

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230060

中国盘腹蚁属 19 种蚂蚁的形态测量学研究

段加焕, 徐正会, 张新民*

(西南林业大学生物多样性保护学院, 云南省森林灾害预警与控制重点实验室, 云南 昆明 650224)

摘要: [目的] 探究形态测量学方法在蚁科昆虫分类中的应用价值。[方法] 采用因子分析、主成分分析和系统聚类的统计分析方法进行中国盘腹蚁属 19 种蚂蚁的形态测量学研究。[结果] 4 个主成分胸长 (MSL)、头宽 (HW)、腹柄长宽比 (LPI) 和腹柄长高比 (DPI) 有较高的载荷值, 可综合反映其他 14 个变量, 其主成分得分散点图能够明显区分该属 19 种蚂蚁; 聚类分析可将 19 种盘腹蚁聚成 4 分支, 第一支与第二亲缘关系最近, 与第四支最远, 其结果与主成分的分散点图的聚类情况以及形态特征分类结果基本一致。[结论] 形态测量学方法对蚁科昆虫的分类学研究具有很好的应用价值, 具有重要应用前景, 可为物种分类鉴定提供新的方法。

关键词: 盘腹蚁属; 形态测量; 主成分分析; 聚类分析

中图分类号: Q969.554.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2023)06-0106-09

蚂蚁是陆地上最常见的昆虫, 也是评价生态环境质量和生物多样性的重要指示生物^[1]。目前全世界已记载 16 亚科 346 属 14 110 种^[2]。随着研究的不断深入, 种类不断增加, 研究学科和方向也不断扩展, 可横跨分类学、生态学和生物学等^[3]。蚂蚁具有重要的生态和经济价值, 在生态系统中占据着重要的位置, 但有些蚂蚁也会带来危害, 例如入侵性的蚂蚁会占领、破坏入侵地的生态环境和资源, 有些则可能传播病毒或通过取食植物根茎造成经济损失^[1, 4-5]。近年来, 国内学者对蚂蚁的研究取得了很大的进步, 尤其在分类、多样性和分布格局等方面^[6-13], 但总体来说与西方发达国家还有一定的差距, 有待进一步深入研究。

盘腹蚁属 (*Aphaenogaster* Mayr), 隶属于膜翅目 (Hymenoptera)、蚁科 (Formicidae)、切叶蚁亚科 (Myrmicinae)^[14], 于 1853 年由科学家 Mayr 建立。截至目前, 盘腹蚁属全世界有效命名 206 种^[1], 国内记录 31 种^[15]。该属已知的大多数物种主要来自北半球, 以古北区最多, 东洋区次之^[16-19], 许多种类均是落叶林和针叶林中的常见种

或优势种^[19-20]。

形态测量学 (morphometrics) 是对某一性状定量描述和分析的一种统计研究方法。该方法能够定量表现昆虫的某些特征值, 利用因子分析、主成分分析和聚类分析等相结合的统计学方法, 对物种进行分类和系统发育分析。例如谷博^[21]、黄海燕^[22-23]、张荣娇^[24]、Weiseri & Kaspari^[25]、Hazarika^[26] 和 Samung^[27] 等利用形态测量学方法对蚁科昆虫进行了研究, 发现该方法有助于厘定已知的蚂蚁种类及有效分区形态相似的物种。Csősz 等用分子系统学和形态测量学方法对盘腹蚁属 *A. swammerdami* 组群进行分析, 基于系统聚类将该组群聚划分成 5 组, 并发表了 3 个新种^[28]。由此可见, 形态测量学方法在蚁科昆虫的分类中具有重要价值。

本研究以分布于中国的 19 种盘腹蚁属蚂蚁作为研究材料, 选取 14 个形态特征为变量, 通过因子分析、主成分分析和聚类分析, 对该类群进行了形态测量学研究, 区分近缘种类, 以期为该属蚂蚁的分类提供新的信息。

收稿日期: 2023-02-20 修回日期: 2023-03-15

基金项目: 云南省农业联合专项 (202101BD070001-057, 202301BD070001-151), 国家自然科学基金项目 (32060122、31760633)。

* 通讯作者: 张新民, 博士, 副教授, E-mail: zhangxm7908@163.com

1 材料与方法

1.1 研究材料

研究材料来源于本文作者采集的标本和实验室多年积累的标本, 所有实验标本均收藏于西南林业大学标本馆。

1.2 研究方法

1.2.1 标本的采集及制作 所用的蚂蚁标本是前期研究时通过样地调查法和搜索调查法采集^[1, 29], 采集时标本储存于装有无水乙醇的 2 mL 冻存管内。之后通过清洗标本→初步分类→显微镜下初步整姿→用中性树胶粘在三角纸上→再次调整蚂蚁姿态→书写标签等步骤, 将其制作成针插标本, 备用。

1.2.2 形态测量 蚂蚁标本的测量使用 SOPTOP SZM 连续变倍体视显微镜。具体步骤: 打开显微镜, 旋转目镜使测微尺水平→调节最合适的倍数→将标本插于泡沫纸板→显微镜下观察, 移动泡沫板, 使测量部位与目镜测微尺在同一水平面→读出测量数值→记录。为减少实验测量误差, 每个形态特征值重复测量 3 次后取平均值, 精确度为 0.01 mm。以此方法测量盘腹蚁属 19 种蚂蚁 14 个形态特征值, 每个物种各测量 5 头标本。14 个形态特征分别为体长 (TL)、头长 (HL)、头宽 (HW)、触角柄节长 (SL)、前胸背板宽 (PW)、胸长 (MSL)、腹柄宽 (DPW)、腹柄长 (PL)、腹柄高 (PH)、头比 (CI)、触角柄节比 (SI_1)、触角柄节比 (SI_2)、腹柄长宽比 (LPI) 和腹柄长高比 (DPI), 测量内容以及标准参考了 Borowiec & Salata^[30]、Salata & Borowiec^[31]、Salata 等^[18] 以及 Csősz 等^[28] 等 (表 1)。

1.2.3 原始数据标准化 为了消除数据单位不同、自身变异或数值相差较大所造成的影响, 使用 SPSS 26.0 软件将原始数据进行标准化处理, 得到无单位的矩阵。

1.2.4 数据分析方法 因子分析: 将具有一定相关关系的多个变量综合为几个因子, 是一种处理多变量问题的常用统计方法^[21]。以每个变量作为一个因子, 运用 SPSS 26.0 软件以“降维”的模式进行因子分析。

主成分分析: 在不丢失大量信息的前提下, 利用多个变量之间的相关性, 通过降维技术, 用少数的变量来代替多个变量的统计分析方法^[32]。当因子间具备一定相关性时, 通过研究众多因子之间的内

表 1 盘腹蚁属蚂蚁的 14 种性状

Table 1 Measured 14 morphological characters of the genus *Aphaenogaster*

特征变量 Variable quantities	定义 Definition
体长 TL	个体在伸展状态下, 上颚 (闭合) 顶端至后腹部末端的总长度
头长 HL	正面观头部唇基前缘至后头缘中央的长度
头宽 HW	正面观头部的最大宽度, 不包括复眼
触角柄节长 SL	触角柄节的直线长度, 不包括基部的球状部
胸长 MSL	侧面观前胸背板前端收缩处至后侧叶基部的对角线长度
前胸背板宽 PW	背面观前胸背板的最大宽度
腹柄宽 DPW	背面观腹柄的最大宽度
腹柄长 PL	侧面观腹柄的最大长度
腹柄高 PH	侧面观腹柄顶端至腹端的最大高度
头比 CI	头宽/头长
触角柄节比 SI_1	头宽/触角柄节长
触角柄节比 SI_2	头长/触角柄节长
腹柄长宽比 LI	腹柄长/腹柄宽
腹柄长高比 DPI	腹柄长/腹柄高

部依赖关系, 提取主成分, 运用 SPSS 26.0 软件以主成分的因子得分制作三维散点图。

系统聚类分析: 按照一定的数据连接规则和一定的层次结构将数据聚合, 形成一个层次的聚类, 从而辨别各种群之间的亲疏关系^[33]。本文选择 SPSS 26.0 软件中的系统聚类方法, 以平方欧氏距离为距离度量, 选择离差平方和为法聚类规则, 得出 19 种盘腹蚁属蚂蚁的系统聚类树状图。

2 结果与分析

2.1 测量结果

将盘腹蚁属 19 种蚂蚁标本的 14 个形态特征测量结果用 Excel 进行处理 ($n=5$), 取每种蚂蚁各性状的平均值 (表 2)。

2.2 原始数据标准化

将盘腹蚁属 19 种蚂蚁的 14 个形态特征值的平均值运用 SPSS 26.0 软件进行标准化处理的结果 (表 3)。

2.3 因子分析

选取盘腹蚁属 19 种蚂蚁的 14 个形态特征为变量, 运用 SPSS 26.0 软件进行因子分析 (表 4~6)。

KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验统计量可以

表2 盘腹蚁属19种蚂蚁的14个形态特征值的平均值

Table 2 The average value of 14 morphological characteristics of 19 species of the genus *Aphaenogaster*

物种名称 species	HL	HW	SL	CI	SI ₁	SI ₂	TL	MSL	PL	PH	PW	DPW	LPI	DPI
贝卡盘腹蚁 <i>A. beccarii</i>	1.30	0.75	1.83	0.57	2.49	1.42	5.53	1.77	0.19	0.20	0.50	0.17	0.96	1.08
角盘腹蚁 <i>A. angulata</i>	1.53	1.07	1.71	0.70	1.60	1.11	6.59	1.89	0.23	0.28	0.65	0.18	0.81	1.26
温雅盘腹蚁 <i>A. lepida</i>	1.43	1.12	1.68	0.78	1.51	1.17	6.37	1.79	0.23	0.27	0.64	0.18	0.84	1.26
西藏盘腹蚁 <i>A. tibetana</i>	1.29	1.06	1.12	0.83	1.05	0.87	5.16	1.51	0.20	0.24	0.63	0.19	0.83	1.04
舒尔盘腹蚁 <i>A. schurri</i>	1.36	1.06	1.53	0.78	1.45	1.13	6.01	1.76	0.24	0.27	0.59	0.19	0.88	1.27
凯氏盘腹蚁 <i>A. caeciliae</i>	1.33	1.10	1.40	0.83	1.27	1.05	5.66	1.63	0.20	0.27	0.56	0.16	0.74	1.21
家盘腹蚁 <i>A. famelica</i>	1.34	1.14	1.44	0.85	1.26	1.07	5.96	1.70	0.24	0.29	0.61	0.21	0.86	1.15
雕刻盘腹蚁 <i>A. exasperata</i>	1.34	1.01	1.60	0.75	1.58	1.19	6.28	1.82	0.23	0.29	0.57	0.18	0.80	1.25
小刺盘腹蚁 <i>A. pumilopuncta</i>	1.37	0.89	1.72	0.65	1.92	1.25	5.63	1.71	0.18	0.24	0.50	0.16	0.74	1.15
风伯盘腹蚁 <i>A. fengbo</i>	1.30	1.02	1.48	0.78	1.45	1.14	5.61	1.71	0.20	0.27	0.71	0.16	0.73	1.23
史氏盘腹蚁 <i>A. smythiesii</i>	1.13	0.94	1.20	0.83	1.27	1.06	5.21	1.54	0.19	0.23	0.52	0.16	0.80	1.20
韦氏盘腹蚁 <i>A. weigoldi</i>	1.08	0.83	1.15	0.77	1.39	1.07	4.49	1.34	0.16	0.24	0.48	0.14	0.69	1.14
玄天盘腹蚁 <i>A. xuantian</i>	1.31	1.05	1.58	0.80	1.50	1.20	5.77	1.71	0.20	0.26	0.62	0.18	0.78	1.14
费氏盘腹蚁 <i>A. feae</i>	1.32	0.79	1.74	0.60	2.21	1.32	5.85	1.83	0.26	0.26	0.55	0.16	1.01	1.63
王爷盘腹蚁 <i>A. wangye</i>	1.22	0.95	1.28	0.78	1.35	1.05	5.35	1.57	0.16	0.24	0.55	0.15	0.67	1.08
王天盘腹蚁 <i>A. wangtian</i>	1.41	0.84	1.72	0.60	2.05	1.22	6.17	1.85	0.25	0.23	0.57	0.19	1.11	1.32
包公盘腹蚁 <i>A. baogong</i>	1.25	0.83	1.70	0.67	2.05	1.37	5.53	1.65	0.16	0.23	0.48	0.16	0.70	1.05
大林盘腹蚁 <i>A. tipuna</i>	1.33	0.93	1.49	0.70	1.61	1.12	5.48	1.67	0.22	0.26	0.53	0.16	0.84	1.38
塞奇盘腹蚁 <i>A. sagei</i>	1.27	1.05	1.06	0.82	1.01	0.84	5.02	1.48	0.19	0.24	0.60	0.16	0.79	1.16

表3 盘腹蚁属19种蚂蚁的14个形态特征值的平均值标准化处理结果

Table 3 The average of standardized results from 14 morphological characteristic values in the 19 studied *Aphaenogaster* species

物种名称 species	ZHL	ZHW	ZSL	ZCI	ZSI ₁	ZSI ₂	ZTL	ZMSL	ZPL	ZPH	ZPW	ZDPW	ZLPI	ZDPI
贝卡盘腹蚁 <i>A. beccarii</i>	-0.13	-1.84	1.41	-1.94	2.30	1.89	-0.26	0.62	-0.56	-2.36	-1.21	0.22	1.29	-0.95
角盘腹蚁 <i>A. angulata</i>	2.20	0.84	0.89	-0.49	0.04	-0.18	1.82	1.45	0.65	1.24	1.29	0.55	-0.14	0.34
温雅盘腹蚁 <i>A. lepida</i>	1.21	1.24	0.79	0.44	-0.19	0.24	1.38	0.74	0.68	0.71	1.05	0.53	0.22	0.39
西藏盘腹蚁 <i>A. tibetana</i>	-0.25	0.79	-1.60	0.98	-1.34	-1.84	-0.99	-1.22	-0.31	-0.67	0.95	1.11	0.12	-1.30
舒尔盘腹蚁 <i>A. schurri</i>	0.44	0.72	0.13	0.43	-0.34	-0.09	0.66	0.56	1.10	0.87	0.24	1.04	0.54	0.44
凯氏盘腹蚁 <i>A. caeciliae</i>	0.18	1.08	-0.42	0.97	-0.78	-0.60	-0.02	-0.37	-0.29	0.61	-0.21	-0.43	-0.71	0.02
家盘腹蚁 <i>A. famelica</i>	0.33	1.44	-0.22	1.23	-0.80	-0.45	0.57	0.13	1.26	1.43	0.56	2.33	0.33	-0.41
雕刻盘腹蚁 <i>A. exasperata</i>	0.26	0.33	0.43	0.16	0.00	0.37	1.20	1.02	0.81	1.50	-0.09	0.81	-0.15	0.30
小刺盘腹蚁 <i>A. pumilopuncta</i>	0.63	-0.64	0.93	-1.03	0.86	0.74	-0.08	0.23	-0.88	-0.41	-1.10	-0.82	-0.72	-0.43
风伯盘腹蚁 <i>A. fengbo</i>	-0.06	0.42	-0.06	0.46	-0.32	-0.02	-0.12	0.21	-0.33	0.74	2.24	-0.60	-0.83	0.13
史氏盘腹蚁 <i>A. smythiesii</i>	-1.78	-0.26	-1.26	1.01	-0.77	-0.56	-0.89	-0.98	-0.65	-0.83	-0.80	-0.84	-0.17	-0.09
韦氏盘腹蚁 <i>A. weigoldi</i>	-2.31	-1.19	-1.46	0.32	-0.49	-0.50	-2.31	-2.37	-1.44	-0.69	-1.43	-1.55	-1.19	-0.54
玄天盘腹蚁 <i>A. xuantian</i>	0.02	0.68	0.35	0.67	-0.19	0.43	0.20	0.18	-0.13	0.33	0.84	0.36	-0.38	-0.50
费氏盘腹蚁 <i>A. feae</i>	0.06	-1.51	1.04	-1.61	1.59	1.25	0.37	1.04	1.77	0.28	-0.35	-0.57	1.68	3.07
王爷盘腹蚁 <i>A. wangye</i>	-0.88	-0.14	-0.89	0.45	-0.59	-0.60	-0.61	-0.77	-1.49	-0.53	-0.39	-1.23	-1.34	-0.94
王天盘腹蚁 <i>A. wangtian</i>	0.94	-1.09	0.93	-1.64	1.18	0.55	0.99	1.22	1.46	-1.09	0.01	1.11	2.60	0.81
包公盘腹蚁 <i>A. baogong</i>	-0.65	-1.17	0.88	-0.85	1.20	1.56	-0.27	-0.19	-1.36	-0.77	-1.39	-0.78	-1.05	-1.18
大林盘腹蚁 <i>A. tipuna</i>	0.21	-0.34	-0.02	-0.49	0.06	-0.13	-0.38	-0.06	0.30	0.22	-0.66	-0.77	0.16	1.22
塞奇盘腹蚁 <i>A. sagei</i>	-0.42	0.64	-1.84	0.94	-1.43	-2.07	-1.27	-1.44	-0.59	-0.59	0.46	-0.47	-0.26	-0.36

表 4 KMO 和 Bartlett 检验
Table 4 KMO and Bartlett's Test

KMO 取样适切性量数 Kaiser-Meyer-Olkin measure of sampling adequacy		0.61
近似卡方 Approximate Chi-Square		546.29
巴特利特球形度检验 Bartlett's sphericity test	df	91
	Sig.	0.00

检验各个变量是否各自独立。由表 4 可知, $KMO=0.61>0.6$ 时, 原有变量满足因子分析的前提条件, 说明可做因子分析。Bartlett's 球状检验结果显示: 显著性 $=0<0.05$, 说明各变量间具有很强的相关性, 因子分析有效。

第 1 主成分、第 2 主成分、第 3 主成分和第 4 主成分的特征值分别为: 6.14、4.52、1.28、1.04, 这 4 个成分各自累计值都超过 1, 其余成分的累计值都远小于 1, 有的成分累计值接近或等于 1; 第 1 主成分、第 2 主成分、第 3 主成分和第 4 主成分的贡献率分别为 43.84%、32.35%、9.14%、7.43%; 这 4 个成分累积贡献率达到 92.76%, 因子分析效果理想 (表 5)。由此可见, 抽取这 4 个成分可以综合反映 14 个形态特征值, 能够涵盖大

多数变量的基本信息, 同时也可分析得到 4 个主成分的因子负荷值 (表 5)。

由表 6 可知, 盘腹蚁属 19 种蚂蚁中第 1 主成分的负荷值较第 2 主成分、第 3 主成分和第 4 主成分大, 且第 1 主成分各变量间负荷值大多相差较大, 少部分变量间负荷值相差较小, 说明第 1 主成分能够较好的反应 14 个形态特征值, 但并不能反应全部形态特征值, 有必要进行进一步的分析。在第 1 主成分、第 2 主成分、第 3 主成分和第 4 主成分中, 具有最大因子负荷值的性状分别是胸长 (MSL)、头宽 (HW)、腹柄长宽比 (LPI) 和腹柄长高比 (DPI), 所以第 1 主成分、第 2 主成分、第 3 主成分和第 4 主成分分别由胸长 (MSL)、头宽 (HW)、腹柄长宽比 (LPI) 和腹柄长高比 (DPI), 同时, 由于腹柄长宽比 (LPI) 是腹柄长 (PL) 与腹柄宽 (DPW) 的比值, 所以第 3 主成分在一定程度上间接受到了腹柄长 (PL) 与腹柄宽 (DPW) 的影响, 同理, 第 4 主成分受到了腹柄长 (PL) 与腹柄高 (PH) 的影响。

表 5 盘腹蚁属 19 种蚂蚁的 14 个形态特征值的总方差解释

Table 5 Interpretation of the total variance of 14 morphological characteristic values of 19 species of the genus *Aphaenogaster*

成分 Ingredient	初始特征值 Initial eigenvalues			提取载荷平方和 Extraction sums of squared loadings		
	特征值 Eigenvalue	贡献率/% rate of contribution	累积/% Accumulation	总计 amount	方差百分比/% Op optional variance percent	累积/% Accumulation
1	6.14	43.84	43.84	6.14	43.84	43.84
2	4.53	32.35	76.19	4.52	32.35	76.19
3	1.28	9.14	85.33	1.28	9.14	85.33
4	1.04	7.43	92.76	1.04	7.43	92.76
5	0.50	3.60	96.36			
6	0.29	2.10	98.46			
7	0.12	0.86	99.31			
8	0.08	0.53	99.84			
9	0.02	0.11	99.95			
10	0.00	0.03	99.98			
11	0.00	0.01	99.99			
12	0.00	0.00	99.99			
13	0.00	0.00	99.99			
14	0.00	0.00	100.00			

表6 盘腹蚁属19种蚂蚁的形态特征主成分负荷值

Table 6 Loading of principal components on the morphological characteristics of 19 species of the genus *Aphaenogaster*

特征变量 Variable quantities	负荷值 Loading value			
	第1主成分 PC1	第2主成分 PC2	第3主成分 PC3	第4主成分 PC4
HL	0.76	0.44	0.22	-0.09
HW	-0.15	0.95	0.18	-0.04
SL	0.90	-0.26	0.34	0.02
CI	-0.66	0.70	0.02	0.02
SI ₁	0.69	-0.70	0.11	-0.04
SI ₂	0.67	-0.59	0.31	0.06
TL	0.84	0.42	0.24	0.01
MSL	0.96	0.13	0.17	0.04
PL	0.77	0.43	-0.44	0.05
PH	0.25	0.78	0.17	0.46
PW	0.15	0.81	0.05	-0.05
DPW	0.47	0.59	-0.12	-0.57
LPI	0.71	-0.09	-0.62	-0.31
DPI	0.59	0.05	-0.51	0.61

2.4 主成分分析

根据因子分析结果, 计算主成分特征向量负荷值, 然后根据主成分特征向量负荷值计算(表7)4个主成分的得分, 表达式中Z表示标准化后的变量。主成分的表达式如下:

$$Y1=0.31 \times ZHL - 0.06 \times ZHW + 0.36 \times ZSL - 0.27 \times ZCI + 0.28 \times ZSI_1 + 0.27 \times ZSI_2 + 0.34 \times TL + 0.39 \times ZMSL + 0.31 \times ZPL + 0.10 \times ZPH + 0.06 \times ZPW + 0.19 \times ZDPW + 0.29 \times ZLPI + 0.24 \times ZDPI$$

$$Y2=0.21 \times ZHL + 0.45 \times ZHW - 0.12 \times ZSL + 0.33 \times ZCI - 0.33 \times ZSI_1 - 0.28 \times ZSI_2 + 0.20 \times TL + 0.07 \times ZMSL + 0.21 \times ZPL + 0.37 \times ZPH + 0.38 \times ZPW + 0.28 \times ZDPW - 0.04 \times ZLPI + 0.02 \times ZDPI$$

$$Y3=0.19 \times ZHL + 0.16 \times ZHW + 0.30 \times ZSL + 0.02 \times ZCI + 0.09 \times ZSI_1 + 0.28 \times ZSI_2 + 0.22 \times TL + 0.15 \times ZMSL - 0.39 \times ZPL + 0.15 \times ZPH + 0.04 \times ZPW - 0.10 \times ZDPW - 0.54 \times ZLPI - 0.46 \times ZDPI$$

$$Y4= - 0.08 \times ZHL - 0.04 \times ZHW + 0.02 \times ZSL + 0.02 \times ZCI - 0.04 \times ZSI_1 + 0.06 \times ZSI_2 + 0.01 \times TL + 0.03 \times ZMSL + 0.05 \times ZPL + 0.45 \times ZPH - 0.04 \times ZPW - 0.56 \times ZDPW - 0.31 \times ZLPI + 0.60 \times ZDPI$$

在上述表达式中各变量是标准化变量, 负荷值

表7 特征向量矩阵

Table 7 The matrix of feature vector

特征变量 Variable quantities	第1主成分 PC1	第2主成分 PC2	第3主成分 PC3	第4主成分 PC4
HL	0.31	0.21	0.19	-0.08
HW	-0.06	0.45	0.16	-0.04
SL	0.36	-0.12	0.30	0.02
CI	-0.27	0.33	0.02	0.02
SI ₂	0.28	-0.33	0.09	-0.04
SI ₁	0.27	-0.28	0.28	0.06
TL	0.34	0.20	0.22	0.01
MSL	0.39	0.07	0.15	0.03
PL	0.31	0.21	-0.39	0.05
PH	0.10	0.37	0.15	0.45
PW	0.06	0.38	0.04	-0.04
DPW	0.19	0.28	-0.10	-0.56
LPI	0.29	-0.04	-0.54	-0.31
DPI	0.24	0.02	-0.46	0.60

的绝对值越大, 贡献也就越大; 根据表7, 结合主成分的表达式可得到19种蚂蚁4个主成分的得分。

胸长(MSL)、头宽(HW)、腹柄长宽比(LPI)和腹柄长高比(DPI)是主要性状。此外, 柄节长(SL)、柄节比(SI₁)和腹柄高(PH)3个性状对数据有着间接的影响。这7个性状基本涵盖了所涉及的14个性状特征, 利用上述主要性状能够明显区分19种蚂蚁。由于第1主成分、第2主成分、第3主成分的累积贡献率为85.33%, 超过了85%, 且第4主成分形态特征负荷值大多小于0.1, 所以本文选取了1主成分、第2主成分、第3主成分的因子得分数据制作三维散点图(图1)。

从主成分的三维散点分布图(图1)可以看出, 以第1主成分、第2主成分和第3主成分构成的散点图能够较明显区分盘腹蚁属19种蚂蚁, 但费氏盘腹蚁和王天盘腹蚁存在重叠现象; 包公盘腹蚁、贝卡盘腹蚁和小刺盘腹与其他几组分开最远。此外, 散点图总体表现为形态相似的物种其散点分布是相互靠近的, 而那些形态相差较大的物种, 其散点分布也呈现出不同程度的远离。由此可见, 以3个主成分做出的散点图能够将19种蚂蚁区分开。

2.5 系统聚类分析

基于欧式距离, 利用SPSS 26.0软件, 以

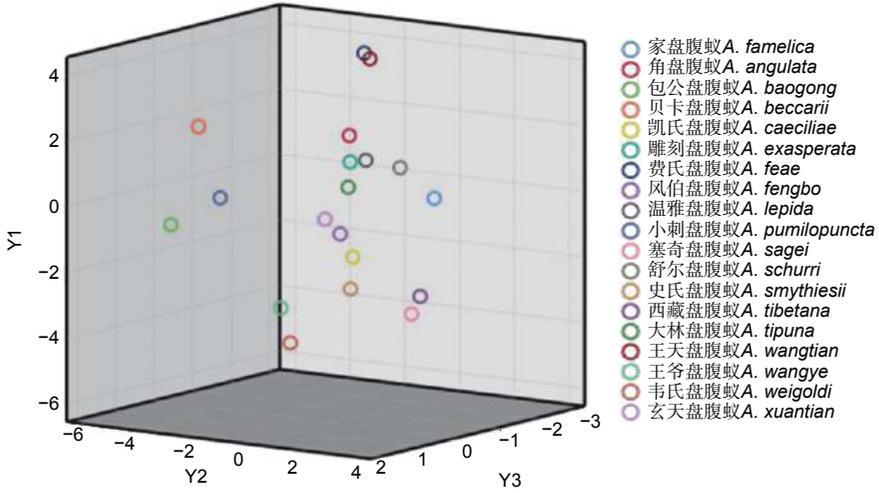


图 1 盘腹蚁属 19 种蚂蚁形态测量学主成分得分三维散点图

Fig. 1 Three-dimensional scatter plot of principal component scores of 19 species of the genus *Aphaenogaster*

14 个性状为变量, 对盘腹蚁属 19 种蚂蚁进行系统聚类分析。由图 2 可知, 以 20 为标度将盘腹蚁属 19 种蚂蚁聚成了 2 个大支。费氏盘腹蚁、王天盘腹蚁、包公盘腹蚁、贝卡盘腹蚁和小刺盘腹蚁聚成 1 支, 其余 14 种聚成 1 支。以 15 为标度则被聚成了 4 支。第一支有舒尔盘腹蚁、雕刻盘腹蚁和角盘腹蚁等 9 个种; 第二支有 5 种, 分别为史氏盘腹蚁、韦氏盘腹蚁、王爷盘腹蚁、塞奇盘腹蚁和西藏盘腹蚁; 第三支只有费氏盘腹蚁和王天盘腹蚁

两种; 第四支有包公盘腹蚁、贝卡盘腹蚁和小刺盘腹蚁 3 种。根据系统聚类树状图中的种间距离判断彼此间的亲缘关系得出: 第一支与第二支的相似度最高, 亲缘关系最近; 与第三支的相似度次之, 亲缘关系较远; 与第四支的相似度最低, 亲缘关系最远。同理, 第三和第四支之间的亲缘关系最近。各支种间相似度最高, 亲缘关系最近, 与其他支的物种亲缘关系最远。结果表明: 形态特征相似的种类会聚到一起, 距离越近, 亲缘关系越近。

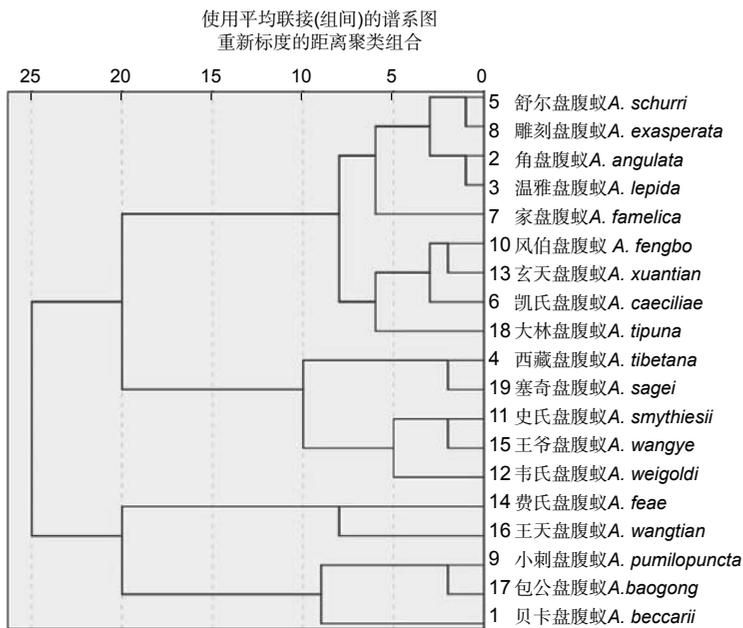


图 2 盘腹蚁属 19 种蚂蚁系统聚类

Fig. 2 Systematic clustering of 19 species of the genus *Aphaenogaster*

3 讨论

本文选取 19 种盘腹蚁的 14 个形态特征值作为变量,通过因子分析和主成分分析,抽取了胸长 (MSL)、头宽 (HW)、腹柄长宽比 (LPI) 和腹柄长高比 (DPI) 4 个成分进行综合分析,4 个主成分累积贡献率达到了 92.76%,说明因子分析效果明显。而张荣娇在研究厚结猛蚁属 13 种的时候,抽取的主成分是头长 (HL),头宽 (HW),头比 (CI),触角柄节比 (SI)^[24];谷博在中国蚁亚科形态测量学研究中抽取的主成分为体长 (TL)、触角柄节比 (SI)、前胸比 (PI)^[21]。不同类群的蚂蚁由于形态特征、栖息生境等方面存在较大差异,导致了不同类群分类由不同的性状特征所决定。虽然各类群所抽取的主成分不同,但均可以实现区分物种的目的,因此我们认为形态测量学的研究在物种分类方面具有一定的价值,可以在其它类群间推广应用。

盘腹蚁属 19 种蚂蚁系统聚类结果与主成分得分散点图结果基本一致,与传统的形态分类的结果大致吻合。根据系统聚类结果费氏盘腹蚁、王天盘腹蚁、包公盘腹蚁、贝卡盘腹蚁和小刺盘腹蚁 5 种头在复眼后明显收缩延伸的物种,具有更近的亲缘关系,这与传统形态分类结果十分符合;温雅盘腹蚁和角盘腹蚁以及西藏盘腹蚁和塞奇盘腹蚁等在形态特征上较相似的物种,在系统聚类结果和主成分得分散点图上也均表现出较近的亲缘关系,且散点图上它们均未出现重叠现象,由此可见,形态测量方法物种分类、区分相似种、研究物种间亲缘关系等方面具有一定价值。系统聚类结果中史氏盘腹蚁和王爷盘腹蚁的亲缘关系要比王爷盘腹蚁和韦氏盘腹蚁更近,而在散点图中,史氏盘腹蚁距离王爷盘腹蚁和韦氏盘腹蚁要更远,与系统聚类结果存在微小差异;同样,大林盘腹蚁在系统聚类中的亲缘关系与凯氏盘腹蚁、风伯盘腹蚁和玄天盘腹蚁要比家盘腹蚁、角盘腹蚁、温雅盘腹蚁和雕刻盘腹蚁更近,在散点图中,大林盘腹蚁与角盘腹蚁、温雅盘腹蚁和雕刻盘腹蚁的距离比较接近,没有显示出与凯氏盘腹蚁、风伯盘腹蚁和玄天盘腹蚁的亲缘关系更近。本研究分析认为,产生此种现象的原因可能是由于标本来源多样化导致的,即同一种蚂蚁,由于生境的不同导致了外部形态差异以及测量过程中可能存在视觉误差,致使个别性状测量结果具有一

定误差,影响了数据的分析,但总体上与形态分类结果一致。

总体而言,形态特征测量值能够对昆虫外部形态的细微变异结构进行量化分析,可以反映物种在生态学和系统发育史上的差异,从而区分同源类群^[25]。黄海燕^[22-23]、张荣娇^[24]、谷博^[21]、Weiseri & Kaspari^[25]、Csősz 等^[28]、Hazarika^[26] 和 Samung^[27] 等都采用了形态测量学的方法开展了相关的研究,均证明该方法可用于蚂蚁物种分类。形态测量学方法对物种分类、区分相似种、研究物种间亲缘关系等方面均具有重要意义。但是同一种蚂蚁的形态特征是由内在基因和外部环境共同决定的,形态测量学不能对蚂蚁的外部特征进行完整描述和数据统计,不能单一的使用形态测量学进行分类学研究,需要同传统形态学方法相结合,才能进一步确定蚂蚁的分类地位。

4 结论

19 种盘腹蚁在 14 个性状变量上存在差异,主要表现在胸长 (MSL)、头宽 (HW)、腹柄长宽比 (LPI) 和腹柄长高比 (DPI) 这 4 个性状上,这 4 个性状基本涵盖该属 19 种蚂蚁形态测量学研究所涉及的 14 个性状特征;主成分得分散点图能够明显区分该属 19 种蚂蚁;通过系统聚类,将盘腹蚁属 19 种蚂蚁分为 4 支,第一支与第二支的相似度最高,亲缘关系最近,与第四支的相似度最低,亲缘关系最远;各支种间亲缘关系则最近,与其他支的种亲缘关系最远,其结果与主成分得分散点图的聚类情况以及形态特征分类结果基本一致。运用形态测量学方法对蚁科昆虫进行物种分类鉴定是可行的,具有重要应用前景,可为分类鉴定提供新的方法。

参考文献:

- [1] 徐正会. 西双版纳自然保护区蚁科昆虫生物多样性研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2002.
- [2] BOLTON B. An online catalog of the ants of the world[DB/OL]. <http://antcat.org/>, retrieved on 16 February 2023.
- [3] 高冬梅, 高立洪, 李 萍, 等. 基于文献计量分析的蚁科昆虫研究[J]. 应用昆虫学报, 2021, 58 (1): 211-219.
- [4] 吴 坚, 王常禄. 中国蚂蚁[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995.
- [5] 周善义. 广西蚂蚁[M]. 桂林: 广西师范大学出版, 2001.
- [6] 陈 超, 徐正会, 张新民, 等. 四川大凉山中部蚂蚁物种多样性研

- 究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2022, 4(2): 218-230.
- [7] 和玉成, 徐正会, 张新民, 等. 四川大凉山西部蚂蚁的物种多样性[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(3): 104-115.
- [8] 韩秀, 徐正会, 张新民, 等. 四川大凉山东部蚂蚁物种多样性研究[J]. 四川农业大学学报, 2021, 39(9): 742-754.
- [9] 祁彪, 刘霞, 徐正会, 等. 四川鞍子河自然保护区及邻近地区蚂蚁群落研究[J]. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2021, 41(2): 89-98.
- [10] 翟奖, 钱昱含, 徐正会, 等. 四川鞍子河自然保护区蚂蚁物种的分布格局[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(6): 612-618.
- [11] 熊忠平, 钱昱含, 徐正会, 等. 祁连山国家公园青海片区蚂蚁物种的分布格局[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(11): 92-97.
- [12] 郭宁妍, 钱昱含, 徐正会, 等. 滇西南地区蚂蚁物种分布格局研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2022, 37(1): 10-23.
- [13] 钱怡顺, 陈超, 祁彪, 等. 四川大凉山中部蚁科昆虫分布格局研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2022, 43(2): 111-120.
- [14] 潘扬莎. 中国大头蚁属和盘腹蚁属(膜翅目: 蚁科: 切叶蚁亚科)昆虫系统分类研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2007.
- [15] BOLTON B. An online catalog of the ants of the world[DB/OL]. <http://www.antwiki.org/>, retrieved on 16 February 2023.
- [16] SCHIFANI E, COSTA S, MEI M, *et al.* A new species for the Italian fauna: *Aphaenogaster strioloides*, not *A. crocea*, inhabits Pantelleria Island (Hymenoptera: Formicidae)[J]. *Fragmenta Entomologica*, 2021, 53(1): 21-23.
- [17] ALICATA A, SCHIFANI E. Three endemic *Aphaenogaster* from the Siculo-Maltese archipelago and the Italian Peninsula: part of a hitherto unrecognized species group from the Maghreb (Hymenoptera: Formicidae: Myrmicinae)[J]. *Acta Entomologica Musei Nationalis Pragae*, 2019, 59: 1-16.
- [18] SALATA S, KARAMAN C, KIRAN K, *et al.* Review of the *Aphaenogaster splendida* Species-Group (Hymenoptera: Formicidae)[J]. *Annales Zoologici*, 2021, 71(2): 297-343.
- [19] GALKOWSKI C, AUBERT C, BLATRIX R. *Aphaenogaster ichnusa* Santschi 1925, bona species, and redescription of *Aphaenogaster subterranea* (Latreille, 1798) (Hymenoptera, Formicidae)[J]. *Sociobiology*, 2019, 66: 420-425.
- [20] SALATA S, BOROWIEC L. Redescription of *Aphaenogaster muschtaidica* Emery, 1908 with a key to *gibbosa* species group[J]. *Asian Myrmecology*, 2018, 10: 1-15.
- [21] 谷博. 中国蚁亚科形态测量学分析[D]. 桂林: 广西师范大学, 2019.
- [22] 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.
- [23] 黄海燕, 陈媛, 周善义. 光亮黑蚁与亮腹黑褐蚁(膜翅目: 蚁科)的形态测量学分析[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2015, 33(2): 96-102.
- [24] 张荣娇, 周雪婷, 唐祺玲, 周善义. 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[J]. *应用昆虫学报*, 2016, 53(5): 1130-1137.
- [25] WEISER M D, KASPARI M. Ecological morphospace of new world ants[J]. *Ecological Entomology*, 2006, 31(2): 131-142.
- [26] HAZARIKA H N, KHANIKOR B. Integration of morphological and molecular taxonomic characters for identification of *Odon-toponera denticulata* (Hymenoptera: Formicidae: Ponerinae) with the description of the antennal sensilla[J]. *Zoologischer Anzeiger*, 2021, 293: 89-100.
- [27] SAMUNG Y, CHAHAIHPHONGPACHARA T, RUANGSITTI-CHAI J, *et al.* Species discrimination of three *Odontomachus* (Formicidae: Ponerinae) species in Thailand using outline morphometrics[J]. *Insects*, 2022, 13: 287-299.
- [28] CSÖSZ S, LÖSS A C, FISHER B L. Taxonomic revision of the Malagasy *Aphaenogaster swammerdami* group (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Peer J*, 2021, 9(3).
- [29] 徐正会, 褚姣娇, 张成林, 等. 藏东南工布自然保护区的蚂蚁种类及分布格局[J]. *四川动物*, 2011, 30(1): 118-123.
- [30] BOROWIEC L, SALATA S. Review of Mediterranean members of the *Aphaenogaster ceconii* group (Hymenoptera: Formicidae), with description of four new species[J]. *Zootaxa*, 2014, 3861(1): 40-60.
- [31] SALATA B, BOROWIEC L. new species of the *Aphaenogaster ceconii* group (Hymenoptera: Formicidae) from Rhodes[J]. *Zootaxa*, 2016, 4170(1): 194-200.
- [32] 黄莉雅, 黄俊才, 廖南燕, 等. 基于主成分分析与聚类分析的森林质量评价-以广西国有博白林场为例[J]. *广西林业科学*, 2022, 51(4): 543-548.
- [33] 赵宇翔, 李彦彬, 张海涛, 等. 基于聚类分析的水资源开发利用分区研究[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(11): 40-44.

Morphometric Studies on 19 Species of the Genus *Aphaenogaster* in China

DUAN Jia-huan, XU Zheng-hui, ZHANG Xin-min

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

Abstract: [Objective] To explore the application of morphometry in the classification of Formicidae. [Methods] Factor analysis, principal component analysis and systematic clustering statistical analysis were used to study the morphometric characteristics of 19 species of ants from the genus *Aphaenogaster* in China. [Results] The four principal components, including thorax length (MSL), head width (HW), petiole index (LPI) and petiole index (DPI) had high loading values, which could comprehensively reflect the other 14 variables. The scatter plot of the principal components could clearly distinguish 19 species of this genus. The results of cluster analysis showed that the 19 species of the genus *Aphaenogaster* could cluster into four branches. The first branch is closest to the second branch and the farthest from the fourth. The results were basically consistent with the clustering situation of the scatter diagram of principal components and the classification results of morphological characteristics. [Conclusion] The research method of morphometry has a good application in the taxonomic study of Formicidae, and has an important application prospect, which can provide a new method for species classification and identification.

Keywords: *Aphaenogaster*; Morphometric measurement; Principal component analysis; Hierarchical cluster analysis

(责任编辑: 崔 贝)