



黄海燕, 陈媛, 周善义. 蚁属 (膜翅目: 蚁科) 4 种的形态测量学分析 [J]. 环境昆虫学报, 2017, 39 (1): 226–231.

## 蚁属 (膜翅目: 蚁科) 4 种的形态测量学分析

黄海燕, 陈媛, 周善义\*

(广西珍稀濒危动植物生态学重点实验室, 广西师范大学生命科学院, 桂林 541004)

**摘要:** 运用形态测量学分析方法, 对蚁属 *Formica* 中的光亮黑蚁 *F. candida*、亮腹黑褐蚁 *F. gagatoides*、北京凹头蚁 *F. beijingsensis* 和满洲蚁 *F. manchu* 4 种共 296 头蚂蚁标本进行研究。选取头长 (HL)、头宽 (HW)、复眼最大直径 (ED)、触角柄节长 (SL)、并腹胸长 (AL)、前胸背板宽 (PW)、并胸腹节宽 (DPW) 和体长 (TL) 8 个度量数据为变量进行相关性、配对 T 检验、均值  $\pm$  SD 与主成分散点分布图分析, 探讨形态测量学方法在蚁科昆虫分类中的应用。结果表明: 形态测量学方法能够将 4 种蚂蚁进行有效识别区分, 可作为形态分类学研究的一种有效、快速的辅助方法。

**关键词:** 膜翅目; 蚁科; 蚁属; 形态测量学; 配对 T 检验; 主成分分析

中图分类号: Q964; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2017) 01-0226-06

### Morphometric analysis on four species of *Formica* (Hymenoptera: Formicidae)

HUANG Hai-Yan, CHEN Yuan, ZHOU Shan-Yi\* (Guangxi Key Laboratory of Rare and Endangered Animal Ecology, College of Life Sciences, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Using morphometric method to measure eight morphological characteristics (i. e. head length (HL), head width (HW), eye maximum diameter (ED), scape length (SL), alitrunk length (AL), pronotal width (PW), dorsal propodeal width (DPW), and total length (TL)), of four species of the genus *Formica* (*F. candida*, *F. gagatoides*, *F. beijingsensis*, and *F. manchu*). Correlation, paired T test, mean value  $\pm$  SD, skewness and kurtosis, and principal component were analyzed. The results showed that morphometric analysis method can distinguish the four species from one to another, and offer an effective and fast method for morphological taxonomy.

**Key words:** Hymenoptera; Formicidae; *Formica*; morphometric; paired T test; principal component analysis

蚁属 *Formica* 是膜翅目 Hymenoptera 蚁科 Formicidae 中较大的一个属, 全世界共记载 169 种 21 亚种 (Bolton, 2015), 我国已记载 44 种 1 亚种 (冉浩等, 2011)。由于蚁属中各种间形态极其相似, 区分困难, 探索一种有效、快速的辅助方法十分重要。

形态测量学方法在昆虫分类学和系统发育研究中得到了广泛的应用。Güler 等 (2006) 使用形态测量法对黄斑蜂族 Anthidiini 6 种 92 个个体进行系统发育研究, 结合非加权组平均法 (UPGMA) 方法探讨不同种属间的亲缘性, 据此提出了一些与传统分类学不同的见解, 支持黄斑蜂族起源于

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31372248); 科技基础性工作专项重点项目 (2015FY210300)

作者简介: 黄海燕, 女, 1990 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为野生动植物保护与利用, E-mail: 1249934976@qq.com

\* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: syzhou@mailbox.gxnu.edu.cn

收稿日期 Received: 2016-01-20; 接受日期 Accepted: 2016-04-21

单系群的结果。赵汗青等 (2002) 开发了昆虫自动识别与鉴定软件, 促进了形态测量学方法在我国昆虫分类学和系统发育研究中的应用。潘鹏亮等 (2008a, 2008b) 结合 ABIS、DAISY 和 SPIDA 等国外软件对昼鸣蝉、蝴蝶等昆虫进行分类鉴定, 证明形态测量学方法在昆虫分类中具有重要的应用价值。冯艳艳 (2013) 运用形态测量学方法对长翅目 Mecoptera 螞蛉科 Panorpidae 中 3 个近似种的翅进行典型变量分析、主成分分析和多元方差分析, 比较其差异, 成功地将 3 种分开。张晶晶等 (2014) 运用几何形态测量学方法对几种蜻蜓的翅进行研究, 通过主成分分析与聚类分析, 发现对 4 种蜻蜓的科属划分结果与传统分类学上的划分结果一致。黄年君 (2014) 将形态测量学应用于直翅目 Orthoptera 斑腿蝗科 Catantopidae 蹦蝗属 *Sinopodisma* 雄性运动器官的研究, 结果表明蹦蝗属前翅具有较高的分类价值。温光华等 (2015) 以几何形态测量学方法研究了 5 种雄性稻蝗的翅, 结合主成分分析和薄片样条分析分别探讨稻蝗翅的形态差异, 结果表明翅的形态可以作为稻蝗的分类依据, 并且翅的形态变化能反映出物种的系统发育关系。目前, 尚未见将形态测量学方法应用于蚁科昆虫分类的报道。

蚁属中的光亮黑蚁 *F. candida* 和亮腹黑褐蚁 *F. gagatoides*、北京凹头蚁 *F. beijingensis* 和满洲蚁 *F. Manchu* 外形都极为相似, 仅以体表光亮程度和毛被多少进行区分, 鉴定十分困难, 即使是经验丰富的分类学家有时也难以把握。因此, 探索一种有效而快速的辅助方法很有必要。在蚂蚁形态分类实践中通常需要对蚂蚁的头长、头宽、复眼最大直径、触角柄节长、并腹胸长、前胸背板宽、并胸腹节宽和体长 8 个基本结构进行测量 (Hölldobler, 1990)。本研究以光亮黑蚁、亮腹黑褐蚁、北京凹头蚁和满洲蚁为研究对象, 尝试运用上述 8 个基本结构的测量数据进行形态测量学研究, 探索该方法在蚂蚁分类中的应用, 旨在为蚂蚁分类提供一种辅助方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 标本来源

本文所用的研究标本来自广西师范大学生命科学学院昆虫标本室, 共 4 种 296 头, 标本从野外采集带回实验室整理, 制成针插标本, 经形态鉴定后保存于广西师范大学生命科学学院昆虫标本室。具体信息见表 1。

表 1 蚂蚁标本的采样地、采集时间及样本大小

Table 1 The locality, collecting date and sample size of the ant specimens

| 种名<br>Species                   | 采集样地<br>Locality | 采集时间 (yy - mm)<br>Collecting date | 样本大小<br>Sample size | 采集人<br>Collectors |
|---------------------------------|------------------|-----------------------------------|---------------------|-------------------|
| 北京凹头蚁<br><i>F. beijingensis</i> | 河北小五台            | 2010 - 07                         | 8                   | 陈媛                |
|                                 | 黑龙江              | 2010 - 07                         | 30                  | 陈媛                |
| 光亮黑蚁<br><i>F. candida</i>       | 河北小五台            | 2009 - 06                         | 15                  | 周善义               |
|                                 | 宁夏六盘山            | 2008 - 07                         | 45                  | 周善义, 林嫦           |
|                                 | 青海祁连山            | 2006 - 07                         | 24                  | 谭钊                |
|                                 | 宁夏六盘山            | 2009 - 07                         | 71                  | 周善义, 林嫦           |
| 亮腹黑褐蚁<br><i>F. gagatoides</i>   | 河北小五台            | 2009 - 06                         | 45                  | 周善义               |
|                                 | 陕西火地塘            | 2006 - 06                         | 15                  | 谭钊                |
|                                 | 新疆南山             | 2006 - 07                         | 9                   | 谭钊                |
| 满洲蚁 <i>F. manchu</i>            | 内蒙古贺兰山           | 2010 - 07                         | 34                  | 陈媛                |

### 1.2 测量方法

#### 1.2.1 标本的整姿

将标本从酒精中取出, 置于滤纸上稍晾干;

根据标本个体大小, 用厚白纸剪成小三角形, 用 3 号或 4 号昆虫针插上三角形厚纸片, 在厚纸片的尖端粘上乳胶, 粘在蚂蚁的中、后足之间, 背面

朝上,头向前,右侧向着昆虫针。粘好后整姿,将各足斜向下方,不让足遮挡观察的部位。

### 1.2.2 标本测量

使用 Nikon SMZ645 型连续变倍体视显微镜,在目镜里安装目镜测微尺,对研究标本的头长 (Head length, HL)、头宽 (Head width, HW)、复眼最大直径 (Eye maximum, ED)、柄节长 (Scape length, SL)、并腹胸长 (Alitrunk length, AL)、前胸背板宽 (Pronotum width, PW)、并胸腹节宽 (Dorsum of propodeum width, DPW) 和体长 (Total length, TL) 进行观察、测量与记录。测量时旋转目镜使测微尺呈水平位置,移动标本,使测量部

位与测微尺在同一水平面。

### 1.3 形态特征值统计分析

运用 Excel 和 SPSS 17.0 软件对研究标本的 8 个基本形态特征值进行均值  $\pm$  SD、相关性、配对 T 检验、第 1 和第 2 主成分散点分布图分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 形态特征值平均数与标准误差分析

分别对 4 种蚂蚁的形态特征值均值  $\pm$  SD 进行分析,发现蚂蚁各部位的数据存在不同程度的差异性 (表 2)。

表 2 形态特征值的均值  $\pm$  SD

Table 2 The mean value  $\pm$  SD among morphological characteristic values

|             | 满洲蚁<br><i>F. manchu</i> | 北京凹头蚁<br><i>F. beijingsensis</i> | 光亮黑蚁<br><i>F. candida</i> | 亮腹黑褐蚁<br><i>F. gagatooides</i> |
|-------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 头长 (HL)     | 1.389 $\pm$ 0.091       | 0.256 $\pm$ 0.021                | 1.115 $\pm$ 0.326         | 1.269 $\pm$ 0.192              |
| 头宽 (HW)     | 1.265 $\pm$ 0.076       | 0.226 $\pm$ 0.036                | 1.111 $\pm$ 0.176         | 1.132 $\pm$ 0.173              |
| 复眼最大直径 (ED) | 0.359 $\pm$ 0.028       | 0.072 $\pm$ 0.014                | 0.468 $\pm$ 0.250         | 0.409 $\pm$ 0.063              |
| 柄节长 (SL)    | 1.358 $\pm$ 0.111       | 0.247 $\pm$ 0.024                | 1.291 $\pm$ 0.210         | 1.345 $\pm$ 0.268              |
| 并腹胸长 (AL)   | 1.870 $\pm$ 0.108       | 0.403 $\pm$ 0.242                | 1.763 $\pm$ 0.259         | 1.845 $\pm$ 0.300              |
| 前胸背板宽 (PW)  | 0.804 $\pm$ 0.044       | 0.155 $\pm$ 0.020                | 0.735 $\pm$ 0.241         | 0.831 $\pm$ 0.126              |
| 并胸腹节宽 (DPW) | 0.484 $\pm$ 0.032       | 0.097 $\pm$ 0.015                | 0.523 $\pm$ 0.101         | 0.536 $\pm$ 0.094              |
| 体长 (TL)     | 5.49 $\pm$ 0.288        | 5.516 $\pm$ 0.423                | 4.941 $\pm$ 0.892         | 5.238 $\pm$ 0.810              |

表 2 显示,4 种蚂蚁中除了北京凹头蚁外,其余 3 种的各个形态特征值均值相差不大。标准差大小是衡量个体各部位离散程度的标准之一,表 2 中蚂蚁各部分构造的离散程度、差异大小各不相同,由此可以区分 4 种蚂蚁。

### 2.2 相关性分析

分别对 4 种蚂蚁的形态特征值进行相关性分析,各特征值之间的相关关系见表 3 和表 4。

表 3 显示,北京凹头蚁的前胸背板宽 (PW) 与并胸腹节宽 (DPW) 的相关性最大,系数为 0.852,并且在 0.01 水平上显著相关;并腹胸长 (AL) 与其他特征值的相关关系不明显;光亮黑蚁的头宽 (HW) 与柄节长 (SL) 相关性最大,系数为 0.882,并且在 0.01 水平上显著相关。

从表 4 的结果看,满洲蚁的头宽 (HW) 与前

胸背板宽 (PW) 的相关性系数最大,为 0.627,并且在 0.01 水平上显著相关;头宽 (HW) 与复眼最大直径 (ED) 和并胸腹节宽 (DPW) 的相关关系不显著;亮腹黑褐蚁的并腹胸长 (AL) 与体长 (TL) 的相关性最大,系数是 0.932,在 0.01 水平上显著相关,并且各个特征值之间的相关系数都在 0.01 水平上显著相关。

综合分析表 3、表 4,光亮黑蚁、亮腹黑褐蚁、北京凹头蚁和满洲蚁各特征值之间的相关系数、相关部分、显著性水平均不相同,故可以对它们进行分类识别。

### 2.3 形态特征值配对 T 检验

分别对 4 种蚂蚁两两之间的形态特征值进行配对 T 检验,发现两种蚂蚁之间的配对 T 检验值之间存在不同的联系 (表 5)。

表 3 北京凹头蚁、光亮黑蚁 8 个形态特征值的相关性

Table 3 The correlation coefficient among 8 morphological characteristic values of *Formica beijingensis* and *Formica candida*

|             | 头长<br>(HL) | 头宽<br>(HW) | 复眼最大<br>直径 (ED) | 柄节长<br>(SL) | 并腹胸长<br>(AL) | 前胸背板<br>宽 (PW) | 并胸腹节<br>宽 (DPW) | 体长<br>(TL) |
|-------------|------------|------------|-----------------|-------------|--------------|----------------|-----------------|------------|
| 头长 (HL)     | -          | 0.311**    | -0.693**        | 0.430**     | 0.525**      | 0.044          | 0.552**         | 0.497**    |
| 头宽 (HW)     | 0.460**    | -          | 0.414**         | 0.882**     | 0.823**      | 0.394**        | 0.784**         | 0.837**    |
| 复眼最大直径 (ED) | 0.552**    | 0.606**    | -               | 0.273*      | 0.117        | 0.181          | 0.062           | 0.166      |
| 柄节长 (SL)    | 0.637**    | 0.594**    | 0.734**         | -           | 0.848**      | 0.322**        | 0.790**         | 0.835**    |
| 并腹胸长 (AL)   | -0.131     | -0.026     | -0.014          | -0.005      | -            | 0.304**        | 0.782**         | 0.879**    |
| 前胸背板宽 (PW)  | 0.469**    | 0.679**    | 0.761**         | 0.741**     | -0.003       | -              | 0.350**         | 0.381**    |
| 并胸腹节宽 (DPW) | 0.356**    | 0.631**    | 0.600**         | 0.644**     | -0.093       | 0.852**        | -               | 0.787**    |
| 体长 (TL)     | 0.666**    | -0.526**   | -0.676**        | -0.595**    | 0.312        | -0.645**       | -0.483**        | -          |

注: \*\* 在 0.01 水平上显著相关, \* 在 0.05 水平上显著相关 (左下角是北京凹头蚁、右上角是光亮黑蚁)。Note: \*\* At the 0.01 level significant correlation, \* At the 0.05 level significant correlation (the lower left corner is *F. beijingensis* and the top right corner is *F. candida*).

表 4 满洲蚁、亮腹黑褐蚁 8 个形态特征值的相关性

Table 4 The correlation coefficient among 8 morphological characteristic values of *Formica manchu* and *Formica gagatoides*

|             | 头长<br>(HL) | 头宽<br>(HW) | 复眼最大<br>直径 (ED) | 柄节长<br>(SL) | 并腹胸长<br>(AL) | 前胸背板<br>宽 (PW) | 并胸腹节<br>宽 (DPW) | 体长<br>(TL) |
|-------------|------------|------------|-----------------|-------------|--------------|----------------|-----------------|------------|
| 头长 (HL)     | -          | 0.844**    | 0.854**         | 0.808**     | 0.859**      | 0.826**        | 0.819**         | 0.876**    |
| 头宽 (HW)     | 0.545**    | -          | 0.805**         | 0.739**     | 0.886**      | 0.907**        | 0.902**         | 0.903**    |
| 复眼最大直径 (ED) | 0.329      | 0.108      | -               | 0.747**     | 0.798**      | 0.783**        | 0.777**         | 0.812**    |
| 柄节长 (SL)    | 0.341*     | 0.449**    | 0.472**         | -           | 0.744**      | 0.743**        | 0.714**         | 0.722**    |
| 并腹胸长 (AL)   | 0.438**    | 0.381*     | 0.371*          | 0.327       | -            | 0.867**        | 0.844**         | 0.932**    |
| 前胸背板宽 (PW)  | 0.455**    | 0.627**    | 0.205           | 0.396*      | 0.407*       | -              | 0.915**         | 0.883**    |
| 并胸腹节宽 (DPW) | 0.378*     | 0.339      | 0.274           | 0.154       | 0.356*       | 0.394*         | -               | 0.867**    |
| 体长 (TL)     | 0.563**    | 0.494**    | 0.118           | -0.009      | 0.447**      | 0.240          | 0.459**         | -          |

注: \*\* 在 0.01 水平上显著相关, \* 在 0.05 水平上显著相关 (左下角是满洲蚁、右上角是亮腹黑褐蚁)。Note: \*\* At the 0.01 level significant correlation, \* At the 0.05 level significant correlation (the lower left corner is *F. manchu* and the top right corner is *F. gagatoides*).

表 5 形态特征值的配对 T 检验

Table 5 The paired T test among morphological characteristic values

|   | 头长<br>(HL) | 头宽<br>(HW) | 复眼最大<br>直径 (ED) | 柄节长<br>(SL) | 并腹胸长<br>(AL) | 前胸背板<br>宽 (PW) | 并胸腹节<br>宽 (DPW) | 体长<br>(TL) |
|---|------------|------------|-----------------|-------------|--------------|----------------|-----------------|------------|
| 光亮黑蚁: 亮腹黑褐蚁<br><i>F. candida</i> : <i>F. gagatoides</i>   | -4.919     | -1.103     | 1.592           | -3.438**    | -2.418*      | -3.137**       | -1.296          | -2.322*    |
| 光亮黑蚁: 北京凹头蚁<br><i>F. candida</i> : <i>F. beijingensis</i> | 43.117     | 38.287     | 48.553          | 53.391      | 27.947       | 10.402         | 32.151          | -2.745**   |

续上表

|  | 头长<br>(HL) | 头宽<br>(HW) | 复眼最大<br>直径 (ED) | 柄节长<br>(SL) | 并腹胸长<br>(AL) | 前胸背板<br>宽 (PW) | 并胸腹节<br>宽 (DPW) | 体长<br>(TL) |
|--|------------|------------|-----------------|-------------|--------------|----------------|-----------------|------------|
| 北京凹头蚁: 亮腹黑褐蚁<br><i>F. beijingensis</i> : <i>F. gagatooides</i> | 56.179     | 58.851     | 50.459          | 51.658      | 28.371       | 46.761         | 42.296          | -0.762     |
| 满洲蚁: 亮腹黑褐蚁<br><i>F. manchu</i> : <i>F. gagatooides</i>         | -1.386     | -3.562**   | 7.751           | 3.722**     | 1.522        | 2.863**        | 5.809           | -0.489     |
| 满洲蚁: 光亮黑蚁<br><i>F. manchu</i> : <i>F. candida</i>              | -2.869**   | -3.601**   | 4.982           | -0.362      | -0.498       | -2.513*        | 4.614           | -2.457*    |
| 北京凹头蚁: 满洲蚁<br><i>F. beijingensis</i> : <i>F. manchu</i>        | -70.911    | -63.427    | -53.744         | -55.398     | -80.924      | -78.211        | -69.006         | -0.494     |

注: \*\* 在 0.01 水平上显著相关, \* 在 0.05 水平上显著相关。Note: \*\* At the 0.01 level significant correlation, \* At the 0.05 level significant correlation.

表 5 的数据显示,除了北京凹头蚁:亮腹黑褐蚁和北京凹头蚁:满洲蚁的特征值配对 T 检验不存在显著性关系外,其它 4 组都有在 0.01 水平上或在 0.05 水平上显著相关的部位,据此可以将不同

的蚂蚁进行形态识别。

## 2.5 主成分散点分布图

图 1 是北京凹头蚁、光亮黑蚁、亮腹黑褐蚁和满洲蚁第 1、第 2 主成分的散点分布图。

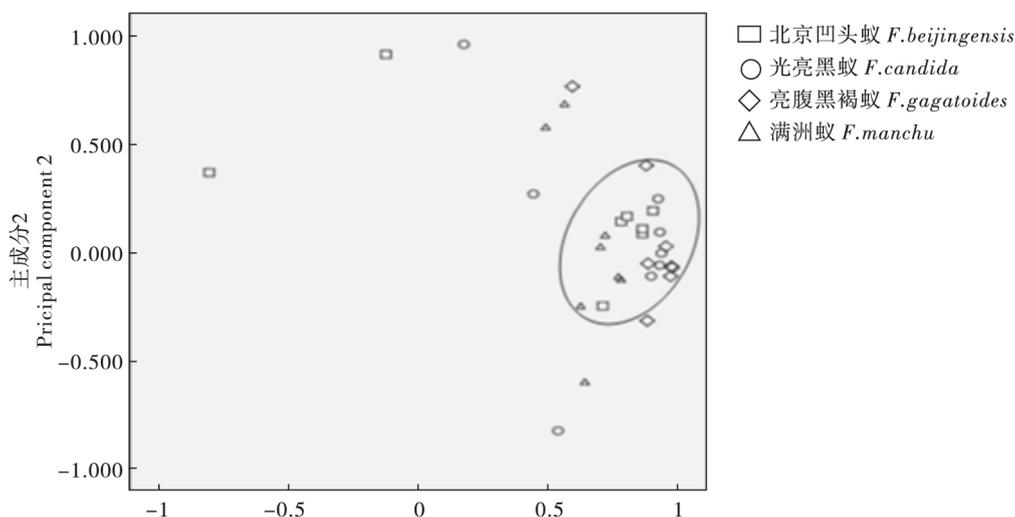


图 1 蚁属 4 个种第 1、第 2 主成分散点分布图

Fig. 1 Plots of principal component factors 1 and 2

用 4 种蚂蚁的第一主成分对第二主成分制作散点分布图并分析。结果表明,4 种蚂蚁的绝大部分散点聚集在椭圆中,少量散点落在椭圆外,而且他们所在的区域范围不一样,可以根据落在椭圆外的散点对北京凹头蚁、光亮黑蚁、亮腹黑褐蚁和满洲蚁进行区分。

## 3 结论与讨论

本研究运用形态测量学方法对北京凹头蚁、光亮黑蚁、亮腹黑褐蚁和满洲蚁进行精确测量,对测量数据进行统计分析。结果表明,在平均数与标准差分析,特征值均值相差不大,但是标准差显示出较大的差异性,蚂蚁各部分的离散程度、

差异大小各不相同, 据此可以进行鉴定识别。相关性分析中, 北京凹头蚁的前胸背板宽 (PW) 与并腹胸宽 (DPW) 相关性最大, 光亮黑蚁相关最大的是头长 (HL) 和头宽 (HW), 满洲蚁的头宽 (HW) 与前性背板宽 (PW) 相关系数最大, 亮腹黑褐蚁的并腹胸长 (AL) 与体长 (TL) 相关系数最大。根据相关系数值与相关部位的不同可以将 4 种蚂蚁区分开来。对 4 种蚂蚁两两之间的形态特征值进行配对 T 检验, 结果显示不同蚂蚁特征值的配对 T 检验值存在不同的显著性关系, 据此可以将不同的蚂蚁进行识别。主成分散点分布图分析显示, 根据散落在椭圆外的点以及所在区域范围的差异性, 可以将北京凹头蚁、光亮黑蚁、亮腹黑褐蚁和满洲蚁进行区分。

与传统分类方法相比, 形态测量学方法能够对昆虫机体的细微结构进行量化分析, 可提供更加完整的形态变异信息 (Lawing *et al.*, 2010)。本文对研究对象的 8 个部位进行测量, 能避免单一结构测量造成的信息量冗余。潘鹏亮等 (2008a, 2008b)、冯艳艳 (2013)、张晶晶等 (2014)、黄年君 (2014) 和温光华等 (2015) 分别对昼鸣蝉、蝴蝶、蝎蛉、蜻蜓和蝗虫进行研究都表明, 形态测量学方法适用于昆虫近缘种的分类。本研究将形态测量学方法用于 4 个近缘种蚂蚁的分类, 通过对形态特征值的测量和分析与比较, 成功将 4 种蚂蚁分开。表明形态测量学方法可以运用于蚂蚁分类。

比较相关分析、配对 T 检验、平均数  $\pm$  标准差分析、偏度和峰度分析和主成分散点图分析这五种方法, 配对 T 检验较其它方法更适用于蚂蚁的分类鉴定。

致谢: 本研究所用的部分蚂蚁标本为广西师范大学 2005 级硕士研究生谭钊和 2006 级硕士研究生林嫦采集, 谨表谢意!

### 参考文献 (References)

- Bolton B. An online catalog of the ants of the world [EB/OL]. [2015 - 7 - 20]. 2015. <http://www.antcat.org/>.
- Feng YY. Wing Shape Analysis of the Scorpionflies (Mecoptera: Panorpidae) Using Geometric Morphometrics [D]. Master Thesis, Northwest Agriculture and Forestry University, 2013. [冯艳艳. 基于几何形态测量学的蝎蛉翅形分析 [D]. 硕士学位论文, 西北农林科技大学, 2013]
- Güler Y, Aytakin AM, Çağatay N. Systematical studies on Anthidiini (Hymenoptera: Megachilidae): A geometric morphometric approach [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2006, 49 (3): 474 - 483.
- Hölldobler B, Wilson EO. *The Ants* [M]. Harvard University Press, 1990.
- Huang NJ. Study on Locomotive Organs of Males of the Genus *Sinopodisma* Using Geometric Morphometrics [D]. Master Thesis, Shannxi Normal University, 2014. [黄年君. 基于几何形态测量学的蝼蛄属雄性运动器官形态变化及模块化集成研究 [D]. 硕士学位论文, 陕西师范大学, 2014]
- Lawing AM, Polly PD. Geometric morphometrics: Recent applications to the study of evolution and development [J]. *Journal of Zoology*, 2010, 280 (1): 1 - 7.
- Pan PL, Shen ZR, Gao LW, *et al.* Development of the technology for auto - extracting venation of insects [J]. *Entomotaxonomia*, 2008a, 30 (1): 72 - 80. [潘鹏亮, 沈佐锐, 高灵旺等. 昆虫翅脉特征自动获取技术的初步研究 [J]. 昆虫分类学报, 2008a, 30 (1): 72 - 80]
- Pan PL, Shen ZR, Yang HZ, *et al.* Digital character extraction and primary analysis of venation of three Parnassian butterflies (Lepidoptera, Papilionidae) [J]. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 2008, 33 (3): 566 - 571. [潘鹏亮, 沈佐锐, 杨红珍等. 三种绢蝶翅脉数字化特征的提取及初步分析 [J]. 动物分类学报, 2008, 33 (3): 566 - 571]
- Ran H, Zhou SY. Checklist of Chinese ants: The formicoid subfamilies (Hymenoptera: Formicidae) (I) [J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2011, 29 (3): 64 - 73. [冉浩, 周善义. 中国蚁科昆虫名录——蚁型亚科群 (膜翅目: 蚁科) (I) [J]. 广西师范大学学报 (自然科学版), 2011, 29 (3): 64 - 73]
- Wen GH, Bai Y, Zhou J, *et al.* Geometric morphometric analysis of wing shape variation in five *Oxya* spp. Grasshoppers [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2015, 52 (2): 356 - 362. [温光华, 白义, 周娟等. 基于几何形态测量学的五种稻蝗前后翅的形态变化研究 [J]. 应用昆虫学报, 2015, 52 (2): 356 - 362]
- Zhang JJ, Bai Y, Wang GH. Using geometric morphometric techniques to analyze wing variation of common dragonflies [J]. *Journal of Ningxia University (Natural Science Edition)*, 2014, 35 (1): 66 - 70. [张晶晶, 白义, 王贵虎. 基于几何形态测量学的几种蜻蜓翅的形态分析 [J]. 宁夏大学学报 (自然科学版), 2014, 35 (1): 66 - 70]
- Zhao HQ, Shen ZR, Yu XW. On computer - aided insect identification through math - morphology features [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2002, 7 (3): 38 - 42. [赵汗青, 沈佐锐, 于新文. 数学形态特征应用于昆虫自动鉴别的研究 [J]. 中国农业大学学报, 2002, 7 (3): 38 - 42]