黯螽和平行黯螽聚合在一起形成一个类群；卡耐尔黯螽作为基部分出，卡氏黯螽和隆线黯螽聚合在一起形成另一个类群。腾冲黯螽和马关黯螽聚在一起形成分支 V。基于普氏距离的聚类分析结果表明，除了马关黯螽和卡氏黯螽与 *Carnabropsis* 亚属的样本聚在一起之外，越北黯螽单独聚为一类，斧尾黯螽和苍白黯螽聚为一类，隆线黯螽、小凹黯螽、挂墩黯螽、纵裂黯螽、渐暗黯螽、卡耐尔黯螽、平行黯螽和腾冲黯螽聚为一类，聚类的结果与传统分类学基本一致。

3 结论与讨论

本研究使用几何形态测量学法对 13 种黯螽属昆虫的右前翅形态进行了主成分分析、薄板样条分析、典型变量分析、判别分析和聚类分析。翅形态测量值、翅室面积、翅室周长、翅室最大宽度及翅室联合数据集与标本数量呈负相关（- 0.126 096 5、- 0.415 873 3、- 0.299 940 8、- 0.162 389 5 和 -0.282 889 5），标本数量对分析的结果影响不大。

Zhang 等（2016）利用形态测量学研究蚱类后翅脉序形态，发现不同属的后翅脉序存在较大差异，因此脉序的形态特征可作为分类鉴定依据。Ingrisch（2019）在对翼黯螽亚属 *Anabropsis* (*Pteranabropsis*)相似物种进行形态学研究时发现卡氏黯螽与挂墩黯螽前翅长宽比不同，R 脉、Rs 脉位置和 Cu 脉分枝位置不同。主成分分析结果显示 Sc 脉、R 脉、A 脉及 CuA 脉端部的变异程度较高，典型变量分析结果显示，13 种黯螽属昆虫之间的翅脉形态存在明显差异，说明翅脉特征能够作为黯螽属昆虫的分类特征。

五种判别分析结果表明，用翅形态数据进行判别分析能够对 13 种黯螽属昆虫进行分类鉴定，其中，翅室测量值数据集进行判别分析的物种正确鉴定率最高。综合翅脉的典型变量分析与 5 类数据的判别分析的结果表明：斧尾黯螽、卡耐尔黯螽和越北黯螽在所有数据中均能被正确地进行分类；卡氏黯螽、腾冲黯螽、马关黯螽、苍白黯螽、小凹黯螽和渐暗黯螽能被分类和判别正确率较高的；纵裂黯螽、挂墩黯螽、隆线黯螽和平行黯螽被进行分类和判别的正确率较低，其中，纵裂黯螽、挂墩黯螽、隆线黯螽通过翅形

态测量值的判别正确率低,平行黯蠹通过翅形态测量值和翅室宽度进行判别的正确率低。

Song 等 (2016) 对小凹黯蠹和纵裂黯蠹进行了描述,并讨论了这两个物种间的形态差异,认为小凹黯蠹与隆线黯蠹的形态有一定的相似。在主成分分析散点图中,小凹黯蠹、纵裂黯蠹和隆线黯蠹之间部分重叠,说明这 3 个物种的右前翅形态相似;典型变量分析的 CV1 中,小凹黯蠹、纵裂黯蠹和隆线黯蠹之间没有明显差异。基于普氏距离的聚类结果中,当系数为 0.17 时,黯蠹属昆虫分为 3 个分支,聚类的结果与传统分类结果基本一致。

本研究仅选取了中国黯蠹属 13 种具翅昆虫,对右前翅形态特征进行几何形态测量学分析,今后还需要结合其他形态特征(如前胸背板、后翅、生殖器等)和分子数据进行分析,进一步厘清黯蠹属昆虫的分类地位,探讨各类群间的亲缘关系,完善黯蠹属的分类系统。

参考文献 (References)

- Aytekin MA, Terzo M, Rasmon P, Çağatay N, 2007. Landmark based geometric morphometric analysis of wing shape in *Sibiricobombus* Vogt (Hymenoptera: Apidae: *Bombus* Latreille). *Annales de la Société entomologique de France*, 43(1): 95–102.
- 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.]
- Eshghi S, Nabati F, Shafaghi S, Nooraefar V, Darvizeh A, Gorb SN, Rajabi H, 2022. An image based application in Matlab for automated modelling and morphological analysis of insect wings. *Scientific Reports*, 12(1): 1–14.
- Ingrisch S, 2018. New taxa and records of Gryllacrididae (Orthoptera, Stenopelmatoidea) from South East Asia and New Guinea with a key to the Genera. *Zootaxa*, 4510(1): 1–278.
- Ingrisch S, 2019. Review of the genus *Pteranabropsis* (Ensifera: Anostomatidae: Anabropsinae) with description of six new species. *Journal of Orthoptera Research*, 28(2): 107–124.
- Jiang X, Stroinski A, Qin DZ, 2023. Geometric morphometric analysis of forewing in *Pochazia* and *Ricania* (Hemiptera: Ricaniidae). *Acta Entomologica Sinica*, 66(3): 391–398. [蒋昕, Adam Stroinski, 秦道正, 2023. 宽广蜡蝉属及广翅蜡蝉属前翅几何形态学分析. *昆虫学报*, 66(3): 391–398.]
- Kaliontzopoulou A, Carretero MA, Llorente GA, 2007. Multivariate and geometric morphometrics in the analysis of sexual dimorphism variation in *Podarcis* lizards. *Journal of Morphology*, 268(2): 152–165.
- Klingenberg CP, 2011. MorphoJ: An integrated software package for geometric morphometrics. *Molecular Ecology Resources*, 11(2): 353–357.
- Li JJ, Ding ZS, Zhang HY, 2007. The analysis of a few discriminants. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 27(1): 138–142. [李建军, 丁正生, 张海燕, 2007. 常用判别分类方法分析. *西安科技大学学报*, 27(1): 138–142.]
- Li L, Dang HY, Ding SY, Zhan QB, Gao LL, Ma RY, Zhao QG, 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, 赵庆国, 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.]
- Pan PL, Yang HZ, Shen ZR, Gao LW, Zhang JW, Zhao HQ, Yu XW, 2008. Research on applying vein feature for mathematical morphology in classification and identification of butterflies (Lepidoptera: Rhopalocera). *Entomotaxonomia*, 30(2): 151–160. [潘鹏亮, 杨红珍, 沈佐锐, 高灵旺, 张建伟, 赵汗青, 于新文, 2008. 翅脉的数学形态特征在蝴蝶分类鉴定中的应用研究. *昆虫分类学报*, 30(2): 151–160.]
- Rohlf FJ, 1987. NTSYS-pc: Microcomputer programs for numerical taxonomy and multivariate analysis. *The American Statistician*, 41(4): 330.
- Rohlf FJ, 2015. The tps series of software. *Hystrix*, 26(1): 9–12.
- 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): 343–360.
- Sontigun N, Sukontason KL, Zajac BK, Zehner R, Sukontason K, Wannasan A, Amendt J, 2017. Wing morphometrics as a tool in species identification of forensically important blow flies of Thailand. *Parasites Vectors*, 10: 1–14.
- Song Q, Guo HF, Bian X, Shi FM, 2016. Review of the genus *Pteranabropsis* Gorochoy, 1988 (Orthoptera: Anostomatidae:

- Anabropsinae) with description of two new species from China. *Zootaxa*, 4121(4): 473–484.
- Wen GH, Bai Y, Zhou J, Zhang R, Zhang XX, Luo QY, Xu SQ, 2015. Geometric morphometric analysis of wing shape variation in five *Oxya* spp. grasshoppers. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(2): 356–362. [温光华, 白义, 周娟, 张瑞, 张秀秀, 罗倩芸, 许升全, 2015. 基于几何形态测量学的五种稻蝗前后翅的形态变化研究. 应用昆虫学报, 52(2): 356–362.]
- Xu WZ, Dong X, Lin QL, Wu W, Dong J, Yu SF, Yin YQ, Yang F, 2019. Determination of parameters of appearance shape of rice based on mobile phone camera and Imagej software. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 34(10): 109–113. [徐炜桢, 许东, 林亲录, 吴伟, 董界, 俞淑芳, 殷月芹, 阳芳, 2019. 基于手机拍照和 ImageJ 软件的大米外观形状参数的测定. 中国粮油学报, 34(10): 109–113.]
- Zelditch ML, Swiderski DL, Sheets HD, 2004. Geometric Morphometrics for Biologists: A Primer. New York and London: Elsevier Academic Press. 1–437.
- Zhang JJ, Bai Y, Wang GH, 2014. Using geometric morphometric techniques to analyze wing variation of common dragonflies. *Journal of Ningxia University (Natural Science Edition)*, 35(1): 66–70. [张晶晶, 白义, 王贵虎, 2014. 基于几何形态测量学的几种蜻蜓翅的形态分析. 宁夏大学学报: 自然科学版, 35(1): 66–70.]
- Zhang RJ, Zhou SY, Deng WA, 2016. Morphometrics analysis on the hind wing of Tetrigides (Orthoptera) and its application in taxonomy. *Entomotaxonomia*, 38(3): 175–183.
- Zhang XX, Guan DL, Qin KH, Xu SQ, Wang WQ, 2017. Geometric morphometric analyses on the wing-shape variation in five *Apis cerana cerana* populations from Qinling Mountains. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 45(2): 71–74. [张秀秀, 管德龙, 覃凯华, 许升全, 王文强, 2017. 秦岭地区中华蜜蜂 5 个地理种群翅形态差异的几何形态测量学研究. 陕西师范大学学报(自然科学版), 45(2): 71–74.]