

doi: 10.3969/j.issn.1674-0858.2016.02.17

基于蛾翅翅脉特征的夜蛾昆虫数字化分类研究 (鳞翅目: 夜蛾科)

蔡小娜¹, 韩旭², 沈佐锐³, 黄大庄^{4*}, 米爽⁴

(1. 河北农业大学基础课部, 河北保定 071000; 2. 河北农业大学理学院, 河北保定 071000;

3. 中国农业大学农学与生物技术学院/IPMist 实验室, 北京 100193; 4. 河北农业大学园林与旅游学院, 河北保定 071000)

摘要: 本文以夜蛾昆虫为研究对象, 利用蛾右前翅翅脉特征对 7 种夜蛾昆虫进行数字化分类研究。首先, 利用软件 tpsDig2 提取蛾翅翅室周围翅脉交点作为标记点; 再利用普世叠加方法消除非形状因素等信息, 计算出每一个翅脉交点与初始交点的距离作为特征参数; 最后, 利用方差分析和逐步判别分析验证各项特征参数对 7 种夜蛾进行分类的可行性、有效性和重要性。研究结果表明, 筛选出 5 项特征参数可以作为分类变量, 其作用大小依次为: $(Dis_{16}, Dis_{17}) > (Dis_{13}, Dis_{15}) > Dis_{12}$, 原始判别和交叉判别结果的正确率分别为 96.2% 和 96.2%。这说明蛾翅翅脉的特征参数可用于蛾类昆虫的数字化分类鉴定。

关键词: 夜蛾; 翅脉; 标记点; 分类

中图分类号: Q969.42; S433.4

文献标志码: A

文章编号: 1674-0858 (2016) 02-0348-06

Digital classification of noctuid moths (Lepidoptera: Noctuidae) base on wings vein characteristics

CAI Xiao-Na¹, HAN Xu², SHEN Zuo-Rui³, HUANG Da-Zhuang^{4*}, MI Shuang⁴ (1. Department of Basic Courses, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, Hebei Province, China; 2. College of Science, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, Hebei Province, China; 3. College of Agronomy and Biotechnology/IPMist Laboratory, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 4. College of Landscape and Travel, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, Hebei Province, China)

Abstract: This study was performed on noctuid moths and vein characteristics of the right forewings were adopted to classify seven noctuid species. Firstly, junctions of veins around cell wing from the seven noctuid species were selected as landmarks by using software tpsDig2. Then, procrustes superimposition was applied to remove non-shape variation from the landmark coordinates, and the distance between initial node and each vein node was calculated as characteristic parameters. Last, variance analysis and stepwise discriminant analysis methods were used to study the feasibility, validity and importance of each characteristic parameter as classification criterions on the seven noctuid species. The results showed that five characters were selected as the classification variables. The contribution of these variables could be ranked as follows: $(Dis_{16}, Dis_{17}) > (Dis_{13}, Dis_{15}) > Dis_{12}$. Accuracies of original and the intersecting discriminant analysis were 96.2% and 96.2% respectively. The results indicated that vein characteristics parameters of moth wings could be used for digital identification of moths.

Key words: Noctuid moths; vein; landmark; identification

基金项目: 国家林业局 948 项目 (2013-4-75)

作者简介: 蔡小娜, 女, 1983 年生, 汉族, 河北省易县人, 博士, 讲师, 研究方向昆虫数字化分类与生物数学, E-mail: xuecaixiaona@163.com

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: huangdazhuang@126.com

收稿日期 Received: 2015-07-25; 接受日期: 2015-08-15

蛾类昆虫是昆虫纲中一个大的类群, 大部分蛾类昆虫均属于农林业重要害虫, 其危害方式多样, 且为害植物种类繁多, 其中有果树、林木、油料、粮食等重要作物 (朱弘复, 1980; 彩万志等, 2001)。农林业生产中经常受到蛾类害虫的困扰, 此外, 在货物运输、植物检疫、粮食储藏等工作中也经常会遇到蛾类危害问题。对蛾类害虫进行测报与防治及动植物检疫等工作的前提是快速而准确地对昆虫物种进行鉴定。

图像处理和数理统计学的发展促进了昆虫数字化分类的迅速发展, 世界各国的昆虫学家从传统分类方法逐渐转向以计算机图像数字化为核心技术的数字化分类。Prieto 等 (2009) 利用形态测量学方法, 探讨了鳞翅目灰蝶科中 *Cupido minimus* 和 *C. carswelli* 是否为不同种的问题。Nikolaou (2010) 构建了一款基于数字图像的半自动分类鉴定系统 VeSTIS, 并利用此系统对多毛纲的五种海生环节动物进行了分类, 这对昆虫幼虫或者形状不易获取的昆虫进行自动分类鉴定提供了技术参考。蔡小娜等利用人工神经网络方法 (2013) 和数学形态学 (2012, 2013) 对蛾类昆虫进行了分类研究, 并且均取得了较好的分类效果。李鸿强等 (2014) 开发了基于 Web 的昆虫分类与检索系统, 充分发挥了 Internet 的远程访问和交互特点, 用户可以很方便地对昆虫进行检索和查询。郝中华 (2010) 利用数字图像处理和模式识别技术对云南地区 27 种实蝇害虫进行了自动识别研究。

本研究利用蛾翅翅脉特征对夜蛾昆虫进行数字化分类识别研究, 筛选出能对蛾类昆虫进行有效分类的数字化特征指标。为了在保证对夜蛾昆虫进行正确分类的同时, 也便于日后在农林业生产中推广应用和对昆虫种类进行拓展, 要求所选特征参数应具有稳定性和可重复选择性, 因此, 本研究选取与大小和方向不相关的蛾翅翅室周围翅脉交点作为标记点, 并以其坐标数据进一步对 7 种夜蛾昆虫进行数字化分析, 寻求一条能够对蛾类昆虫进行快速而准确鉴定的数字化分类方法。

1 材料与方法

1.1 试验材料

为了验证蛾翅翅室周围翅脉交点在夜蛾分类鉴定中应用的可行性和有效性, 试验所选物种包括翅型相似的夜蛾昆虫, 其中夜蛾科 Noctuidae 地

虎属 *Agrotis* 包含 3 个物种, 而其余 4 种夜蛾分别属于 4 个属。试验所用夜蛾科昆虫共 7 种, 每种夜蛾 30 个样本, 每头夜蛾取其右前翅作为研究对象, 具体昆虫名称如下表 1 所示。

表 1 试验所用 7 种夜蛾名录
Table 1 Directory of seven noctuid species for experiment

属 Genus	种 Species	采集地 Collecting zone
地虎属 <i>Agrotis</i>	小地老虎	河北保定
	<i>Agrotis ypsilon</i> (Rottemberg)	Baoding
	黄地老虎	河北保定
	<i>Agrotis segetum</i> (Schiffermiiller)	Baoding
	八字地老虎	北京
	<i>Agrotis c-nigrum</i> (Linnaeus)	Beijing
嘴壶夜蛾属 <i>Oraesia</i>	乌嘴壶夜蛾	北京
	<i>Oraesia excavata</i> Butler	Beijing
铃夜蛾属 <i>Helicoverpa</i>	棉铃虫	河北保定
	<i>Helicoverpa armigera</i> (Hübner)	Baoding
光裳夜蛾属 <i>Ephesia</i>	栎光裳夜蛾	北京
	<i>Ephesia dissimilis</i> (Bremer)	Beijing
裳夜蛾属 <i>Catocala</i>	显裳夜蛾	北京
	<i>Catocala deuteronympha</i> Staudinger	Beijing

利用化学去鳞法 (潘鹏亮等, 2008) 去除蛾翅上覆盖的鳞片, 从而获得清晰地蛾翅脉标本。由于蛾翅翅脉标本薄而透明, 因此, 选择具有透扫功能的扫描仪作为蛾翅脉数字图像的获取工具, 本研究所选用的图像获取工具为中晶 Phantom v900 Plus 型平板式扫描仪。

1.2 特征数据提取

利用软件 tpsDig2 在蛾右前翅翅脉图像上选取标记点。为了使所选标记点可在其它样本上再现, 保证标记点的可重复选择, 本研究以径脉 (R1) 基部为起始点, 在蛾翅翅室周围顺时针方向选取翅脉交点作为标记点, 共 7 个, 并获取每一个标记点的坐标数据, 以供分析。蛾翅翅脉标记点分布图 (以栎光裳夜蛾为例) 如图 1 所示。

利用软件 tpsDig2 获取的初始坐标数据包含许多非形状因素 (闫宝荣和花保祯, 2010), 如标本摆放的方向和位置, 以及标本的大小等。为了消除这些非形状因素等冗余信息, 对初始标记点数

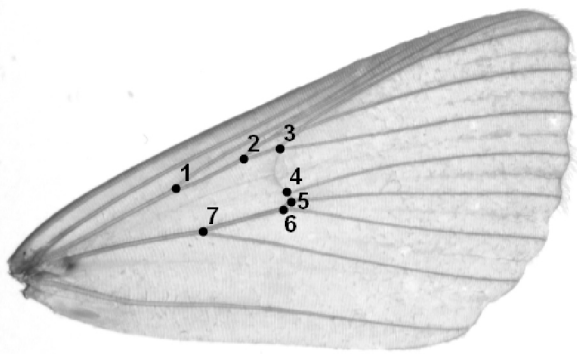


图1 栎光裳夜蛾右前翅标记点分布图

Fig. 1 Landmarks locations on the right forewing of *Ephesia dissimilis*

据进行普氏叠加分析 (Rohlf, 1999), 通过置中、旋转和缩放, 以几何学上相应的线性代数作矩阵运算, 所得运算结果便消除了上述非形状因素等多余的信息, 留下真正想要的形状, 并得到新的

标记点坐标数据。

再根据所得新的坐标数据, 计算出每一个标记点与初始标记点 1 的距离, 得到 6 个参数作为夜蛾原始翅脉图像的形态特征参数进行分析, 具体为: 标记点 1、2 的距离为 Dis_{12} ; 标记点 1、3 的距离为 Dis_{13} ; 标记点 1、4 的距离为 Dis_{14} ; 标记点 1、5 的距离为 Dis_{15} ; 标记点 1、6 的距离为 Dis_{16} ; 标记点 1、7 的距离为 Dis_{17} 。

按照选取翅脉交点的顺序, 利用软件 Photoshop 7.0 勾勒出翅脉交点间的轮廓。为了避免同种昆虫不同样本间大小的差异, 选用普世叠加分析所得每种夜蛾的平均组态图进行分析, 每种夜蛾右前翅翅室周围翅脉交点间的位置分布简图如图 2 所示。从图 2 中可以看出 7 个标记点相对位置的拓扑结构明显不同, 从这个角度也可证明翅室周围的标记点坐标数据可进一步用于 7 种夜蛾的分类鉴定。

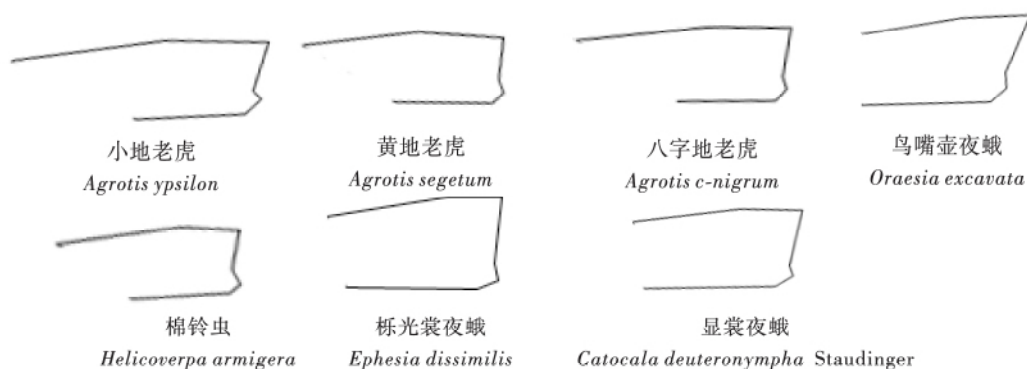


图2 7种夜蛾右前翅翅室周围翅脉交点位置分布图

Fig. 2 Distribution of veins junctions around right forewings cell from the seven noctuid species

2 结果与分析

2.1 方差分析

利用软件 SPSS 13.0 对所获取的 6 项特征参数进行方差分析, 得到 F 值和 P 值, 如表 2。方差分析结果显示, 分析所得 F 值均比给定的标准 $F(6, 203) = 3.67$ 大, 即同一种夜蛾的不同样本间各个特征参数均无显著差异; 不同夜蛾种类各个特征参数间均具有极显著差异 ($P < 0.01$)。因此, 6 项特征参数可作为对 7 种夜蛾进行分类的特征指标。

2.2 判别分析

利用软件 SPSS 13.0 对 7 种夜蛾的 6 项特征参

表2 方差分析结果

Table 2 Results of variance analysis

特征参数 Characteristic parameters	F 值 F value	P 值 P value
Dis_{12}	79.129	0.000
Dis_{13}	846.621	0.000
Dis_{14}	1002.313	0.000
Dis_{15}	1166.809	0.000
Dis_{16}	1167.417	0.000
Dis_{17}	269.705	0.000

数进行逐步判别分析, 分析结果显示除特征参数 Dis_{14} 之外, Dis_{12} , Dis_{13} , Dis_{15} , Dis_{16} 和 Dis_{17} 等 5 项

特征参数对 7 种夜蛾的分类鉴定均具有显著意义, 即这 5 项特征参数可以作为 7 种夜蛾的分类指标。利用得到的 5 个分类指标建立了 5 个标准典型判别函数, 用于 7 种夜蛾昆虫的分类鉴定, 具体判别函数如下所示。

$$Y_1 = -0.073a + 0.443b + 0.242c + 0.456d + 0.28e$$
$$Y_2 = -0.33a + 0.218b - 0.913c + 0.461d + 0.843e$$
$$Y_3 = 0.032a - 1.043b + 1.09c - 0.322d + 0.266e$$
$$Y_4 = 0.847a - 0.511b - 0.882c + 1.174d - 0.181e$$
$$Y_5 = 0.627a + 0.043b + 0.732c - 1.068d + 0.397e$$

$$(a = Dis_{12}, b = Dis_{13}, c = Dis_{15}, d = Dis_{16}, e = Dis_{17})$$

判别分析所得 7 种夜蛾 210 个样本的原始判别和交叉判别结果如表 3 所示, 其结果显示所有夜蛾的原始判别和交叉判别正确率均为 96.2%。即在原始判别和交叉判别中都只有 5 个八字地老虎样本被误判成黄地老虎, 3 个黄地老虎样本被误判为八字地老虎, 其他夜蛾全部实现了正确分类, 总体来说, 利用所选 6 项特征参数对 7 种夜蛾进行分类鉴定达到了很好的分类效果。

表 3 7 种夜蛾判别分析结果

Table 3 Discriminant analysis results of 7 species of moths

物种编号		组成员关系预测 Predicted group membership							总和	正确率 (%)
Species number		1	2	3	4	5	6	7	Total	Accuracy
原始 ^a Original	1	25	0	5	0	0	0	0	30	83. 3
	2	0	30	0	0	0	0	0	30	100
	3	3	0	27	0	0	0	0	30	90
	4	0	0	0	30	0	0	0	30	100
	5	0	0	0	0	30	0	0	30	100
	6	0	0	0	0	0	30	0	30	100
	7	0	0	0	0	0	0	30	30	100
交叉 ^b Cross-validated	1	25	0	5	0	0	0	0	30	83. 3
	2	0	30	0	0	0	0	0	30	100
	3	3	0	27	0	0	0	0	30	90
	4	0	0	0	30	0	0	0	30	100
	5	0	0	0	0	30	0	0	30	100
	6	0	0	0	0	0	30	0	30	100
	7	0	0	0	0	0	0	30	30	100

注: a, 对原始分组案例的 96.2% 进行了正确的分类; b, 对交叉验证分组案例的 96.2% 进行了正确的分类。1, 八字地老虎; 2, 小地老虎; 3, 黄地老虎; 4, 棉铃虫; 5, 鸟嘴壶夜蛾; 6, 栎光裳夜蛾; 7, 显裳夜蛾。Note: a, 96.2% of original grouped cases were correctly classified; b, 96.2% of cross-validated grouped cases were correctly classified. 1, *Agrotis c-nigrum*; 2, *Agrotis ypsilon*; 3, *Agrotis segetum*; 4, *Helicoverpa armigera*; 5, *Oraesia excavate*; 6, *Ephesia dissimilis*; 7, *Catocala deuteronympha*.

通过判别分析, 可得到用于 7 种夜蛾分类鉴定的每一项特征参数的权重, 即 5 项特征参数在对 7 种夜蛾进行分类时所起作用的大小, 如表 4 所示。从表 4 中也可看出, 全部特征参数的相对作用大小为: $(Dis_{16}、Dis_{17}) > (Dis_{13}、Dis_{15}) > Dis_{12}$ 。在对 7 种夜蛾进行分类时没有用到特征参数 Dis_{14} , 也就表明 Dis_{14} 这一特征在对 7 种夜蛾进行分类时没有起到任何作用。

表 4 5 项特征的权重

Table 4 Weights of 5 characters

指标 Index	特征参数 Characteristic parameters				
	Dis_{12}	Dis_{13}	Dis_{15}	Dis_{16}	Dis_{17}
权重 (%) Weight	6.7	20	13.3	33.3	26.7

3 结论与讨论

本研究主要从夜蛾右前翅翅室周围选取 7 个标记点,并据此计算出标记点间的距离作为分类指标,实现了 7 种夜蛾的分类鉴定。这充分证明了利用蛾翅翅脉特征对夜蛾昆虫进行数字化分类的可行性,为未来进一步实现蛾类昆虫的自动分类识别提供了技术支持。

通过判别分析结果得知八字地老虎和黄地老虎相互误判的样本较多,从传统分类学角度,八字地老虎和黄地老虎二者之间的亲缘关系较近,图 2 也说明这两种夜蛾蛾翅翅室标记点的拓扑结构极其相似,这可能是造成误判的原因之一。此外,获取蛾翅翅脉图像不准确或者标记点选取位置的偏差也可能造成误判,这就要求在图像采集时保持翅面平整,并且在选取标记点时位置要严格统一。

在以后的研究中,除了避免上述提到的误判原因,对于翅脉拓扑结构相似的物种还应不断探索新的数字化分类方法,比如几何形态测量学。目前,此方法已经广泛应用到考古学 (Deane and Begun, 2008) 和脊椎动物学等领域 (Cardini and Elton, 2009; Albarella *et al.*, 2009; Drake, 2011),其特点就是对拓扑结构特征的分析,并且可以实现分类识别的可视化。因此,对几何形态测量学在昆虫分类中的应用研究,也是本课题组接下来要做的重点工作。

对于实现昆虫的数字化分类识别,最重要的步骤是特征参数的筛选。本研究所采用的蛾类害虫种类有限,利用筛选的 5 个特征参数即可实现其分类识别,但是,随着研究蛾类昆虫种类的不断拓展,可能需要不断增加前翅标记点或者其它部位的标记点来实现较好的分类效果。而利用各种数字化分类方法最终实现更多昆虫种类的自动识别,这将会是一个漫长的过程。

蛾类昆虫所属的鳞翅目昆虫翅面上均覆盖大量鳞片,这对于利用翅脉特征实现蛾类昆虫的数字化分类鉴定无疑是一个难点,对去鳞的方法与技术也是一种挑战。虽然,本研究利用化学去鳞法能够相对较容易的去除蛾翅上覆盖的鳞片,获得清晰的蛾翅脉标本,但在实际生产中还是略显繁琐。因此,需要不断寻找新的解决方案,使蛾翅脉特征更好的应用于蛾类昆虫的分类鉴定中。

翅脉特征不仅对昆虫的分类鉴定有重要意义,还可应用于对昆虫的物种多样性、系统发育学及昆虫在不良环境条件下所发生的变异程度的研究。比如,大部分蛾类昆虫为农林业重要害虫,杀虫剂的广泛使用所带来的昆虫抗药性越来越严重。而蛾类昆虫抗药性的强弱或有无具体表现在:蛾翅的颜色、翅型或翅脉上,可据此预测下一代幼虫的抗药性,从而制定更科学的防治策略。相信随着相关专家学者的不断深入研究,翅脉特征或其它数字化特征除了可很好的应用于昆虫的分类鉴定,在其它相关领域也会有越来越好的应用前景。

参考文献 (References)

- Albarella U, Dobney K, Rowley - Conwy P. Size and shape of the eurasian wild boar (*Sus scrofa*), with a view to the reconstruction of its holocene history [J]. *Environ. Archaeol*, 2009, 14 (2): 103 - 136.
- Cai WZ, Pang XF, Hua BZ, *et al.* General Entomology [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2001. [彩万志, 庞雄飞, 花保祯, 等. 普通昆虫学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001]
- Cai XN, Huang DZ, Shen ZR, *et al.* Feasibility of math - morphological characters of wings to classification and identification of noctuid moths (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2012, 55 (5): 596 - 605. [蔡小娜, 黄大庄, 沈佐锐, 等. 蛾翅数学形态特征用于夜蛾分类和鉴定的可行性研究 [J]. 昆虫学报, 2012, 55 (5): 596 - 605]
- Cai XN, Huang DZ, Shen ZR, *et al.* Research on artificial neural network method used for insects classification and identification: Principal component analysis and mathematical modeling [J]. *Journal of Biomathematics*, 2013, 28 (1): 23 - 33. [蔡小娜, 黄大庄, 沈佐锐, 等. 用于昆虫分类鉴定的人工神经网络方法研究: 主成分分析与数学建模 [J]. 生物数学学报, 2013, 28 (1): 23 - 33]
- Cai XN, Huang DZ, Shen ZR, *et al.* Systematic research on the classification of moths using math - morphological characters of wings (I). Superfamily level [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2013, 18 (4): 96 - 104. [蔡小娜, 黄大庄, 沈佐锐, 等. 利用翅的数学形态特征对蛾类昆虫进行分类鉴定的系统研究 (I). 在总科级阶元上的应用研究 [J]. 中国农业大学学报, 2013, 18 (4): 96 - 104]
- Cardini A, Elton S. Geographical and taxonomic influences on cranial variation in red colobus monkeys (Primates, Colobinae): Introducing a new approach to 'morph' monkeys [J]. *Glob. Ecol. Biogeogr*, 2009, 18 (2): 248 - 263.
- Deane AS, Begun DR. Broken fingers: Retesting locomotor hypotheses for fossil hominoids using fragmentary proximal phalanges and high-resolution polynomial curvefitting (HR - PCF) [J]. *J. Hum. Evol.*, 2008, 55: 691 - 701.

- Drake AG. Dispelling dog dogma: An investigation of heterochrony in dogs using 3D geometric morphometric analysis of skull shape [J]. *Evol. Dev.*, 2011, 13 (2): 204–213.
- Hao ZH. Study of Classification of Fruit Flies Insects Based on Digital Image Processing Technology [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010. [郝中华. 基于图像模式识别技术的实蝇昆虫分类识别研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010]
- Li HQ, Lu HB. Insect classification and retrieval system based on web technology [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2014, 36 (2): 265–270. [李鸿强, 卢海博. 基于 Web 的昆虫分类与检索系统实现 [J]. 环境昆虫学报, 2014, 36 (2): 265–270]
- Nikolaou N, Sampaziotis P, Aplikioti M, et al. Vestis: A versatile semi-automatic taxon identification system from digital images [J]. *Tools for Identifying Biodiversity: Progress and Problems*, 2010, 231–236.
- Prieto C, Munguira M, Romo H. Morphometric analysis of genitalia and wing pattern elements in the genus *Cupido* (Lepidoptera, Lycaenidae): Are *Cupido minimus* and *C. carswelli* different species? [J]. *Deul. Entomol. Z.*, 2009, 56: 137–147.
- Pan PL, Shen ZR, Yang HZ, et al. Digital character extraction and primary analysis of venation of three parnassian butterflies (Lepidoptera, Papilionidae) [J]. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 2008, 33 (3): 566–571. [潘鹏亮, 沈佐锐, 杨红珍, 等. 三种绢蝶翅脉数字化特征的提取及初步分析 [J]. 动物分类学报, 2008, 33 (3): 566–571]
- Rohlf FJ. Shape statistics: Procrustes superimpositions and tangent spaces [J]. *Journal of Classification*, 1999 (16): 197–223.
- Yan BR, Hua BZ. Geometric morphometrics and its application in the systematics and phylogenetics of insects [J]. *Entomotaxonomia*, 2010, 32 (4): 313–320. [闫宝荣, 花保祯. 几何形态测量学及其在昆虫分类学和系统发育中的应用 [J]. 昆虫分类学报, 2010, 32 (4): 313–320]
- Zhu HF. Moths Figure List [M]. Beijing: Science Press, 1980. [朱弘复. 蛾类图册 [M]. 北京: 科学出版社, 1980]