基于形态学标记的吕梁山区中华蜜蜂的遗传多样性研究*

张 宇[1, 2**] 郭丽娜[1, 2***] 郭 媛[2, 3***]

（1. 山西农业大学动物科学学院，太谷 030801；2. 畜禽遗传资源发掘与精准育种山西省重点实验室，太谷 030801；3. 山西农业大学园艺学院，太谷 030801）

摘 要 **【目的】** 利用形态标记解析吕梁山区 6 个地理种群中华蜜蜂 *Apis cerana cerana* 的遗传多样性，筛选优良性状种群，为吕梁山区的中华蜜蜂遗传资源保护与定向选育提供科学依据。**【方法】** 基于 Ruttner 形态鉴定法及《NY/T2364-2013》标准，测定 37 项形态指标（540 只工蜂），通过单因素方差分析、主坐标分析、飞行能力相关指标分析、采集力相关指标分析、体型大小相关指标分析、泌蜡能力相关指标分析及聚类分析，综合分析目前中华蜜蜂种群分化及遗传多样性。**【结果】** 吕梁山区 6 个样点中华蜜蜂的 37 个形态指标中有 20 个形态指标存在显著差异（P<0.05），其中米脂县种群表现出最优的飞行能力和较强的泌蜡能力，子洲县种群则具有较长的吻部，吴堡县种群在多数指标上表现较弱。吕梁山区 6 个样点间吴堡县中华蜜蜂采集力相关指标测定值均低，采集力最差。米脂县、子洲县、清涧县 3 个样点的中华蜜蜂体型较大，吴堡县最小。米脂县、清涧县、石楼县工蜂的泌蜡腺发育情况良好，泌蜡能力更强，吴堡县最弱。19 个经济性能相关指标在不同样点间形态发生了一定的改变，但离散程度较低，没有显著区分。基于形态学指标的聚类结果与采样点地理分布基本一致。**【结论】** 吕梁山区 6 个样点的中华蜜蜂种群在形态特征上存在显著分化，且与经济性能相关的性状呈现明显的地域性差异。米脂县种群表现出最优的飞行能力，子洲县种群则具有较长的吻部，米脂县、子洲县和清涧县的个体体型较大，而米脂县、清涧县和石楼县的工蜂泌蜡能力较优，吴堡县种群在飞行能力、采集力和体型大小等指标上均表现较弱。

关键词 中华蜜蜂；吕梁山区；形态学标记；遗传多样性；种质资源

Morphological marker-based study of the genetic diversity of *Apis cerana cerana* in the Lüliang Mountain Area

ZHANG Yu[1, 2**] GUO Li-Na[1, 2***] GUO Yuan[2, 3***]

(1. College of Animal Science，Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Livestock and Poultry Genetic Resource Exploration and Precision Breeding, Taigu 030801, China; 3. College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract **[Aim]** To analyze the genetic diversity of six geographic populations of *Apis cerana cerana* in the Lüliang Mountain Area using morphological markers, in order to identify populations with superior traits, and thereby provide a basis for the conservation of valuable genetic resources and the selective breeding of this species in this region. **[Methods]** Based on Ruttner's morphometric methods and the NY/T 2364-2013 standard, 37 morphological traits were measured in 540 worker bees. Data, including flight capacity-related indices, foraging ability-related indices, body size-related indices and wax secretion ability-related indices, were analyzed using one-way ANOVA, principal coordinate analysis, and cluster analysis, to comprehensively evaluate population differentiation and genetic diversity. **[Results]** The results indicate that 20 of the 37 morphological traits analyzed significantly differed (P<0.05) among the six sampling sites in the Lüliang Mountain Area. The

*资助项目 Supported projects：国家重点研发计划（2022YFD1600201-3）；国家现代农业产业技术体系项目（CARS-44-KXJ2）

**第一作者 First author，E-mail：15183537865@163.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors，E-mail：linaguo@126.com；yysgy3@163.com

收稿日期 Received：2025-07-08；接受日期 Accepted：2025-08-18

Mizhi County population had the best flight performance and strong wax secretion ability, whereas the Zizhou County population had the longest proboscis. The Wubu County population performed poorly in most traits. Among the six sampling sites, the foraging-related metrics of the Wubu County population were consistently the lowest, indicating the weakest foraging capacity. Bees from the Mizhi, Zizhou, and Qingjian Counties were larger in body size, whereas those from Wubu County were the smallest. Worker bees from Mizhi, Qingjian, and Shilou Counties displayed well-developed wax glands and stronger wax secretion ability, whereas those from Wubu County were the weakest in these respects. Among the 19 economic performance-related traits analyzed, some morphological variations were observed across sites, but the degree of variation was not statistically significant. Clustering results based on morphological traits were largely consistent with the geographical distribution of the sampling sites. **[Conclusion]** The results of this study indicate significant morphological differentiation among geographically distinct populations of *A. c. cerana* in the Lüliang Mountain Area, along with marked regional variation in economically important traits. The Mizhi County population has the best flight performance, whereas the Zizhou County population has the longest proboscis. Worker bees from the Mizhi, Zizhou, and Qingjian Counties have larger body sizes, and those from Mizhi, Qingjian, and Shilou Counties have superior wax secretion capacity. In contrast, the Wubu County population had the weakest flight and foraging ability, and the smallest body size. These differences may reflect geographical isolation, ecological adaptation, and localized selection pressures.

Key words　*Apis cerana cerana*; Lüliang Mountain Area; morphological markers; genetic diversity; germplasm resources

中华蜜蜂 *Apis cerana cerana*（简称中蜂）是东方蜜蜂 *Apis cerana* 的指名亚种，隶属于节肢动物门 Arthropoda 昆虫纲 Insect 膜翅目 Hymenoptera 蜜蜂科 Apidae 蜜蜂属 *Apis*（曹焕喜等, 2022），广泛分布于我国 30 个省（直辖市、自治区），可划分为北方中蜂、华南中蜂、华中中蜂、云贵高原中蜂、长白山中蜂、海南中蜂、阿坝中蜂、滇南中蜂、西藏中蜂和巴塘中蜂 10 个不同的地理类型（Liu *et al*., 2022；黎梅等, 2025）。吕梁山区中蜂属于北方中蜂，具有体型大、耐寒性强、分蜂性弱、适应性强、群式稳定（7 框以上）等优势，但抗巢虫能力弱，易感幼虫腐臭病等（霍履远, 2024）。该区是我国北方中蜂遗传资源最丰富的地区之一，但面临气候变化、外来蜂种入侵等导致的基因杂合与资源稀释风险（宋美英等, 2022）。因此挖掘并保护优异中蜂遗传资源已成为保护本土遗传资源的关键。

为了准确评估中蜂的遗传多样性水平并制定科学的保护策略，需要采用多维度分析方法。遗传变异性高低的评估通常需要综合多种数据和指标，其中形态学测定是重要的分析手段之一（葛平珍等, 2021）。形态标记是指一类可以通过肉眼观察到的特定形态特征，具有直观、经济、容易操作的优点，对物种间的亲缘关系进行鉴定及分类。长期以来，物种的分类及鉴定都是以形态学特征为主要依据（曹联飞等, 2017）。每个蜂种都有各自独特的形态特征，根据差异形态特征，可以将各不同品种、品系的蜜蜂区别开来（García *et al*., 2022）。Ruttner（1988）在 1988 年提出的 37 个蜜蜂形态指标被广泛应用于形态测定中，包括头、翅膀、后足、背板等部位，具体包括体色、毛色、绒毛指数、覆毛指数、蜡镜面积，初生工蜂头重、吻长、附节指数、肘脉指数、翅面积、前翅长和宽、背板长等形态指标（Gonçalves *et al*., 2022）。

目前，关于中蜂的遗传多样性研究已经涉及华东（吉挺等，2009）、华南（朱翔杰，2009）、长白山（于瀛龙等, 2013）等多个地理区域，这些研究均表明，不同地理区域的中蜂种群之间存在显著的遗传分化，并且与海拔、气候等环境因素显著相关。本研究利用形态标记对吕梁山区 6 个样点中蜂进行遗传多样性测定，对优质性状及种群进行筛选，为吕梁山区的中蜂遗传资源保护和利用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　供试昆虫

本研究于 2023 年 5 月进行样本采集，试验蜂群选自吕梁山区绥德县（SD；37°30′13″N，

110°37′14″E）、吴堡县（WB；37°39′19″N，110°36′47″E）、米脂县（MZ；37°53′3″N，110°5′42″E）、子洲县（ZZ；37°61′06″N，110°03′52″E）、清涧县（QJ；37°2′9″N，110°4′38″E）、石楼县（SL；37°1′20″N，110°45′57″E）。绥德县为黄土丘陵沟壑区，海拔800-1 200 m，无定河贯穿，半干旱气候，水土流失严重，植被以灌丛和人工林为主；吴堡县为黄河沿岸石质山地，地势陡峭，海拔600-1 000 m，气候干燥，土层薄，多枣树经济林；米脂县为无定河中游河谷阶地，黄土梁峁与川地交错，年均温 10 ℃，传统农业区（小米、苹果种植）；子洲县为大理河流域丘陵区，沟壑密度大，土壤以黄绵土为主，干旱频发，退耕还林后植被覆盖改善；清涧县为黄河支流清涧河沿岸，多深切割峡谷，海拔900-1 300 m，昼夜温差大，红枣主产区；石楼县为吕梁山西侧土石山区，地形破碎，海拔1 000-1 500 m，森林覆盖率较高（油松、辽东栎）。从6个县蜂农饲养的中蜂，每个样点采集10群，每个样点取90只，共540只中蜂进行形态学测定，将样本于75%酒精中保存备用。

1.2 主要仪器

本研究使用的仪器为Image-ProExpress的微小昆虫形态测量系统，TK-C921EC 的图形采集器以及GL-99TI体式显微镜。

1.3 形态指标测量方法

中蜂形态指标的测定采用 Ruttner（1988）的蜜蜂形态鉴定方法和《NY/T2364-2013 蜜蜂种质资源评价规范》。通过形态学标本制作与测量共得到不同样点60群中蜂生产性能相关的37个形态数据：吻长（Pr）（图1：A）、右前翅长（FL）（图1：C）、右前翅宽（FB）（图1：C）、肘脉长（a）（图1：D）、肘脉宽（b）（图1：D）、肘脉指数（Ci）、前翅翅脉角（A4、B4、D7、E9、J10、L13、J16、G18、K19、N23、O26）（图1：B）、后足胫节长（Ti）（图1：I）、后足股节长（Fe）（图1：I）、后足基跗节长（ML）（图1：I）、后足基跗节宽（MT）（图1：I）、第3背板长（T3）、第4背板长（T4）（图1：H）、第4背板绒毛带长（4a）（图1：H）、第3+4背板长（T3+T4）、第3腹板长（S3）（图1：F）、第3腹板腊镜宽（WL）（图1：F）、第3腹板腊镜斜长（WT）（图1：F）、第3腹板腊镜间距（WD）（图1：H）、第6腹板长（L6）（图1：G）、第6腹板宽（T6）（图1：G）、第2背板色度（P2）、第3背板色度（P3）、小盾片色度SC区（SC）（图1：K）、小盾片色度K区（K）（图1：K）、小盾片色度B区（B）（图1：K）、上唇色度（PL）（图1：J）、唇基色度（PC）（图1：J）、后翅钩数（Nh）（图1：E），部分形态如图1。

1.4 形态测定数据分析方法

利用单因素方差分析（One-way ANOVA）对吕梁山区6个采样点的60群中蜂的37个形态指标进行分析。这些形态指标与蜜蜂的经济性能相关，按其生理功能划分为与蜜蜂飞行能力、采集力、体型大小及泌蜡能力相关的四类数据。进一步利用主坐标分析（Principal coordinates analysis, PCoA）对6个采样点中蜂19个显著差异的形态指标进行分析，用于研究多个特征的差异和相似性，并鉴定样本在主坐标空间中的聚类和分散情况。此外，利用判别分析（Discrimination analysis, DA）对6个采样点的中蜂群体的形态数据进行分类判别。这些形态数据与蜜蜂的飞行能力、采集力、体型大小及泌蜡能力相关，用于鉴定4种类型之间的离散程度。最后，利用NTSYS-pc软件对6个样点的19个形态指标的遗传相似性系数进行聚类分析（Cluster analysis, CA），以判断6个样点之间的亲缘关系远近。

1.5 形态测定数据处理

使用软件SPSS 22.0进行单因素方差分析，结果以平均数±标准误（Mean±SE）表示，使用GraphPad Prism 8.3.0软件进行柱状图绘制。使用R进行主坐标分析和判别分析。

2 结果与分析

2.1 不同种群形态单因素方差分析

对绥德县、吴堡县、米脂县、子洲县、清涧

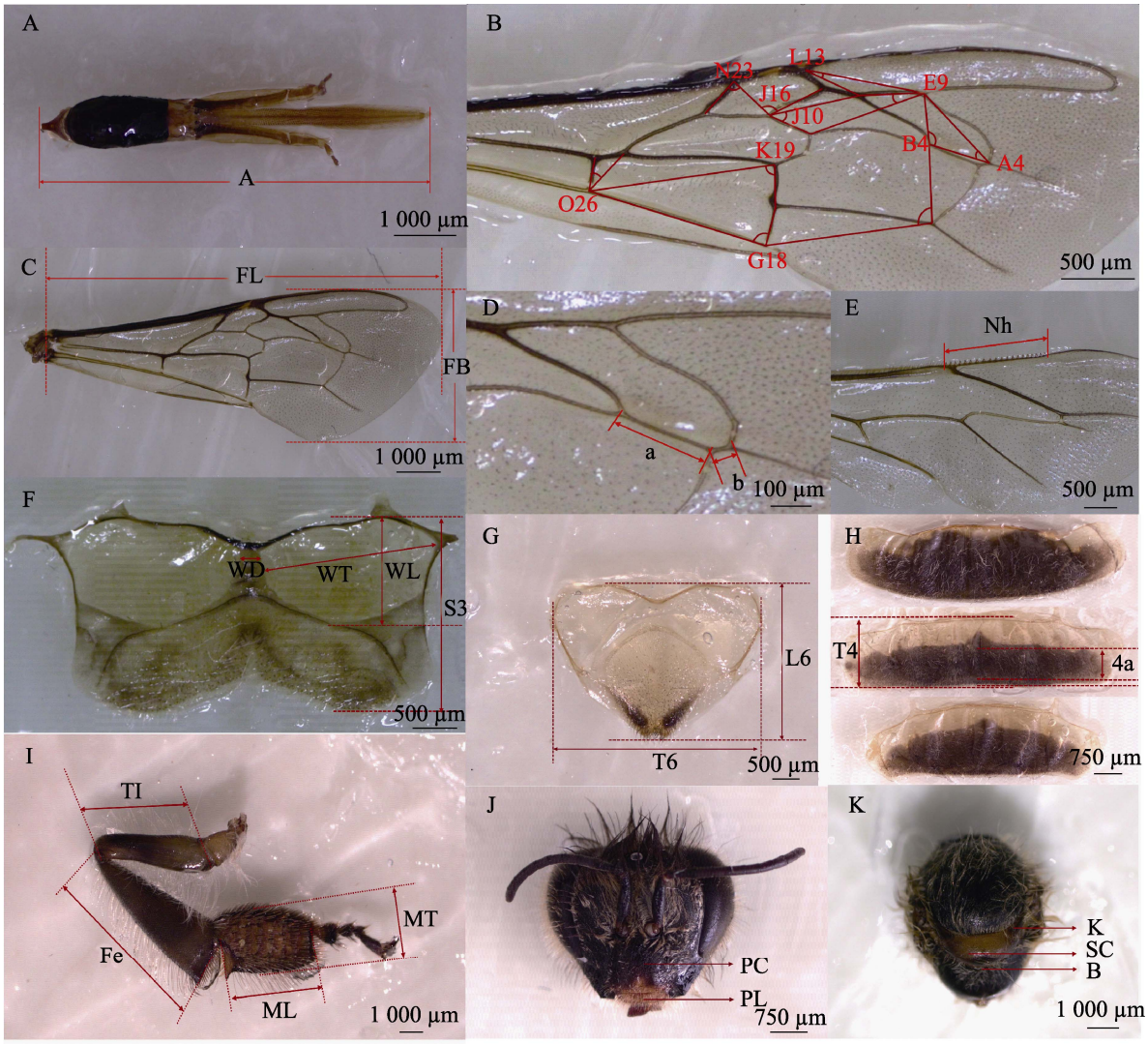

图 1　中华蜜蜂形态测定指标

Fig. 1　Morphological indices of *Apis cerana cerana*

A. 吻；B. 11 个翅脉角；C. 右前翅；D. 肘脉；E. 后翅钩数；F. 第 3 腹板；G. 第 6 腹板；H. 背板；I. 后足；J. 头；K. 胸。O26：前翅翅脉角 O26；G18：前翅翅脉角 G18；D7：前翅翅脉角 D7；K19：前翅翅脉角 K19；B4：前翅翅脉角 B4；A4：前翅翅脉角 A4；E9：前翅翅脉角 E9；L13：前翅翅脉角 L13；J10：前翅翅脉角 J10；J16：前翅翅脉角 J16；N23：前翅翅脉角 N23；FL：右前翅长；FB：右前翅宽；a：肘脉长；b：肘脉宽；Nh：后翅钩数；WD：第 3 腹板腊镜间距；WT：第 3 腹板腊镜斜长；WL：第 3 腹板腊镜宽；S3：第 3 腹板长；L6：第 6 腹板长；T6：第 6 腹板宽；T4：第 4 背板长；4a：第 4 背板绒毛带长；TI：后足胫节长；Fe：后足股节长；ML：后足基跗节长；MT：后足基跗节宽；PC：唇基色度；PL：上唇色度；K：小盾片色度 K 区；SC：小盾片色度 SC 区；B：小盾片色度 B 区。下表及下图同。

A. Proboscis; B. 11 forewing venation angle; C. Right forewing; D. Cubital vein; E. Number of bee hindwing hamuli; F. Sternite 3; G. Sternite 6; H. Tergite; I. Hind leg; J. Head; K. Thorax.

O26: Forewing vein angle O26; G18: Forewing vein angle G18; D7: Forewing vein angle D7; K19: Forewing vein angle K19; B4: Forewing vein angle B4; A4: Forewing vein angle A4; E9: Forewing vein angle E9; L13: Forewing vein angle L13; J10: Forewing vein angle J10; J16: Forewing vein angle J16; N23: Forewing vein angle N23; FL: Right forewing length; FB: Right forewing width; a: Cubital vein length; b: Cubital vein width; Nh: Number of bee hindwing hamuli; WD: Distance of bee wax mirror on sternum 3; WT: Slanting length of bee wax mirror on sternum 3; WL: Width of bee wax mirror on sternum 3; S3: Length of sternum 3; L6: Length of 6th sternite; T6: Width of 6th sternite ; T4: 4th tergite length; 4a: 4th tergite hair band length; TI: Hind tibia length; Fe: Hind femur length; ML: Hind basitarsus length; MT: Hind basitarsus width; PC: Labial base color; PL: Labium color; K: Scutellum K area color; SC: Scutellum SC area color; B: Scutellum B area color. The same below.

县及石楼县 6 个地点共 540 只中蜂工蜂的 37 个形态指标进行单因素方差分析。通过邓肯氏（Duncan's）多重比较，6 个样点中蜂的右前翅长、右前翅宽、翅钩数、肘脉指数、后足股节长、后足胫节长、后足基跗节长、后足基跗节宽节、吻长、第 3 背板长、第 4 背板长、第 3+第 4 背板长、第 3 腹板长、第 3 腹板腊镜宽、第 3 腹板腊镜斜长、第 3 腹板腊镜间距、第 6 腹板长、第 6 腹板宽和翅脉角 B4 这 20 个指标存在显著差异（$P < 0.05$），其余相关指标均无显著差异（$P > 0.05$）（表 1）。在 20 个显著差异的形态指标中，翅脉角中仅 B4 具显著性，对其不做统计分析。

根据蜜蜂不同部位的功能将差异显著的 19 个形态指标分为 4 类，即飞行能力相关的翅膀指标（右前翅长、右前翅宽、翅钩数及肘脉指数），与采集力相关的足与喙指标（后足股节长、后足胫节长、后足基跗节长、后足基跗节宽节及吻长），与体型大小相关的背板指标（第 3 背板长、第 4 背板长及第 3+第 4 背板长），与泌蜡能力相关的腹板指标（第 3 腹板长、第 3 腹板腊镜宽、第 3 腹板腊镜斜长、第 3 腹板腊镜间距、第 6 腹板长及第 6 腹板宽）。

表 1　吕梁山区中华蜜蜂 37 个形态指标单因素方差分析结果

Table 1　Univariate variance analysis of 37 morphological indicators of *Apis cerana cerana* in the Lüliang Mountain Area

指标 Index	绥德县 SD	吴堡县 WB	米脂县 MZ	子洲县 ZZ	清涧县 QJ	石楼县 SL
吻长 Length of proboscis	5.00 ± 0.13 c	4.98 ± 0.12 c	5.05 ± 0.13 bc	5.18 ± 0.43 a	4.98 ± 0.09 c	5.09 ± 0.12 b
右前翅长 Forewing length	8.72 ± 0.29 b	8.59 ± 0.25 c	8.79 ± 0.23 ab	8.85 ± 0.38 a	8.77 ± 0.25 ab	8.59 ± 0.16 c
右前翅宽 Forewing width	3.03 ± 0.10 b	2.95 ± 0.11 c	3.05 ± 0.07 ab	3.08 ± 0.13 a	3.02 ± 0.09 b	3.01 ± 0.08 b
后翅钩数 Number of hindwing hamuli	13.21 ± 0.80 ab	12.69 ± 0.73 c	13.48 ± 0.60 a	13.51 ± 0.85 a	13.24 ± 0.70 ab	12.94 ± 0.56 bc
肘脉指数 Index number of cubital vein	4.19 ± 0.62 a	3.64 ± 0.64 b	4.03 ± 0.71 a	3.69 ± 0.85 b	4.10 ± 0.83 a	4.22 ± 0.81 a
后足胫节长 Length of tibia of hind leg	2.90 ± 0.10 ab	2.76 ± 0.17 c	2.84 ± 0.18 b	2.82 ± 0.22 bc	2.88 ± 0.23 ab	2.92 ± 0.09 a
后足股节长 Length of femur of hind leg	2.38 ± 0.11 a	2.31 ± 0.17 b	2.39 ± 0.11 a	2.37 ± 0.18 a	2.38 ± 0.11 a	2.39 ± 0.08 a
后足基跗节长 Length of hind leg metatarsus	2.08 ± 0.12 ab	2.01 ± 0.15 c	2.10 ± 0.13 a	2.07 ± 0.18 ab	2.10 ± 0.10 a	2.03 ± 0.05 bc
后足基跗节宽 Width of hind leg metatarsus	1.06 ± 0.06 abc	1.04 ± 0.07 b	1.07 ± 0.12 ab	1.06 ± 0.09 abc	1.09 ± 0.06 a	1.04 ± 0.06 bc
第 3 背板长 Length of tergite 3	2.01 ± 0.13 ab	1.93 ± 0.12 c	2.05 ± 0.11 a	2.02 ± 0.14 a	2.06 ± 0.14 a	1.96 ± 0.06 bc
第 4 背板长 Length of tergite 4	1.96 ± 0.13 ab	1.87 ± 0.17 c	1.98 ± 0.08 a	1.97 ± 0.15 a	1.98 ± 0.13 a	1.92 ± 0.06 bc

续表 1 (Table 1 continued)

指标 Index	绥德县 SD	吴堡县 WB	米脂县 MZ	子洲县 ZZ	清涧县 QJ	石楼县 SL
第 3+第 4 背板长 Length of tergite 3 + length of tergite 4	3.97 ± 0.21 a	3.80 ± 0.25 c	4.03 ± 0.16 a	3.99 ± 0.29 a	4.04 ± 0.23 a	3.88 ± 0.09 b
第 3 腹板长 Length of sternite 3	2.53 ± 0.10 c	2.47 ± 0.15 d	2.62 ± 0.09 a	2.56 ± 0.19 bc	2.63 ± 0.11 a	2.61 ± 0.08 a
第 3 腹板腊镜宽 Width of wax mirror on sternum 3	1.20 ± 0.08 c	1.16 ± 0.07 d	1.27 ± 0.08 a	1.23 ± 0.11 bc	1.26 ± 0.07 a	1.24 ± 0.07 ab
第 3 腹板腊镜斜长 Slanting length of wax mirror on sternum 3	2.19 ± 0.10 b	2.13 ± 0.13 c	2.25 ± 0.10 a	2.19 ± 0.16 b	2.26 ± 0.15 a	2.25 ± 0.09 a
第 3 腹板腊镜间距 Distance of wax mirror on sternum 3	0.28 ± 0.07 a	0.27 ± 0.05 a	0.27 ± 0.06 a	0.24 ± 0.06 b	0.24 ± 0.05 b	0.26 ± 0.06 a
第 6 腹板长 Length of 6th sternite	2.31 ± 0.23 ab	2.28 ± 0.13 b	2.38 ± 0.08 a	2.35 ± 0.16 a	2.37 ± 0.25 a	2.36 ± 0.08 a
第 6 腹板宽 Width of 6th sternite	2.83 ± 0.15 b	2.75 ± 0.17 c	2.89 ± 0.16 a	2.83 ± 0.23 a	2.90 ± 0.16 a	2.88 ±0.12 a
前翅翅脉角 A4 Forewing venation angle A4	30.24 ± 1.72	30.92 ± 1.84	30.00 ± 1.86	30.32 ± 2.04	30.08 ± 1.69	30.63 ± 1.69
前翅翅脉角 B4 Forewing venation angle B4	110.35 ± 4.82 c	110.07 ± 4.68 c	110.68 ± 5.13 ab	111.73 ± 4.72 a	110.65 ± 4.46 b	110.12 ± 4.66 c
前翅翅脉角 D7 Forewing venation angle D7	94.01 ± 3.08	94.78 ± 2.56	94.14 ± 2.94	94.86 ± 3.40	94.07 ± 3.25	94.34 ± 2.58
前翅翅脉角 E9 Forewing venation angle E9	20.19 ± 1.35	20.05 ± 1.09	20.82 ± 1.30	20.54 ± 1.53	20.25 ± 1.28	20.08 ± 1.16
前翅翅脉角 J10 Forewing venation angle J10	46.70 ± 2.83	46.51 ± 3.84	46.06 ± 2.80	46.62 ± 3.67	46.14 ± 2.72	46.08 ± 2.95
前翅翅脉角 L13 Forewing venation angle L13	14.11 ± 1.22	14.34 ± 1.34	14.07 ± 1.31	14.07 ± 1.58	14.05 ± 1.43	14.47 ± 1.37
前翅翅脉角 J16 Forewing venation angle J16	106.03 ± 3.15	106.94 ± 3.47	106.9 ± 3.23	106.39 ± 4.86	106.03 ± 3.09	106.88 ± 3.26
前翅翅脉角 G18 Forewing venation angle G18	88.82 ± 3.32	88.77 ± 3.82	89.07 ± 2.93	89.98 ± 3.44	89.33 ± 2.86	89.39 ± 3.17
前翅翅脉角 K19 Forewing venation angle K19	79.18 ± 2.75	79.42 ± 2.97	79.95 ± 3.10	79.04 ± 3.01	79.39 ± 2.71	79.98 ± 2.88
前翅翅脉角 N23 Forewing venation angle N23	88.22 ± 3.44	88.34 ± 4.04	88.06 ± 2.99	88.60 ± 4.92	88.27 ± 3.67	88.8 ± 3.62

续表 1 (Table 1 continued)

指标 Index	绥德县 SD	吴堡县 WB	米脂县 MZ	子洲县 ZZ	清涧县 QJ	石楼县 SL
前翅翅脉角 O26 Forewing venation angle O26	34.09 ± 3.70	34.07 ± 4.07	34.04 ± 3.34	34.39 ± 4.02	34.04 ± 3.74	34.14 ± 3.56
第 4 背板绒毛带长 Length of smooth bandon tergite 4	1.14 ± 0.21	1.12 ± 0.16	1.12 ± 0.17	1.13 ± 0.24	1.13 ± 0.15	1.13 ± 0.10
第 2 背板色度 2nd thoracic plate color	1.02 ± 0.21	1.03 ± 0.23	1.03 ± 0.38	1.03 ± 0.43	1.03 ± 0.48	1.03 ± 0.48
第 3 背板色度 3rd thoracic plate color	2.02 ± 0.21	2.02 ± 0.15	2.03 ± 0.28	2.02 ± 0.45	2.02 ± 0.21	2.02 ± 0.15
小盾片色度 SC 区 Scutellum SC area color	2.82 ± 1.23	2.83 ± 1.19	2.82 ± 1.31	2.83 ± 1.33	2.82 ± 1.62	2.82 ± 1.39
小盾片色度 K 区 Scutellum K area color	0.44 ± 1.07	0.44 ± 1.13	0.43 ± 0.78	0.44 ± 0.88	0.43 ± 0.99	0.44 ± 1.18
小盾片色度 B 区 Scutellum B area color	0.39 ± 0.92	0.39 ± 0.84	0.39 ± 0.71	0.39 ± 0.87	0.39 ± 0.77	0.39 ± 0.51
上唇色度 Labium color	1.01 ± 0.10	1.00 ± 0.00	1.02 ± 0.15	1.00 ± 0.00	1.00 ± 0.00	1.01 ± 0.28
唇基色度 Labial base color	1.00 ± 0.21	1.00 ± 0.00	1.01 ± 0.35	1.01 ± 0.41	1.01 ± 0.57	1.01 ± 0.38

同一行数据后标有不同字母表示组间存在统计学显著差异（$P < 0.05$, Duncan 氏新复极差法检验）。

SD: Suide County; WB: Wubu County; MZ: Mizhi County; ZZ: Zizhou County; QJ: Qingjian County; SL: Shilou County. Different letters within the same row indicate statistically significant difference among groups ($P < 0.05$, Duncan's new multiple range test).

2.2 显著差异相关指标主坐标分析

对 19 个形态数据进行主坐标分析发现，吴堡县及子洲县离散程度较大，米脂县次之，其余采样点离散程度并不明显。吴堡县在 PCoA1 和 PCoA2 水平上相似，子洲和米脂县在 PCoA1 水平上离散程度大于 PCoA2 水平，石楼县离散程度最小，在 PCoA1 和 PCoA2 水平上相似，绥德和清涧县在 PCoA1 水平上离散程度较 PCoA2 大（图 2）。

2.3 翅膀相关指标分析

2.3.1 翅膀相关指标单因素方差分析 对飞行能力相关形态指标进行单因素方差分析，并利用柱状图展示（图 3:A-D）。结果可知，吕梁山区 6 个样点间中蜂的飞行能力均存在较大差异。对于右前翅长，米脂县中蜂最长，为（8.85±0.23）mm，石楼县中蜂最短，为（8.59±0.16）mm（图 3：A）；对于右前翅宽，子洲县中蜂最长，为（3.08±0.13）mm，吴堡县中蜂最短，为（2.95±0.11）mm（图 3：B）；对于后翅钩数，米脂县中蜂最多，为（13.51±0.60）个，吴堡县中蜂最少，为（12.69±0.73）个（图 3：C）；对于肘脉指数，石楼县中蜂最大，为 4.22±0.81，吴堡县中蜂最小，为 3.64±0.64（图 3：D）。综合 4 个飞行能力相关形态指标测定值可发现，吕梁山区 6 个样点间米脂县中蜂右前翅长、后翅钩数测定值均最大，除右前翅长外，其余指标吴堡县中蜂测定值最小。

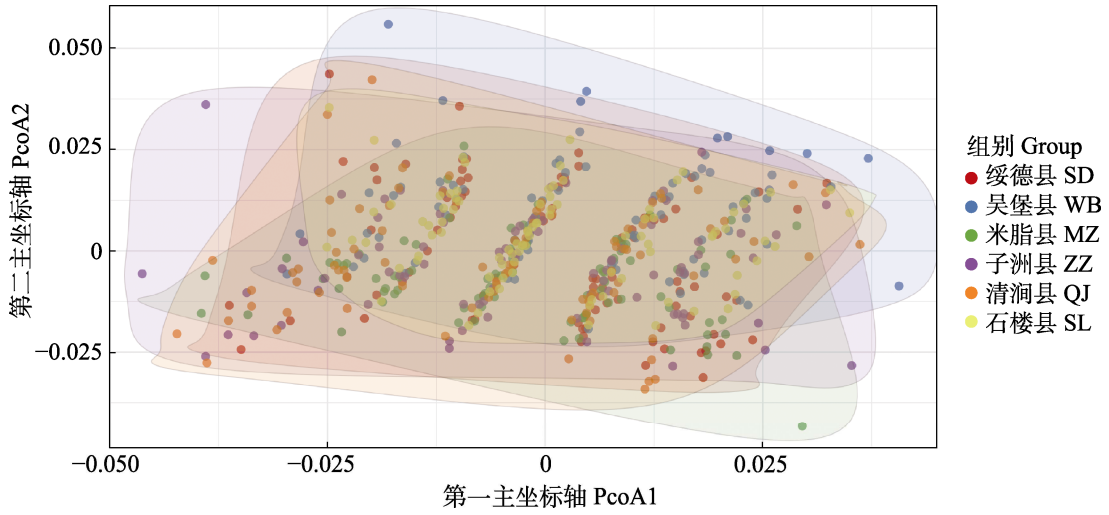

图 2　不同样点中华蜜蜂 PCoA 分析

Fig. 2　PCoA of *Apis cerana cerana* from different locations

SD：绥德县；WB：吴堡县；MZ：米脂县；ZZ：子洲县；QJ：清涧县；SL：石楼县。下图同。

SD: Suide County; WB: Wubao County; MZ: Mizhi County; ZZ: Zizhou County; QJ: Qingjian County; SL: Shilou County. The same below.

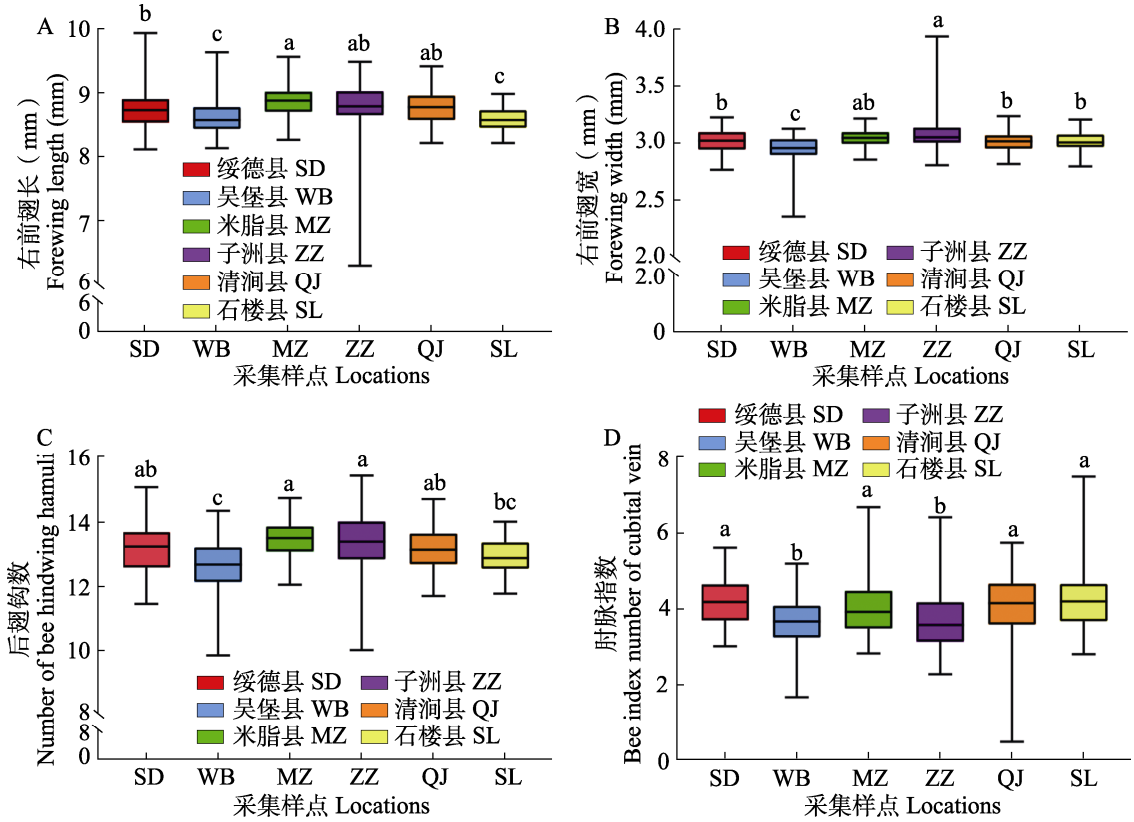

图 3　翅膀相关指标单因素方差分析结果

Fig. 3　Results of one-way analysis of variance (ANOVA) for wing-related metrics

A. 右前翅长；B. 右前翅宽；C. 后翅钩数；D. 肘脉指数。柱上标有不同字母表示差异显著（$P < 0.05$, Duncan 氏新复极差法检验）。下图同。

A. Forewing length; B. Forewing width; C. Number of bee hindwing hamuli; D. Index number of cubital vein. Different letters above bars indicate significant difference ($P < 0.05$, Duncan's new multiple range test). The same below.

2.3.2 翅膀相关指标形态判别分析 飞行能力相关指标判别分析发现，子洲县和吴堡县两样点的中蜂发生部分偏离，主要分布中心点的左下角和右下角，其他 4 个相关指标在判别分析后聚在一起，子洲县右前翅宽测定值最大，肘脉指数与吴堡县没有显著差异，显著低于其他 4 个县，进一步说明子洲县与吴堡县中蜂在飞行能力方面的不同指标测定值存在显著差异（图 4）。

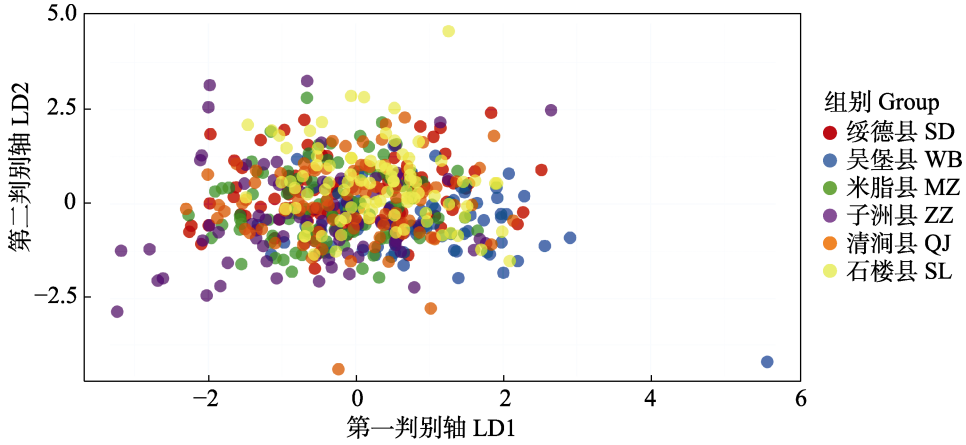

图 4 翅膀相关指标形态判别分析

Fig. 4 Morphological discrimination analysis of wing related indicators

2.4 足与喙相关指标分析

2.4.1 足与喙相关显著差异指标单因素方差分析 对采集力相关指标的单因素方差分析结果，利用柱状图展示（图 5：A-E）。对于后足股节长（图 5：A），米脂县中蜂最高，为（2.39± 0.11）mm，吴堡县中蜂最低，为（2.31± 0.17）mm；对于后足胫节长（图 5：B），吴堡县中蜂低于其他 5 个样点，为（2.76±0.17）mm；对于后足基跗节长（图 5：C），米脂县和清涧县中蜂均高于其他样点，分别为（2.10±0.13）和（2.10±0.10）mm，吴堡县中蜂最低，为（2.01±0.15）mm；对于后足基跗节宽（图 5：D），清涧县中蜂最高，为（1.09±0.06）mm，吴堡县和石楼县中蜂最低，分别为（1.04± 0.07）和（1.04± 0.06）mm；对于吻长（图 5：E），子洲县中蜂最高，为（5.18±0.43）mm，吴堡县和清涧县中蜂最低，分别为（4.98± 0.12）和（4.98± 0.09）mm。综合 5 个足与喙相关形态指标测定值可发现，吕梁山区 6 个样点间吴堡县的中蜂各项指标测定值均比较低，在与足相关的指标中，吴堡县中蜂的后足股节长均显著低于其它县的测定值（P<0.05），其后足胫节长显著低于除子洲县外的其它 4 个县测定值（P<0.05），其后足基跗节长显著低于除石楼县外的其它 4 个县测定值（P<0.05），其后足基跗节宽显著低于清涧县的测定值（P<0.05），在与喙相关的指标即吻长中，吴堡县中蜂的吻长显著低于子洲县和石楼县的测定值（P<0.05）。

2.4.2 足与喙相关指标形态判别分析 对采集力相关指标进行判别分析发现，不同样点间采集力相关指标大部分聚在一起，其中仅个别样点存在偏离现象，但无明显样点偏离现象（图 6）。

2.5 背板相关指标分析

2.5.1 背板相关显著差异指标单因素方差分析 体型大小相关指标的单因素方差分析结果见图 7（A-C）。其中，对于第 4 背板长（图 7：A），清涧县中蜂为（2.06 ± 0.14）mm、米脂县中蜂为（2.05±0.11）mm、子洲县中蜂为（2.02± 0.14）mm，显著高于其他样点（P<0.05），吴堡县中蜂最小，为（1.93±0.12）mm；对于第 4 背板长（图 7：B），米脂县中蜂为（1.98±0.08）mm、清涧县中蜂为（1.98±0.13）mm、子洲县中蜂为（1.97±0.15）mm，3 个样点测定值均显著高于

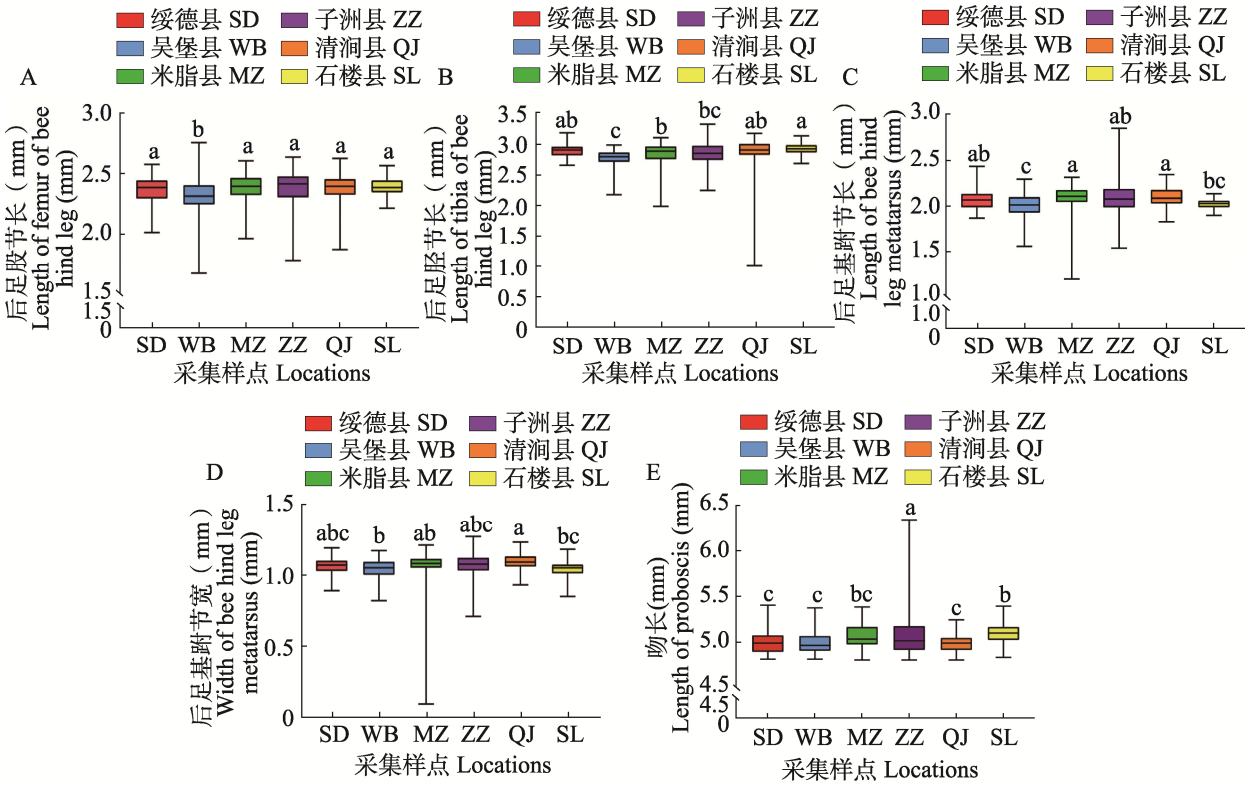

图 5　足与喙相关指标单因素方差分析结果

Fig. 5　Results of one-way analysis of variance (ANOVA) for foot and beak-related metrics

A. 后足胫节长；B. 后足股节长；C. 后足基跗节长；D. 后足基跗节宽；E. 吻长。

A. Length of tibia of bee hind leg; B. Length of femur of bee hind leg; C. Length of bee hind leg metatarsus; D. Width of bee hind leg metatarsus; E. Length of proboscis.

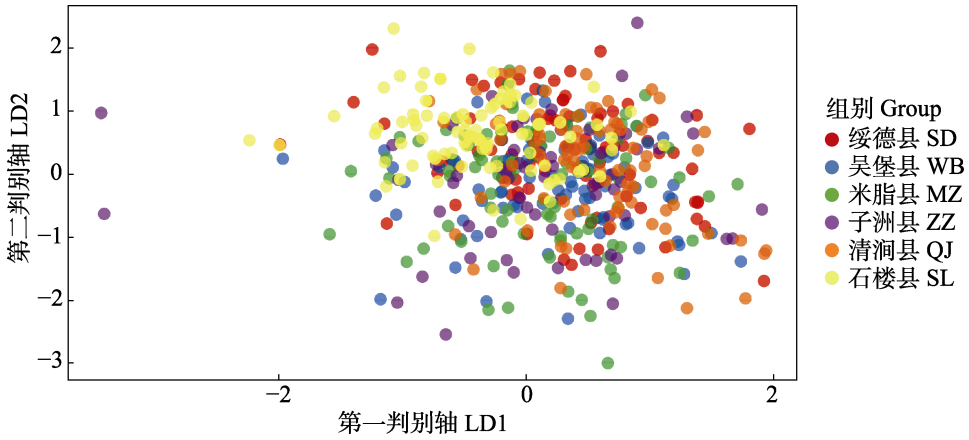

图 6　足与喙相关指标形态判别分析

Fig. 6　Morphological discrimination analysis of foot and beak related indicators

吴堡县（P<0.05），吴堡县中蜂为（1.87±0.17）mm；对于第 3+4 背板长（图 7：C），清涧县中蜂为（4.04±0.23）mm、米脂县中蜂为（4.03±0.16）mm、子洲县中蜂为（3.99±0.29）mm、绥德县中蜂为（3.97±0.21）mm，4 个样点测定值均显著高于吴堡县和石楼县中蜂（P<0.05），吴堡县中蜂最低为（3.80±0.25）mm。综合 3 个体型大小相关形态指标测定值，吕梁山区 6 个样点间，米脂县、子洲县、清涧县中蜂在体型大小相关指标测定值最大，吴堡县中蜂测定值

最小。

2.5.2 背板相关指标形态判别分析 体型大小相关指标判别分析结果见图 8。不同样点间与体型大小相关的经济性状通过判别分析发现各样点间聚集较为分散，各样点大体区分开，第一判别轴水平上以子洲县中蜂和吴堡县中蜂较为分散，第二判别轴水平上以米脂县中蜂较为分散，其余样点由中心向四周发散。

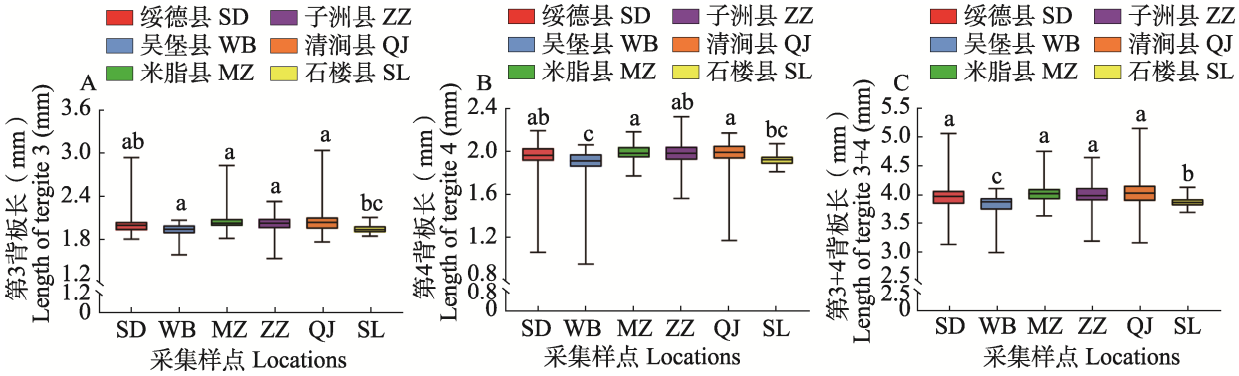

图 7 背板相关指标单因素方差分析结果

Fig. 7 Results of one-way analysis of variance (ANOVA) for tergum-related metrics

A. 第 3 背板长；B. 第 4 背板长；C. 第 3+第 4 背板长。

A. Length of tergite 3; B. Length of tergite 4; C. Length of tergite 3+4.

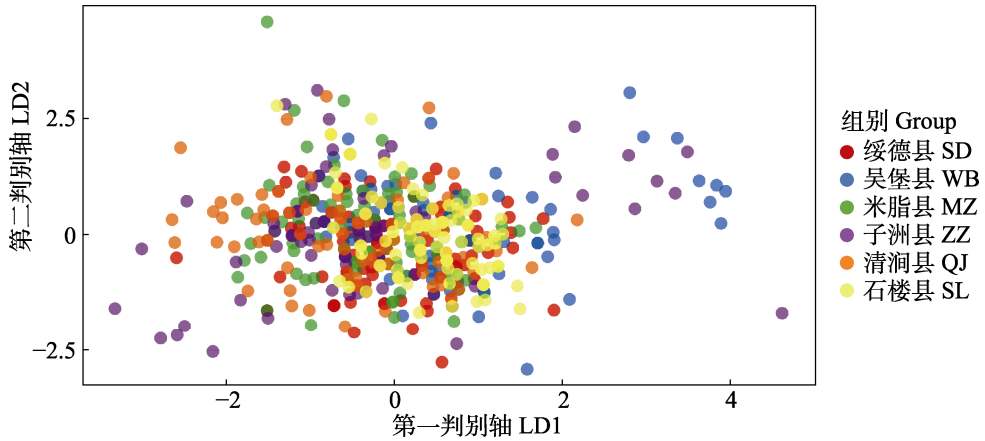

图 8 背板相关指标形态判别分析

Fig. 8 Morphological discrimination analysis of tergum related indicators

2.6 腹板相关指标分析

2.6.1 腹板相关显著差异指标单因素方差分析 对泌蜡能力相关指标的单因素方差分析结果见图 9（A-F）。其中，对于第 3 腹板长（图 9：A），清涧县中蜂为（2.63±0.11）mm、米脂县中蜂为（2.62±0.09）mm、石楼县中蜂为（2.61±0.08）mm，测定值均高于其他 3 个县，吴堡县中蜂最低，为（2.47±0.15）mm；对于第 3 腹板腊镜宽（图 9：B），米脂县中蜂为（1.27±0.08）mm、清涧县中蜂为（1.26±0.07）mm、石楼县中蜂为（1.24±0.07），均高于其他 3 个县，吴堡县中蜂最低，为（1.16±0.07）mm；对于第 3 腹板腊镜斜长（图 9：C），清涧县中蜂为（2.26± 0.15）mm、米脂县中蜂为（2.25±0.10）mm、石楼县中蜂为（2.25±0.09）mm，测定值均显著高于其他 3 个县（P<0.05），吴堡县中蜂最低，为（2.13±0.13）mm；对于第 3 腹板腊镜间距（图 9：D），绥德县中蜂为（0.28±0.07）mm、吴堡县中蜂为（0.27±0.05）mm、米脂县中蜂为（0.27±0.06）mm、石楼县中蜂为（0.26±0.06）mm，测定值均

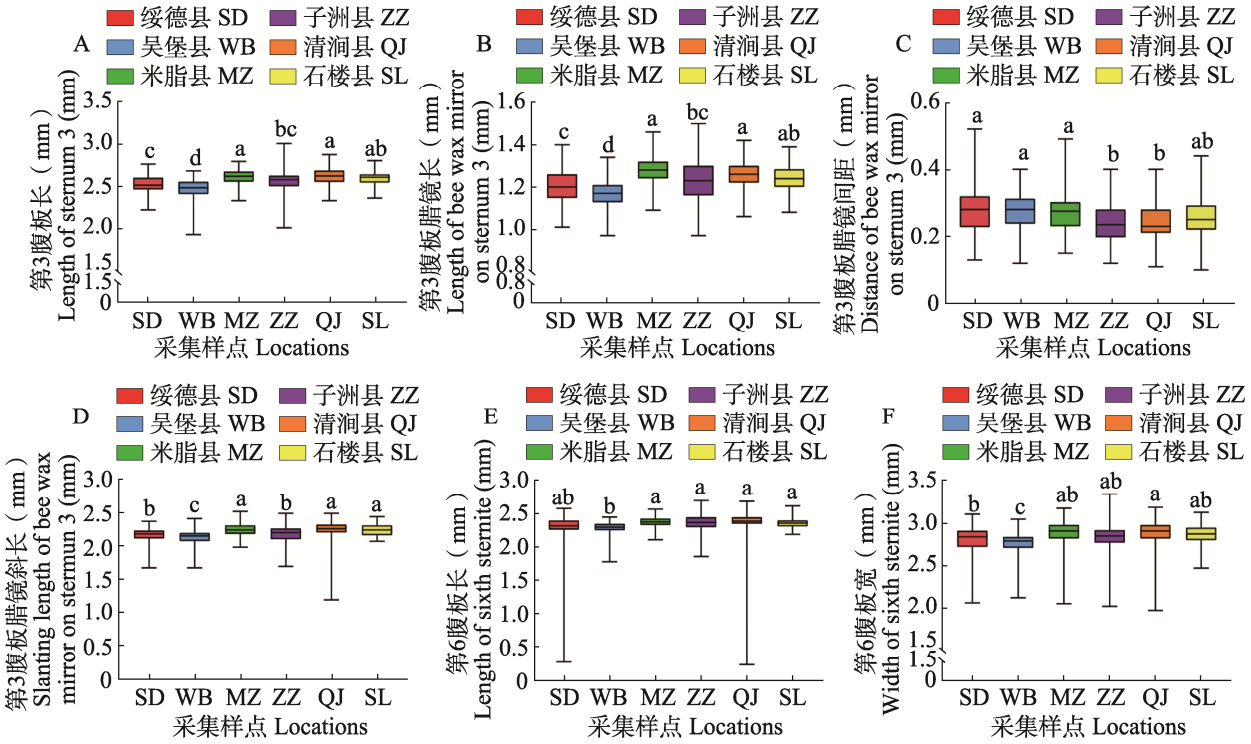

图 9　腹板相关指标单因素方差分析结果

Fig. 9　Results of one-way analysis of variance (ANOVA) for sternum-related metrics

A. 第 3 腹板长；B. 第 3 腹板腊镜长；C. 第 3 腹板腊镜间距；D. 第 3 腹板腊镜斜长；E. 第 6 腹板长；F. 第 6 腹板宽。
A. Length of sternite 3; B. Length of bee wax mirror on sternum 3; C. Distance of bee wax mirror on sternum 3; D. Slanting length of bee wax mirror on sternum 3; E. Length of 6th sternite; F. Width of 6th sternite.

较高，子洲县中蜂为（0.24± 0.06）mm、清涧县中蜂为（0.24±0.05）mm，测定值均较低；对于第 6 腹板长（图 9：E），米脂县中蜂为（2.38±0.08）mm、清涧县中蜂为（2.37±0.25）mm、子洲县中蜂为（2.35±0.16）mm、石楼县中蜂为（2.36± 0.08）mm，测定值均显著高于吴堡县中蜂（P<0.05），吴堡县中蜂最低，为（2.28±0.13）mm；对于第 6 腹板宽（图 9：F），清涧县中蜂为（2.90±0.16）mm、米脂县中蜂为（2.89±0.16）mm、石楼县中蜂为（2.88±0.12）mm、子洲县中蜂为（2.83±0.23）mm，测定值均较高，吴堡县中蜂最低，为（2.75±0.17）mm。综上所述，吕梁山区 6 个样点泌蜡能力相关指标，不同样点不同指标存在不同显著性，第 3 腹板长、第 3 腹板腊镜宽、腊镜斜长、第 6 腹板长及第 6 腹板宽等结果表明米脂县、清涧县、石楼县中蜂泌蜡能力相关指标测定值较大，吴堡县测定值较小。

2.6.2　腹板相关指标形态判别分析　吕梁山区 6 个样点泌蜡能力相关指标的判别分析结果见图 10。不同样点间形态数据的判别上离散程度较小，其中 LD1 水平上以子洲和吴堡县中蜂较为分散，LD2 水平上以绥德县中蜂较为分散，其余样点由中心向四周发散。

2.7　聚类分析

利用遗传相似性系数对 6 个采样点进行样点聚类分析，结果如图 11 所示。横坐标表示每个聚类的置信度，每个聚类分支代表了一组相似的数据点。吕梁山区 6 个采样点的中蜂根据形态指标可分为 2 个大的分支，第一个大分支由绥德县（SD）和吴堡县（WB）中蜂组成，第二个大分支又包括 2 个分支，第 1 分支由米脂县（MZ）和子洲县（ZZ）中蜂聚类后再与清涧县（QJ）中蜂聚类组成，第 2 分支由石楼县（SL）中蜂组成。

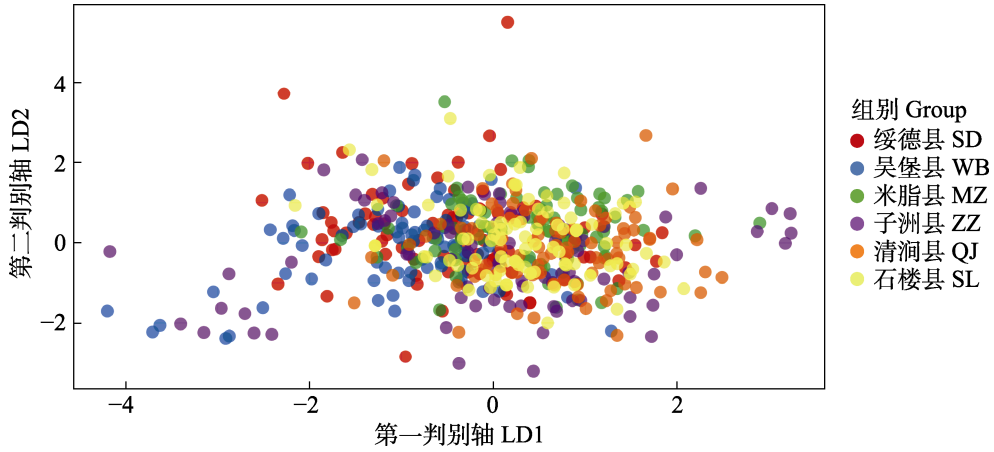

图 10　腹板相关指标形态判别分析

Fig. 10　Morphological discrimination analysis of sternum related indicators

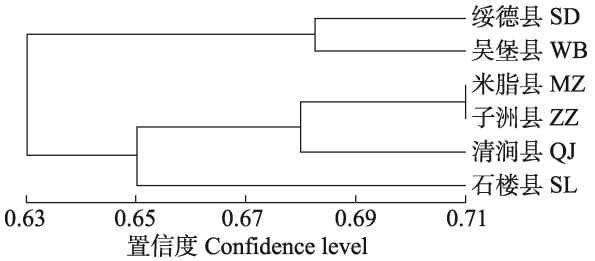

图 11　不同样点中华蜜蜂聚类分析

Fig. 11　Cluster analysis of *Apis cerana cerana* from different locations

3　讨论

形态学一直是蜜蜂分类、鉴定、遗传多样性分析的主要方法。前期国内学者用形态标记对中国境内不同地域的中蜂进行大量的遗传多样性分析。邱立飞等（2018）分析了陕西秦巴山区中蜂翅的形态分化规律及影响因素，发现影响蜂翅大小变化的主要因素是海拔及纬度差异。赵金玉等（2023）采集了贵州省 11 个自然保护区的中蜂样本，通过 31 项形态指标并结合 mtDNA COⅠ-COⅡ序列进行遗传多样性鉴定，结果发现 11 个地区均存在一定种群分化，且形态和 mtDNA 分化结果基本一致。本研究对吕梁山区不同样点中蜂的 37 个形态指标进行分析后发现 20 个指标存在显著差异，并基于形态指标结果分析了不同样点间中蜂的离散程度，表明形态学可作为分析中蜂种群分化和遗传多样性的重要方法。

蜜蜂形态标记与其飞行能力（吉挺, 2009）、采集力（Estoup *et al*., 1996）、体型大小（Arrowsmith *et al*., 2023）和泌蜡能力（胡宗文等, 2020）息息相关，这些形态特征不仅影响蜜蜂的生存和繁殖，还对蜂群生产力具有重要影响（吉挺, 2009）。本研究对 37 个形态指标进行单因素方差分析，发现 20 个指标存在显著差异，对 19 个显著差异指标进行主坐标分析发现，吴堡县中蜂及子洲县中蜂离散程度较大，米脂县中蜂次之，其余采样点离散程度并不明显，仅有个别点分散的情况。方差分析及显著差异结果初步表明，吕梁山区中蜂的 19 个经济性能相关指标在不同样点间形态发生了一定的改变，但离散程度较低。由于 19 种指标综合 PCoA 结果对 6 个采样点中蜂形态特征的解释有限，故本研究分别就飞行能力、采集力、体型大小、泌蜡能力进行分类分析。因此在日后对中蜂形态指标进行研究时，可以将这几个指标作为独立的形态指标对形态进行描述。

前翅的长度和宽度与飞行能力密切相关，是衡量蜜蜂飞行能力的重要指标之一。翅钩的数量越多，通常意味着翅膀结构更加坚固，能够更好地支撑飞行时产生的力量（吉挺, 2009）。本研究发现，吕梁山区 6 个样点间中蜂，米脂县中蜂右前翅长（8.85±0.23）mm、后翅钩数（13.51±0.60）个，测定值均高于其他 5 个县的中蜂。子洲县中蜂的右前翅宽（3.08±0.13）mm，测定值最高，但与米脂县中蜂差异不显著，显著高于其他 4 个县的中蜂。石楼县肘脉指数 4.22±0.81，测定值

最大，显著高于吴堡县和子洲县中蜂测定值。综合 4 个飞行能力相关形态指标测定值可发现，吕梁山区 6 个样点的中蜂在飞行能力相关形态指标上存在显著差异，反映了不同地理种群对局部环境的适应性分化。米脂县中蜂具有最长的右前翅（ 8.85±0.23 ）mm 和最多的后翅钩数（13.51±0.60）个，表明其翅膀结构更优、飞行能力最强，可能适应长距离高效飞行或复杂环境；子洲县中蜂则表现出最宽的右前翅（3.08±0.13）mm，可能更适合短途高负载飞行。石楼县中蜂较高的肘脉指数 4.22±0.81，暗示其翅膀柔韧性更强，而吴堡县中蜂各项指标均较弱，飞行能力最差，可能受限于生态压力。判别分析显示子洲县和吴堡县中蜂种群部分偏离其他群体，说明地理隔离或局部选择压力导致了形态分化，其他 4 个样点中蜂种群则具有较高的形态相似性。

研究发现，伊犁黑蜂是西方蜜蜂 *Apis mellifer* 的一种，其吻长为 6.27 mm，对零星蜜源的采集表现突出，吻长较长的蜜蜂在采集零星蜜源时具有优势（哈力木拜克·阿汗, 2009）。对吕梁山区中蜂测定后发现，子洲县中蜂吻长最长，为（5.18±0.43）mm，说明子洲县中蜂比其他样点具有明显采集优势。后足股节的长度对工蜂采集花粉时的灵活性和效率有影响，较长的股节能提供更大的支撑面积，从而有助于稳定身体并有效携带花粉（孟庆鑫, 2023）；胫节末端宽扁，表面光滑，周围有长毛，形成一个花粉篮，用于收集和携带花粉（常宏才, 2023）；基跗节的宽度和长度对花粉的收集和携带能力有直接影响。本研究发现米脂县中蜂的后足股节长在 6 个县中蜂中最长，显著高于吴堡县中蜂。石楼县中蜂后足胫长在 6 个县中蜂中最长，吴堡县中蜂最短。米脂县和清涧县中蜂后足基跗节长相差不大，高于其他 4 个县中蜂，显著高于吴堡县中蜂。清涧县中蜂后足基跗节宽在 6 个县中蜂中最高，显著高于吴堡县中蜂。吕梁山区不同样点的中蜂在采集适应性形态特征上存在显著差异，米脂县中蜂表现出最长的后足股节，结合其较长的基跗节，说明其花粉携带稳定性可能更强；而清涧县中蜂具有最宽的基跗节，可能更有利于花粉的高效收集。相比之下，吴堡县中蜂在股节长、胫节长及基跗节长宽等指标上均表现最弱，表明其花粉采集能力较差，这可能是由于吴堡县多枣树经济林，蜜源丰富，导致中蜂在长期进化过程中减少了对花粉采集能力的依赖。这些形态差异反映了不同地理种群对当地蜜粉源特征的适应性分化，其中米脂县和清涧县中蜂可能更适应花粉丰富的环境，而子洲县中蜂则对零星蜜源具有相对优势。由判别分析结果可知，不同样点间采集力相关指标通过判别大部分聚在一起，其中仅个别点存在偏离现象，但无明显样点偏离现象，与单因素方差分析结果一致，说明中蜂采集力相关指标在样点间总体差异不大。

背板长度是衡量蜜蜂体型大小的重要指标，可以反映蜜囊大小，与贮存花蜜的能力直接相关（Arrowsmith *et al*., 2023）。体型较大的蜜蜂在飞行时会遇到更多的阻力和氧气需求，静止和飞行时的绝对代谢率更高，能量消耗更多，飞行距离远，携带花粉能力更强，蜜囊容量更大，可能会影响其飞行效率和寿命。本研究综合 3 个体型大小相关形态指标测定值，发现吕梁山区清涧县、米脂县、子洲县这几个样点的中蜂体型更大，说明能量消耗更多，携带花粉及储存花蜜能力更强，吴堡县中蜂体型最小，所以该样点中蜂耗能少，飞行距离更近，蜜囊容量相对小。与体型大小相关的经济性状通过判别分析发现各样点间聚集较为分散，各样点大体区分开，其余样点由中心向四周发散，样点间无显著离散。

第 3 腹板相关指标与第 6 腹板是衡量工蜂泌蜡能力的重要指标，反映了工蜂腹部蜡腺的发育程度，工蜂在泌蜡期间，第 6 腹板会显著增厚，形成腺体，用于分泌蜡质，对筑巢行为有很大的影响（胡宗文等, 2020）。单因素方差分析结果发现，吕梁山区 6 个样点的中蜂在泌蜡能力相关形态指标上存在显著的地理变异。米脂县、清涧县和石楼县的中蜂在第 3 腹板长、腊镜长、腊镜斜长以及第 6 腹板长和宽等关键指标上均表现出较大测定值，显著优于其他样点，尤其是吴堡县中蜂。其中，清涧县中蜂在腊镜斜长[（2.26±

0.15）mm]和第 6 腹板宽[（2.90±0.16）mm]上表现最优，米脂县中蜂则在腊镜长[（1.27±0.08）mm]和第 6 腹板长[（2.38±0.08）mm]上领先，石楼县中蜂各项指标也保持较高水平。相比之下，吴堡县中蜂在所有泌蜡相关指标中均表现最弱，如第 3 腹板长（2.47±0.15）mm 和第 6 腹板宽（2.75±0.17）mm 均为最低值。这些差异表明，米脂县、清涧县和石楼县的中蜂可能具有更强的泌蜡能力，能够更高效地筑造巢脾，而吴堡县中蜂种群的泌蜡功能相对较弱。这种地理分化可能反映了不同种群对当地气候、蜜源条件或巢穴需求的适应性进化。并且对泌蜡能力相关指标进行判别分析可发现，不同样点间的判别上离散程度较小，由中心向四周发散，无显著差异。说明泌蜡能力以米脂县、清涧县、石楼县样点显著较强，吴堡县较弱。聚类分析发现，该结果与地理分布大体一致，增加了实验的可信度，说明形态测定结果与地理分布有一定相关性（García *et al*., 2022）。

基于形态指标的聚类分析显示，吕梁山区 6 个采样点的中蜂可分为 2 个主要分支，第 1 分支由绥德县（SD）中蜂和吴堡县（WB）中蜂组成，第 2 分支进一步分为米脂县（MZ）中蜂与子洲县（ZZ）中蜂聚类后再与清涧县（QJ）中蜂聚类的亚群，以及单独聚类的石楼县（SL）中蜂。这一聚类模式与形态指标的变异趋势及地理分布具有一定相关性，与邱立飞等（2018）和赵金玉等（2023）研究中形态分化与地理因素关联的结论一致。聚类结果与关键经济性状的形态差异存在部分对应关系，飞行能力最强的子洲县（ZZ）中蜂与采集力较优的米脂县（MZ）中蜂聚为一类，而飞行能力和采集力均较弱的吴堡县（WB）中蜂则与绥德县（SD）中蜂聚为另一分支。此外，泌蜡能力突出的石楼县（SL）中蜂在聚类中单独成支，可能反映其独特的形态适应特征。这一结果支持形态标记对种群遗传分化的指示作用（García *et al*., 2022），但需结合分子数据进一步验证其遗传基础。部分样点的聚类关系与单一性状分析结果存在差异，清涧县（QJ）中蜂虽在泌蜡能力上与石楼县（SL）中蜂相近，却与米脂县（MZ）中蜂和子洲县（ZZ）中蜂聚为一类，这表明形态聚类可能受多性状协同作用或环境因素（如海拔、蜜源分布）的影响。

4 结论

吕梁山区 6 个样点中蜂的 37 个形态指标中共 20 个指标存在显著差异。本研究通过 19 个形态指标分析，揭示了吕梁山区中蜂种群在飞行能力、采集适应性、体型大小及泌蜡能力等方面存在显著的地理分化。米脂县中蜂种群表现出最优的飞行能力和较强的泌蜡能力，子洲县中蜂种群具有较长的吻部，显示出对零星蜜源的采集优势，而吴堡县中蜂种群在多数指标上表现较弱，可能受限于当地生态条件或遗传瓶颈。判别分析与单因素方差分析结果基本一致。19 个经济性能相关指标在不同样点间形态发生了一定的改变，但离散程度较低，没有显著区分。基于形态学指标的聚类结果与采样点地理分布基本一致。研究结果为中蜂品种资源提供了客观、严谨的评价依据，不仅为吕梁山区中蜂种质资源的科学保护与合理利用奠定了重要基础，同时也为后续中蜂品种选育工作提供了关键参考。

参考文献 (References)

Arrowsmith K, Reynolds VA, Briggs HM, Brosi BJ, 2023. Community context mediates effects of pollinator loss on seed production. *Ecosphere*, 14(6): e4569.

Cao LF, Gu PP, Lin YQ, 2017. Genetic diversity of *Apis cerana cerana* based on mitochondrial DNA in Lishui, Zhejiang, China. *Journal of Zhejiang University* (*Agriculture and Life Sciences*), 43(4): 425–430. [曹联飞, 顾佩佩, 林宇清, 2017. 浙江丽水中蜂线粒体遗传多样性分析. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 43(4): 425–430.]

Chang HC, 2023. Differences in the nutrition of three kinds of bee pollens and their effects on the hemolymph metabolism of honeybee workers (*Apis mellifera* L.). Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [常宏才, 2023. 三种蜂花粉成分差异及其对西方蜜蜂工蜂血淋巴代谢的影响. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]

Cao HX, Luo AR, Niu ZQ, Zhang YZ, Xiao H, Zhu CD, 2022. New taxa of the order Hymenoptera in 2021. *Biodiversity Science*, 30(8): 27–36. [曹焕喜, 罗阿蓉, 牛泽清, 张彦周, 肖晖, 朱朝东, 2022. 2021 年膜翅目新增分类单元. 生物多样性, 30(8):

27–36.]

Estoup A, Solignac M, Cornuet JM, Goudet J, Scholl A, 1996. Genetic differentiation of continental and island populations of *Bombus terrestris* (Hymenoptera: Apidae) in Europe. *Molecular Ecology*, 5(1): 19–31.

García CAY, Rodrigues PJ, Tofilski A, Elen D, McCormak GP, Oleksa A, Henriques D, Ilyasov R, Kartashev A, Bargain C, Fried B, Pinto MA, 2022. Using the software DeepWings© to classify honey bees across Europe through wing geometric morphometrics. *Insects*, 13(12): 1132.

Gonçalves LT, Françoso E, Deprá M, 2022. Shorter, better, faster, stronger? Comparing the identification performance of full-length and mini-DNA barcodes for apid bees (Hymenoptera: Apidae). *Apidologie*, 53(5): 55.

Ge PZ, Wang ZL, Yu L, He YX, Zhang SL, Zhao L, 2021. Phenotypic genetic diversity analysis and comprehensive evalution of dry bean germplasm. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 34(7): 1386–1394. [葛平珍, 王昭礼, 余莉, 何友勋, 张时龙, 赵龙, 2021. 粒用菜豆种质资源表型遗传多样性分析及综合性评价. 西南农业学报, 34(7): 1386–1394.]

Halimubaike · Ahan, 2009. Research progress of black bees in Yili, Xinjiang. *Xinjiang Agricultural Science and Technology*, 2009(2): 9. [哈力木拜克·阿汗, 2009. 新疆伊犁黑蜂研究进展. 新疆农业科技, 2009(2): 9.]

Huo LY, 2024. Research on insect species and diversity in shrub-grass habitat in Taihang and Lvliang Mountainous areas of Shanxi Province. *Shanxi Forestry Science and Technology*, 53(3): 24–27. [霍履远, 2024. 山西省太行山区和吕梁山区灌草生境昆虫种类及多样性研究. 山西林业科技, 53(3): 24–27.]

Hu ZW, Yang J, Miao CH, Huang XQ, Yang S, 2020. Malformation grade of western honeybee, *Apis mellifera*, infected by mite, *Varroa destructor*. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 32(7): 1187–1195. [胡宗文, 杨娟, 苗春辉, 黄新球, 杨爽, 2020. 侵染狄斯瓦螨后西方蜜蜂的致畸等级划分. 浙江农业学报, 32(7): 1187–1195.]

Ji T, 2009. Research of genetic diversity among *Apis cerana* in China. Doctor dissertation. Yangzhou: Yangzhou University. [吉挺, 2009. 中国东方蜜蜂资源遗传多样性分析. 博士学位论文. 扬州: 扬州大学.]

Ji T, Yin L, Liu M, Chen GH, 2009. Genetic diversity and genetic differentiation of six geographic populations of *Apis cerana cerana* (Hymenoptera: Apidae) in East China. *Acta Entomologica Sinica*, 52(4): 413–419. [吉挺, 殷玲, 刘敏, 陈国宏, 2009. 华东地区中华蜜蜂六地理种群的遗传多样性及遗传分化. 昆虫学报, 52(4): 413–419.]

Li M, Yang MX, Huang L, Wang SL, Zhao YG, Gao TL, Cao FL, Shu CB, Wang B, Huang ZJ, Wang SH, Lai K, 2025. Suggestions for the protection and development of genetic resources of Chinese bees in Batang. *Apiculture of China*, 76(3): 35–39. [黎梅, 杨明显, 黄伦, 王遂林, 赵光阳, 高太利, 曹丰磊, 舒长斌, 王斌, 黄枳腱, 王顺海, 赖康, 2025. 巴塘中蜂遗传资源保护与开发利用建议. 中国蜂业, 76(3): 35–39.]

Liu NN, Liu HM, Ju Y, Li XG, Li Y, Wang TJ, He JM, Niu QS, Xing XM, 2022. Geometric morphology and population genomics provide insights into the adaptive evolution of *Apis cerana* in Changbai Mountain. *BMC Genomics*, 23(1): 64.

Meng QX, 2023. Characteristics of gnawing and rebuilding combs of *Apis cerana cerana* and the effect of old combs on the development of workers. Master dissertation. Kunming: Yunnan Agricultural University. [孟庆鑫, 2023. 中蜂啃咬、重建巢脾特征及巢脾老旧对工蜂发育的影响. 硕士学位论文. 昆明: 云南农业大学.]

Qiu LF, Wei ZM, Wang JJ, Liu HX, Zhao BX, Zhang Y, Lian ZM, 2018. Geometric analysis of morphological variation in the wing of *Apis cerana cerana* from the Qinling-daba Mountain Areas. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(3): 503–513. [邱立飞, 魏朝明, 王俊杰, 刘红霞, 赵白雪, 张彧, 廉振民, 2018. 基于几何形态学方法的秦巴山区中华蜜蜂翅形态变异研究. 应用昆虫学报, 55(3): 503–513.]

Ruttner F, 1988. Morphometric analysis and classification. Biogeography and taxonomy of honeybees. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 66–78.

Song MY, Wang GL, Wang JY, Li FX, Wei JL, Yang Y, 2022. Investigation report on the current situation of *Apis cerana cerana* breeding and germplasm resources in Yimeng Mountain area. *Apiculture of China*, 73(6): 40–42. [宋美英, 王光龙, 王军一, 李馥霞, 魏景亮, 杨燕, 2022. 沂蒙山区中华蜜蜂养殖和种质资源现状调研报告. 中国蜂业, 73(6): 40–42.]

Yu YL, Zhou SJ, Xu XJ, Zhu XJ, Zhou BF, 2013. Analysis on genetic diversity of *Apis cerana cerana* in Changbai Mountains. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University* (*Natural Science Edition*), 42(6): 643–647. [于瀛龙, 周姝婧, 徐新建, 朱翔杰, 周冰峰, 2013. 长白山中华蜜蜂(*Apis cerana cerana*)遗传多样性分析. 福建农林大学学报(自然科学版), 42(6): 643–647.]

Zhao JY, Wu YT, Long JK, Chen XS, Chang ZM, 2023. Morphological and mtDNA diversity of *Apis cerana cerana* populations from Nature Reserves in Guizhou Province. *Journal of Biology*, 40(6): 81–87. [赵金玉, 吴育滔, 龙见坤, 陈祥盛, 常志敏, 2023. 贵州省自然保护区中华蜜蜂形态及 mtDNA 遗传多样性. 生物学杂志, 40(6): 81–87.]

Zhu XJ, 2009. Study on population genetics of *Apis cerana cerana* in Fujian Province and adjacent regions. Doctor dissertation. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. [朱翔杰, 2009. 福建及邻近地区中华蜜蜂种群遗传分析. 博士学位论文. 福州: 福建农林大学.]