

蛱蝶翅鳞片的超微结构观察

房岩^{1,2}, 王同庆¹, 孙刚^{1,3}, 丛茜^{1,*}

(1. 吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室, 长春 130022; 2. 长春师范学院生命科学学院, 长春 130032;
3. 东北师范大学生命科学学院, 长春 130024)

摘要: 对我国东北地区典型常见蛱蝶科 15 属 20 种蝴蝶翅鳞片的超微结构进行了扫描电镜观察。结果显示: 蛱蝶翅鳞片形态上可分为窄叶形、阔叶形和圆叶形 3 种, 鳞片长 65 ~ 135 μm , 宽 35 ~ 85 μm , 间距 48 ~ 112 μm 。蛱蝶翅鳞片的超微结构可分为拱桥形、棋盘形和筛孔形 3 种。拱桥形结构和棋盘形结构比较接近, 二者与筛孔形结构差异较明显。在已观察的种类中, 线蛱蝶属红线蛱蝶翅鳞片上的纵肋突起最小(200 nm $\times$ 300 nm), 闪蛱蝶属柳紫闪蛱蝶翅鳞片上的纵肋突起最大(590 nm $\times$ 560 nm)。鳞片具有相似的形状、结构和排列, 尤其是同属蝴蝶翅鳞片超微结构的形状和尺寸差异较小, 表明它们之间的亲缘关系接近。

关键词: 鳞翅目; 蛱蝶科; 翅; 鳞片; 超微结构

中图分类号: Q964; Q969.439.2 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2007)03-0313-05

Ultrastructure of wing scales of Nymphalid butterflies (Lepidoptera: Nymphalidae)

FANG Yan^{1,2}, WANG Tong-Qing¹, SUN Gang^{1,3}, CONG Qian^{1,*} (1. Key Laboratory for Terrain-Machine Bionics Engineering of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. School of Life Sciences, Changchun Teachers College, Changchun 130032, China; 3. School of Life Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: Ultrastructures of wing scales of 20 species in 15 genera of Nymphalidae, typically common in northeast China, were observed by scanning electron microscopy. The wing scales of Nymphalid butterflies were in three shapes, namely angustifoliate shape, latifoliate shape and round-leaved shape. Scale length is 65–135 μm , width 35–85 μm , and distance 48–112 μm . The wing scale ultrastructures of Nymphalid butterflies observed can be divided into three types, namely arch bridge shape, chessboard shape and sieve pore shape. Arch bridge shape and chessboard shape are quite similar, but they are very different from sieve pore shape. Of the species observed, the size of the vertical gibbosities on the scale was smallest in *Limenitis populi* (200 nm $\times$ 300 nm) and largest in *Apatura ilia* (590 nm $\times$ 560 nm). The scales are similar in shape, structure and arrangement, and especially the differences in shape and size of the scale ultrastructure between the congeneric species are relatively less, suggesting their closer relationship.

Key words: Lepidoptera; Nymphalidae; wing; scale; ultrastructure

自古以来, 自然界就是人类各种科学技术原理及重大发明的源泉。生物在漫长的进化过程中, 为了求得生存和发展, 逐渐具备了适应自然界变化的本领。蝴蝶经过长期进化和自然选择, 翅表面具有较强的疏水性和自清洁性。当雨雪等污染物落到其

表面上时, 它们能进行自我清洁, 而清洗同等面积的人工表面却要花费几倍的努力(房岩等, 2006)。蝴蝶表面的自清洁性能在防雪、防水、防雾、防污染、抗氧化等工农业生产、人们日常生活以及航天器、潜艇、雷达通讯等领域都有着极其广阔的应用前景。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(56035030); 高等学校博士学科点基金(20040183048); 教育部留学回国人员启动基金

作者简介: 房岩, 女, 1965年生, 汉族, 吉林长春人, 博士研究生, 教授, 从事工程仿生学研究, E-mail: fangyan0318@sohu.com

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: congqian@jlu.edu.cn

收稿日期 Received: 2006-09-03; 接受日期 Accepted: 2006-12-26

蛱蝶科(Nymphalidae)为蝶类中最大的科,包括很多中型或大型种类,翅形和色斑的变化比其他科都显著,是世界广布种,已记载 3 400 种,分布在大区,中国已知 290 余种(周尧,1998)。国内外对鳞翅目昆虫鳞片表面的形态特征和分类进行了一定的研究,如洪健等(1998)观察了 4 种虎凤蝶 *Luehdorfia* 翅面斑纹特征及鳞片的超微结构。许多分类学研究证明,鳞片的形态特征可准确地反映种、属间的差异,并且已经用于许多种动物的分类、鉴定、进化及亲缘关系等研究(Rentz and John,1990;Bland and Rentz,1991;郑一平和暴学祥,1995;邵奇妙等,2002)。

作者曾对蝶翅表面非光滑形态进行了扫描电镜观察(Cong *et al.*, 2004),发现蝶翅表面的微米级鳞片及鳞片上的纳米级纵肋突起直接影响蝶翅表面的疏水性(Chen *et al.*, 2004)。为深入探索生物体表非光滑形态的疏水自清洁机理,我们对东北地区典型蛱蝶科 15 属 20 种蝴蝶成虫翅表面非光滑形态的微米/纳米级结构尺寸、鳞片超微形态进行了比较研究,揭示蝶翅鳞片形态结构和生理机能的关系,探讨蝶翅鳞片超微形态特征在分类学上的意义,为蛱蝶的行为学、分类学、进化研究以及仿生纳米界面材料的制备提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验昆虫

蝴蝶标本于 2005 年 6–8 月采自长春市(南湖公园、动植物公园、净月潭国家森林公园),吉林市(左家特区)和大连市(旅顺口区)。标本鉴定由东北师范大学生命科学学院昆虫学专家暴学祥教授帮助完成,采用系统分类法进行分类鉴定(周尧,1998;周繇和朱俊义,2003)。本文对其中的蛱蝶科 15 属 20 种(表 1)进行研究。

1.2 扫描电镜观察样品制作

每种取展翅标本各 10 头,剪取中室部位,按照正面和背面分别剪成 5 mm × 5 mm,用双面胶粘在扫描电镜样品台上,使用 SBC-12 型小型离子溅射仪(中国科学院北京仪器研制中心 KYKY)对样品进行离子溅射镀膜喷金处理,金粉厚度约 20 nm。在 S-570 型扫描电子显微镜(日本 HITACHI 公司)下观察拍照。

2 结果与分析

2.1 蛱蝶翅鳞片的类型及特征

前后翅上下表面除翅脉外,都覆盖着鳞片以及少数鳞毛。鳞片如覆瓦状相互重叠,前后两排鳞片重叠 1/3 ~ 3/4 鳞片长度。多数蛱蝶的翅表面(边缘除外)有 1 ~ 2 层鳞片,在 100 μm × 100 μm 的范围内,有 2 ~ 12 个鳞片(图版 I : 1)。翅上的鳞片结构因种类的不同而有所差异,通常扁平宽阔,也有细长或者圆形。每一个鳞片的基部都突出呈小柄状,这些小柄镶嵌在翅膜的基环即鳞片槽内,并且排列均匀(图版 I : 2)。蝴蝶翅上的翅脉排列方向与躯体方向垂直,与翅长轴平行,由于翅室的机械强度不高,翅脉起到加固翅的作用。对蛱蝶科 20 种蝴蝶翅鳞片按照形状进行分类,可分为 3 种,即窄叶形、阔叶形、圆叶形(表 1)。鳞片游离端具数目不等深度不同的缺刻(图版 I : 3, 4, 5)。

2.2 蛱蝶翅鳞片的超微结构特征

每个鳞片的表面由纳米级的纵肋或者槽以及柱状结构组成。在 SEM 图像中可以看到鳞片具有许多平行排列的纵肋,个别纵肋有分叉,很多平行脊线与横线交叉成网格状。有些种类的蝴蝶横线上还有突起,鳞片的外表面由一种类似骨架的柱状结构构建在一起(图版 I : 6, 7, 8)。

表 1 显示:蝶翅鳞片上纵肋的间距为 1.06 ~ 2.27 μm ,高度为 200 ~ 590 nm,宽为 200 ~ 650 nm。其中,线蛱蝶属红线蛱蝶翅鳞片上的纵肋突起高度最小(200 nm),闪蛱蝶属柳紫闪蛱蝶翅鳞片上的纵肋突起高度最大(590 nm);银豹蛱蝶属曲纹银豹蛱蝶的纵肋突起宽最小(200 nm),迷蛱蝶属白斑迷蛱蝶纵肋突起宽最大(650 nm);银豹蛱蝶属曲纹银豹蛱蝶的纵肋突起间距最小(1.06 μm),豹蛱蝶属绿豹蛱蝶纵肋突起间距最大(2.27 μm)。其它 11 属 15 种蝶翅鳞片上纵肋的间距为 1.16 ~ 2.10 μm ,高度为 250 ~ 560 nm,宽为 210 ~ 570 nm。蝶翅鳞片的长度为 65 ~ 135 μm ,宽度为 35 ~ 85 μm ,厚度为 0.5 ~ 2.4 μm ,间距为 48 ~ 112 μm ,密度为 101 ~ 280 个/ mm^2 。其中,窄叶形鳞片长度为 70 ~ 125 μm ,宽度为 35 ~ 85 μm ,间距为 54 ~ 104 μm ;阔叶形鳞片长度为 65 ~ 135 μm ,宽度为 35 ~ 75 μm ,间距为 48 ~ 112 μm ;圆叶形鳞片长度为 95 μm ,宽度为 55 μm ,间距为 80 μm 。

依据鳞片的超微形态,可把 20 种蛱蝶分为 3 个

类型 ,其中拱桥形鳞片的蛱蝶 13 属 16 种、棋盘形 2 属 2 种、筛孔形 2 属 2 种(表 1、图版 I : 6, 7, 8)。

16 种蛱蝶翅表面的鳞片为拱桥形 ,鳞片长约 160 μm ,宽约 85 μm ,间距约 48 ~ 112 μm 。鳞片的上层片由许多分支或不分支的桁柱相连 ,鳞片表面有许多平行排列的微细纵肋 ,个别纵肋分叉。纵肋间交织的加固横梁呈拱桥形规则排列 ,纵肋和横梁之间有很多大小不等、形状不规则的贯穿孔 ,这些贯穿孔排成一纵列 ,有的种类在横梁上还有数目不等的斜向突起 ,纵肋、横梁的密度和结构因蝴蝶种类而异。横梁间距 340 ~ 800 nm(图版 I : 6)。

红蛱蝶属 *Vanessa* Fabricius 小红蛱蝶和青豹蛱蝶属 *Damora* Nordmann 青豹蛱蝶翅表面的鳞片为棋盘形 ,鳞片长约 95 μm ,宽约 55 ~ 65 μm ,间距约 80 ~

91 μm 。鳞片的上层片纵肋间距约 1.58 ~ 1.80 μm ,宽 310 ~ 390 nm ,高 340 ~ 570 nm。上层片的纵肋较细 ,间距较宽 ,其间只有一纵列贯穿孔呈棋盘状规则排列。纵肋上有明显的突起结构 ,个别纵肋有分叉现象(图版 I : 7)。

迷蛱蝶属 *Mimathyma* Moore 白斑迷蛱蝶和闪蛱蝶属 *Apatura* Fabricius 紫闪蛱蝶翅表面的鳞片为筛孔形 ,这种鳞片的微细结构与前 2 种相比差别较大。鳞片长约 90 ~ 105 μm ,宽约 70 ~ 85 μm ,间距约 86 ~ 104 μm 。鳞片的上层片纵肋间距约 1.16 ~ 1.77 μm ,宽 460 ~ 530 nm ,高 520 ~ 650 nm。纵肋间的贯穿孔很大 ,近圆形 ,排列不规则 ,贯穿孔周围的纵肋和横梁表面有很细的横纹结构(图版 I : 8)。

表 1 蛱蝶科蝴蝶翅鳞片的形态表征

Table 1 Morphological measurements of Nymphalid butterfly wing scales

属 Genera	种 Species	纵肋 Vertical gibbosity			鳞片 Scale				
		高 Height	宽 Width	间距 Distance	长 Length	宽 Width	间距 Distance	形状 Shape	超微结构 Ultrastructure
豹蛱蝶属 <i>Argynnis</i>	绿豹蛱蝶 <i>A. paphia</i>	0.34 ± 0.04	0.37 ± 0.05	2.27 ± 0.31	70 ± 12	35 ± 9	54 ± 11	AF	AB
线蛱蝶属 <i>Limenitis</i>	红线蛱蝶 <i>L. populi</i>	0.20 ± 0.01	0.30 ± 0.02	1.49 ± 0.17	90 ± 21	50 ± 11	76 ± 19	AF	AB
	断眉线蛱蝶 <i>L. doerriesi</i>	0.41 ± 0.03	0.48 ± 0.04	1.30 ± 0.34	70 ± 21	45 ± 18	58 ± 12	AF	AB
老豹蛱蝶属 <i>Argyronome</i>	老豹蛱蝶 <i>A. laodice</i>	0.40 ± 0.04	0.27 ± 0.03	1.63 ± 0.29	85 ± 24	55 ± 13	77 ± 18	LF	AB
银豹蛱蝶属 <i>Childrena</i>	曲纹银豹蛱蝶 <i>C. zenobia</i>	0.25 ± 0.02	0.20 ± 0.01	1.06 ± 0.12	90 ± 24	45 ± 12	60 ± 14	AF	AB
斑豹蛱蝶属 <i>Speyeria</i>	银斑豹蛱蝶 <i>S. aglaja</i>	0.28 ± 0.02	0.35 ± 0.04	1.17 ± 0.25	70 ± 19	60 ± 13	77 ± 21	LF	AB
闪蛱蝶属 <i>Apatura</i>	紫闪蛱蝶 <i>A. iris</i>	0.46 ± 0.05	0.52 ± 0.04	1.77 ± 0.37	90 ± 18	85 ± 19	104 ± 33	AF	SP
	柳紫闪蛱蝶 <i>A. ilia</i>	0.59 ± 0.06	0.56 ± 0.05	1.70 ± 0.23	105 ± 31	50 ± 11	70 ± 14	AF	AB
迷蛱蝶属 <i>Mimathyma</i>	白斑迷蛱蝶 <i>M. schrenckii</i>	0.53 ± 0.04	0.65 ± 0.05	1.16 ± 0.14	105 ± 27	70 ± 13	86 ± 18	AF	SP
	夜迷蛱蝶 <i>M. nycteis</i>	0.56 ± 0.05	0.40 ± 0.06	1.49 ± 0.21	80 ± 14	35 ± 9	48 ± 11	LF	AB
小豹蛱蝶属 <i>Brenthis</i>	伊诺小豹蛱蝶 <i>B. ino</i>	0.45 ± 0.07	0.41 ± 0.05	1.83 ± 0.41	65 ± 13	60 ± 14	79 ± 18	LF	AB
云豹蛱蝶属 <i>Nephargynnis</i>	云豹蛱蝶 <i>N. anadyomene</i>	0.42 ± 0.05	0.25 ± 0.03	1.62 ± 0.36	125 ± 31	65 ± 16	78 ± 17	AF	AB
蛱蝶属 <i>Nymphalis</i>	白矩朱蛱蝶 <i>N. vaux-album</i>	0.49 ± 0.06	0.46 ± 0.04	1.35 ± 0.27	135 ± 47	75 ± 12	112 ± 36	LF	AB
红蛱蝶属 <i>Vanessa</i>	小红蛱蝶 <i>V. cardui</i>	0.31 ± 0.09	0.57 ± 0.04	1.80 ± 0.21	95 ± 25	65 ± 15	91 ± 21	AF	CB
福蛱蝶属 <i>Fabriciana</i>	福蛱蝶 <i>F. niobe</i>	0.34 ± 0.09	0.21 ± 0.02	1.24 ± 0.31	75 ± 14	55 ± 12	74 ± 15	AF	AB
青豹蛱蝶属 <i>Damora</i>	青豹蛱蝶 <i>D. sagana</i>	0.39 ± 0.05	0.34 ± 0.03	1.58 ± 0.38	95 ± 31	55 ± 9	80 ± 21	RL	CB
钩蛱蝶属 <i>Polygonia</i>	黄钩蛱蝶 <i>P. c-aureum</i>	0.54 ± 0.11	0.35 ± 0.04	1.57 ± 0.41	115 ± 42	65 ± 13	84 ± 18	LF	AB
环蛱蝶属 <i>Neptis</i>	伊络环蛱蝶 <i>N. ilos</i>	0.48 ± 0.04	0.26 ± 0.02	1.60 ± 0.37	100 ± 37	60 ± 12	76 ± 15	AF	AB
	单环蛱蝶 <i>N. rivularis</i>	0.40 ± 0.05	0.55 ± 0.03	2.10 ± 0.49	70 ± 21	35 ± 7	56 ± 9	LF	AB
	朝鲜环蛱蝶 <i>N. philyroides</i>	0.35 ± 0.03	0.44 ± 0.04	1.16 ± 0.23	70 ± 17	40 ± 9	56 ± 16	AF	AB

表中数据为平均值 ± SE(*n* = 10) ; 测量单位为 μm 。Data in the table are mean ± SE(*n* = 10). Measurement unit is μm . AF : 窄叶形 Angustifoliate shape ; LF : 阔叶形 Latifoliate shape ; RL : 圆叶形 Round-leaved shape ; AB : 拱桥形 Arch bridge shape ; CB : 棋盘形 chessboard shape ; SP : 筛孔形 Sieve pore shape.

3 讨论

在观察的蛱蝶科 15 属 20 种蝴蝶中 ,一些体型较小的个体的翅鳞片略小 ,但鳞片的形状、上层鳞片的结构、上层鳞片纵肋间距及贯穿孔形状、排列都基本相同 ,尤其是同属的种类其鳞片的超微结构形状和尺寸极其接近 ,表明它们之间的亲缘关系接近。

在鳞片超微结构的 3 种形状中 ,以拱桥形结构最多 ,棋盘形结构较接近拱桥形结构 ,二者的纵肋突起的高和宽都接近。如果把拱桥形结构沿横梁方向拉伸 ,就可以得到棋盘形结构 ,如果把拱桥形和棋盘形结构沿纵肋方向拉伸 ,就可以得到筛孔形结构。据此可以认为蛱蝶科蝶翅鳞片超微结构以拱桥形结构为主 ,结构相似的种属之间具有较近的亲缘关系。我们观察到的其它科的蝴蝶鳞片超微结构还有

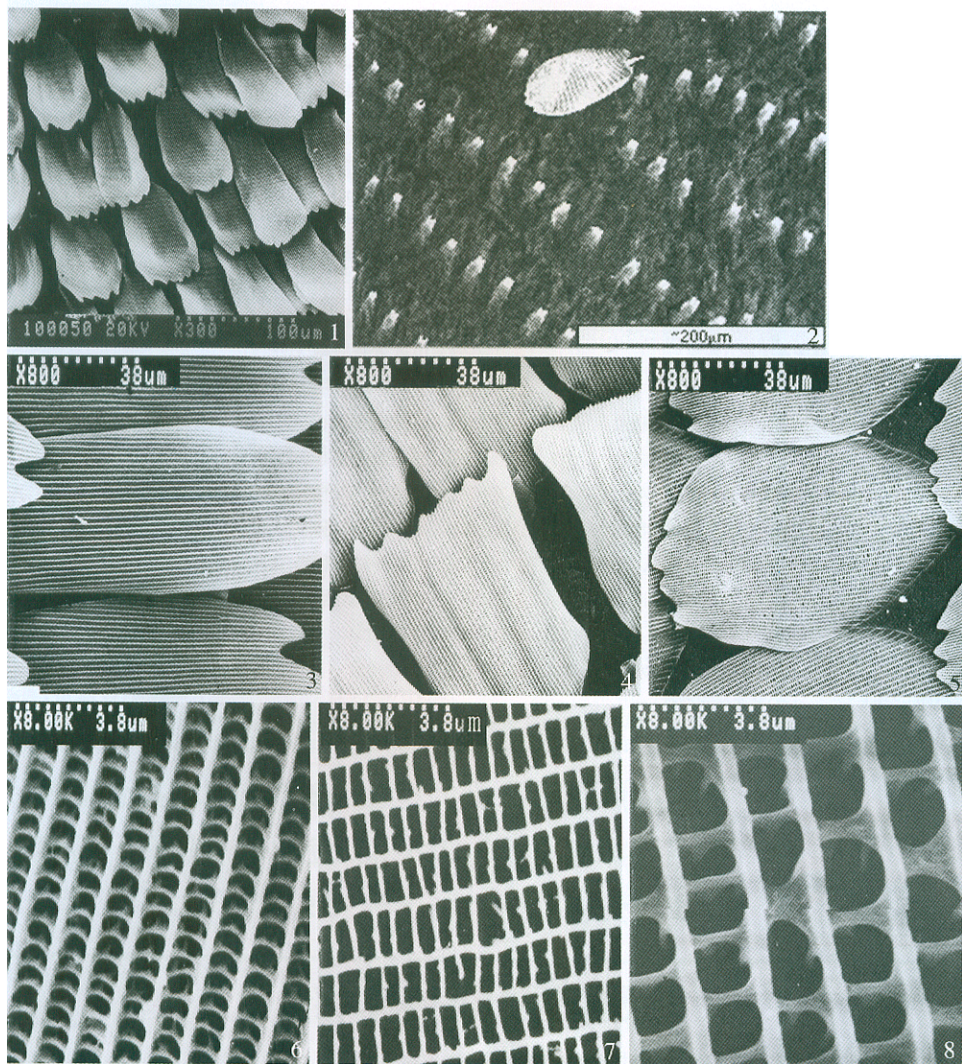
双列筛孔形(碧凤蝶 *Papilio bianor* Cramer)珊瑚形(菜粉蝶 *Pieris rapae* Linnaeus)羽枝形(冰清绢蝶 *Parnassius glacialis* Butler)和多列筛孔形(柑橘凤蝶 *P. xuthus* Linnaeus)等(另文发表)。它们与蛱蝶科蝴蝶鳞片的超微形态在尺寸和形态上都具有较大的差异。研究表明,蝴蝶翅膀表面的微米级鳞片及鳞片上的纳米级纵肋突起直接影响蝴蝶翅膀表面的疏水性(Chen *et al.*, 2004)。通过对蝴蝶翅膀表面非光滑形态的微米级和纳米级结构尺寸的研究,可为仿生纳米疏水材料的制备提供参考和例证。

蝶翅表面鳞片的微观和超微观结构为科以下单位(属、种)分类鉴定中的重要依据,表1所列特征在不同产地的标本中基本稳定,对于区分不同种具有参考价值。由于分布的地理环境差异,种内存在着一定的地理变异和个体变异,应对此做进一步研究。

参 考 文 献 (References)

- Bland RG, Rentz DCF, 1991. Studies in Australian Gryllacrididae: the proventriculus as a taxonomic character. *Invertebrate Taxonomy*, 5: 443 – 455.
- Chen GH, Cong Q, Feng Y, Ren LQ, 2004. Study on the wettability and self-cleaning butterfly wing surface. In: Collins M, Brebbia C eds. *Design and Nature II*. Boston: WIT Press. 245 – 252.
- Cong Q, Chen GH, Fang Y, Ren LQ, 2004. Study on the super-hydrophobic characteristic of butterfly wing surface. *Journal of Bionics Engineering*, 1(4): 249 – 255.
- Fang Y, Sun G, Cong Q, Ren LQ, 2006. Advances in researches on biomimetic materials. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 37(11): 163 – 167. [房岩,孙刚,丛茜,任露泉, 2006. 仿生材料科学研究进展. 农业机械学报, 37(11): 163 – 167]
- Hong J, Ye GY, Hu C, 1998. Studies on wing coloration and scale ultrastructure of four *Luehdorfia* species. *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 24(Suppl.): 1 – 4. [洪健,叶恭银,胡萃, 1998. 四种虎凤蝶翅面斑纹特征及鳞片的超微结构. 浙江农业大学学报, 24(增刊): 1 – 4]
- Rentz CDF, John B, 1990. Studies in Australian Gryllacrididae, taxonomy, biology, ecology and cytology. *Invertebrate Taxonomy*, 3: 1 053 – 1 210.
- Shao QM, Zhang L, Li W, Jia JZ, 2002. Fine structure and distribution of the sensilla on the antennae of *Locusta migratoria manilensis*. *Journal of China Agricultural University*, 7(1): 83 – 88. [邵奇妙,张龙,李文,贾君镇, 2002. 东亚飞蝗触角感受器的外部形态及分布. 中国农业大学学报, 7(1): 83 – 88]
- Zheng YP, Bao XX, 1995. Studies on three kinds of antennae of grasshoppers with scanning electron microscope. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 27(2): 86 – 88. [郑一平,暴学祥, 1995. 蝗虫三种触角扫描电镜研究. 东北师大学报(自然科学版), 27(2): 86 – 88]
- Zhou Y, 1998. *Classification and Identification of Chinese Butterflies*. Zhengzhou: Henan Scientific and Technological Publishing House. [周尧, 1998. 中国蝴蝶分类与鉴定. 郑州: 河南科学技术出版社]
- Zhou Y, Zhu JY, 2003. *A Colour Album of Butterflies of Chang Bai Mountains in China*. Changchun: Jilin Education Publishing House. [周繇,朱俊义, 2003. 中国长白山蝶类彩色图志. 长春: 吉林教育出版社]

(责任编辑:袁德成)



1: 白斑迷蛱蝶翅表面鳞片 Scale on wing surface of *Mimathyma schrenckii*; 2: 去鳞片小红蛱蝶翅表面 (a: 鳞片柄; b: 鳞片槽) Wing surface of *Vanessa cardui* without scale (a: elytrephore; b: scale follicle); 3, 4, 5: 鳞片形态 Scale shape (3: 绿豹蛱蝶, 窄叶形 *Argynnis paphia*, angustifoliate shape; 4: 伊诺小豹蛱蝶, 阔叶形 *Brenthis ino*, latifoliate shape; 5: 青豹蛱蝶, 圆叶形 *Damora sagana*, round-leaved shape); 6, 7, 8: 鳞片超微结构 Scale ultrastructure (6: 夜迷蛱蝶, 拱桥形 *Mimathyma nycteis*, arch bridge shape; 7: 青豹蛱蝶, 棋盘形 *Damora sagana*, chessboard shape; 8: 紫闪蛱蝶, 筛孔形 *Apatura iris*, sieve pore shape).