**DOI**：10.19789/j.1004-9398.2024.04.001
**文献引用**：王宸越，韩瑛，周振宇，等．刺蛾科昆虫翅脉结构初步分析[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2024，45（4）：3-10. WANG C Y，HAN Y，ZHOU Z Y，et al. A preliminary study of the wings vein structure of slug moths（Lepidoptera：Limacodidae）[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2024，45（4）：3-10.

# 刺蛾科昆虫翅脉结构初步分析*

王宸越[1#]，韩　瑛[1#]，周振宇[1]，吴　俊[2]，李　晶[1**]，张爱兵[1**]
（1. 首都师范大学生命科学学院，北京　100048；2. 东北林业大学林学院，
黑龙江 哈尔滨　150040）

**摘要**：刺蛾科（Limacodidae）隶属于鳞翅目斑蛾总科（Lepidoptera：Zygaenoidea），在世界范围内广泛分布，目前已知种类超过1 700种，是研究鳞翅目昆虫生物多样性的重要类群。昆虫翅脉形态特征研究是探索鳞翅目昆虫多样性的重要手段，本研究对我国部分刺蛾科昆虫翅形态结构进行初步分析，建立了刺蛾科翅脉结构模型和翅脉地标点，并进行普氏分析，依据其距心值对不同物种的翅脉形态进行比较。结果表明：刺蛾科不同物种的前翅形态具有显著差异，体现为代表翅脉M干的6号地标点和代表$R_3$脉、$R_5$脉共柄的10号地标点的距心值在黄刺蛾（*Monema flavescens*）、窄缘绿刺蛾（*Parasa consocia*）和中国扁刺蛾（*Thosea sinensis*）上差异显著（$F$=4.033，$P$<0.05）；后翅形态差异无统计学意义（$P$>0.05）。

**关键词**：刺蛾科；翅脉结构；几何形态学；地标点
**中图分类号**：Q969.2　　**文献标志码**：A

# A preliminary study of the wings vein structure of slug moths（Lepidoptera：Limacodidae）*

WANG Chenyue[1#]，HAN Ying[1#]，ZHOU Zhenyu[1]，WU Jun[2]，LI Jing[1**]，ZHANG Aibing[1**]
（1. College of Life Sciences，Capital Normal University，Beijing　100048；2. College of Forest，
Northeast Forestry University，Harbin Heilongjiang　150040）

**Abstract**：Limacodidae belonging to the superfamily Zygaenoidea of Lepidoptera，is widely distributed throughout the world. With over 1 700 known species，it represents an important group for studying the biodiversity of Lepidoptera. The wing vein morphology is an essential approach to explore the diversity within lepidopteran insects. This study conducted preliminary analyses of the wing morphology of several Limacodidae species. Based on establishing a wing vein structure model and defining wing vein landmarks for procrustes analysis，we compared the wing vein morphologies of different species based on centroid size. The results revealed significant morphological differences in the forewings of different limacodidae species，particularly in landmarks 6（representing the M vein）and 10（indicating the common stalk of $R_3$ and $R_5$ veins）. Notably，significant disparities were detected in *Monema flavescens*，*Parasa consocia*，and *Thosea sinensis* at these landmarks（$F$=4.033，$P$<0.05）. However，no significant differences were observed in the wing morphology of the hind wings（$P$>0.05）.

**Keywords**：Limacodidae；wing vein structure；geometric morphometrics；landmarks
**CLC**：Q969.2　　**DC**：A

收稿日期：2024-02-01
* 国家自然科学基金项目（32170421）；北京市自然科学基金项目（5232001）

# 第一作者
** 通信作者：lij@cnu.edu.cn；zhangab2008@cnu.edu.cn

## 0 引 言

昆虫翅是昆虫飞行的重要器官,其形态结构和形变程度与飞行的空气动力学参数密切相关[1]。昆虫翅具有自我清洁、抗疲劳和降噪消震等特性[2],并且具有强疏水性和抗菌性,其翅上的多级微观粗糙结构,如糖类、表面蛋白质和脂类等天然疏水物质为其强疏水性提供了基础[3-4]。通过对蛱蝶科(Nymphalidae)昆虫翅形态的研究结果表明,鳞翅目(Lepidoptera)昆虫的前翅长度与飞行持久力和速度呈正相关,后翅窄度与飞行持久力呈负相关[5]。昆虫翅脉的结构代表了整体翅的结构,包含交错的横脉和纵脉,不同物种的翅脉复杂程度和差异显著[6]。因此,翅脉作为几何形态学分析中最常用的分析材料之一,拥有特征稳定、蕴含大量生物信息的优势,可以作为物种形态分析和鉴定的重要依据。几何形态学是昆虫翅形态研究的重要方法,通过比较不同物种的翅脉形态特征,可以解决物种间的形态差异、进化关系和生态适应等问题[7]。几何形态学中的测量方法包括轮廓线法和地标点法。轮廓线法用于对物体轮廓上的采样点进行数字化,从而比较数学曲线之间的差异[8]。然而,该方法仅适用于简单物体的边缘,并且由不同计算方法得出的统计结果无法统一,因此应用上仍存在争议[9]。地标点法是一种更为常用和灵活的几何形态学测量方法。该方法在生物结构中选择明显且易于识别的地标点,并通过比较地标点之间的差异来反映不同对象的结构差异[10]。通过地标点法获得的数据可以使用多种统计学方法进行分析,且从几何学和生物学原理的角度更容易解释分析结果。此外,地标点法还能更好地与研究对象的生态环境、行为学和系统发育等相关结果结合分析[11]。

鳞翅目包括蝶(butterflies)和蛾(moths)2类,全球广泛分布,已描述种类约20万种,是昆虫纲第2大目。刺蛾科(Limacodidae)属于鳞翅目斑蛾总科(Lepidoptera:Zygaenoidea),该科昆虫体型相对较小,目前已知1 700余种,分布广泛。虽然大部分鳞翅目幼虫取食植物,会对农业产生一定的负面影响,但同时鳞翅目昆虫也是生态系统重要的传粉者,对于维持生态系统的多样性具有重要意义[12]。

通过几何形态学研究和比较昆虫的形态,可以分析由遗传变异引起的形态差异,推动昆虫学和生物学领域的研究进展,并应用于生态保护等领域[13]。王巾等[14]利用桃蛀螟(*Conogethes punctiferalis*)和松蛀螟(*C.pinicolalis*)的前翅斑点坐标数据进行主成分分析,可以将这2种形态上相似的农林业害虫区分开。不仅如此,通过对蝗虫、蚁蛉和毒蛾等类群的研究也表明几何形态学可以作为物种鉴别的重要方法[15-17]。尽管刺蛾科昆虫在生态和分类学上的重要性已得到广泛认可,但针对刺蛾科几何形态学的研究仍较少,研究不全面、不深入,后续研究仍有巨大的发展空间。本研究对19种刺蛾科昆虫的前、后翅数据定量比较分析,探讨不同物种之间前、后翅翅形态的细微变化。在排除大部分干扰的同时,对刺蛾科翅形态进行有效量化,为刺蛾科昆虫形态鉴定提供新的研究视角。通过对分布广泛、种内存在形态差异的黄刺蛾(*Monema flavescens*)、窄缘绿刺蛾(*Parasa consocia*)和中国扁刺蛾(*Thosea sinensis*)的进一步研究,探讨翅形变化是否可以用于不同物种的鉴别,为后期开展刺蛾科分类鉴定提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集及鉴定

研究样品取自10个采样点,包括北京及其周边地区7个采样点,以及福建省、云南省的3个采样点(表1)。其中海拔最高处为云南省红河黄连山国家级自然保护区丫口保护站采样点(2 637 m),最低处为北京市妙峰山鹫峰采样点(144 m)。

**表1 样本采集地地理信息**

| 所在地 | 采样点 | 代码 | 纬度/(°) | 经度/(°) | 海拔/m |
|---|---|---|---|---|---|
| 北京 | 百花山 | BHS | 39.85 | 115.56 | 733 |
| | 东灵山 | DLS | 39.79 | 115.56 | 1 455 |
| | 喇叭沟门 | LBGM | 40.90 | 115.62 | 475 |
| | 妙峰山鹫峰 | JF | 40.10 | 116.10 | 144 |
| | 妙峰山涧沟 | JG | 40.06 | 116.03 | 797 |
| 河北 | 雾灵山 | WLS | 40.64 | 115.46 | 699 |
| | 云蒙山 | YMS | 35.99 | 116.72 | 1 177 |
| 福建 | 金饶山 | JRS | 26.79 | 116.89 | 921 |
| 云南 | 松山 | SS | 40.51 | 115.80 | 779 |
| | 黄连山 | YNHH | 22.90 | 102.31 | 2 637 |

采用夜间灯诱法采集刺蛾科昆虫样本,采集时间为20:00—次日1:00。为防止成虫样本见光后频繁扇动翅膀导致其翅面花纹破坏或翅膀受损,将收集到的昆虫样本均放入黑色塑料袋中避光,置于-20 ℃冷冻保存,共得到刺蛾科昆虫样本527头,标本存放于首都师范大学生命科学学院遗传进化与多样性

实验室。参照《中国动物志 昆虫纲 第七十六卷 鳞翅目 刺蛾科》[18]进行物种鉴定,疑难标本由刺蛾科昆虫形态鉴定专家进行鉴定,得到个体数>20头的物种共计19种,用于后续研究(表2)。

### 1.2 翅脉标本制作

鳞翅目昆虫的翅膀表面覆盖有鳞片,要将鳞片进行清理制成透明翅脉标本后进行几何形态测量和分析。首先用75%酒精浸润标本的翅基部,从标本上取下前、后翅,随后放入75%酒精中完全湿润,移入10% $HNO_3$溶液中浸泡2~3 min,再移入15% NaClO溶液中浸泡2~3 min,重复3~5次,直至翅面上的鳞片脱净、翅呈无色透明为止。将透明翅移回75%酒精中洗去翅表面的NaClO和$HNO_3$,将表面液体吸干净,放入滤纸中压平,阴干。翅脉标本塑封到护膜卡中进行保存,并注明标本编号。

### 1.3 地标点数据获取

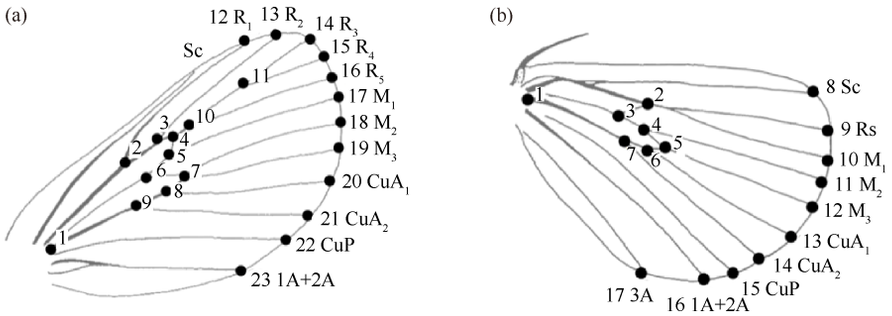
利用tpsUtil软件按物种对标本照片进行分组,tpsDig2软件在标本照片上选取地标点[17],分别在前翅和后翅选取了23和17个地标点(图1),这些地标点均为翅脉纵脉的起点或终点,以及关键的横脉与纵脉的交点,为I型地标点。

### 1.4 普氏分析获取形状坐标与距心值

获得原始坐标之后,对坐标值进行普氏叠加,从而减少由于翅位置、方向和大小等非形状因素对翅形状差异分析的影响。普氏叠加通过居中、旋转和缩放可以使所有样本的地标点达到相对最重合的状态,对应坐标点之间的距离达到最小,从而使非形状因素的影响降到最低[19]。选择距心值,即各地标点到其质心距离平方和的平方根,作为衡量这一变异的主要指标,公式为

**表2 研究所用19种刺蛾名录**

| 属名(拉丁名) | 种名(拉丁名) | 样本数/头 | 形态学特征 |
|---|---|---|---|
| 岐刺蛾属(*Austrapoda*) | 锯纹岐刺蛾(*Austrapoda seres*) | 21 | 雄性前翅长12~13 mm、翅展24~27 mm,头部、胸部和腹部暗褐色掺杂黑色鳞片,腹部末端较黑 |
| 线刺蛾属(*Cania*) | 角齿刺蛾(*Cania robusta*) | 21 | 翅展26~36 mm,头部和胸背浅红褐色,腹部褐黄色 |
| 仿姹刺蛾属(*Chalcoscelides*) | 仿姹刺蛾(*Chalcoscelides castaneipars*) | 21 | 雄性翅长15~16 mm、翅展31~34 mm,雌性对应为21、45 mm,身体黄白色,翅基片带黄褐色,臀毛簇暗褐色 |
| 迷刺蛾属(*Chibiraga*) | 迷刺蛾(*Chibiraga banghaasi*) | 24 | 前翅长9~13 mm,雄性和雌性翅展分别约19和28 mm,头部、胸部和腹部密被淡棕色至棕色鳞片 |
| 佳刺蛾属(*Euphlyctinides*) | 铜翅佳刺蛾(*Euphlyctinides aeneola*) | 28 | 雄性翅长10~12 mm、翅展14~28 mm,雌性对应为14、28 mm,头部棕黄色,触角线状、棕黄色 |
| 汉刺蛾属(*Hampsonella*) | 微白汉刺蛾(*Hampsonella membra*) | 23 | 雄性翅长13~14 mm、翅展26~28 mm,头部、胸部和腹部暗褐色 |
| 獾刺蛾属(*Melinaria*) | 窄边獾刺蛾(*Melinaria campagnei*) | 22 | 雄性翅长16 mm、翅展36 mm,触角深棕色,头部绿色,胸部绿色且中央有1条倒V形棕色中带,腹部红棕色 |
| 黄刺蛾属(*Monema*) | 黄刺蛾(*Monema flavescens*) | 29 | 雄性前翅长14~16 mm、翅展30~35 mm,雌性对应为16~18、35~39 mm,触角线状,头部和胸背黄色 |
| 娜刺蛾属(*Narosoideus*) | 梨娜刺蛾(*Narosoideus flavidorsalis*) | 24 | 雄性前翅长约13 mm、翅展28 mm,雌性对应分别为15、33 mm,雄性触角双栉齿状分枝到末端,全体褐黄色 |
| 新扁刺蛾属(*Neothosea*) | 新扁刺蛾(*Neothosea suigensis*) | 24 | 雄性翅长9~11 mm、翅展20~23 mm,雌性对应分别为12、25 mm,触角双栉状分枝直达顶端,头部和胸背淡棕黄色,腹部棕色 |
| 绿刺蛾属(*Parasa*) | 窄缘绿刺蛾(*Parasa consocia*) | 31 | 雄性和雌性翅长分别为13~30和15~20 mm,翅展20~43 mm,头部和胸背绿色,腹部浅黄色 |
| | 迹斑绿刺蛾(*Parasa pastoralis*) | 21 | 雄性体长15~19 mm、翅展28~37 mm,雌性对应分别为16~18、38~42 mm,头部翠绿色,复眼黑色,触角褐色,胸背翠绿色 |
| | 中国绿刺蛾(*Parasa sinica*) | 27 | 体长9~11 mm、翅展23~26 mm,雄性触角基部双栉状分枝较宽、雌性触角线状,触角和下唇须为暗褐色,头顶和胸背绿色 |
| 奕刺蛾属(*Phlossa*) | 枣奕刺蛾(*Phlossa conjucta*) | 22 | 雄性翅长13 mm、翅展28~32 mm,雌性对应为16、29~33 mm,雄性触角短单栉齿状、雌性线状,全体褐色,头小,复眼灰褐色 |
| 齿刺蛾属(*Rhamnosa*) | 灰齿刺蛾(*Rhamnosa uniformis*) | 23 | 雄性和雌性翅展分别为26~31和28 mm,雄性全体灰褐黄色,胸背竖立毛簇末端红褐色 |
| | 锯齿刺蛾(*Rhamnosa dentifera*) | 21 | 翅展25~32 mm,全体灰褐黄色,胸背竖立毛簇末端暗红褐色 |
| | 敛纹齿刺蛾(*Rhamnosa convergens*) | 22 | 翅展约35 mm,全体灰褐黄色,胸背竖立毛簇末端暗红褐色 |
| 褐刺蛾属(*Setora*) | 桑褐刺蛾(*Setora postornata*) | 24 | 雄性前翅长约16 mm、翅展36 mm,雌性对应为20、41 mm,头部和胸部深棕色,腹部灰棕色 |
| 扁刺蛾属(*Thosea*) | 中国扁刺蛾(*Thosea sinensis*) | 31 | 雄性翅长16 mm、翅展36 mm,雌性对应为18、38 mm,头部和胸背灰棕色,腹部灰褐色、末端颜色暗 |




注:数字为地标点编号;英文字母为翅脉脉序。

**图1 鳞翅目刺蛾科昆虫样本翅脉地标点例**

**(a)前翅;(b)后翅**

$$C=\sqrt{\frac{1}{n}\times\sum\left[\left(x-R_x\right)^2+\left(y-R_y\right)^2\right]},$$

式中:$C$为距心值;$n$为地标点数量;$(x,y)$为地标点坐标;$(R_x,R_y)$为质心坐标。$C$与翅的大小相关,$C$越大,翅面积也越大。通过CoordGen8软件[20]对导入的tps文件进行普氏叠加,并计算$C$。

统计标本翅的面积、长度、宽度、长宽比及长宽乘积与面积比6个维度形态数据,并利用主成分分析(principal component analysis,PCA)法对上述数据进行降维处理。

### 1.5 数据处理与分析

数据以$\bar{x}\pm s$表示。采用R3.4.3软件处理数据(https://www.R-project.org),利用相应的R包"ggplot2"作图;对不同物种的距心值进行单因素方差分析(Anova)。$P<0.05$为差异有统计学意义。

## 2 结果与分析

### 2.1 前翅数据统计分析

测量刺蛾科昆虫翅脉标本,有关前翅形态数据列于表3。所选取的19种刺蛾前翅面积为3.529~10.271 mm$^2$,长度为3.055~5.233 mm,宽度为1.531~2.798 mm。其中,窄边獾刺蛾(*Melinaria campagnei*)的前翅最长,达到了5.233 mm,而敛纹齿刺蛾(*Rhamnosa convergens*)的前翅最宽,达到了2.798 mm。样本在属水平上的前翅形状数据PCA相关结果如图2所示。第1和第2主成分的贡献率分别为65.3%和21.3%,累计贡献率达86.6%,该值>80.0%,表明前2个主成分可以很好地保留原样本信息,即可以解释15属19种刺蛾在翅脉形状上的主要差异,同时表明岐刺蛾属(*Austrapoda*)、佳刺蛾属(*Eu-*

**表3 前翅形态特征数据**

| 种名 | 面积/mm² | 长度/mm | 宽度/mm | 长宽比 | 长宽乘积与面积比 |
|---|---|---|---|---|---|
| 锯纹岐刺蛾 | 4.875±0.836 | 3.550±0.239 | 1.804±0.145 | 0.508±0.019 | 1.314±0.027 |
| 角齿刺蛾 | 8.352±0.740 | 4.639±0.247 | 2.439±0.127 | 0.526±0.025 | 1.355±0.032 |
| 仿姹刺蛾 | 5.634±0.430 | 3.873±0.161 | 1.940±0.081 | 0.501±0.011 | 1.334±0.032 |
| 迷刺蛾 | 8.882±1.056 | 4.718±0.265 | 2.542±0.166 | 0.539±0.020 | 1.350±0.025 |
| 铜翅佳刺蛾 | 3.529±0.675 | 3.055±0.206 | 1.531±0.126 | 0.501±0.017 | 1.325±0.023 |
| 微白汉刺蛾 | 8.027±0.569 | 4.427±0.187 | 2.312±0.097 | 0.522±0.015 | 1.275±0.019 |
| 窄边獾刺蛾 | 9.641±0.297 | 5.233±0.149 | 2.654±0.053 | 0.507±0.017 | 1.441±0.036 |
| 黄刺蛾 | 8.634±0.563 | 4.656±0.172 | 2.468±0.109 | 0.531±0.006 | 1.334±0.028 |
| 梨娜刺蛾 | 6.819±1.024 | 4.236±0.289 | 2.156±0.189 | 0.510±0.035 | 1.345±0.039 |
| 新扁刺蛾 | 4.466±0.898 | 3.542±0.303 | 1.750±0.138 | 0.495±0.024 | 1.392±0.022 |
| 窄缘绿刺蛾 | 10.271±1.789 | 5.163±0.359 | 2.737±0.239 | 0.530±0.016 | 1.387±0.039 |
| 迹斑绿刺蛾 | 6.788±0.615 | 4.105±0.192 | 2.243±0.118 | 0.546±0.021 | 1.356±0.024 |
| 中国绿刺蛾 | 5.646±1.241 | 3.818±0.345 | 1.981±0.243 | 0.518±0.028 | 1.355±0.029 |
| 枣奕刺蛾 | 6.217±0.571 | 3.961±0.144 | 2.111±0.132 | 0.532±0.014 | 1.356±0.001 |
| 灰齿刺蛾 | 8.056±0.648 | 4.772±0.214 | 2.270±0.116 | 0.476±0.018 | 1.344±0.031 |
| 锯齿刺蛾 | 9.589±0.831 | 4.801±0.237 | 2.599±0.145 | 0.541±0.022 | 1.301±0.027 |
| 敛纹齿刺蛾 | 9.852±0.508 | 5.077±0.168 | 2.798±0.098 | 0.551±0.014 | 1.442±0.023 |
| 桑褐刺蛾 | 9.184±0.838 | 5.155±0.269 | 2.554±0.105 | 0.496±0.015 | 1.436±0.021 |
| 中国扁刺蛾 | 8.237±1.044 | 4.713±0.262 | 2.381±0.198 | 0.505±0.022 | 1.367±0.028 |

*phlyctinides*)与其他属存在显著差异;新扁刺蛾属(*Neothosea*)与娜刺蛾属(*Narosoideus*)在前翅形态上虽存在差异,但并无明显分化。

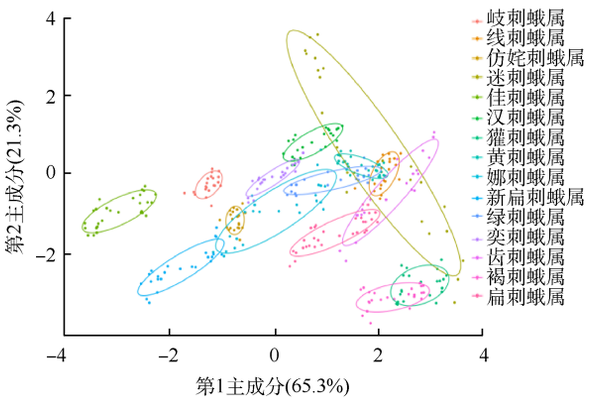



**图 2　前翅翅形态数据主成分分析(PCA)结果**

选择样本数最多的 3 个物种,即黄刺蛾、窄缘绿刺蛾、中国扁刺蛾的前翅形态数据进行普氏分析,并绘制前翅形状模型(图 3)。在不同物种间前翅翅脉的 6 和 10 号地标点位置翅脉交叉结构变异较大。其中 6 号地标点所指的翅脉交点,与翅脉端点所连的中翅干脉为刺蛾科昆虫独特的结构,其变异体现为距端点的远近;10 号地标点所指的交点结构产生的变异是最大的,体现为距 4 号地标点结构在长轴上的距离远近,部分样本中会与 4 号地标点结构重合,经过分析认为 10 和 4 号长轴方向相距越远,翅相对更长,翅的最宽值与最长值的比值越低,翅形态越偏细长;反之则是 10 和 4 号长轴方向相距越近,翅相对更短,翅的最宽值与最长值的比值越高,翅形态越偏短粗。

对各物种前翅坐标点数据进行普氏分析后,获得样本的距心值数据,部分种的普氏分析结果如图 4 所示。黄刺蛾、窄缘绿刺蛾和中国扁刺蛾的统计样本数分别为 29、31 和 31 头,相应距心值的平均值分别为 0.389±0.010、0.380±0.030 和 0.395±0.020,存在显著差异($F$=4.033,$P$<0.05)。说明这 3 种刺蛾物种翅大小具有显著差异,窄缘绿刺蛾翅面积最大为 10.271 mm$^2$,中国扁刺蛾翅面积最小为 8.237 mm$^2$。

## 2.2　后翅数据统计分析

对刺蛾后翅翅脉标本的照片,与前翅作相同处理,相关数据列于表 4。面积上,刺蛾后翅的最小面积为 2.589 mm$^2$,最大达到了 6.925 mm$^2$;长度上,后翅长度为 2.220~3.972 mm,显示了不同的体型特征;宽度上,最窄的刺蛾为 1.464 mm,而最宽为 2.637 mm;后翅的长宽比大致为 0.564~0.715;长宽乘积与面积比为 1.255~1.469。后翅形态测量数据的 PCA 结果如图 5 所示,与前翅研究结果相似,后翅的形态数据能够将刺蛾在属水平上进行有效区分。第 1 与第 2 主成分的贡献率分别为 59.4% 与 32.6%,累计贡献率达 92.0%,能够说明各形态参数之间在后翅上具有明显差异。汉刺蛾属(*Hampsonella*)、娜刺蛾属与其他属在后翅形态存在明显差异($F$=2.747,$P$<0.05);仿姹刺蛾属(*Chalcoscelides*)与迷刺蛾属(*Chibiraga*)

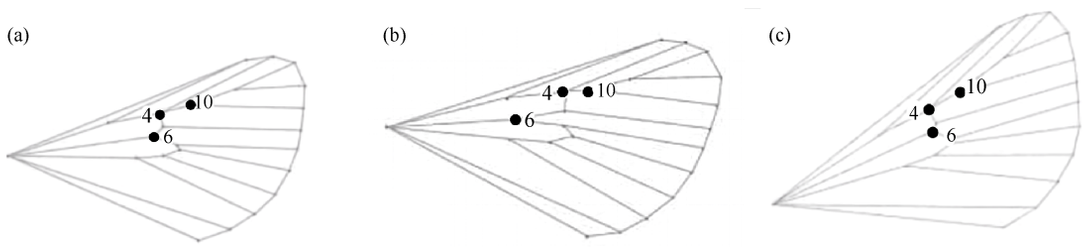



**图 3　前翅翅脉平均形状结构模型**

**(a)黄刺蛾;(b)窄缘绿刺蛾;(c)中国扁刺蛾**

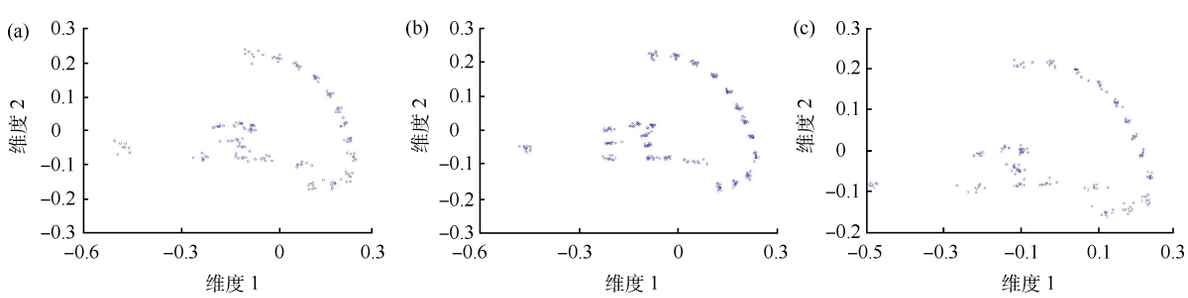



**图 4　前翅普氏分析结果**

**(a)黄刺蛾;(b)窄缘绿刺蛾;(c)中国扁刺蛾**

**表4　后翅形态测量数据**

| 种名 | 面积/mm² | 长度/mm | 宽度/mm | 长宽比 | 长宽乘积与面积比 |
|---|---|---|---|---|---|
| 锯纹岐刺蛾 | 4.709±0.477 | 3.100±0.314 | 1.982±0.386 | 0.639±0.032 | 1.304±0.101 |
| 角齿刺蛾 | 5.627±0.842 | 3.426±0.275 | 2.313±0.223 | 0.675±0.043 | 1.408±0.048 |
| 仿姹刺蛾 | 2.589±0.248 | 2.220±0.276 | 1.464±0.165 | 0.659±0.050 | 1.255±0.097 |
| 迷刺蛾 | 2.983±0.774 | 2.429±0.248 | 1.667±0.187 | 0.686±0.035 | 1.357±0.041 |
| 铜翅佳刺蛾 | 6.925±0.847 | 3.688±0.233 | 2.637±0.203 | 0.715±0.034 | 1.405±0.045 |
| 微白汉刺蛾 | 6.821±0.196 | 3.972±0.118 | 2.239±0.264 | 0.564±0.022 | 1.304±0.082 |
| 窄边獾刺蛾 | 6.354±0.763 | 3.760±0.164 | 2.247±0.178 | 0.597±0.023 | 1.330±0.015 |
| 黄刺蛾 | 4.875±0.578 | 3.279±0.251 | 2.119±0.083 | 0.646±0.039 | 1.425±0.026 |
| 梨娜刺蛾 | 4.780±0.621 | 3.158±0.191 | 2.224±0.179 | 0.704±0.037 | 1.469±0.038 |
| 新扁刺蛾 | 6.179±0.345 | 3.712±0.251 | 2.273±0.231 | 0.612±0.051 | 1.365±0.084 |
| 窄缘绿刺蛾 | 6.785±1.562 | 3.761±0.381 | 2.505±0.266 | 0.666±0.025 | 1.388±0.041 |
| 迹斑绿刺蛾 | 4.919±1.129 | 3.409±0.295 | 2.089±0.208 | 0.613±0.027 | 1.448±0.035 |
| 中国绿刺蛾 | 4.208±0.883 | 2.948±0.218 | 2.017±0.218 | 0.684±0.043 | 1.413±0.042 |
| 枣奕刺蛾 | 6.119±0.033 | 3.593±0.025 | 2.224±0.062 | 0.619±0.021 | 1.306±0.033 |
| 灰齿刺蛾 | 5.552±0.205 | 3.597±0.167 | 2.183±0.180 | 0.607±0.036 | 1.414±0.072 |
| 锯齿刺蛾 | 6.649±0.496 | 3.851±0.164 | 2.377±0.212 | 0.617±0.038 | 1.377±0.053 |
| 敛纹齿刺蛾 | 6.018±0.541 | 3.789±0.201 | 2.197±0.183 | 0.581±0.032 | 1.383±0.049 |
| 桑褐刺蛾 | 5.883±0.590 | 3.633±0.098 | 2.237±0.183 | 0.616±0.054 | 1.382±0.037 |
| 中国扁刺蛾 | 5.519±0.978 | 3.364±0.271 | 2.262±0.154 | 0.672±0.020 | 1.379±0.025 |

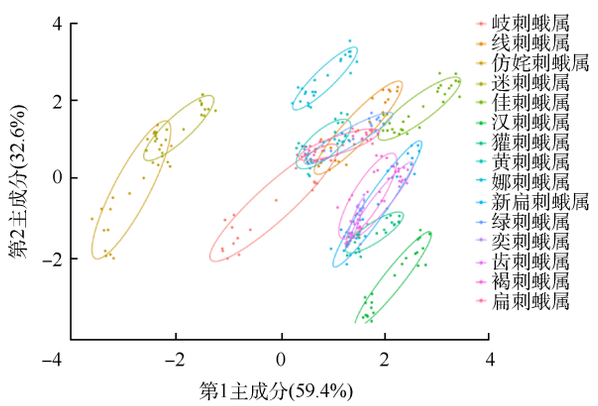



**图5　后翅翅形态数据PCA结果**

在后翅形态上无显著差异($P$>0.05)。

在整体形态上,后翅整体大小相较前翅更小,如在后翅样本中,平均最长值为(3.581±0.271)mm、平均最宽值为(2.314±0.142)mm、平均面积为(6.154±0.389)mm²,前翅的对应值(4.540±0.168)mm、(2.356±0.211)mm、(7.965±0.726)mm²。但后翅拥有更小的平均长宽乘积与面积比,在形态上比前翅要相对更短粗(1.353<1.388)。

绘制每个物种后翅的平均形状,获得可视化的后翅形状模型,部分物种的后翅翅脉平均形状结构模型如图6所示。在不同刺蛾物种间,后翅翅脉仅有3号地标点位置的翅脉交叉结构与图1(b)具有较明显的变异。3号地标点所指的翅脉交点对应着前翅的5号地标点的翅脉结构,其具有刺蛾科昆虫的独特性,同时变异也体现为距端点的远近。分析推测:3号地标点结构距端点较远,其翅相对更大、更长;其余各地标点的变异并不显著。

对各物种刺蛾后翅坐标点数据进行普氏分析,获得距心值数据,部分种的普氏分析结果如图7所示。黄刺蛾、窄缘绿刺蛾和中国扁刺蛾的统计样本数分别为27、21和28头,计算表明上述3个物种的距心值分别为0.322±0.020、0.317±0.010、0.335±0.020,差异无统计学意义($P$>0.05),该结论也与后翅除靠中心的3号以外的地标点结构均无明显变异相互验证。虽然这3个物种刺蛾后翅的大小无显著差异,但从平均距心值分析,不同物种刺蛾后翅从小到大

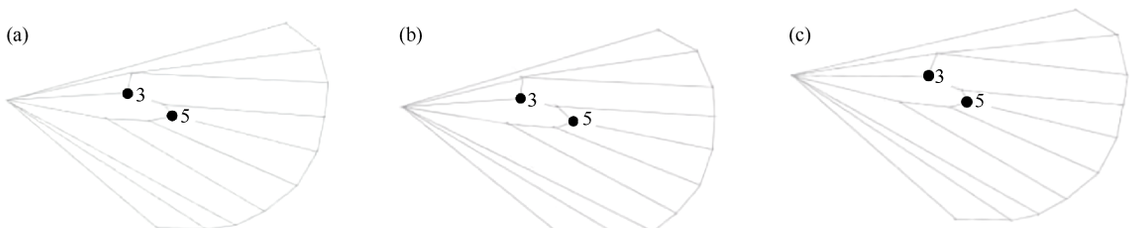



**图6　后翅翅脉平均形状结构模型**

**(a)黄刺蛾;(b)窄缘绿刺蛾;(c)中国扁刺蛾**

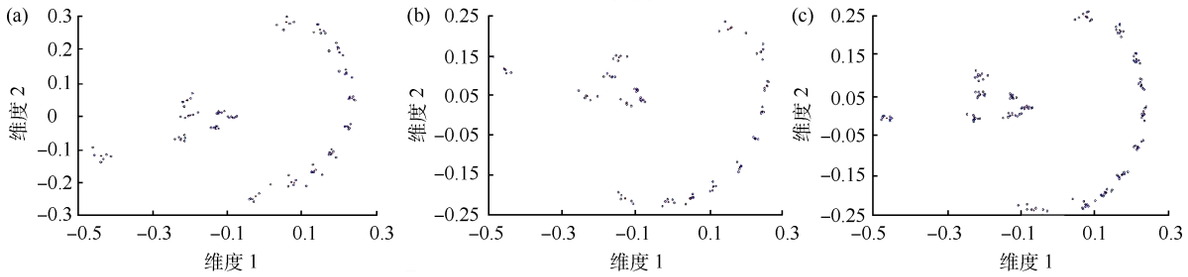



**图7　后翅普氏分析结果**

**(a)黄刺蛾;(b)窄缘绿刺蛾;(c)中国扁刺蛾**

依次是窄缘绿刺蛾、黄刺蛾和中国扁刺蛾,对应分别为0.317、0.322、0.335。该结论与前翅的翅大小分析结果相同,因此这3个物种翅的平均大小关系由高到低为中国扁刺蛾、黄刺蛾、窄缘绿刺蛾。

## 3　讨　论

刺蛾科昆虫前翅位于身体的外侧,覆盖着更多的鳞片,同时厚度、强度、长度、宽度和面积等翅形态数据均大于后翅,为提供飞行动力、保护身体和承受风阻压力提供了重要支持[20];后翅相比于前翅更宽、更圆润,可能有助于其稳定飞行[21]。本文通过PCA方法对前、后翅轮廓分别进行探讨,证实刺蛾翅形态在属水平上具有差异,但仅存在于个别属,大部分属之间的差异并不明显。这种翅形态差异可能是多因素相互作用的结果,如鳞翅目尺蛾科(Geometridae)昆虫的翅长在遗传因素的影响下表现出性别差异,并且在环境适应中分化出前、后翅[22]。闪蝶飞行行为的选择改变其翅形态,以最大限度地提高物种两性间的交流[23]。果蝇(*Drosophila melanogaster*)体内保幼激素水平的降低会加速其变态过程,使前翅过早发育或发育异常[24]。

为进一步区分刺蛾科昆虫翅形态特征,本文利用23个地标点来探索刺蛾科昆虫前翅的形态,表明不同物种之间的形状存在差异,尤其是2个关键地标点的翅脉交点结构变异对整体形态产生了影响。前翅翅脉交点的空间分布变异显著,特别是在6和10号地标点的翅脉交点结构上,而后翅形态的变异则不显著。通过对样本数量较多的3个物种进行距心值分析,显示翅脉在横向方向也有所变化,前翅的翅脉复杂度高于后翅。虽然这3个物种在体色上存在差别,但其体型差异并不明显。此结果与传统形态学鉴定结果一致,证明了几何形态学方法在刺蛾分类中应用的可行性,可以为刺蛾科昆虫与其他昆虫在翅形可塑性、不对称性(波动和方向不对称性)、定量遗传和系统发育信号分析等方面提供几何形态学数据[25]。

几何形态测量学在昆虫学领域的应用尚处于起步阶段[26]。本研究通过对刺蛾科昆虫翅脉的几何形态测量学分析,表明该方法在比较昆虫翅脉差异中的可行性。几何形态测量学主要以二维数据为主[27],对于研究平面结构的翅而言,二维图像较易获取,并可用于不同种类的分类鉴定。尽管三维数据分析较为复杂,但随着计算机处理能力的提升和昆虫研究的扩展,三维数据在昆虫分类鉴定方面的应用前景可期[28]。几何形态测量学还可应用于非对称结构[29]和内部解剖等的研究,具有广阔的应用前景。通过与分子生物学方法相结合,几何形态学可揭示种间的亲缘关系和系统发育关系。

## 4　结束语

本研究探讨了几何形态测量学在刺蛾科昆虫翅脉结构研究中的价值,并证实不同刺蛾科物种间翅形态结构的显著差异。前翅地标点的变异性显著,其距心值的显著差异准确反映了翅大小的变异。尽管在后翅上仅1处地标点变异显著,但其距心值仍可与前翅结果相互印证,为比较刺蛾科昆虫形态结构差异提供了有力支持。综上所述,几何形态测量学为昆虫分类学、物种鉴定和系统发育研究提供了有力支持,但在使用该方法时需注意前、后翅的差异性和个体发育的影响,并尽可能综合考虑其他因素,以获得更可靠的研究结果。未来研究可以进一步探讨刺蛾科昆虫翅形态结构差异的成因机制,包括遗传、生态和进化等多个层面的影响因素。同时,应充分利用现代生物技术和数据分析方法,提升研究的深度和广度,为揭示刺蛾科昆虫翅脉的生态适应性和进化历程提供更为精确的科学依据。

**志谢**　感谢遗传与进化课题组中吕擎、姚梦欣和段琛媛在样本采集和实验设计中的帮助;感谢李沁颐在部分样本的翅脉形态数据分析中的帮助。

## 参 考 文 献


[1] SHANG J K, COMBES S A, FINIO B M, et al. Artificial insect wings of diverse morphology for flapping-wing micro air vehicles[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2009, 4(3): 036002.

[2] REN L Q, LI X J. Functional characteristics of dragonfly wings and its bionic investigation progress[J]. Science China (Technological Sciences), 2013, 56(4): 884-897.

[3] BERWAERTS K, MATTHYSEN E, VAN DYCK H. Take-off flight performance in the butterfly *Pararge aegeria* relative to sex and morphology: a quantitative genetic assessment[J]. Evolution, 2008, 62(10): 2525-2533.

[4] BELLO E, CHEN Y, ALLEYNE M. Staying dry and clean: an insect's guide to hydrophobicity[J]. Insects, 2023, 14(1): 42.

[5] 王誉茜. 基于昆虫翅表面微观结构的仿生材料制备及其抑菌性研究[D]. 长春: 长春师范大学, 2018.

[6] STARK J, BONACUM J, REMSEN J, et al. The evolution and development of dipteran wing veins: a systematic approach[J]. Annual Review of Entomology, 1999, 44(1): 97-129.

[7] LORENZ C, ALMEIDA F, ALMEIDA-LOPES F, et al. Geometric morphometrics in mosquitoes: what has been measured?[J]. Infection, Genetics and Evolution, 2017, 54: 205-215.

[8] 陈炳权, 刘宏立, 孟凡斌. 数字图像处理技术的现状及其发展方向[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2009, 30(1): 63-70.

[9] ADAMS D C, ROHLF F J, SLICE D E. Geometric morphometrics: ten years of progress following the 'revolution'[J]. Italian Journal of Zoology, 2004, 71(1): 5-16.

[10] WEBSTER M, SHEETS H D. A practical introduction to landmark-based geometric morphometrics[J]. The Paleontological Society Papers, 2010, 16: 163-188.

[11] 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]. 昆虫知识, 2007, 44(1): 143-147.

[12] LUCK R F. Evaluation of natural enemies for biological control: a behavioral approach[J]. Trends in Ecology & Evolution, 1990, 5(6): 196-199.

[13] HOLLIDAY J A, AITKEN S N, COOKE J E K, et al. Advances in ecological genomics in forest trees and applications to genetic resources conservation and breeding[J]. Molecular Ecology, 2017, 26(3): 706-717.

[14] 王巾, 曾雪刚, 李卫春. 桃蛀螟和松蛀螟的外部形态学和几何形态度量学研究[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(4): 792-796.

[15] 邓维安, 姚大亨, 谷博. 蚱类昆虫前胸背板几何形态测量学分析[J]. 河池学院学报, 2019, 39(2): 1-7.

[16] 詹庆斌. 中国蚊蛉科翅几何形态学研究及其四属的分类修订[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.

[17] ROHLF F J, MARCUS L F. A revolution morphometrics[J]. Trends in Ecology & Evolution, 1993, 8(4): 129-132.

[18] 武春生, 方承莱. 中国动物志 昆虫纲 第七十六卷 鳞翅目 刺蛾科[M]. 北京: 科学出版社, 2023.

[19] GOODALl C. Procrustes methods in the statistical analysis of shape[J]. Journal of the Royal Statistical Society (Series B (Methodological)), 1991, 53(2): 285-321.

[20] LE R C, DEBAT V, LLAURENS V. Adaptive evolution of butterfly wing shape: from morphology to behaviour[J]. Biological Reviews, 2019, 94(4): 1261-1281.

[21] NORBERG L U M. Structure, form, and function of flight in engineering and the living world[J]. Journal of Morphology, 2002, 252(1): 52-81.

[22] NIITSU S, KAMITO T. Morphological and histological examination of short-wing formation in the winter moth *Protalcis concinnata* (Insecta: Lepidoptera, Geometridae)[J]. Journal of Morphology, 2021, 282(1): 160-168.

[23] DEVRIES P J, PENZ C M, HILL R I. Vertical distribution, flight behaviour and evolution of wing morphology in Morpho butterflies[J]. Journal of Animal Ecology, 2010, 79(5): 1077-1085.

[24] RIDDIFORD L M, TRUMAN J W, MIRTH C K, et al. A role for juvenile hormone in the prepupal development of *Drosophila melanogaster*[J]. Development, 2010, 137(7): 1117-1126.

[25] ANAND P P, SEENA S, PETER J, et al. Detection of geographical specific plasticity and the effect of natural selection pressure on the wing size and shape of *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae)[J]. Biologia, 2022, 77(5): 1347-1371.

[26] 蔡小娜, 黄大庄, 沈佐锐, 等. 利用翅的数学形态特征对蛾类昆虫进行分类鉴定的系统研究I: 在总科级阶元上的应用[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(4): 96-104.

[27] SANTILLÁN-GUAYASAMÍN S, VILLACÍS A G, GRIJALVA M J, et al. The modern morphometric approach to identify eggs of Triatominae[J]. Parasites & Vectors, 2017, 10: 1-10.

[28] ULLAH N, KHAN J A, ALHARBI L A, et al. An efficient approach for crops pests recognition and classification based on novel DeepPestNet deep learning model[J]. IEEE Access, 2022, 10: 73019-73032.

[29] BENÍTEZ H A, LEMIC D, VILLALOBOS-LEIVA A, et al. Breaking symmetry: fluctuating asymmetry and geometric morphometrics as tools for evaluating developmental instability under diverse agroecosystems[J]. Symmetry, 2020, 12(11): 1789.


(责任编辑: 王 媛)