

蛾翅翅脉特征在夜蛾昆虫数学分类学中的应用

蔡小娜¹ 黄大庄^{2*} 沈佐锐^{3*} 高灵旺³

(1. 河北农业大学 基础课部,河北 保定 071000;

2. 河北农业大学 园林与旅游学院,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)

摘要 为对夜蛾翅脉特征进行分类研究,以6种夜蛾右前翅的翅脉为研究对象,利用 tpsDig2 软件在夜蛾翅室周围翅脉交叉点处提取标记点,利用普氏叠加分析消除标记点数据中的非形状因素信息,计算出相邻翅脉交点间的距离作为特征参数,利用方差分析和逐步判别分析论证各项特征参数对6种夜蛾进行分类的可行性、可靠性和重要性。研究表明:7个特征参数可作为分类变量,它们的作用大小依次为: $(dis_{67}, dis_{71}) > dis_{34} > (dis_{23}, dis_{12}) > (dis_{45}, dis_{56})$,原始判别和交叉判别结果的正确率分别为99.4%和99.4%。这充分证明了蛾翅翅脉的特征变量可用于蛾类昆虫的分类鉴定研究。

关键词 夜蛾;翅脉;标记点;普氏叠加;分类

中图分类号 Q 969.436.4

文章编号 1007-4333(2015)05-0188-06

文献标志码 A

Application of wings vein characteristics on mathematics identification of noctuid moths (Lepidoptera:Noctuidae)

CAI Xiao-na¹, HUANG Da-zhuang^{2*}, SHEN Zui-ru^{3*}, GAO Ling-wang³

(1. Department of Basic Courses, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China;

2. College of Landscape and Travel, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China;

3. College of Agronomy and Biotechnology/IPMist Laboratory, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract This study was performed on six noctuid species and vein characteristics of the right forewings were adopted to classify moths. Junctions of veins around cell wing from the six noctuid species were selected as landmarks by using software tpsDig2. Procrustes superimposition was applied to remove non-shape variation from the landmark coordinates, and the distance between adjacent vein nodes was calculated as characteristic parameters. And, variance analysis and stepwise discriminant analysis methods were used to study the feasibility, reliability and importance of each characteristic parameter as classification criteria on the six noctuid species. The results showed that seven characters were selected as the classification variables. The contribution of these variables could be ranked as follows: $(dis_{67}, dis_{71}) > dis_{34} > (dis_{23}, dis_{12}) > (dis_{45}, dis_{56})$. Accuracies of original and the intersecting discriminant analysis were 99.4% and 99.4% respectively. The results indicated that vein characteristics of moth wings could be used to identify moths.

Key words noctuid moths; vein; landmark; Procrustes superimposition; identification

目前,昆虫种类的鉴定工作主要由经验丰富但为数不多的鉴定专家完成,由于昆虫种类繁多,昆虫种类鉴定的实际需求已远远超过了现有鉴定专家所

能承担的负荷^[1]。为了减轻传统分类学专家对昆虫鉴定工作的负担,昆虫自动识别技术已成为一个热门的研究领域^[2]。

收稿日期:2015-01-13

基金项目:国家林业局948项目(2013-4-75)

第一作者:蔡小娜,讲师,主要从事生物数学及昆虫数值分类研究,E-mail:xuecaixiaona@163.com

通讯作者:黄大庄,教授,主要从事森林害虫综合治理研究,E-mail:huangdazhuang@126.com

沈佐锐,教授,主要从事植物保护、昆虫生态以及农业信息化研究,E-mail:ipmist@163.com

近年来,美国科学院院士 F. James Rohlf 开发的 tps 系列图像特征提取软件倍受人们关注,并得到广泛应用^[3-4]。比如,闫宝荣^[5]利用翅脉交点特征对蛴蛉科昆虫的系统发育进行研究。英国自然历史博物馆的 MacLeod^[6]出版了《分类学中自动分类鉴定的理论方法和应用》(Automated Taxon Identification in Systematics: Theory, Approaches and Applications),其中详细介绍了 DAISY、ABIS 和 SPIDA 3 个软件系统。Prieto 等^[7]利用形态测量学的方法,对隶属于鳞翅目灰蝶科的 *Cupido minimus* 和 *C. carswelli* 进行分类识别的研究。中国农业大学 IPMist 实验室沈佐锐教授及其科研团队研发出了两款昆虫自动识别软件 Bugvisux1.0^[8]和 BugShape1.0^[9],并应用此两款软件对半翅目^[10]和鳞翅目^[11]的部分昆虫种类及啮齿目的小型哺乳动物^[12]进行了分析。除此之外,张蕾等^[13]提出利用翅及中胸背板的二进制模式(LBP)特征,设计和开发了“实蝇科果实蝇属昆虫数字图像自动识别系统”,对果实蝇属 8 个种的平均识别率达 80% 以上。蔡小娜等^[14-15]利用蛾翅数学形态特征对蛾类昆虫进行数字化分类研究,并取得了较好的分类效果。

昆虫翅的特征是昆虫分类学特别是传统昆虫分类学中的重要分类学指标^[16],且便于进行数值描述,因此应用昆虫翅特征进行昆虫数字化分类的研究相对较多。近年的研究表明,地球上的昆虫种类可能达 1 000 万种^[17],其形态多样性也极高,用几项特征指标或某种算法来实现所有昆虫种类的数字化鉴定,这几乎是不可能的,因此,需要对不同种类的昆虫不断探索新的特征参数并制定相应的鉴定方案。

为探索蛾翅翅脉标记点特征对蛾类昆虫进行分类识别的可行性,以夜蛾科昆虫的右前翅为研究对象,应用 tpsDig2 软件提取和分析蛾右前翅翅脉的标记点特征数据,对夜蛾进行分类识别研究。为保证所选择标记点的可重复选择以及便于日后对更多种类的昆虫进行推广应用,本着由简到难的原则,首先从蛾翅翅室周围选取翅脉交点作为标记点,探究应用翅脉特征数据能否很好的实现夜蛾的分类鉴定,如果本研究能够证明所应用的技术方法可行,则将进一步应用蛾翅标记点特征对蛾其他种类进行分类识别研究,旨在为逐步实现蛾类昆虫的数字化鉴定提供简便有效的方法。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验采用夜蛾科 6 种夜蛾昆虫作为研究对象,以蛾右前翅为试验材料,每种夜蛾选取 30 个样本。夜蛾种类具体包括:八字地老虎(*Agrotis cnigrum* Linnaeus,北京)、小地老虎(*A. ypsilon* Rottemberg,保定)、黄地老虎(*A. segetum* Schiffermüller,保定)、棉铃虫(*Helicoverpa armigera* Hübner,保定)、乌嘴壶夜蛾(*Oraesia excavata* Butler,北京)和栎光裳夜蛾(*Catocala dissimilis* Bremer,北京),目前,试验所用 6 种夜蛾均保存在河北农业大学昆虫标本室。

利用文献[18]的方法去除蛾翅上覆盖的鳞片,获取清晰的蛾翅翅脉标本。由于翅脉标本薄而透明,因此,蛾翅翅脉数字图像的获取工具选择具有透扫功能的扫描仪,本研究采用上海中晶科技有限公司生产的中晶 Phantom v900 Plus 型平板式扫描仪。

1.2 特征数据提取

利用 tpsDig2 软件按照一定顺序在蛾右前翅翅脉图像上选取标记点,并获取标记点的坐标数据,将其保存为 tps 格式的文件,以供分析。为了保证标记点的可重复选择以及方便应用,本研究主要从蛾翅翅室周围选取翅脉交点作为标记点,具体为:以径脉(R1)基部为起始点,顺时针方向选取翅室周围 7 个翅脉交点作为本研究所用标记点,所选标记点的位置分布图(以栎光裳夜蛾为例)如图 1 所示。

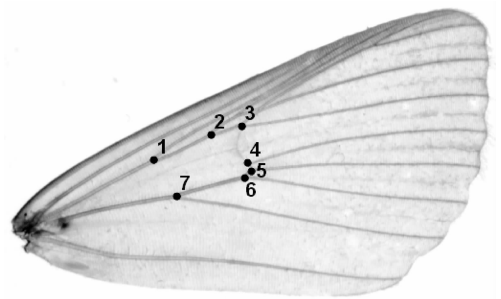


图 1 栎光裳夜蛾右前翅标记点分布图

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

原始标记点坐标数据包含许多非形状因素^[19],如标本摆放的位置和方向等,因此,利用普氏叠加分

析^[20]消除上述这些非形状因素等冗余信息,根据新的标记点坐标数据计算出相邻翅脉交点间的距离,得到7个特征参数作为原始翅脉图像的形态数据进行分析,具体为:标记点1、2的距离为 dis_{12} ;标记点2、3的距离为 dis_{23} ;标记点3、4的距离为 dis_{34} ;标记点4、5的距离为 dis_{45} ;标记点5、6的距离为 dis_{56} ;标记点6、7的距离为 dis_{67} ;标记点7、1的距离为 dis_{71} 。

1.3 数据分析

首先采用方差分析对7个特征参数变量进行分析,判断这7个变量在6种夜蛾种类间是否具有显著差异($P < 0.05$),并挑选出差异显著的特征参数用于判别分析。

判别分析^[21]又称“分辨法”,是在分类确定的条件下,根据某一研究对象的各种特征值判别其类型归属问题的一种多变量统计分析方法。根据方差分析结果,对筛选出的具有显著差异的特征参数进行逐步判别分析,以探讨利用蛾翅脉特征实现6种夜蛾分类鉴定的可行性。

2 数据分析与结论

2.1 方差分析

利用SPSS 13.0软件对7项特征参数进行方差分析,得到 F 值和 P 值,如表1所示。结果显示 F 值均比给定的标准 $F(5, 174) = 4.36$ 大,即同种夜蛾的不同标本间每个特征参数均不具有显著差异;不同种夜蛾各个特征参数均具有极显著差异($P < 0.001$)。

2.2 判别分析

利用逐步判别分析对6种夜蛾的7项特征参数进行分析,结果表明7项特征参数对6种夜蛾的分类鉴定均有显著意义,即全部7项特征参数均可用

表1 方差分析结果

Table 1 Results of variance analysis

特征参数	F 值	P 值
Characteristic parameters	F value	P value
dis_{12}	74.598	0.000
dis_{23}	159.793	0.000
dis_{34}	658.321	0.000
dis_{45}	80.727	0.000
dis_{56}	49.421	0.000
dis_{67}	696.820	0.000
dis_{71}	320.299	0.000

于6种夜蛾的分类研究。因此,针对这7项特征参数构建了5个标准典型判别函数,如下所示。

$$Y_1 = 2.383a + 2.696b + 0.754c + 0.348d + 0.704e + 2.668f + 1.923g$$

$$Y_2 = 0.581a + 0.724b - 0.645c - 0.301d - 0.173e - 0.031f + 0.641g$$

$$Y_3 = -0.573a - 0.037b + 0.392c + 0.509d - 0.204e - 0.372f + 0.306g$$

$$Y_4 = -0.536a - 0.148b - 0.568c + 0.541d + 0.167e + 0.46f + 0.31g$$

$$Y_5 = 0.752a + 0.102b + 0.063c + 0.603d - 0.147e - 0.356f - 0.379g$$

$$(a = dis_{12}, b = dis_{23}, c = dis_{34}, d = dis_{45}, e = dis_{56}, f = dis_{67}, g = dis_{71})$$

判别分析得到典型判别函数的特征值和方差贡献如表2所示,从表2中可看出前2个标准典型判别函数 Y_1 和 Y_2 的累积贡献率为99.7%。由它们得到6种夜蛾的散点图(图2),从图2可看出6种夜蛾不同种分别聚集,达到了较好的分类效果。

表2 典型判别函数的特征值和方差贡献

Table 2 Eigenvalues and variance contribution from canonical discriminant functions

函数	特征值	方差贡献率/%	累积贡献率/%	典型相关
Function	Eigenvalue	Variance	Cumulative	Canonical correlation
1	508.683	94.5	94.5	0.999
2	28.145	5.2	99.7	0.983
3	0.818	0.2	99.8	0.671
4	0.496	0.1	99.9	0.576
5	0.317	0.1	100.0	0.491

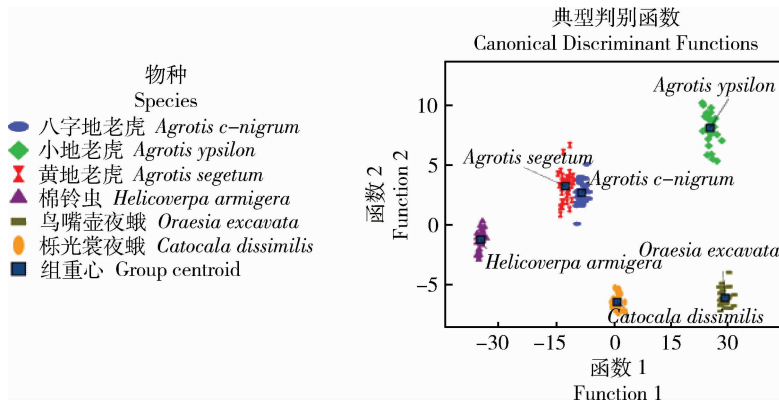


图 2 判别结果

Fig. 2 Results of discriminant analysis

通过判别分析得到试验所用 6 种夜蛾的原始判别和交叉判别结果如表 3 所示,结果显示,它们的总正确率均为 99.4%,即在原始判别和交叉判别中都

只有一个黄地老虎被误判成八字地老虎,其他夜蛾种类全部实现了正确分类,总体来说,利用蛾翅脉 7 项特征参数达到了很好的分类效果。

表 3 6 种夜蛾判别分析结果

Table 3 Discriminant analysis results of 6 species of moths

指标 Indx	物种 Species	编号 Number	组成员关系预测 Predicted group membership						总和 Total	正确率% Accuracy
			1	2	3	4	5	6		
原始 ^① Original	八字地老虎 <i>Agrotis c-nigrum</i>	1	30	0	0	0	0	0	30	100
	小地老虎 <i>Agrotis ypsilon</i>	2	0	30	0	0	0	0	30	100
	黄地老虎 <i>Agrotis segetum</i>	3	1	0	29	0	0	0	30	96.7
	棉铃虫 <i>Helicoverpa armigera</i>	4	0	0	0	30	0	0	30	100
	乌嘴壶夜蛾 <i>Oraesia excavata</i>	5	0	0	0	0	30	0	30	100
	栎光裳夜蛾 <i>Catocala dissimilis</i>	6	0	0	0	0	0	30	30	100
交叉 ^② Cross-validated	八字地老虎 <i>Agrotis c-nigrum</i>	1	30	0	0	0	0	0	30	100
	小地老虎 <i>Agrotis ypsilon</i>	2	0	30	0	0	0	0	30	100
	黄地老虎 <i>Agrotis segetum</i>	3	1	0	29	0	0	0	30	96.7
	棉铃虫 <i>Helicoverpa armigera</i>	4	0	0	0	30	0	0	30	100
	乌嘴壶夜蛾 <i>Oraesia excavata</i>	5	0	0	0	0	30	0	30	100
	栎光裳夜蛾 <i>Catocala dissimilis</i>	6	0	0	0	0	0	30	30	100

注:①对原始分组案例的 99.4%进行了正确的分类。②对交叉验证分组案例的 99.4%进行了正确的分类。

Note:①99.4% of original grouped cases were correctly classified;②99.4% of cross-validated grouped cases were correctly classified.

在判别分析中,每项特征参数在对6种夜蛾进行分类鉴定时被应用的次数有所不同,可据此得到各项参数在6种夜蛾分类中的权重,如表4所示,可

以据此判断这些特征在对6种夜蛾昆虫进行分类鉴定时的贡献大小。

表4 7项特征的权重

Table 4 Weights of 7 characters

指标 Index	特征参数 Characteristic parameters						
	dis ₁₂	dis ₂₃	dis ₃₄	dis ₄₅	dis ₅₆	dis ₆₇	dis ₇₁
权重/% Weight	10.71	14.29	17.86	7.14	3.57	25.00	21.43

2.3 研究结论

方差分析的结果显示,7项特征参数组间具有显著性差异,能够用于对6种夜蛾的分类鉴定研究。通过逐步判别分析得到原始判别和交叉判别的总正确率均为99.4%,并且建立了5个标准典型判别函数,它们可以实现对6种夜蛾分类识别,这表明利用蛾翅翅室周围的标记点数据可以实现对夜蛾昆虫分类鉴定。

利用判别分析得到的原始判别和交叉判别结果显示,均只有一个黄地老虎被误判成八字地老虎,其他夜蛾均被正确地分类。从图2中也能明显看出,黄地老虎和八字地老虎距离较近。这说明在6种夜蛾中,黄地老虎和八字地老虎蛾翅翅室的拓扑结构相对其他种类较接近。

7项特征参数在6种夜蛾分类中的相对贡献大小为:(dis₆₇、dis₇₁) > dis₃₄ > (dis₂₃、dis₁₂) > (dis₄₅、dis₅₆)。其中dis₆₇、dis₇₁等特征参数的权重相对较大,这也说明在分类时它们的相对贡献更大;而dis₄₅、dis₅₆等特征的相对贡献较小。本研究的分类结果说明,蛾翅翅脉的标记点特征参数可应用到更多蛾类昆虫的分类研究。但是,在对不同种类的昆虫进行分类识别研究时可能会用到不同的特征参数,而且这些特征参数的重要性和有效性也会随着研究种类的不同而改变。

3 讨论

1)本研究主要是从蛾右前翅翅室周围选取7个标记点,以此为基础计算出相邻翅脉交点间的距离,得到7个特征参数实现了6种夜蛾昆虫的分类鉴定。为了保证所选择标记点在日后研究中可重复选择以及方便推广应用,同时也为了便于日后对昆虫种类的拓展,本着由简单到复杂的原则,主要选择便于重复利用的蛾翅翅室周围的翅脉交点作为标记点

以供分析使用。随着研究蛾类昆虫种类的不断增多,可能会逐渐增加标记点以实现较好的分类效果,例如,右前翅翅脉的其余交叉点可能被选为标记点被应用到分类鉴定中,或者增加后翅翅脉等部位的特征参数。所以,不同的研究对象或者所研究昆虫的种类数量等因素会导致选择的标记点数量有所不同。

2)两性差异也是形态学研究中考虑的一个重要方面,本研究随机抽取供试夜蛾样本,雌雄蛾均有。利用蛾翅翅脉特征,在分析过程中利用普氏叠加消除非形状因素等信息,因此虽然同种蛾雌雄之间的蛾翅会有差异,但是所用的这些特征对6种夜蛾进行分析研究时没有受到影响。随着研究蛾类昆虫的种类逐渐增多,雌雄蛾之间蛾翅的几何特征的差异也会逐渐显现出来,在以后进行研究时需注意此问题并加以解决。

3)在传统昆虫分类学中^[22-23],八字地老虎和黄地老虎均属于地虎属。由判别分析得到分类结果(图2和表3),图2显示在6种夜蛾昆虫中八字地老虎和黄地老虎距离较近,而表3也显示只有一头黄地老虎被误判为八字地老虎,二者均可说明八字地老虎和黄地老虎在亲缘关系上较接近。但是,由于所研究的蛾类昆虫种类较少,而且主要目的是针对蛾类昆虫的分类问题,日后随着研究蛾类昆虫的种类不断增加,可能会使所得结论得到进一步修正。在以后的研究中,除了利用形态特征参数对更多种类的昆虫进行数字化鉴定研究,也将会利用数字化特征参数对昆虫的亲缘关系进行探索性研究。

4)在许多昆虫种类中,由于农药、温度和转基因植物或其他不利环境条件导致昆虫翅脉发生变化,其中包括翅脉的增加和缺失等^[24-27]。为了适应外界环境条件,某些昆虫会发生基因突变,而有些性状不能够稳定地遗传到下一代,所以不能看作是一种新

物种。在进行分析时应当注意,应选取遗传性能稳定的翅脉交点以作为分类学指标。

5)昆虫数字化分类鉴定的一个很重要的研究步骤是对特征参数的选取,选取一组好的参数特征,既能方便提取和应用,又可使昆虫分类的准确率和有效性得以提高。在形态学研究中,除了形状之外,大小也是重要的形态学特征。但是为了日后便于应用和种类拓展,没有采用大小特征。获取样本图像的工具是扫描仪,但是大小这一特征与扫描仪分辨率等参数的设置相关,若采用大小特征用于识别研究,对获取样本图像的仪器以及相应的参数设置等都需要保持严格统一,在这种条件下大小这一特征在形态学研究中将会发挥很重要的作用。

6)目前利用昆虫的数学特征或几何特征进行数字化分类的研究很多^[28-29],而昆虫的数学特征和几何特征各有优缺点。在进行昆虫自动识别鉴定方面,由于几何形态特征着重于研究生物形态的拓扑结构,通过普氏叠加分析消除标本大小或形态变化等非形状因素信息的影响,从而可以极大地提高昆虫自动识别鉴定的准确性。但是对于翅面上覆盖有鳞片的鳞翅目昆虫,不能直接获取翅脉图像以提取几何形态特征,因此,对于这类昆虫应用几何形态特征相对较繁琐。而数学形态特征,虽然不用去除翅面上的鳞片,特征提取较简单灵活,但是有些数学形态特征会受到样本大小、获取图像的仪器参数设置等因素有关,而在实际应用中这些条件是较难满足的。因此,在今后的研究中,可以将两者取长补短配合使用。

参 考 文 献

- [1] 赵三琴. 稻飞虱前翅形状特征测量方法的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010
- [2] 杨红珍, 蔡小娜, 李湘涛, 等. 几何形态计量学在昆虫自动鉴定中的应用与展望[J]. 四川动物, 2013, 32(3): 464-469
- [3] 白明, 杨星科. 几何形态测量法在生物形态学研究中的应用[J]. 昆虫知识, 2007, 44(1): 143-147
- [4] Rohlf F J TpsDig. Ecology and evolution, SUNY[CP/OL]. New York; Stony Brook, 1998[2014-12-30]. <http://life.bio.sunysb.edu/morph>
- [5] 闫宝荣. 基于几何形态测量学的蝇蛉科昆虫系统发育研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011
- [6] MacLeod N. Automated taxon identification in systematics: Theory, approaches and applications [M]. London: CRC Press, 2007
- [7] 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
- [8] 于新文. 昆虫图像数字技术的研究开发[D]. 北京: 中国农业大学, 1999
- [9] 张建伟. 基于计算机视觉技术的蝴蝶自动识别研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006
- [10] 赵汗青, 沈佐锐, 于新文. 数学形态特征应用于昆虫自动鉴别的研究[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(3): 38-42
- [11] 潘鹏亮, 杨红珍, 沈佐锐, 等. 翅脉的数学形态特征在蝴蝶分类鉴定中的应用研究[J]. 昆虫分类学报, 2008, 30(2): 151-160
- [12] 花慧贞, 花慧勇, 袁雄峰, 等. 基于随机森林的鼠头类头骨自动识别系统开发[J]. 中国媒介生物学及控制杂志, 2014, 25(5): 416-424
- [13] 张蕾, 陈小琳, 侯新文. 实蝇科果实蝇属昆虫数字图像自动识别系统的构建和测试[J]. 昆虫学报, 2011, 54(2): 184-196
- [14] 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
- [15] 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
- [16] 朱弘复. 蛾类图册[M]. 北京: 科学出版社, 1980
- [17] 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
- [18] 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
- [19] 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
- [20] Rohlf F J. Shape statistics: procrustes superimpositions and tangent spaces[J]. Journal of Classification, 1999(16): 197-223
- [21] 于秀林, 任雪松. 多元统计分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 1999
- [22] 陈一心. 中国动物志: 昆虫纲. 第 16 卷, 鳞翅目: 夜蛾科[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- [23] 朱弘复, 陈一心. 中国经济昆虫志. 第 3 册, 鳞翅目: 夜蛾科(一)[M]. 北京: 科学出版社, 1963
- [24] Mpho M, Callaghan A, Holloway G J. Temperature and genotypic effects on life history and fluctuating asymmetry in a field strain of *Culex pipiens*[J]. Heredity, 2002, 88: 307-312
- [25] 李娜, 孟玲, 翟保平, 等. 在转 Bt 基因棉压力下棉铃虫和异色瓢虫的波动性不对称[J]. 昆虫学报, 2004, 47(2): 198-205
- [26] Birdsall K, Zimmerman E, Teeter K, et al. Genetic variation for the positioning of wing veins in *Drosophila melanogaster*[J]. Evolution & Development, 2000, 2(1): 16-24
- [27] Rand D M, Fry A, DiChiaro L. Experimental evolution of development: Changes in wing vein phenotypes across compartment boundaries in "hot" and "cold" adapted lab populations of *Drosophila melanogaster* [J]. Developmental Biology, 2000, 222(1): 238-242
- [28] 蔡小娜. 基于数字图像的主要蛾类害虫分类识别研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2013
- [29] 董学超, 黄大庄. 蛾翅数学形态特征在夜蛾科昆虫分类鉴定中的应用研究[J]. 河北林果研究, 2014, 29(1): 31-35