

基于几何形态学对七种指突水虻翅脉形态分析*

刘士宜** 张婷婷***

(山东农业大学植物保护学院, 昆虫分类与系统进化实验室, 泰安 271018)

摘要 【目的】使用几何形态学方法分析水虻科瘦腹水虻亚科指突水虻属 *Ptecticus* 7 种水虻翅的形态, 以期为其鉴定提供新方法。【方法】应用标点法对 7 种指突水虻的翅进行量化分析, 每张翅照片选取 28 个地标点, 采用主成分分析 (Principal component analysis, PCA)、聚类分析 (Cluster analysis) 和典型变量分析 (Canonical variate analysis, CVA) 探究翅脉的形态变异。【结果】7 种指突水虻在翅脉形态上存在显著差异 ($P < 0.05$), 变异部位主要在亚前缘脉 (Sc) 和径脉分支 (R_1-R_5) 的端部。主成分分析和聚类分析显示福建指突水虻 *Ptecticus fukienensis*、狡猾指突水虻 *P. vulpianus* 和斯里兰卡指突水虻 *P. srilankai* 相较其他几种水虻而言, 翅形差异较小。典型变量分析能够将 7 种指突水虻区分开来, 分类效果理想。【结论】证明了几何形态学方法在水虻分类中应用的可行性, 28 地标点的典型变量分析能够实现指突水虻属 7 种昆虫的分类, 为进一步研究奠定了基础。

关键词 指突水虻属; 翅脉形态; 几何形态学; 地标点

A preliminary geometric morphometric analysis of wing shape variation among seven important species of the genus *Ptecticus* (Diptera: Stratiomyidae)

LIU Shi-Yi** ZHANG Ting-Ting***

(Laboratory of Insect Classification and Systematic Evolution, College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract [Aim] Geometric morphometric analysis was carried out on the wings of seven species of *Ptecticus*, to provide a new species identification method. [Methods] Quantitative analysis of seven species of *Ptecticus* was carried out using the landmarks method. A total of 28 landmarks were selected from each wing photo. Principal component analysis, cluster analysis, and canonical variable analysis was used to explore the morphological variation of the wing veins. [Results] There were significant differences in the morphology of the wings, primarily located at the ends of subcosta and radial vein. Principal component analysis and cluster analysis showed relatively small differences in wing shape between *P. fukienensis*, *P. vulpianus*, and *P. srilankai* compared with other species. Canonical variable analysis was able to distinguish between the seven species, and the classification effect was optimal. [Conclusion] This article demonstrates the feasibility of applying geometric morphology methods for the classification of Stratiomyidae. Canonical variable analysis of 28 landmarks was able to classify seven species of *Ptecticus*. The findings of this study establish a foundation for further research into the use of geometric morphometrics for species identification.

Key words *Ptecticus*; venation morphology; geometric morphometrics; landmarks

指突水虻属 *Ptecticus* 隶属双翅目 Diptera 水虻科 Stratiomyidae 瘦腹水虻亚科 Sarginae, 广泛分布于世界各动物地理区系, 全世界已知 143 种, 我国已知 17 种 (杨定等, 2014; Yang *et al.*,

*资助项目 Supported projects: 科技基础资源调查专项 (2018FY100403); 国家自然科学基金青年基金 (31801996)

**第一作者 First author, E-mail: 572868050@qq.com

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

收稿日期 Received: 2023-07-27; 接受日期 Accepted: 2023-09-16

2015)。该属体形瘦长,通常为黄色和黑色,部分物种有拟蜂形态,主要识别特征为触角梗节内侧端缘明显向前突出成指状,翅 R_{2+3} 脉和 R_{4+5} 脉的分支点接近 r-m 横脉。主要以后头中央骨片、额胛、小盾片、翅和足等颜色区分不同种,但部分物种外观形态和颜色极相似,仅能通过生殖器进行区分,如斯里兰卡指突水虻 *Ptecticus srilankai* 和福建指突水虻 *P. fukienensis*。指突水虻属昆虫幼虫腐食性,作为自然界的分解者可以用于处理畜禽粪便,还可作为动物饲料或用于提取生物柴油等(杨定等, 2014), 具有重要经济意义。叶明强等(2012b)对金黄指突水虻 *P. aurifer* 的营养成分分析发现,其老熟幼虫是一种优质的蛋白质饲料,且幼虫粉在一定程度上能促进肉鸡生长和其免疫器官的生长发育,提高肌肉总氨基酸和饱和脂肪酸含量(叶明强等, 2012a)。

几何形态学是一门基于图论的应用数学分支,能够定量分析和比较形态差异(白明等, 2014)。基本原理是先使用标点法将生物体之间的形状变量数字化,然后通过这些数字化的样本数据对不同样本进行变量分析和比较。几何形态学在其相关软件被开发后得到了快速发展(Rohlf and Marcus, 1993),目前广泛应用于各个领域,在昆虫上主要应用于形态特征分类、近似属种的区分、未知种的鉴定和探讨系统演化等(白明和杨星科, 2007; 葛德燕等, 2012)。国内外学者已将几何形态学应用于各个类群的昆虫分类研究中,如直翅目的跃度蝗属 *Podismopsis*, 双翅目的离腹寡毛实蝇属 *Bactrocera*、缟蝇科 *Lauxaniidae*、鳞翅目的灰蝶科 *Lycaenidae*、脉翅目的蚁蛉科 *Myrmeleontidae*、鞘翅目的蜣螂亚科 *Scarabaeinae* 和喜马象属 *Leptomias* 等(Prieto et al., 2009; Bai et al., 2012; 詹庆斌, 2014; 李玲等, 2017; 宋真真, 2017; 戚凌等, 2020; 杜梓甄, 2021),证明了几何形态学是区分昆虫微小形状变异的有力工具。

几何形态学方法不断发展,国内外已有大量研究表明其在昆虫分类研究中的重要作用。相比传统基于外部形态的鉴定方法,几何形态学能够

有效解决其无法解决分类问题,能够对形状和形状变异进行定量描述、分析及解释,并能够区分微小的形状变异,使分类结果更加直观与明显(白明等, 2014)。指突水虻属部分物种外观形态和颜色极为相似,仅通过外部形态难以区分,为解决此问题,本研究基于几何形态学方法分析了瘦腹水虻亚科指突水虻属 7 种水虻的翅脉形态,通过主成分分析、聚类分析和典型变量分析,评估该方法用于区分 7 种水虻的有效性和可行性,以期指突水虻属的系统分类提供更多证据,并为物种鉴定提供新途径,提高该属的分类研究水平。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究所用标本为作者个人采集和中国农业大学昆虫分类学实验室借用,采集地包括安徽、北京、福建、甘肃、贵州、海南、河北、内蒙古、山东、陕西、四川、台湾、西藏、云南和浙江。共选取指突水虻属 7 种 55 头标本(表 1)。

1.2 试验方法

1.2.1 标本鉴定 物种鉴定主要依据《中国水虻总科志》(杨定等, 2014),在体式光学显微镜(江南 JSZ5B)下对标本进行外部形态观察和雄性外生殖器解剖。

1.2.2 翅照片采集 使用 Canon EOS kiss $\times 7$ 相机借助自动堆叠摄影导轨和堆叠摄影垂直支架对每头标本右翅进行拍照,拍摄过程需保持镜头与翅面平行。拍摄后使用 Adobe Photoshop 23.0.2 软件对翅照片进行微调,照片命名为 Sa-Pt-种名缩写-编号。

1.2.3 地标点提取 地标点是指明显且易辨认的点,这些点可以在生物体上标出(闫宝荣和花保祯, 2010)。首先使用 tpsUtil ver.1.81 软件将翅照片转化为 tps 格式文件;然后在 tpsDig2 ver.2.32 软件中分别对水虻翅照片进行标点,每张翅照片均按照同样的位置和顺序标注 28 个地标点(图 1)。

表 1 标本信息表
Table 1 Informations of specimens

物种 Species	标本编号 Sample no.	采集地 Collecting site
金黄指突水虻 <i>P. aurifer</i>	Sa-Pt-001	西藏林芝察隅县八嘎桥 Baga Bridge, Chayu County, Nyingchi, Xizang
	Sa-Pt-010	甘肃成县浪沟峡 Langgou Gorge, Chengxian County, Gansu
	Sa-Pt-023	西藏林芝波密通麦 G318 国道路边 Beside G318 National Highway, Tongmai, Bome, Nyingchi, Xizang
	Sa-Pt-024	四川平武县老河沟自然保护区 Laohegou, Nature Reserve, Pingwu County, Sichuan
	Sa-Pt-025	北京门头沟区潭柘寺 Tanzhe Temple, Mentougou District, Beijing
	Sa-Pt-041	浙江金华药用植物园 Medical Plants Garden, Jinhuan, Zhejiang
	Sa-Pt-042	安徽六安金寨县马鬃岭林场 Mazongling Forest Farm, Jinzhai County, Liu'an, Anhui
	Sa-Pt-043	西藏林芝排龙老虎咀 Laohuzui, Pailong, Nyingchi, Xizang
	Sa-Pt-044	西藏林芝墨脱扎墨公路 80K 80K of Zhamu-Motuo Highway, Motuo, Nyingchi, Xizang
	Sa-Pt-045	西藏林芝察隅县上察隅镇 Shangchayu Town, Chayu County, Nyingchi, Xizang
	Sa-Pt-006	福建龙岩新罗区天宫山 Tiangong Mountain, Xinluo District, Longyan, Fujian
	Sa-Pt-017	福建龙岩新罗区天宫山 Tiangong Mountain, Xinluo District, Longyan, Fujian
福建指突水虻 <i>P. fukienensis</i>	Sa-Pt-046	福建龙岩新罗区天宫山 Tiangong Mountain, Xinluo District, Longyan, Fujian
	Sa-Pt-047	福建龙岩新罗区天宫山 Tiangong Mountain, Xinluo District, Longyan, Fujian
	Sa-Pt-048	福建龙岩新罗区天宫山 Tiangong Mountain, Xinluo District, Longyan, Fujian
	Sa-Pt-049	福建龙岩新罗区天宫山 Tiangong Mountain, Xinluo District, Longyan, Fujian
	Sa-Pt-012	山东泰安竹林寺 Zhulin Temple, Tai'an, Shandong
日本指突水虻 <i>P. japonicus</i>	Sa-Pt-005	北京门头沟区王平新板桥 Xinban Bridge, Wangping, Mentougou District, Beijing
	Sa-Pt-022	贵州安顺龙宫 Dragon Palace Scenic Spot, Anshun, Guizhou
	Sa-Pt-026	河北雾灵山四县交界 Intersection of Four Counties, Wuling Mountain, Hebei
	Sa-Pt-027	内蒙古小青湖 Xiaoqing Lake, Inner Mongolia
	Sa-Pt-050	山东泰安下港镇茶园 Tea Garden, Xiagang Town, Tai'an, Shandong
	Sa-Pt-051	山东泰安药乡林场 Yaoxiang Forest Farm, Tai'an, Shandong
	Sa-Pt-052	山东淄博鲁山森林公园青山石 Qingshan Stone, Lushan National Forest Park, Zibo, Shandong
	Sa-Pt-053	山东淄博鲁山森林公园马场 Horse Ranch, Lushan National Forest Park, Zibo, Shandong

续表 1 (Table 1 continued)

物种 Species	标本编号 Sample no.	采集地 Collecting site
长翅指突水虻 <i>P. longipennis</i>	Sa-Pt-003	西藏林芝上察隅镇本堆村 Bendui Village, Shangchayu Town, Nyingchi, Xizang
	Sa-Pt-018	甘肃康县何家庄 Hejia Village, Kang County, Gansu
	Sa-Pt-029	甘肃康县大水沟 Dashuigou, Kang County, Gansu
	Sa-Pt-030	海南五指山娘母庙 Niangmu Temple, Wuzhi Mountain, Hainan
	Sa-Pt-031	四川平武县老河沟自然保护区 Laohegou Nature Reserve, Pingwu County, Sichuan
	Sa-Pt-054	陕西镇安县茨沟村 Cigou Village, Zhen'an County, Shaanxi
	Sa-Pt-055	甘肃康县大水沟 Dashuigou, Kang County, Gansu
	Sa-Pt-056	甘肃康县何家庄 Hejia Village, Kang County, Gansu
	Sa-Pt-057	四川峨眉山净水 Jingshui, Emei Mountain, Sichuan
新昌指突水虻 <i>P. sichangensis</i>	Sa-Pt-013	北京门头沟区王平新板桥 Xinban Bridge, Wangping, Mentougou District, Beijing
	Sa-Pt-019	山东泰安泰山铁佛寺 (马氏网) Iron Buddha Temple (Malaise trap), Mount Tai, Tai'an, Shandong
	Sa-Pt-040	山东临沂蒙山大洼林场 Dawa Forest Farm, Meng Mountain, Linyi, Shandong
斯里兰卡指突水虻 <i>P. srilankai</i>	Sa-Pt-004	西藏林芝墨脱米日村 Miri Village, Motuo, Nyingchi, Xizang
	Sa-Pt-011	西藏林芝墨脱江新村 (灯诱) Jiangxin Village (Light trap), Motuo, Nyingchi, Xizang
	Sa-Pt-035	西藏林芝墨脱德兴大桥 Dexing Bridge, Motuo, Nyingchi, Xizang
	Sa-Pt-036	海南五指山娘母庙 Niangmu Temple, Wuzhi Mountain, Hainan
	Sa-Pt-058	西藏林芝墨脱米日村 Miri Village, Motuo, Nyingchi, Xizang
	Sa-Pt-059	西藏林芝墨脱米日村 Miri Village, Motuo, Nyingchi, Xizang
	Sa-Pt-060	西藏林芝墨脱米日村 Miri Village, Motuo, Nyingchi, Xizang
	Sa-Pt-061	西藏林芝墨脱米日村 Miri Village, Motuo, Nyingchi, Xizang
狡猾指突水虻 <i>P. vulpianus</i>	Sa-Pt-014	四川稻城县 (灯诱) Daocheng County (Light trap), Sichuan
	Sa-Pt-008	北京门头沟区王平新板桥 Xinban Bridge, Wangping, Mentougou District, Beijing
	Sa-Pt-037	西藏林芝下察隅镇沙玛村 Shama Village, Xiachayu Town, Nyingchi, Xizang
	Sa-Pt-038	台湾高雄热带植物园 Tropical Botanical Garden, Kaohsiung, Taiwan
	Sa-Pt-039	云南腾冲县高黎贡 Gaoligong, Tengchong County, Yunnan
	Sa-Pt-062	四川峨眉山清音阁 Qingyin Pavilion, Emei Mountain, Sichuan
	Sa-Pt-063	四川峨眉山清音阁 Qingyin Pavilion, Emei Mountain, Sichuan
	Sa-Pt-064	云南昆明云南农业大学后山 Back Mountain of Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan
	Sa-Pt-065	云南昆明云南农业大学后山 Back Mountain of Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan
	Sa-Pt-066	四川峨眉山净水 Jingshui, Emei Mountain, Sichuan

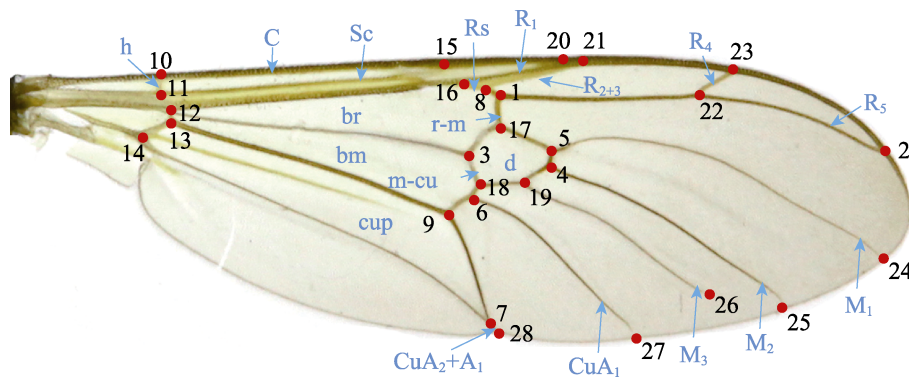


图 1 指突水虻翅的 28 个地标点

Fig. 1 28 landmarks on the wing of *Plecticus*

h: 肩横脉; C: 前缘脉; Sc: 亚前缘脉; Rs: 径分脉; R_1 : 第 1 径脉; R_{2+3} : 第 2、3 合径脉; R_4 : 第 4 径脉; R_5 : 第 5 径脉; M_1 : 第 1 中脉; M_2 : 第 2 中脉; M_3 : 第 3 中脉; CuA_1 : 第 1 前肘脉; CuA_2+A_1 : 肘臀合脉; r-m: 径中横脉; m-cu: 中肘横脉; br: 径基室; bm: 中基室; cup: 后肘室; d: 盘室; 1: h 脉与 C 脉交点; 2: h 脉与 Sc 脉交点; 3: br 室与 bm 室基部交点; 4: cup 室与 bm 室基部交点; 5: CuA_1 和 A 脉分支点; 6: Sc 脉端点; 7: Rs 脉与 R_1 脉分支点; 8: r-m 脉与 Rs 脉交点; 9: r-m 脉与盘室交点; 10: br 室与 bm 室与盘室交点; 11: m-cu 脉与盘室交点; 12: m-cu 脉和 CuA_1 脉交点; 13: CuA_1 脉和 CuA_2 脉分支点; 14: M_1 脉与盘室交点; 15: M_2 脉与盘室交点; 16: M_3 脉与盘室交点; 17: R_1 脉端点; 18: Rs 脉与 R_{2+3} 脉分支点; 19: R_{2+3} 脉端点; 20: R_4 脉端点; 21: R_4 脉与 R_5 脉分支点; 22: R_5 脉端点; 23: M_1 脉端点; 24: M_2 脉端点; 25: M_3 脉端点; 26: CuA_1 脉端点; 27: CuA_2+A_1 脉端点; 28: CuA_2 脉与 A_1 脉交点。图 2 同。

h: Humeral vein; C: Costal vein; Sc: Subcostal vein; Rs: Radial sector vein; R_1 : 1st radial vein; R_{2+3} : The fused 2nd and 3rd radial veins; R_4 : 4th radial vein; R_5 : 5th radial vein; M_1 : 1st medial vein; M_2 : 2nd medial vein; M_3 : 3rd medial vein; CuA_1 : 1st anterior cubital vein; CuA_2+A_1 : Fused cubital-anal vein; r-m: Radial-medial cross-vein; m-cu: Median-cubital cross-vein; br: Basal radial cell; bm: Basal medial cell; cup: Posterior cubital cell; d: Discal cell; 1: Intersection of humeral (h) and costal veins (C); 2: Intersection of humeral (h) and subcostal vein (Sc); 3: Intersection of cell br and base of cell bm; 4: Intersection of cell cup and base of cell bm; 5: Branch points of veins CuA_1 and A; 6: Endpoint of subcostal vein (Sc); 7: Branch points of veins Rs and R_1 ; 8: Intersection of veins r-m and Rs; 9: Intersection of vein r-m and cell dm; 10: Intersection of cell br, cell bm and cell dm; 11: Intersection of vein m-cu and cell dm; 12: Intersection of veins m-cu and CuA_1 ; 13: Branch points of veins CuA_1 and CuA_2 ; 14: Intersection of vein M_1 and cell dm; 15: Intersection of vein M_2 and cell dm; 16: Intersection of vein M_3 and cell dm; 17: Endpoint of vein R_1 ; 18: Branch points of veins Rs and R_{2+3} ; 19: Endpoint of vein R_{2+3} ; 20: Endpoint of vein R_4 ; 21: Branch points of veins R_4 and R_5 ; 22: Endpoint of vein R_5 ; 23: Endpoint of vein M_1 ; 24: Endpoint of vein M_2 ; 25: Endpoint of vein M_3 ; 26: Endpoint of vein CuA_1 ; 27: Endpoint of vein CuA_2+A_1 ; 28: Intersection of veins CuA_2 and A_1 . The same for Fig. 2.

1.2.4 数据分析 使用 tpsRelw ver.1.74 进行平均翅形和地标点变异分析。使用 Past4.08 软件进行主成分分析和聚类分析, 首先将标点后的 tps 文件导入, 通过普氏叠加消除提取地标点时因翅大小、放置位置及方向等非形状因素造成的误差, 然后分别进行主成分分析和聚类分析。使用 MorphoJ 1.07a 进行典型变量分析, 先将标点数据的 ID 和图片格式隐藏, 在软件中经普氏叠加和创建分类条件后进行典型变量分析。

2 结果与分析

2.1 7 种指突水虻翅的平均翅形及变异度分析

基于 28 个地标点计算得到指突水虻属 7 种

的平均翅形及地标点变异图 (图 2)。由图 2 可知变异较大的地标点为 2 (R_5 脉端点)、15 (Sc 脉端点)、20 (R_1 脉端点)、21 (R_{2+3} 脉端点)、22 (R_4 脉与 R_5 脉分支点)、23 (R_4 脉端点)、26 (M_3 脉端点) 和 28 (CuA_2+A_1 脉端点), 其余地标点的位置比较稳定。综合来看, 7 种指突水虻翅的变异部位主要在亚前缘脉 (Sc) 和径脉分支 (R_1 - R_5) 的端部。

2.2 7 种指突水虻翅的主成分分析

对指突水虻属 7 个物种的右翅 28 个地标点进行主成分分析共获得 56 个主成分, 其中第一主成分 (PC1) 占 42.053%, 第二主成分 (PC2) 占 20.038%, 前两个主成分共占 62.091%, 可以用来

解释 7 种指突水虻在翅形上的主要差异(表 2)。

由图 3 可知,日本指突水虻 *P. japonicus*、金黄指突水虻 *P. aurifer*、新昌指突水虻 *P. sichangensis* 和长翅指突水虻 *P. longipennis* 在散点图上完全分离,与其他物种无重叠,说明这 4 种指突水虻翅形与其他种存在明显差异,从翅脉形状上能够将其有效区分;福建指突水虻 *P. fukienensis*、狡猾指突水虻 *P. vulpianus* 和斯里

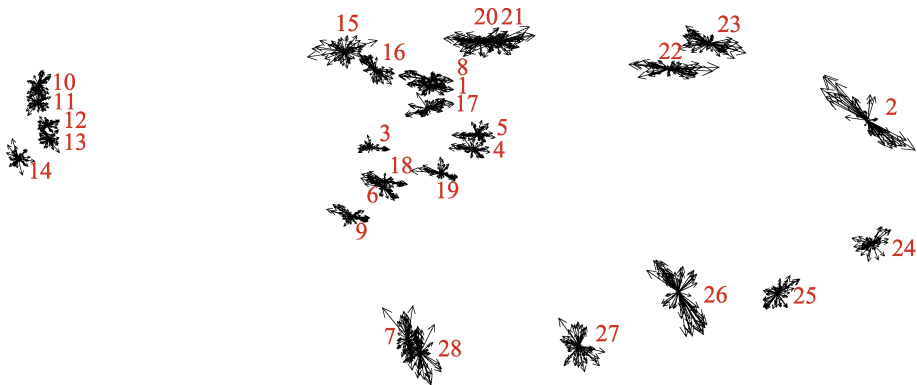


图 2 7 种指突水虻的平均翅形及 28 个地标点变异图

Fig. 2 The mean wing shape and 28 landmarks variation plots of 7 species of *Ptecticus*

表 2 第一、第二主成分的特征值、占总体的贡献率及累计贡献率

Table 2 Eigenvalues, variance and cumulative of the first and second principal components

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalues	占总体贡献率 (%) Variance (%)	累计贡献率 (%) Cumulative (%)
PC1	0.001 460 130	42.053	42.053
PC2	0.000 695 758	20.038	62.091

PC1: 第一主成分; PC2: 第二主成分。图 3 同。

PC1: Principal component 1; PC2: Principal component 2. The same for Fig. 3.

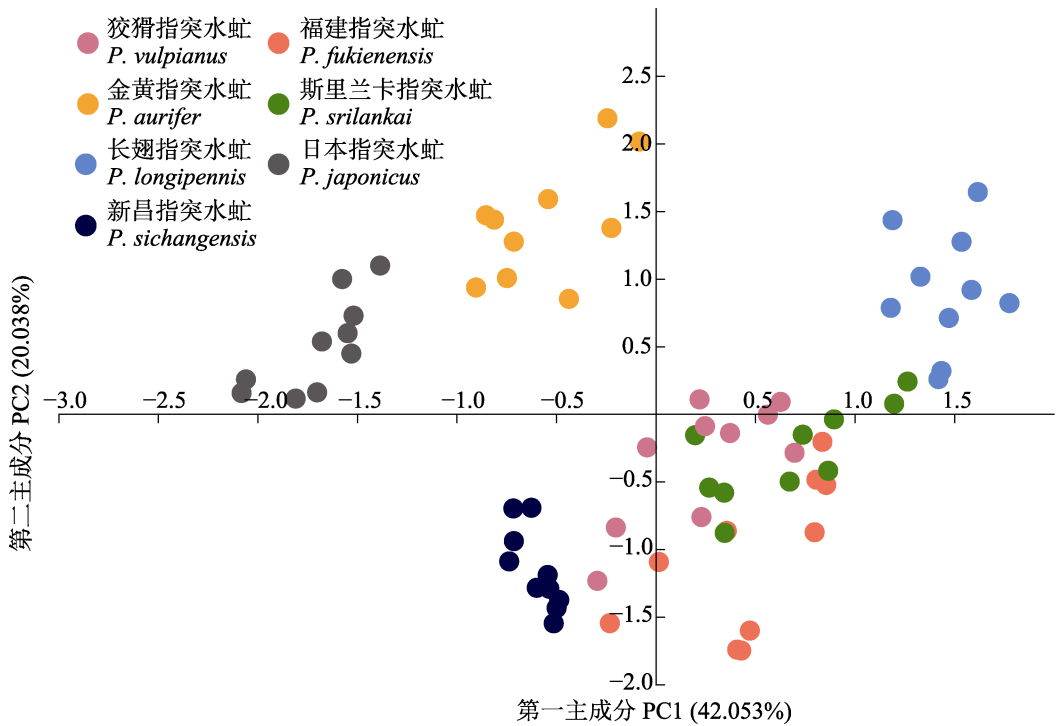


图 3 7 种指突水虻的主成分分析

Fig. 3 The principal component analysis of 7 species of *Ptecticus*

兰卡指突水虻 *P. srilankai* 散点图有部分重叠, 说明这 3 种翅脉差异不明显。

2.3 7 种指突水虻翅的聚类分析

利用平均翅形的普氏距离结果, 基于非加权

组平均法对 7 种指突水虻进行聚类分析, 得到聚类分析表型树 (图 4)。由图 4 可知, 表型树先分为两大支, 日本指突水虻 *P. japonicus* 和金黄指突水虻 *P. aurifer* 聚为一支, 其他 5 种聚为一支。其中日本指突水虻 *P. japonicus* 和金黄指突

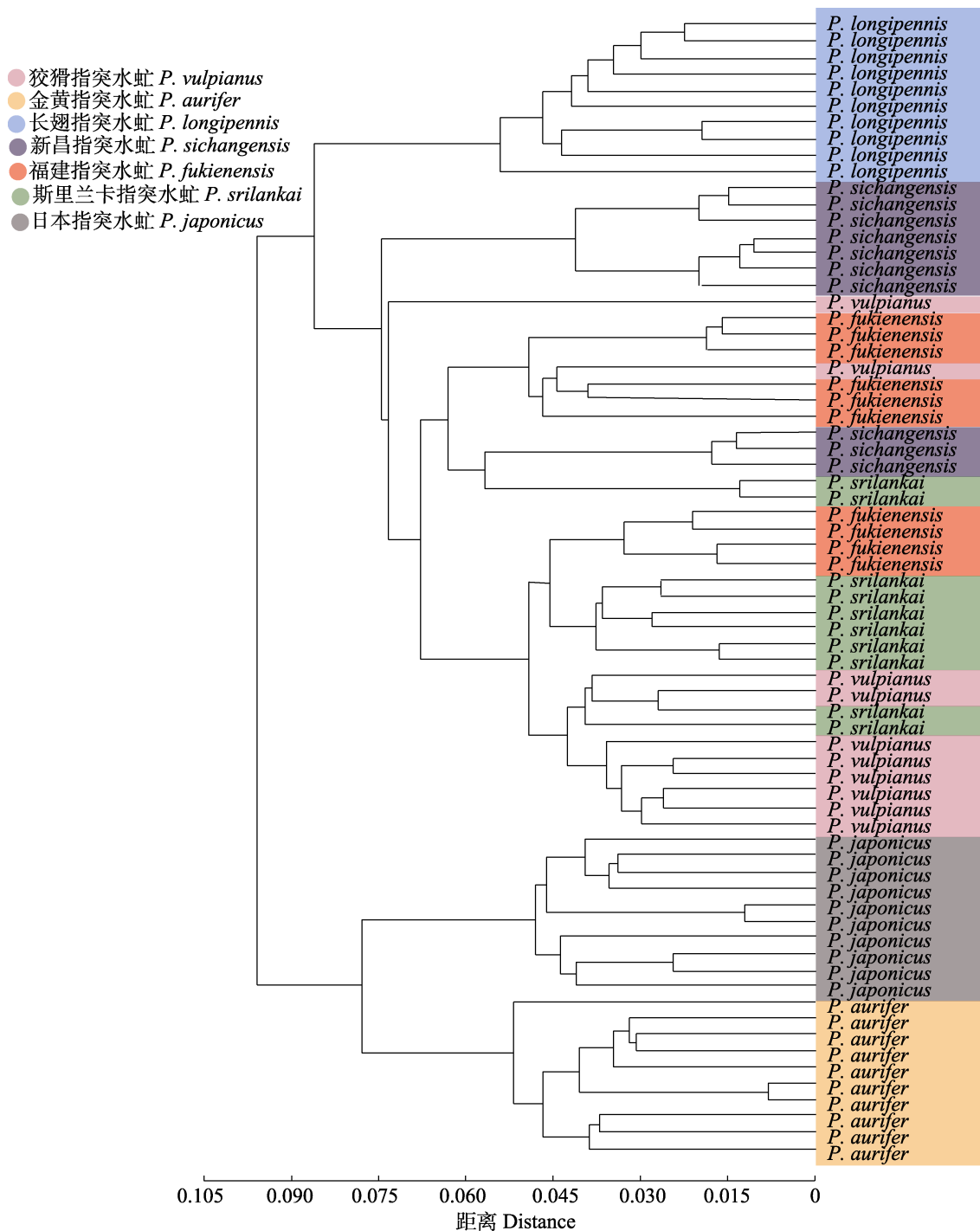


图 4 7 种指突水虻的聚类分析
Fig. 4 Cluster analysis of 7 species of *Ptecticus*

水虻 *P. aurifer* 又各自聚为一支,说明这 2 种水虻相较于其他 5 种翅形相似度高,而 2 种间的翅形又有一定差异。在 5 种分支中长翅指突水虻 *P. longipennis* 单独聚为一支,其他 3 种部分物种互有交叉,说明长翅指突水虻 *P. longipennis* 与其他 4 种翅形差异大,而新昌指突水虻 *P. sichangensis*、福建指突水虻 *P. fukienensis*、狡猾指突水虻 *P. vulpianus* 和斯里兰卡指突水虻 *P. srilankai* 翅形较为相似。

2.4 7 种指突水虻翅的典型变量分析

对指突水虻属 7 种水虻右翅进行典型变量分析,以第一典型变量 CV1 为横坐标,第二典型变量 CV2 为纵坐标作散点图(图 5)。由图 5 可知,7 种指突水虻均各自聚集在一起,说明该方法的分类效果理想,可以通过典型变量分析将不同物种完全区分开。由马氏距离及其 *P* 值比较(表 3)和普氏距离及其 *P* 值比较(表 4)可知,7 种指突水虻两两之间 *P* 值均小于 0.05,表明不同种间翅脉形态比较均有显著性差异,研究结果具有统计学意义。斯里兰卡指突水虻和狡猾指突水虻之间的马氏距离最小,为 18.991 5,说明 2

种水虻的翅形差异最小;日本指突水虻和新昌指突水虻的马氏距离最大,为 82.5416,说明两者的翅形差异最大,此结果与 7 种指突水虻的聚类分析结果一致。

选取未知种 W1 和 W2 进行典型变量分析对上述分类结果进行验证,结果如图 6。由图 6 可知,未知种 W1 与狡猾指突水虻 *P. vulpianus* 所在集团接近,初步判断其为狡猾指突水虻;未知种 W2 与金黄指突水虻 *P. aurifer* 所在集团接近,初步判断其为金黄指突水虻。两个未知种的鉴定结果与传统形态学鉴定结果一致,进一步证明了应用几何形态学方法鉴定该属昆虫的可行性。

3 讨论

昆虫是生物界中最大的类群,物种鉴定费时耗力。指突水虻属部分物种仅通过外部形态难以区分,加之有些标本存在部分残缺,使可用的分类条件更少,难以鉴定到种。翅在指突水虻属的分类鉴定中有重要作用,比如该属的特征有 R_{2+3} 脉从 *r-m* 横脉处发出或接近 *r-m* 横脉,以及 *r-m* 横脉和 R_{2+3} 脉之间的 *Rs* 脉不存在或与 *r-m* 横脉

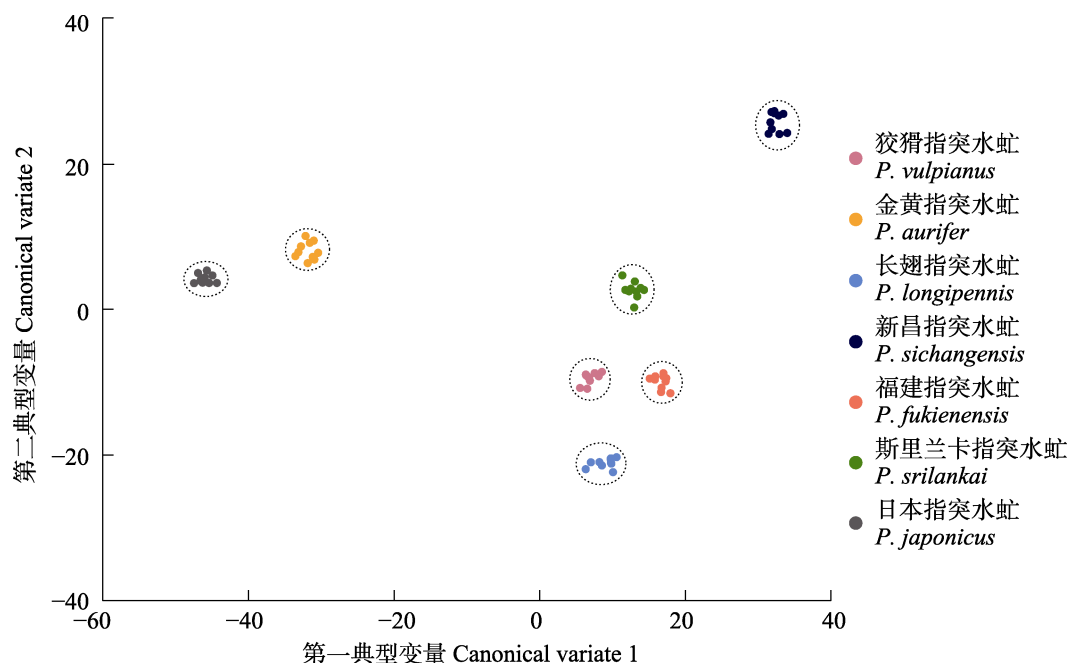


图 5 7 种指突水虻的典型变量分析

Fig. 5 Canonical variate analysis of 7 species of *Ptecticus*

表 3 7 种指突水虻翅的马氏距离及显著性比较 (基于 10 000 次重复)
Table 3 Shape difference of wing of 7 species of *Ptecticus* based on the Mahalanobis distance and significant test (based on 10 000 permutation rounds)

	金黄指突水虻 <i>P. aurifer</i>	福建指突水虻 <i>P. fukienensis</i>	日本指突水虻 <i>P. japonicus</i>	长翅指突水虻 <i>P. longipennis</i>	新昌指突水虻 <i>P. sichangensis</i>	斯里兰卡指突水虻 <i>P. srilankai</i>
福建指突水虻 <i>P. fukienensis</i>	0.083 0 (<0.000 1)					
日本指突水虻 <i>P. japonicus</i>	0.066 5 (<0.000 1)	0.095 0 (<0.000 1)				
长翅指突水虻 <i>P. longipennis</i>	0.087 0 (<0.000 1)	0.068 6 (<0.000 1)	0.122 0 (<0.000 1)			
新昌指突水虻 <i>P. sichangensis</i>	0.073 6 (<0.000 1)	0.057 9 (<0.000 1)	0.075 6 (<0.000 1)	0.100 8 (0.000 1)		
斯里兰卡指突水虻 <i>P. srilankai</i>	0.069 0 (<0.000 1)	0.041 7 (0.000 1)	0.099 5 (<0.000 1)	0.056 8 (<0.000 1)	0.063 1 (<0.000 1)	
狡猾指突水虻 <i>P. vulpianus</i>	0.063 0 (<0.000 1)	0.040 2 (<0.000 1)	0.085 5 (<0.000 1)	0.071 9 (<0.000 1)	0.061 9 (<0.000 1)	0.031 5 (0.001 4)

表中括号内数据为显著性分析结果 *P* 值, 所用方法为置换检验 (Permutation test) 。表 4 同。
The data in brackets in the table are the *P*-values of the significance analysis results, the method used is permutation test. The same for Table 4.

表 4 7 种指突水虻翅的普氏距离及显著性比较 (基于 10 000 次重复)
Table 4 Shape difference of wing of 7 species of *Ptecticus* based on the Procrustes distance and significant test (based on 10 000 permutation rounds)

	金黄指突水虻 <i>P. aurifer</i>	福建指突水虻 <i>P. fukienensis</i>	日本指突水虻 <i>P. japonicus</i>	长翅指突水虻 <i>P. longipennis</i>	新昌指突水虻 <i>P. sichangensis</i>	斯里兰卡指突水虻 <i>P. srilankai</i>
福建指突水虻 <i>P. fukienensis</i>	56.329 5 (<0.000 1)					
日本指突水虻 <i>P. japonicus</i>	38.357 8 (<0.000 1)	66.528 6 (<0.000 1)				
长翅指突水虻 <i>P. longipennis</i>	53.878 9 (<0.000 1)	23.117 3 (<0.000 1)	64.852 7 (<0.000 1)			
新昌指突水虻 <i>P. sichangensis</i>	70.601 1 (<0.000 1)	40.687 2 (<0.000 1)	82.541 6 (<0.000 1)	53.434 9 (<0.000 1)		
斯里兰卡指突水虻 <i>P. srilankai</i>	50.426 4 (<0.000 1)	21.313 6 (0.000 1)	62.644 0 (<0.000 1)	33.066 6 (<0.000 1)	35.231 3 (<0.000 1)	
狡猾指突水虻 <i>P. vulpianus</i>	51.852 2 (<0.000 1)	20.206 4 (<0.000 1)	57.294 2 (<0.000 1)	29.570 9 (<0.000 1)	47.312 1 (<0.000 1)	18.991 5 (<0.000 1)

等长 (杨定等, 2014) ; 部分物种可以根据 Cup 脉是否发达或 *M*₃ 是否弯曲来区分。但这些特征的描述都比较模糊, 在实际鉴定过程中应用起来有一定难度, 且鉴定者个人经验等因素会影响鉴定结果的准确性, 所以定性的形态比较具有很多局限性, 无法精确记录和描述形态差异, 不能够高效处理大量数据, 也难以利用数学工具进行分析等 (白明等, 2014) 。几何形态学克服了传统形态差异描述中的单一变量和几个独立变量比

较的缺陷, 通过计算翅的地标点间的几何关系, 结合一系列统计方法和变形网格将翅形态上的变异客观准确地呈现出来, 分类效果直观与明显 (白明等, 2014) 。
昆虫的翅是平面结构且不易扭曲变形, 并且二维图像的获取比较容易 (Dujardin *et al.*, 2003) 。目前, 在运用几何形态学方法进行昆虫分类和系统发育研究中, 翅为最常用的研究对象。本研究利用几何形态学方法对指突水虻属

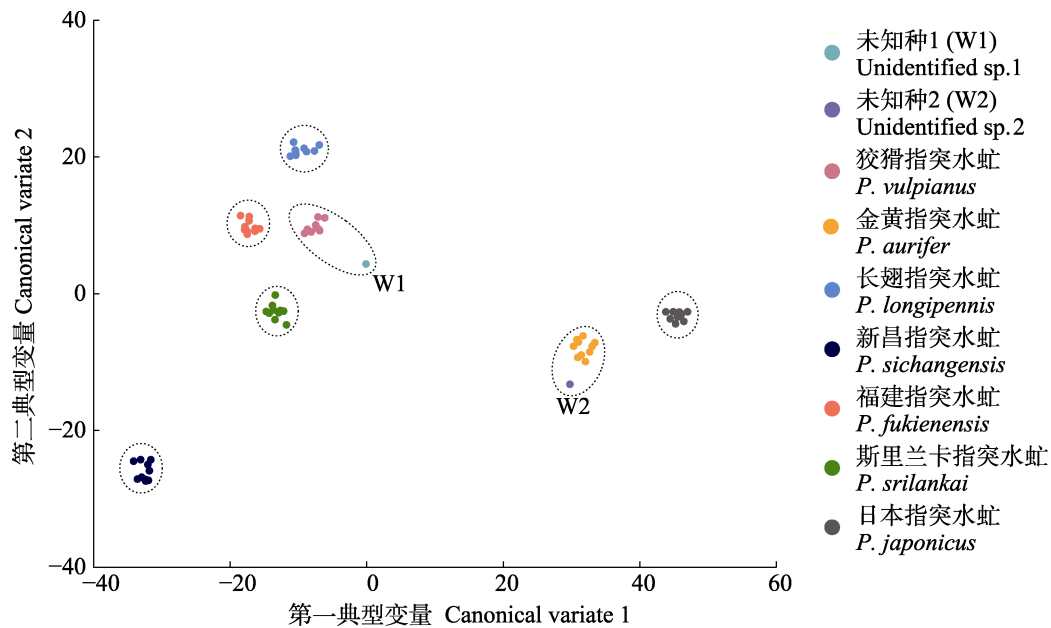


图6 指突水虻属未知种鉴定的典型变量分析

Fig. 6 Canonical variate analysis of identification of unknown species in *Ptecticus*

7种水虻的翅脉进行了量化分析,结果表明7种指突水虻在翅脉形状上存在明显差异;翅脉形状变异部位主要在亚前缘脉(Sc)和径脉分支(R_1 - R_5)端部,通过典型变量分析能够将其区分开。此外,通过几何形态学方法分析得到的结果与传统分类学鉴定结果一致,证明了该方法的可行性。几何形态学方法为指突水虻属的分类鉴定提供了一种新方法,也为整合系统发育信息的深入研究奠定了基础。指突水虻属部分物种外观形态和颜色极相似,仅能通过生殖器区分,而雌虫无法通过外部形态或生殖器有效鉴定,几何形态学方法为此提供了一个新的鉴定思路。

几何形态学的聚类分析结果并不足以代表样本的亲缘关系,准确确定样本间的系统发育关系还需结合分子生物学的相关数据(邓维安等,2019)。本研究仅选取了指突水虻属的7种水虻,部分种类的标本数量较少,可能对试验结果有一定影响。翅的轮廓也是分类中的重要特征,可使用轮廓法(Outline methods)进行研究,通常是以一定的顺序沿着轮廓选取坐标点,并将这些坐标点作为数据资料进行分析(闫宝荣和花保祯,2010)。本研究仅使用了标点法,未结合轮廓法对翅轮廓的变化进行研究,后续可增加标本数

量,结合翅轮廓进一步证明翅在分类中的重要性,还可结合分子生物学技术探究其系统发育关系,从而实现更加准确的分类鉴定,最终实现样本的自动识别。

致谢: 特别感谢中国农业大学杨定教授实验室提供的部分标本。本篇论文的关联数据(DOI/CSTR: 10.57760/sciencedb.08852)可在科学数据银行 Science Data Bank (ScienceDB) 数据库(<https://www.scidb.cn/s/3QB7ri>)中访问获取。

参考文献 (References)

- Bai M, Yang XK, 2007. Application of geometric morphometrics in biological researches. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(1): 143-147. [白明, 杨星科, 2007. 几何形态测量法在生物形态学研究中的应用. *昆虫知识*, 44(1): 143-147.]
- Bai M, Beutel RG, Song KQ, Liu WG, Malqin H, Li S, Hu XY, Yang XK, 2012. Evolutionary patterns of hind wing morphology in dung beetles (Coleoptera: Scarabaeinae). *Arthropod Structure & Development*, 41(5): 505-513.
- Bai M, Yang XK, Li J, Wang WC, 2014. Geometric morphometrics, a super scientific computing tool in morphology comparison. *Chinese Science Bulletin*, 59(10): 887-894. [白明, 杨星科, 李静, 王文成, 2014. 几何形态学: 关于形态定量比较的科学计算工具. *科学通报*, 59(10): 887-894.]

- Deng WA, Yao DH, Gu B, 2019. Morphometrics analysis on the pronotum of Tetrigoidea. *Journal of Hechi University*, 39(2): 1–7. [邓维安, 姚大亨, 谷博, 2019. 蚱类昆虫前胸背板几何形态测量学分析. 河池学院学报, 39(2): 1–7.]
- Dujardin JP, Le Pont, Baylac M, 2003. Geographical versus interspecific differentiation of sand flies (Diptera: Psychodidae): A landmark data analysis. *Bulletin of Entomological Research*, 93(1): 87–90.
- Du ZZ, 2021. Rapid identification of the genus *Podismopsis* and similar genera (species) in morphology based on geometric morphology (Orthoptera: Acridoidea). Master dissertation. Shenyang: Shenyang Agricultural University. [杜梓甄, 2021. 基于几何形态学对跃度蝗属及其形态近似属种的快速鉴定(直翅目: 蝗总科). 硕士学位论文. 沈阳: 沈阳农业大学.]
- Ge DY, Xia L, Lü XF, Huang CM, Yang QS, Huang JH, 2012. Methods in geometric morphometrics and their applications in ontogenetic and evolutionary biology of animals. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 37(2): 296–304. [葛德燕, 夏霖, 吕雪霏, 黄乘明, 杨奇森, 黄建华, 2012. 几何形态学方法及其在动物发育与系统进化研究中的应用. 动物分类学报, 37(2): 296–304.]
- Li L, Dang HY, Ding SY, Zhan QB, Gao LL, Ma RY, Zhao ZG, Zhang LJ, 2017. A preliminary geometric morphometric analysis of wing shape variation among three important species of the genus *Bactrocera* (Diptera: Tephritidae: Bactrocera). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(1): 84–91. [李玲, 党海燕, 丁三寅, 詹庆斌, 高玲玲, 马瑞燕, 赵志国, 张利军, 2017. 基于几何形态学对三种实蝇翅脉形态分析(Diptera: Tephritidae: Bactrocera). 应用昆虫学报, 54(1): 84–91.]
- 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 *C. carswelli* different species? *Deutsche Entomologische Zeitschrift*, 56(1): 137–147.
- Qi L, He XY, Li WL, 2020. A preliminary study on the geometric morphology of the higher taxa in Chinese Lauxaniidae (Diptera: Lauxanioidea). *Sichuan Journal of Zoology*, 39(3): 301–308. [戚凌, 何向怡, 李文亮, 2020. 中国缟蝇科(双翅目: 缟蝇总科)高级阶元的几何形态学分析. 四川动物, 39(3): 301–308.]
- Rohlf JF, Marcus LF, 1993. A revolution morphometrics. *Trends in Ecology & Evolution*, 8(4): 129–132.
- Song ZZ, 2017. Comparative morphology of important diagnosis characters of *Leptomias* generic group from China. Master dissertation. Tai'an: Shandong Agricultural University. [宋真真, 2017. 中国喜马象属团重要结构的比较形态学. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]
- Yan BR, Hua BZ, 2010. Geometric morphometrics and its application in the systematics and phylogenetics of insects. *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.]
- Yang D, Zhang TT, Li Z, 2014. Stratiomyoidea of China. Beijing: China Agricultural University Press. 1–870. [杨定, 张婷婷, 李竹, 2014. 中国水虻总科志. 北京: 中国农业大学出版社. 1–870.]
- Yang ZH, Chen XM, Yang MF, 2015. Two new species and two new records of *Ptecticus* Loew (Diptera: Stratiomyidae: Sargiinae) from China. *Zootaxa*, 3964(4): 433–444.
- Ye MQ, Chen XF, Kuang ZS, Guo MF, Zhao XJ, Luo QL, Wang FB, Luo GQ, Ye JL, 2012a. Effects of stratiomyiid larva on the growth performance and blood indices of broilers. *Animal Husbandry and Feed Science*, 33(3): 4–6. [叶明强, 陈小凤, 邝哲师, 郭明昉, 赵祥杰, 罗秋兰, 王付彬, 罗国庆, 叶剑利, 2012. 水虻幼虫粉对肉鸡生长性能、血液指标等的影响. 畜牧与饲料科学, 33(3): 4–6.]
- Ye MQ, Kuang ZS, Zhao XJ, Luo QL, Luo GQ, Chen XF, Guo MF, Hou BH, 2012b. Evaluation of the nutritional value of *Ptecticus aurifer* as a protein feed. *China Feed*, 2012(3): 40–42. [叶明强, 邝哲师, 赵祥杰, 罗秋兰, 罗国庆, 陈小凤, 郭明昉, 侯柏华, 2012. 金黄指突水虻作为蛋白质饲料的营养价值评价. 中国饲料, 2012(3): 40–42.]
- Zhan QB, 2014. Geometric morphometric analysis of wing shape in Chinese antlion and taxonomic review of four genera (Neuroptera, Myrmeleontidea). Doctor dissertation. Beijing: China Agricultural University. [詹庆斌, 2014. 中国蚁蛉科翅几何形态学研究及其四属的分类修订. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学.]