

中国蚁属（膜翅目：蚁科）十六种蚂蚁的 形态测量学研究*

苏海舫** 徐正会 张新民***

（西南林业大学林学院，云南省森林灾害预警与控制重点实验室，昆明 650224）

摘要 【目的】对蚁属 *Formica* 16 种蚂蚁进行形态测量学研究，旨在探讨形态测量学在蚁科 Formicidae 蚁属的分类和系统发育中的应用价值。【方法】选取蚁属 16 个种各 5 只，对头长（Head length, HL）、头宽（Head width, HW）、触角柄节长（Scape length, SL）、前胸背板宽（Pronotal width, PW）、并腹胸长（Mesosoma length, MSL）、腹柄长（Petiole length, PL）、腹柄宽（Petiole width, DPW）、腹柄高（Petiole height, PH）、体长（Total length, TL）、头比（Cephalic index, CI）、触角柄节比 1（Scape index1, SI₁）、触角柄节比 2（Scape index2, SI₂）、腹柄长宽比（Petiole length index, LPI）、腹柄长高比（Dorsal petiole index, DPI）共 14 个特征变量进行测量，并采用因子分析、主成分分析和系统聚类分析对数据进行处理。【结果】头长（HL）、头宽（HW）、触角柄节长（SL）、腹柄节长（PL）、腹柄节宽（DPW）及腹柄节长宽比（LPI）、触角柄节比 2（SI₂）7 个特征载荷值较高，能够综合反映 14 个变量作为区分 16 种蚂蚁的关键依据；聚类分析可以将 16 种蚂蚁分为 4 支，其中第二支和第三支距离较近，形态测量值相似度较高，亲缘关系较近，与第四支相似度次之，亲缘关系较远，与第一支相似度最低，亲缘关系最远，所得结果与主成分分析结果基本一致。【结论】形态测量学的研究结果与传统形态分类结果基本吻合，表明该方法可以作为蚁科蚁属昆虫分类鉴定的重要依据，具有重要的应用价值和广泛的应用前景。

关键词 蚁属；形态测量学；因子分析；主成分分析；聚类分析

Morphometrics of sixteen species of ants in the genus *Formica* (Hymenoptera: Formicidae) found in China

SU Hai-Ge** XU Zheng-Hui ZHANG Xin-Min***

(Key Laboratory of Forest Disaster Warning and Control in Yunnan Province, College of Forestry,
Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract [Aim] To investigate the value of morphometrics for taxonomic research on the genus *Formica* (family Formicidae). [Methods] Five individuals from 16 species of the genus *Formica* were selected as specimens, and 14 morphometric variables of these were measured, including head length (HL), head width (HW), antennal scape length (SL), pronotal width (PW), mesothoracic length (MSL), petiole length (PL), petiole width (DPW), petiole height (PH), total length (TL), cephalic index (CI), antennal scape index (SI₁), antennal scape index (SI₂), petiole length-to-width ratio (LPI), and petiole length-to-height ratio (DPI). The data were processed using factor analysis, principal component analysis, and systematic cluster analysis. [Results] Seven variables; head length (HL), head width (HW), antennal scape length (SL), petiole length (PL), petiole width (DPW), petiole length-to-width ratio (LPI), and antennal scape index (SI₂), are key diagnostic variables for distinguishing among species. Cluster analysis grouped the 16 species into four clades. The second and third clades were closer, with higher similarity in morphometric values, indicating a closer phylogenetic relationship.

*资助项目 Supported projects: 云南省农业联合专项-重点项目（202301BD070001-151）；国家自然科学基金项目（32060122）

**第一作者 First author, E-mail: 15692950550@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhangxm7908@163.com

收稿日期 Received: 2024-06-17; 接受日期 Accepted: 2024-10-18

The fourth branch had the next highest similarity, indicating a more distant relationship, while the first branch had the lowest similarity and was most distantly related. These results were consistent with those of principal component analysis. **[Conclusion]** The results of morphometric analysis are basically consistent with those of the traditional morphological classification, indicating that this method can be a useful auxiliary approach for identifying species of the Formicidae. It has significant advantages over traditional taxonomic methods and there is broad scope for further application of this method.

Key words *Formica*; morphometric measurement; factor analysis; principal component analysis; hierarchical cluster analysis

蚂蚁隶属昆虫纲 Insecta 膜翅目 Hymenoptera 蚁科 Formicidae, 全球已记载 16 亚科 342 属 14272 种 (Bolton, 2024), 是地球上分布最广泛的社会性昆虫, 除了两极和高山雪线以上的陆地几乎都有分布 (Hölldobler and Wilson, 1990)。蚂蚁与人类生活息息相关, 既能防治作物病虫害、分解小型动物或昆虫的尸体、改变土壤营养成分, 又能取食果蔬的根系, 传播致病微生物(左代代, 2008), 在生态系统中占有重要位置。因此, 分类学、生态学、生物学等众多学科都将蚂蚁作为重要的研究对象之一 (吴坚和王常禄, 1995; 周善义, 2001; 徐正会, 2002; 高冬梅等, 2021)。但是, 蚂蚁的分类学研究目前仍面临诸多问题, 尤其一些种间形态差异不显著的种类, 其分类和鉴定均存在困难, 阻碍了学科的整体发展。

蚁属 *Formica* 由 Linnaeus 在 1758 年建立, 模式标本为红褐林蚁 *Formica rufa*, 随后, Bolton (1995)、Wheeler (1913)、Agosti (1994) 等大量分类学家对该属进行补充修订, 我国对该属的研究起步较晚。Wheeler 首次以名录的形式对中国蚁属进行了总结, 记有 2 种, 1 亚种和 3 变种 (陈媛, 2014)。《中国蚂蚁》中记载了蚁属 21 种, 并列出该属的分类检索表。之后, 夏永娟和郑哲民 (1997)、长有德和贺达汉 (2002)、黄人鑫等 (2004) 对国内部分地区的蚁属进行了研究, 并记述了新种。截止目前, 全世界共记述蚁属 179 种, 其中中国记述 54 种 (Bolton, 2024)。然而, 该属种间差异不大, 存在很多鉴定困难的物种, 例如丝光蚁 *F. fusca* 和莱曼蚁 *F. lemani*、亮腹黑褐蚁 *F. gagatoides* 和光亮黑蚁 *F. candida*, 形态特征极为相似, 如何准确区分这些物种, 成

为该属分类的难点问题。

形态测量学 (Morphometrics) 是随着统计学的发展形成的一种通过对物体进行精确测量、系统分析、开展定量研究的一种方法 (闫宝荣和花保祯, 2010; 黄海燕等, 2015; 谷博, 2019)。形态测量学方法能够对昆虫的细微特征进行量化分析, 可提供更加具体的形态差异信息, 从而被广泛运用到昆虫研究中。Klingenberg (2002) 通过形态测量分析对果蝇的遗传变异与发育实例进行研究, 认为形态测量学方法在遗传学与生物进化学上的应用有深远意义; Güler 等 (2006) 等运用形态测量学方法对黄斑蜂族 Anthidiini 部分种的亲缘关系进行了探讨, 得出了不同于传统形态分类学的新结论; Prieto 等 (2009) 则使用形态测量学方法对鳞翅目 Lepidoptera 灰蝶科 Lycaenidae 的 2 个近似种进行了区分, 印证了形态分类学的结论; 潘鹏亮等 (2008) 则运用形态测量学方法对蝴蝶、昼鸣蝉等昆虫进行了分类鉴定; 赵冲等 (2013) 通过形态测量确定了不同地理种群的烟蚜存在形态差异。该方法对蚂蚁的区分和鉴定也提供了新的思路, 例如: Weiser 和 Kaspari (2006) 用主成分分析的方法, 研究了蚂蚁形态特征值与生存环境的关系, 得出物种的形态特征值在生态学和系统发育史上的差异性; Hazarika 和 Khanikor (2021) 用形态测量的方法鉴别有争议的蚂蚁物种, 说明形态测量方法有助于蚂蚁种类的鉴定; Samung (2022) 等用轮廓形态测量的方法来区分大齿猛蚁属 *Odontomachus* 3 个形态相似的物种; 黄海燕等 (2015, 2017) 用形态测量学分析的方法将光亮黑蚁 *F. candida* 与亮腹黑褐蚁 *F. gagatoides*、蚁属 4 个近缘种成功区分; 张荣娇等 (2016b) 用

形态测量学的方法区分中国厚结猛蚁属 *Pachycondyla* 13 种蚂蚁, 通过聚类分析, 得出厚结猛蚁属种间的亲缘关系; 谷博 (2019) 指出蚂蚁外部形态的细微变异结构可通过形态测量进行量化分析来区分。为了进一步探讨形态测量学在蚁科 Formicidae 蚁属 *Formica* 的分类和系统发育中的应用价值, 本研究选择蚁属 16 种蚂蚁

为对象, 进行了形态测量学研究。

1 材料与方法

1.1 研究材料

研究所用的蚂蚁标本源于作者近年来采集和西南林业大学标本馆 (表 1)。

表 1 蚂蚁标本的采集地、采集时间及个体数量
Table 1 Collection locations, collection dates and individual quantity of the ant specimens

物种 Species	采集地 Locality	采集时间 (年.月) Collecting date (year. month)	个体数量 Individual quantity	采集人 Collectors
光亮黑蚁 <i>F. candida</i>	西藏然乌 Ranwu, Xizang	2010.8	5	刘霞
亮腹黑褐蚁 <i>F. gagatodies</i>	西藏扎西绕登 Zhaxiraodeng, Xizang	2008.9	5	徐正会
丝光蚁 <i>F. fusca</i>	云南奔子栏 Benzilan, Yunnan	2004.10	5	徐正会
莱曼蚁 <i>F. lemani</i>	青海珠固 Zhugu, Qinghai	2023.7	5	冷雪艳
凹唇蚁 <i>F. sanguinea</i>	黑龙江带岭 Dailing, Heilongjiang	2009.8	5	徐正会
四川凹唇蚁 <i>F. sentschuensis</i>	四川旦都 Dandu, Sichuan	2006.8	5	徐正会
乌拉尔蚁 <i>F. uralensis</i>	内蒙古室韦 Shiwei, Inner Mongolia	2008.9	5	徐正会
红林蚁 <i>F. clara</i>	内蒙古呼伦 Hulun, Inner Mongolia	2008.8	5	徐正会
中华红林蚁 <i>F. sinensis</i>	四川旦都 Dandu, Sichuan	2006.8	5	徐正会
满凹头蚁 <i>F. fukaii</i>	西藏错高 Cuoga, Xizang	2008.7	5	徐正会
掘穴蚁 <i>F. cunicularia</i>	云南嘎洒 Gasa, Yunnan	2003.3	5	徐正会
北方蚁 <i>F. aquilonia</i>	黑龙江图强 Tuqiang, Heilongjiang	2009.7	5	徐正会
类干红蚁 <i>F. approximans</i>	黑龙江带岭 Dailing, Heilongjiang	2009.8	5	徐正会
多栉蚁 <i>F. polycheta</i>	吉林长岭种马场 Changling Stud Farm, Jilin	2000.6	5	徐正会
红头林蚁 <i>F. truncorum</i>	新疆昭苏 Zhaosu, Xinjiang	2022.8	5	杨蕊
中亚凹头蚁 <i>F. mesasiatica</i>	新疆加尕斯台 Jiagasitai, Xinjiang	2022.8	5	杨林

1.2 研究方法

1.2.1 标本的采集与制作 本研究所用标本, 均是通过样地调查法和搜索调查法获取(徐正会, 2002)。调查时将所捕获的蚂蚁储存于装有无水乙醇的 2 mL 冻存管中带回实验室, 之后将其用 95%的无水乙醇在培养皿中进行多次清洗, 清洗掉标本上附着的泥土和杂质, 然后将清洗干净的标本, 根据形态特征进行初步分类后, 再次装入盛有 95%无水乙醇的冻存管中, 写好临时标签保存, 待所有标本清洗和分类完毕后, 在 SOPTOP SZM45 连续变倍体视镜下对蚂蚁姿态进行整

理, 最后将处理好的标本用树胶粘在针插三角纸上, 制成针插标本, 插上采集标签, 保存备用。

1.2.2 测量方法 在 SOPTOP SZM45 连续变倍体视镜下测量 16 种蚂蚁的头长 (Head length, HL)、头宽 (Head width, HW)、触角柄节长 (Scape length, SL)、前胸背板宽 (Pronotal width, PW)、并腹胸长 (Mesosoma length, MSL)、腹柄长 (Petiole length, PL)、腹柄宽 (Petiole width, DPW)、腹柄高 (Petiole height, PH)、体长 (Total length, TL)、头比 (Cephalic index, CI)、触角柄节比 1 (Scape index1, SI₁)、触角柄节比 2 (Scape index2, SI₂)、腹柄长宽比 (Petiole length

index, LPI)、腹柄长高比 (Dorsal petiole index, DPI), 共 14 个特征变量。每个物种各测量 5 只, 每个特征变量测量 3 次, 取平均值, 精确值为 0.01 mm。测量内容及标准参考 Bolton (1995) (表 2)。

表 2 蚁属 16 种蚂蚁 14 种测量特征
Table 2 Measured characteristics of 14 species of 16 ants of *Formica*

特征变量 Variable quantities	定义 Definition
头长 Head length (HL)	正面观唇基前缘至后头缘的垂直长度, 如果唇基前缘和后头缘中央凹陷, 则以唇基两侧角连线和后头角之间连线建的垂直长度为准 The vertical length from the anterior margin of the labial base to the posterior head margin in frontal view, and if the anterior margin of the labial base or the posterior head margin are centrally concave, the vertical length should be determined by the perpendicular distance between the line connecting the lateral corners of the labial base and the line connecting the posterior head corners
头宽 Head width (HW)	正面观头部的最大宽度, 不包含复眼 The maximum width of head in frontal view, excluding the compound eyes
触角柄节长 Scape length (SL)	触角柄节的直线长度, 不包括基部狭缩和球形插入部 The straight length of the antennal scape, excluding the basal constriction and the spherical insertion part
前胸背板宽 Pronotal width (PW)	背面观前胸背板的最大宽度 The maximum width of the pronotum in dorsal view
并腹胸长 Mesosoma length (MSL)	侧面观前胸背板前端 (不包括颈状部) 至胸部后下角之间的直线长度 The straight length from the anterior end of the pronotum (excluding the neck-like portion) to the posterior inferior corner of the thorax in lateral view
腹柄长 Petiole length (PL)	侧面观腹柄结的最大长度, 包含前面和后面收缩的柄状部 The maximum length of the petiolar node in lateral view, including the anterior and posterior constricted peduncular parts
腹柄高 Petiole height (PH)	侧面挂观腹柄结顶端至腹柄下突之间的垂直高度 The vertical height from the apex of the petiolar node to the projection of the petiole in lateral view
腹柄宽 Petiole width (DPW)	背面观腹柄结的最大宽度 The maximum width of the petiolar node in dorsal view
体长 Total length (TL)	身体伸展状态下, 上颚顶端至腹末端的长度 The length from the tip of the mandible to the posterior end of the abdomen when the body is extended
头比 Cephalic index (CI)	头宽与头长的比值 The ratio of head width to head length
触角柄节比 1 Scape index1 (SI ₁)	头宽与触角柄节长的比值 The ratio of head width to scape length
触角柄节比 2 Scape index2 (SI ₂)	头长与触角柄节长的比值 The ratio of head length to scape length
腹柄长宽比 Petiole length index (LPI)	腹柄长与腹柄宽的比值 The ratio of petiole length to petiole width
腹柄长高比 Dorsal petiole index (DPI)	腹柄长与腹柄高的比值 The ratio of petiole length to petiole height

1.3 数据处理

(1) 将测量得到的数据运用 Excel 2021 进行处理 (n=5), 取每种蚂蚁各特征变量的平均值,

得到 16 种蚂蚁的 14 个特征变量的均值。
(2) 数据标准化处理: 特征变量的均值同时涉及比值和度量单位, 不同指标量纲不同, 不存在可比性, 因此, 将原始数据先通过 SPSS

Statistics (Version 26.0) (SPSS 26.0) 运用标准化处理方法进行处理, 得到形态测量均值的无单位数字矩阵。

(3) 因子分析: 在进行因子分析前, 先对标准化后的数据通过 SPSS 26.0 进行 Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) 和巴特利特球形度检验来判断是否满足因子分析的条件。确认符合条件后再将数据通过 SPSS 26.0 软件“分析→降维→因子”的命令进行因子分析得到 14 个特征变量的特征值和主成分负荷值, 之后便可将 14 个特征变量划分为几个主成分。

(4) 主成分分析: 使用 Excel 2021 将主成分的特征值 x 代入“ $y=\text{SQRT}(x)$ ”算出对应的 y 值,

用各变量的负荷值除以对应主成分的 y 值得到特征向量矩阵后即可写出主成分表达式确定主要特征变量, 绘制出主成分得分散点图。

(5) 聚类分析: 运用 SPSS 26.0 软件的系统聚类方法结合主要特征变量, 以平方欧式距离度量、离差平方和为聚类法则, 得出 16 种蚂蚁的聚类分析谱系图。

2 结果与分析

2.1 测量结果

通过测量和 Excel 2021 处理数据, 得到了 16 种蚂蚁 14 个形态测量平均值 (表 3)。

表 3 蚁属 16 种蚂蚁的 14 个特征变量平均值
Table 3 Mean values of 14 characteristic variables of 16 species of *Formica*

物种 Species	特征变量均值 (mm) Mean of characteristic variables (mm)													
	HL	HW	SL	PW	MSL	PL	PH	DPW	TL	CI	SI ₁	SI ₂	LPI	DPI
光亮黑蚁 <i>F. candida</i>	1.19	1.10	1.20	0.79	1.78	0.37	0.52	0.47	5.09	0.92	1.09	1.01	0.78	0.71
亮腹黑褐蚁 <i>F. gagatodies</i>	1.38	1.15	1.41	0.84	1.91	0.35	0.56	0.51	5.32	0.83	1.23	1.02	0.69	0.63
丝光蚁 <i>F. fusca</i>	1.32	1.13	1.44	0.83	1.92	0.36	0.65	0.54	5.31	0.86	1.28	1.10	0.67	0.56
莱曼蚁 <i>F. lemani</i>	1.34	1.18	1.36	0.84	1.84	0.37	0.59	0.52	5.28	0.88	1.15	1.01	0.70	0.62
凹唇蚁 <i>F. sanguinea</i>	1.58	1.46	1.51	1.02	2.26	0.51	0.82	0.69	6.44	0.92	1.03	0.95	0.74	0.63
四川凹唇蚁 <i>F. sentschuensis</i>	1.10	1.00	1.10	0.69	1.62	0.31	0.51	0.40	4.66	0.91	1.10	1.00	0.78	0.60
乌拉尔蚁 <i>F. uralensis</i>	1.60	1.48	1.42	1.03	2.14	0.47	0.85	0.68	6.18	0.92	0.96	0.89	0.69	0.55
红林蚁 <i>F. clara</i>	1.30	1.11	1.26	0.83	1.82	0.39	0.62	0.52	5.30	0.85	1.14	0.97	0.75	0.63
中华红林蚁 <i>F. sinensis</i>	1.83	1.63	1.64	1.06	2.45	0.48	0.94	0.78	6.80	0.89	1.00	0.89	0.61	0.51
满凹头蚁 <i>F. fukaii</i>	1.54	1.33	1.44	0.92	2.06	0.42	0.77	0.54	6.06	0.87	1.08	0.94	0.76	0.54
掘穴蚁 <i>F. cunicularia</i>	1.64	1.50	1.84	1.07	2.44	0.44	0.76	0.58	6.72	0.91	1.22	1.12	0.77	0.58
北方蚁 <i>F. aquilonia</i>	1.95	1.77	1.62	1.26	2.62	0.52	1.04	0.90	7.61	0.91	0.91	0.83	0.58	0.51

续表 3 (Table 3 continued)

物种 Species	特征变量均值 (mm) Mean of characteristic variables (mm)													
	HL	HW	SL	PW	MSL	PL	PH	DPW	TL	CI	SI ₁	SI ₂	LPI	DPI
类干红蚁 <i>F. approximans</i>	1.83	1.73	1.65	1.19	2.60	0.56	0.96	0.78	7.27	0.95	0.95	0.90	0.71	0.58
多栉蚁 <i>F. polychtena</i>	1.46	1.26	1.41	0.91	1.97	0.37	0.65	0.57	5.31	0.86	1.12	0.96	0.66	0.57
红头林蚁 <i>F. truncorum</i>	1.78	1.66	1.66	1.16	2.48	0.56	0.92	0.76	7.07	0.93	1.00	0.93	0.74	0.61
中亚凹头蚁 <i>F. mesasiatica</i>	1.72	1.52	1.53	1.02	2.24	0.54	0.93	0.61	6.62	0.89	1.00	0.89	0.88	0.58

特征变量同表 2。下表同。 Characteristic variables are the same as Table 2. The same below.

2.2 原始数据标准化

通过 Z 标准化(Z-score standardization)的方法将蚁属 16 种蚂蚁的 14 个特征变量的平均值进行标准化处理 (表 4), 处理过后 14 个特征变量均无单位。数据的正负表示数据点相对于均值的偏离方向。

2.3 因子分析

由表 5 可知, 标准化后的数据 KMO=0.681>0.6, 且巴特利特球形度检验的显著性小于 0.05 ($P<0.05$), 这表明各变量具有相关关系, 满足因子分析的前提条件, 可以进行因子分析且因子分析的结果具有一定价值。

表 4 标准化后的蚁属 16 种蚂蚁 14 个特征变量的平均值
Table 4 Mean values of 14 unit-free standardized characteristic variables of 16 species of *Formica*

物种 Species	标准化后的特征变量均值 Standardization refers to unit-free normalization													
	ZHL	ZHW	ZSL	ZPW	ZMSL	ZPL	ZPH	ZDPW	ZTL	ZCI	ZSI ₁	ZSI ₂	ZLPI	ZDPI
光亮黑蚁 <i>F. candida</i>	- 1.37	- 1.10	- 1.40	- 1.10	- 1.13	- 0.86	- 1.38	- 1.05	- 1.08	0.89	0.14	0.60	0.85	2.42
亮腹黑褐蚁 <i>F. gagatodies</i>	- 0.64	- 0.91	- 0.31	- 0.77	- 0.72	- 1.06	- 1.13	- 0.79	- 0.83	- 1.85	1.37	0.77	- 0.37	0.79
丝光蚁 <i>F. fusca</i>	- 0.88	- 0.99	- 0.12	- 0.85	- 0.67	- 0.91	- 0.62	- 0.53	- 0.84	- 1.14	1.87	1.73	- 0.70	- 0.50
莱曼蚁 <i>F. lemani</i>	- 0.76	- 0.80	- 0.59	- 0.77	- 0.92	- 0.86	- 0.95	- 0.67	- 0.88	- 0.59	0.69	0.59	- 0.24	0.66
凹唇蚁 <i>F. sanguinea</i>	0.20	0.34	0.22	0.36	0.40	0.90	0.35	0.56	0.42	0.86	- 0.44	- 0.14	0.29	0.77
四川凹唇蚁 <i>F. sentschuensis</i>	- 1.74	- 1.50	- 1.95	- 1.72	- 1.62	- 1.59	- 1.41	- 1.61	- 1.56	0.47	0.19	0.47	0.82	0.27
乌拉尔蚁 <i>F. uralensis</i>	0.28	0.40	- 0.25	0.39	0.01	0.36	0.53	0.44	0.13	0.81	- 1.10	- 1.00	- 0.38	- 0.68
红林蚁 <i>F. clara</i>	- 0.96	- 1.07	- 1.10	- 0.87	- 1.01	- 0.62	- 0.78	- 0.73	- 0.85	- 1.21	0.54	0.12	0.46	0.74
中华红林蚁 <i>F. sinensis</i>	1.17	1.02	0.90	0.59	1.01	0.46	1.07	1.17	0.81	- 0.04	- 0.72	- 0.88	- 1.49	- 1.56

续表 4 (Table 4 continued)

物种 Species	标准化后的特征变量均值 Standardization refers to unit-free normalization													
	ZHL	ZHW	ZSL	ZPW	ZMSL	ZPL	ZPH	ZDPW	ZTL	ZCI	ZSI ₁	ZSI ₂	ZLPI	ZDPI
满凹头蚁 <i>F. fukaii</i>	0.00	- 0.17	- 0.14	- 0.32	- 0.23	- 0.27	0.09	- 0.53	0.00	- 0.83	0.01	- 0.33	0.64	- 0.94
掘穴蚁 <i>F. cunicularia</i>	0.44	0.50	1.96	0.64	0.96	0.07	0.03	- 0.26	0.73	0.57	1.35	1.98	0.65	- 0.06
北方蚁 <i>F. aquilonia</i>	1.65	1.57	0.79	1.82	1.53	1.05	1.62	2.11	1.72	0.42	- 1.55	- 1.72	- 1.96	- 1.57
类干红蚁 <i>F. approximans</i>	1.19	1.42	0.98	1.39	1.48	1.44	1.20	1.23	1.34	1.59	- 1.18	- 0.79	- 0.14	- 0.21
多栉蚁 <i>F. polystena</i>	- 0.30	- 0.46	- 0.32	- 0.38	- 0.53	- 0.79	- 0.59	- 0.36	- 0.85	- 0.96	0.34	0.00	- 0.85	- 0.31
红头林蚁 <i>F. truncorum</i>	1.00	1.15	1.00	1.24	1.10	1.49	0.95	1.05	1.12	1.20	- 0.79	- 0.45	0.25	0.41
中亚凹头蚁 <i>F. mesasiatica</i>	0.72	0.59	0.32	0.36	0.34	1.19	1.02	- 0.03	0.61	- 0.18	- 0.72	- 0.94	2.19	- 0.24

表 5 Kaiser-Meyer-Olkin 和巴特利特检验结果
Table 5 Results of Kaiser-Meyer-Olkin and Bartlett's test

检验内容 Test content	检验结果 Test result
KMO 取样适切性量数 Kaiser-Meyer-Olkin measure of sampling adequacy	0.681
巴特利特球形度检验 Bartlett's sphericity test	近似卡方 Approximate chi-square 527.432
	自由度 Degrees of freedom 91
	显著性 Significance <0.001

由表 6 可知,成分 1、2 和 3 的特征值分别为 9.99、1.61 和 1.31,均大于 1,对原有变量保留的信息较多,而其余成分的特征值远小于 1。

方差贡献率则反映了各因子对原有变量总方差的解释能力,该值越高,相应因子重要性越高。这 3 个成分的贡献率分别为 71.38%、11.53%和

表 6 蚁属 16 种蚂蚁 14 个成分的特征值
Table 6 Feature values of 14 components of 16 species of *Formica*

成分 Component	特征值 Morphometric variable	贡献率 (%) Contribution rate (%)	累积贡献率 (%) Cumulative contribution rate (%)	成分 Component	特征值 Morphometric variable	贡献率 (%) Contribution rate (%)	累积贡献率 (%) Cumulative contribution rate (%)
1	9.99	71.38	71.38	8	0.02	0.11	99.95
2	1.61	11.53	82.91	9	0.00	0.03	99.97
3	1.31	9.33	92.24	10	0.00	0.01	99.99
4	0.64	4.60	96.84	11	0.00	0.01	100.00
5	0.33	2.36	99.21	12	0.00	0.00	100.00
6	0.06	0.45	99.65	13	0.00	0.00	100.00
7	0.02	0.18	99.83	14	0.00	0.00	100.00

9.33%, 大于其他成分的贡献率, 且累积贡献率达到 92.24%。一般提取满足特征值大于 1, 累积贡献率大于 85%的因子。因此可以将蚁属 16 种蚂蚁的 14 种形态特征确定为 3 个主要成分, 它们可以综合反映蚁属 16 种蚂蚁 14 种形态特征中所包含信息的 92.24%。

由表 7 可知, 第一个主成分中多数特征变量的负荷值大于 0.9, 说明第一个主成分与多数特征变量的相关性较强, 第二个主成分中腹柄长宽

比 (LPI) 和腹柄长高比 (DPI) 的负荷值较大, 第三个主成分中触角比 (SI₁) 和触角比 (SI₂) 的负荷值较大。3 个主成分特征变量的负荷值差异明显。因此很难确定 3 个主成分所代表的具体特征变量, 需要进行主成分分析。

2.4 主成分分析

通过表 8, 即可写出 3 个主要成分的表达式, 式中各变量均为标准化后的变量。

表 7 蚁属 16 种蚂蚁特征变量主成分负荷值
Table 7 Principal component loadings of characteristic variables of 16 species of *Formica*

特征变量 Variable quantities	主成分负荷值 Load value		
	1	2	3
头长 Head length (HL)	0.983	- 0.109	0.063
头宽 Head width (HW)	0.995	0.020	0.080
触角柄节长 Scape length (SL)	0.796	- 0.249	0.541
前胸背板宽 Pronotal width (PW)	0.980	- 0.019	0.127
并腹胸长 Mesosoma length (MSL)	0.966	- 0.068	0.232
腹柄长 Petiole length (PL)	0.932	0.262	0.114
腹柄高 Petiole height (PH)	0.981	- 0.005	- 0.037
腹柄宽 Petiole width (DPW)	0.960	- 0.113	- 0.108
体长 Total length (TL)	0.979	0.015	0.161
头比 Cephalic index (CI)	0.548	0.637	0.096
触角柄节比 1 Scape index1 (SI ₁)	- 0.760	- 0.405	0.503
触角柄节比 2 Scape index 2 (SI ₂)	- 0.689	- 0.199	0.664
腹柄长宽比 Petiole length index (LPI)	- 0.314	0.709	0.339
腹柄长高比 Dorsal petiole index (DPI)	- 0.594	0.583	0.253

表 8 特征向量矩阵
Table 8 Eigenvector matrix

特征变量 Variable quantities	主成分 Component		
	1	2	3
头长 Head length (HL)	0.311	- 0.086	0.055
头宽 Head width (HW)	0.315	0.015	0.070
触角柄节长 Scape length (SL)	0.252	- 0.196	0.473
前胸背板宽 Pronotal width (PW)	0.310	- 0.015	0.111
并腹胸长 Mesosoma length (MSL)	0.306	- 0.053	0.203
腹柄长 Petiole length (PL)	0.295	0.207	0.100
腹柄高 Petiole height (PH)	0.310	- 0.004	- 0.033

续表 8 (Table 8 continued)

特征变量 Variable quantities	主成分 Component		
	1	2	3
腹柄宽 Petiole width (DPW)	0.304	- 0.089	- 0.094
体长 Total length (TL)	0.310	0.012	0.141
头比 Cephalic index (CI)	0.173	0.502	0.084
触角柄节比 1 Scape index1 (SI ₁)	- 0.241	- 0.319	0.440
触角柄节比 2 Scape index2 (SI ₂)	- 0.218	- 0.156	0.581
腹柄长宽比 Petiole length index (LPI)	- 0.099	0.559	0.296
腹柄长高比 Dorsal petiole index (DPI)	- 0.188	0.459	0.221

$$Y_1 = 0.311 \times ZHL + 0.315 \times ZHW + 0.252 \times ZSL + 0.310 \times ZPW + 0.306 \times ZMSL + 0.295 \times ZPL + 0.310 \times ZPH + 0.304 \times ZDPW + 0.310 \times ZTL + 0.173 \times ZCI - 0.241 \times ZSI_1 - 0.218 \times ZSI_2 - 0.099 \times ZLPI - 0.188 \times ZDPI;$$

$$Y_2 = - 0.086 \times ZHL + 0.015 \times ZHW - 0.196 \times ZSL - 0.015 \times ZPW - 0.053 \times ZMSL + 0.207 \times ZPL - 0.004 \times ZPH - 0.089 \times ZDPW + 0.012 \times ZTL + 0.502 \times ZCI - 0.319 \times ZSI_1 - 0.156 \times ZSI_2 + 0.559 \times ZLPI + 0.459 \times ZDPI;$$

$$Y_3 = 0.055 \times ZHL + 0.070 \times ZHW + 0.473 \times ZSL + 0.111 \times ZPW + 0.203 \times ZMSL + 0.100 \times ZPL - 0.033 \times ZPH - 0.094 \times ZDPW + 0.141 \times ZTL + 0.084 \times ZCI + 0.440 \times ZSI_1 + 0.581 \times ZSI_2 + 0.296 \times ZLPI + 0.221 \times ZDPI。$$

上面表达式中, 各项前面的系数绝对值越大, 贡献越大。表达式 Y_1 中头宽 (HW) 系数为 0.315, 即 Y_1 主要由头宽 (HW) 决定。表达式 Y_2 中腹柄节长宽比 (LPI) 系数为 0.559, 即 Y_2 主要由腹柄长 (PL) 和腹柄宽 (DPW) 决定。 Y_3 中触角比 (SI₂) 系数为 0.581, 即 Y_3 主要由头长 (HL) 和触角柄节长 (SL) 决定。

综上所述, 蚁属昆虫主要以头长 (HL)、头宽 (HW)、触角柄节长 (SL)、腹柄节长 (PL)、腹柄节宽 (DPW)、腹柄节长宽比 (LPI)、触角比 (SI₂) 作为形态分类的主要特征和依据。这 7 个测量特征变量是 3 个主成分所代表的具体特征变量, 即可以替代蚁属 16 种蚂蚁 14 个特征变量的主要特征变量, 在蚁属形态测量研究中值得重点关注。

根据表达式计算出 3 个主成分的得分, 即可绘制出蚁属 16 种蚂蚁的散点图 (图 1)。图 1 表现为形态相似的物种点相接近, 形态有差异的物种点分散远离。由图 1 可知, 16 中蚂蚁基本分布在 5 个区域。亮腹黑褐蚁、掘穴蚁、莱曼蚁、丝光蚁、红林蚁聚集在一起; 光亮黑蚁与四川凹唇蚁聚集在一起; 满凹头蚁和多栉蚁距离较近; 类干红蚁、乌拉尔蚁、红头林蚁、凹唇蚁和中亚凹头蚁聚集在一起; 中华红林蚁和北方蚁分布在一个区域。各点相互离散, 没有重叠和相交, 说明提取的 3 种主成分能够区分蚁属的 16 种蚂蚁, 且能够反映出部分种的亲缘关系。

2.5 聚类分析

由主成分分析得到头长 (HL)、头宽 (HW)、触角柄节长 (SL)、腹柄节长 (PL)、腹柄节宽 (DPW) 及腹柄节长宽比 (LPI)、触角比 (SI₂) 这 7 个特征变量, 在最大程度上反映了蚁属 16 种蚂蚁的形态差异信息。以上述 7 种特征变量进行系统聚类分析, 得到聚类分析谱系图 (图 2)。

由图 2 可知, 蚁属 16 种蚂蚁在重新标度的距离聚类组合值为 15 的情况下分成了 4 支, 在重新标度的距离组合值为 10 时则分成了 7 支, 重新标度的距离聚类组合值越小, 物种被划分的越细致, 说明重新标度的距离聚类组合值越小, 物种的亲缘关系越近。在距离为 15 时, 第一大支包括亮腹黑褐蚁、莱曼蚁、多栉蚁和丝光蚁、光亮黑蚁、红林蚁和四川凹唇蚁 7 种; 第二大支为类干红蚁、红头林蚁、中华红林蚁、北方蚁

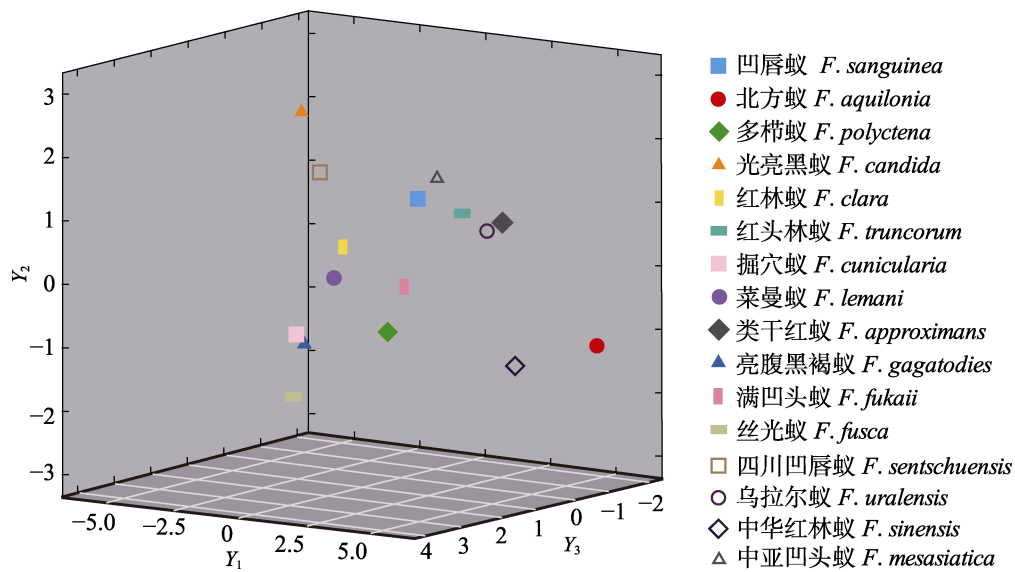


图 1 主成分得分三维散点图

Fig. 1 Three-dimensional scatterplot of principal component scores

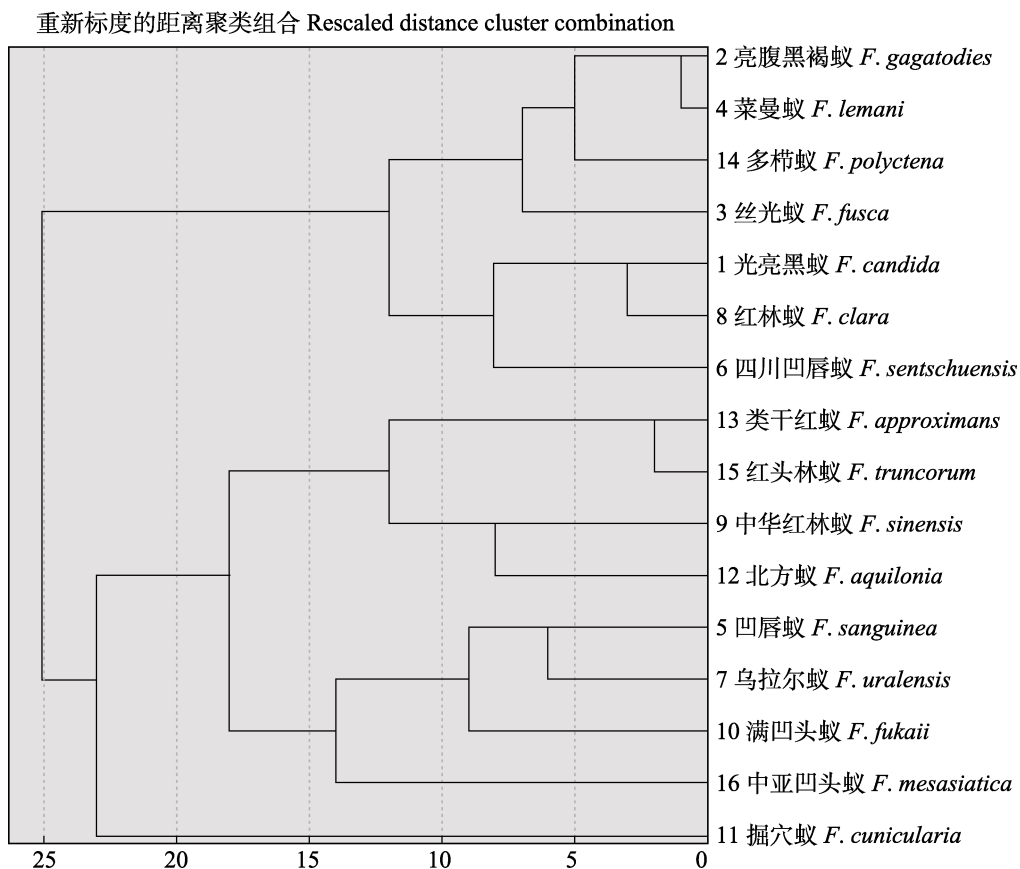


图 2 蚁属 16 种蚂蚁的系统聚类

Fig. 2 Systematic clustering of 16 species of *Formica*

4 种; 凹唇蚁、乌拉尔蚁、满凹头蚁、中亚凹头蚁聚为第三支; 掘穴蚁单独为第四支。聚类为同

一支的物种形态相似度较高, 亲缘关系较近, 这与传统形态分类鉴定的结果基本一致。

3 讨论

黄海燕等(2015)在区分亮腹黑褐蚁和光亮黑蚁提取到的主成分为头宽(HW)、头长(HL)和体长(TL);张荣娇等(2016)在区分厚结猛蚁属 *Pachycondyla* 13种时提取的主成分为头长(HL)、头宽(HW)、头比(CI)和触角柄节比(SI)、谷博(2019)在对中国蚁亚科 Formicinae 形态测量学研究中提取的主成分为体长(TL)、触角柄节比(SI)。本文为区分蚁属 16 种蚂蚁,选取了 14 个形态测量特征,其中头宽(HW)、触角柄节长(SL)、腹柄节长(PL)、腹柄节宽(DPW)、腹柄节长宽比(LPI)和触角比(SI₂) 7 个作为主要特征,虽然与上述研究选取的特征值不一致,但这与传统形态分类在区分物种时,选取不同的特征区分不同分类阶元物种的方法是一致的(段加焕等, 2023)。

聚类分析的结果揭示了相似种的亲缘关系,与传统形态分类鉴定结果基本吻合,例如:红林蚁、亮腹黑褐蚁、光亮黑蚁、莱曼蚁、丝光蚁、形态特征极为相似,在传统分类鉴定中仅通过体色、后腹部柔毛排列间距、中足腿节和前中胸背板的立毛数量进行区分(吴坚和王常禄, 1995),在聚类分析中被聚类为一支;中亚凹头蚁和满凹头蚁均具有头部后缘凹陷的特征,因此,在聚类时被聚为一支。但四川凹唇蚁和凹唇蚁同样拥有唇基前缘中央凹陷的形态特征(吴坚和王常禄, 1995),却被聚类到了不同的两支;另外,乌拉尔蚁头部后缘并不凹陷,却与头部后缘凹陷的满凹头蚁和中亚凹头蚁聚为一支。这可能是因为形态测量学仅仅是点对点的测量,忽略了不规则形态特征值的测量(周用武等, 2024),导致无法反映出诸如头后缘形状、唇基前缘形状、体色、毛列分布等具体的形态特征,具有一定的局限性。

散点图中各个点相互离散,没有交叉重叠,说明运用形态测量学方法可以有效的区分蚁属 16 种蚂蚁,其结果与聚类结果基本相似。例如:亮腹黑褐蚁、莱曼蚁、丝光蚁,在散点图中集中在一个区域,在聚类分析中亲缘关系较近;类干红蚁和红头林蚁集中分布在一个区域,在聚类分析中亲缘关系较近。但唇基都具有凹陷特征

的四川凹唇蚁和凹唇蚁,在散点图中却未能集中在一起。造成这一结果的原因除了形态测量学无法反映测量特征形状的局限性外,还可能与蚂蚁标本来源多样,同种蚂蚁个体间的形态差异,测量的蚂蚁样本较少、测量时因观察角度等因素造成的误差有关(谷博, 2019)。

4 结论

本文选取的 14 个形态测量特征,通过因子分析、主成分分析和聚类分析,可以区分蚁属的 16 种蚂蚁;头长(HL)、头宽(HW)、触角柄节长(SL)、腹柄节长(PL)、腹柄节宽(DPW)、腹柄节长宽比(LPI)、触角比(SI₂) 7 个特征载荷值较高,是区分该属蚂蚁的重要依据;聚类分析得到的结果与散点图所得的结果较为相似,与传统的形态分类结果也较吻合。综上所述,形态测量学方法可用于蚁属昆虫的分类鉴定,是区分近似种、研究亲缘关系的重要手段。然而,单独使用该方法并不可靠,只有将其与传统形态分类方法相结合,才能进一步提高物种鉴定的准确性、充分发挥出这种方法的应用价值。

参考文献 (References)

- Agosti DA, 1994. The phylogeny of the ant tribe Formicini (Hymenoptera: Formicidae) with the description of a new genus. *Systematic Entomology*, 19(2): 93–117.
- Bolton B, 1995. Identification Guide to the Ant Genera of the World. Cambridge, Mass: Harvard University Press. 138–143.
- Bolton B, 2024. An online catalog of the ants of the world [DB/OL]. <http://antcat.org/>.
- Chang YD, He DH, 2002. Taxonomic study of genus *Formica* L. from Northwest China with descriptions of nine new species and four new records (Hymenoptera: Formicidae: Formicinae). *Zoological Research*, 23(1): 49–60. [长有德, 贺达汉, 2002. 中国西北地区蚁属分类研究兼 9 新种和 4 新纪录种记述(膜翅目: 蚁科: 蚁亚科). 动物学研究, 23(1): 49–60.]
- Cheng Y, 2014. Research on phylogenetic relationship and DNA barcoding among sixteen species of the genus *Formica* (Hymenoptera: Formicidae) from China. Master dissertation. Guilin: Guangxi Normal University. [陈媛, 2015. 中国蚁属 16 种蚂蚁系统发育及 DNA 条形码研究. 硕士学位论文. 桂林: 广西师范大学.]
- Duan JH, Xu ZH, Zhang XM, 2023. Morphometric studies on 19 species of the genus *Aphaenogaster* in China. *Forest Research*, 36(6): 106–114. [段加焕, 徐正会, 张新民, 2023. 中国盘腹蚁属 19 种蚂蚁的形态测量学研究. 林业科学研究, 36(6):

- 106–114.]
- Gao DM, Gao LH, Li P, Dong MC, Pan RD, Xu ZH, Guo X, 2021. A bibliometric review of research on the Formicidae. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 58(1): 211–219. [高冬梅, 高立洪, 李萍, 董毛村, 潘润东, 徐正会, 郭萧, 2021. 基于文献计量分析的蚁科昆虫研究. *应用昆虫学报*, 58(1): 211–219.]
- Gu B, 2019. Morphometry of Chinese Formicinae. Master dissertation. Guilin: Guangxi Normal University. [谷博, 2019. 中国蚁亚科形态测量学分析. 硕士学位论文. 桂林: 广西师范大学.]
- Güler Y, Aytekin AM, Cagvatay N, 2006. Systematical studies on Anthidiini (Hymenoptera: Megachilidae): A geometric morphometric approach. *Acta Entomologica Sinica*, 49(3): 474–483.
- Hazarika HN, Khanikar B, 2021. Integration of morphological and molecular taxonomic characters for identification of *Odontoponera denticulata* (Hymenoptera: Formicidae: Ponerinae) with the description of the antennal sensilla. *Zoologischer Anzeiger*, 293: 89–100.
- Hölldobler B, Wilson EO, 1990. The Ants. Cambridge, USA: Belknap Press of Harvard University Press. 21.
- Huang HY, Chen Y, Zhou SY, 2015. Morphometric analysis of *Formica candida* and *Formica gagatoides* (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 33(2): 96–102. [黄海燕, 陈媛, 周善义, 2015. 光亮黑蚁与亮腹黑褐蚁(膜翅目: 蚁科)的形态测量学分析. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 33(2): 96–102.]
- Huang HY, Chen Y, Zhou SY, 2017. Morphometric analysis on four species of *Formica* (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Environmental Entomology*, 39(1): 226–231. [黄海燕, 陈媛, 周善义, 2017. 蚁属(膜翅目: 蚁科)4种的形态测量学分析. *环境昆虫学报*, 39(1): 226–231.]
- Huang RX, Ouyang T, Wu W, Fan ZT, 2004. Forty two new record species of family Formicidae (Hymenoptera: Formicoidea) from Xinjiang, China. *Entomotaxonomia*, 26(2): 156–160. [黄人鑫, 欧阳彤, 吴卫, 范兆田, 2004. 新疆蚁科昆虫 42 种中国新记录. *昆虫分类学报*, 26(2): 156–160.]
- Klingenberg CP, 2002. Morphometrics and the role of the phenotype in studies of the evolution of developmental mechanisms. *Gene*, 287(1/2): 3–10.
- Pan PL, Shen ZR, Yang HZ, Gao LW, Zhang JW, Xie M, 2008. Digital character extraction and primary analysis of venation of three *Parnassius* butterflies (Lepidoptera, Papilionidae). *Zoological Systematics*, 33(3): 566–571. [潘鹏亮, 沈佐锐, 杨红珍, 高灵旺, 张建伟, 谢敏, 2008. 三种绢蝶翅脉数字化特征的提取及初步分析. *动物分类学报*, 33(3): 566–571.]
- Prieto CG, Munguira ML, Romo H, 2009. Morphometric analysis of genitalia and wing pattern elements in the genus *Cupido* (Lepidoptera, Lycaenidae): Are *Cupido minimus* and *Cupido carswelli* different species? *Deutsche Entomologische Zeitschrift*, 56(1): 137–147.
- Samung Y, Chaiphongpachara T, Ruangsittichai J, Sriwichai P, Phayakkaphon A, Jaitrong W, Dujardin JP, Sumruayphol S, 2022. Species discrimination of three *Odontomachus* (Formicidae: Ponerinae) species in Thailand using outline morphometrics. *Insects*, 13(3): 287.
- Weiser MD, Kaspari M, 2006. Ecological morphospace of new world ants. *Ecological Entomology*, 31(2): 131–142.
- Wheeler WM, 1913. A revision of the ants of the genus *Formica* (Linne) Mayr. *Museum of Comparative Zoology at Harvard College*, 53(10): 379–565.
- Wu J, Wang CL, 1995. The Ants of China. Beijing: China Forestry Publishing House. 214. [吴坚, 王常禄. 1995. 中国蚂蚁. 北京: 中国林业出版社. 214.]
- Xia YJ, Zheng ZM, 1997. A new species of the genus *Formica* form Xinjiang (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Hubei University (Natural Science)*, 19(4): 88–89. [夏永娟, 郑哲民, 1997. 新疆蚁属一新种记述(膜翅目: 蚁科). *湖北大学学报(自然科学版)*, 19(4): 88–89.]
- Xu ZH, 2002. A Study on the Biodiversity of Formicidae Ants of Xishuangbanna Nature Reserve. Kunming: Yunnan Science and Technology Press. 3–8. [徐正会, 2002. 西双版纳自然保护区蚁科昆虫生物多样性研究. 昆明: 云南科技出版社. 3–8.]
- Yan BR, Hua BZ, 2010. Geometric morphometrics and its applications in insect taxonomy and phylogeny. *Entomotaxonomia*, 32(4): 313–320. [闫宝荣, 花保祯, 2010. 几何形态测量学及其在昆虫分类学和系统发育中的应用. *昆虫分类学报*, 32(4): 313–320.]
- Zhao C, Wang XF, Chen D, Wang XW, Xue D, Ren GW, 2013. Morphological variations of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) from different geographical populations in China. *Acta Entomologica Sinica*, 56(12): 1452–1463. [赵冲, 王秀芳, 陈丹, 王新伟, 薛冬, 任广伟, 2013. 不同地理种群蚜虫形态特征差异分析. *昆虫学报*, 56(12): 1452–1463.]
- Zhang RJ, 2015. Studies on DNA barcoding and morphometrics of some species of the genus *Pachycondyla* (Hymenoptera: Formicidae). Master dissertation. Guilin: Guangxi Normal University. [张荣娇, 2015. 厚结猛蚁属部分种的 DNA 条形码与形态测量学研究. 硕士学位论文. 广西师范大学.]
- Zhang RJ, Zhou XT, Tang QL, Zhou SY, 2016. Morphometrics of thirteen species of the genus *Pachycondyla* (Hymenoptera: Formicidae) in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(5): 1130–1137. [张荣娇, 周雪婷, 唐祺玲, 周善义, 2016. 中国厚结猛蚁属(膜翅目: 蚁科)十三种蚂蚁的形态测量学研究. *应用昆虫学报*, 53(5): 1130–1137.]
- Zhou SY, 2001. Guangxi Ants. Guilin: Guangxi Normal University Press. 255. [周善义, 2001. 广西蚂蚁. 桂林: 广西师范大学出版. 255.]
- Zhou YW, Ma J, Zhan QB, 2024. Application and prospect of morphometry in the identification of three commonly involved parrot eggs. *Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 38(1): 76–82. [周用武, 马骏, 詹庆斌, 2024. 形态测量学在三种常见鹦鹉蛋识别中的应用与展望. *山西师范大学学报(自然科学版)*, 38(1): 76–82.]
- Zuo DD, 2008. Study on the classification and distribution of Formicidae insects in Jilin Province. Master dissertation. Changchun: Northeast Normal University. [左代代, 2008. 吉林省蚁科昆虫分类及分布研究. 硕士学位论文. 长春: 东北师范大学.]