

基于形态特征和 mtDNA COI 序列的北美五倍子蚜分类和系统发育地位研究

庞雅文¹, 马恩波², 任竹梅^{1,*}

(1. 山西大学生命科学学院, 太原 030006; 2. 山西大学应用生物学研究所, 太原 030006)

摘要: 五倍子蚜共 6 属 12 种, 除北美分布 1 属 1 种外, 其余分布东亚。本研究采用数值分类和分子系统发育分析方法对北美五倍子蚜 *Melaphis rhois* 的形态特点和分类地位进行研究, 以倍蚜 6 属 8 种 179 个有翅孤雌蚜为研究对象, 对其头部、胸部、腹部的直接测量特征 48 个、量度间比例特征 31 个及转化为数值的描述特征 29 个共 108 个特征进行分析。基于欧氏距离的聚类结果显示, 北美倍蚜 *M. rhois* 与倍蚜属关系较近, 五倍子蚜 8 个种共形成 3 个大的聚类簇, 北美倍蚜 *M. rhois* 与倍蚜属的倍蛋蚜 *Schlechtendalia peitan* 和角倍蚜 *S. chinensis* 聚为一支; 铁倍蚜属的肚倍蚜蛋铁亚种 *Kaburagia rhusicola ovogallis* 和肚倍蚜枣铁亚种 *K. rhusicola ensigallis* 与小铁枣蚜属的红小铁枣蚜 *Meitanaphis elongallis*、圆角倍蚜属的倍花蚜 *Nurudea shiraii* 和红倍花蚜 *N. yanoiella* 与铁倍花蚜属的铁倍花蚜 *Floraphis meitanensis* 分别聚为一支。另外, 测定五倍子蚜 8 个种共 16 个样本的 mtDNA COI 基因序列(约 1.2 kb), 最大简约法(maximum parsimony, MP)和最大似然法(maximum likelihood, ML)分子系统发育分析结果均显示北美倍蚜 *M. rhois* 与倍蚜属的关系密切, 和形态数据得到的结果一致; 但倍蚜 8 个种之间的聚类总体上与形态学研究结果不太一致, 铁倍花蚜属的铁倍花蚜和小铁枣蚜属的红小铁枣蚜、铁倍蚜属的肚倍蚜枣铁亚种和肚倍蚜蛋铁亚种与圆角倍蚜属的倍花蚜和红倍花蚜分别聚为一支, 彼此之间的关系尚需深入研究。

关键词: 五倍子蚜; 北美倍蚜; 数值分类; COI 基因序列; 系统发育

中图分类号: Q964 **文献标识码:** A **文章编号:** 0454-6296(2011)05-0575-07

Taxonomic and phylogenetic status of *Rhus* gall aphid *Melaphis rhois* (Homoptera: Pemphigidae) from North America based on morphological characters and mtDNA COI gene sequence

PANG Ya-Wen¹, MA En-Bo², REN Zhu-Mei^{1,*} (1. School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Research Institute of Applied Biology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: *Rhus* gall aphids include six genera and 12 species, and are mainly distributed in East-Asia with only one species *Melaphis rhois* in North America. Based on morphological characteristics and molecular data, we studied the taxonomic status of the North America species *M. rhois*. The numerical taxonomy on eight species from six genera of *Rhus* gall aphids was studied using hierarchical clustering analysis. A total of 108 morphological characters from 179 individuals of the alate adults were evaluated from all parts of aphid body, among which 48 characters from head, thorax and abdomen were directly measured, 31 characters were the ratio from two measured characters, and the rest were numerical values converted from morphological characters. The cladistic analysis based on the Euclidean distance showed that the eight *Rhus* gall aphid species are clustered into three clades, among which the North America species *M. rhois* is closely clustered with the two species from the genus *Schlechtendalia*; the two species from *Nurudea* and *Floraphis meitanensis*, *Meitanaphis elongallis* and two subspecies from the genus *Kaburagia* are clustered as a group, respectively. In addition, the 1.2 kb DNA sequences of mtDNA COI gene from 16 individuals of eight *Rhus* gall aphid species were obtained. Both of the MP and ML phylogenetic trees showed that the eight *Rhus* gall aphid species are clustered into three clades, and the North America species *M. rhois* clustered closely with the genus *Schlechtendalia*, which are consistent with the results of the morphological analysis. However, the relationship between the three clusters are inconsistent with that based on the morphological data. In molecular trees, North America species *M. rhois* and two species from the genus

基金项目: 国家自然科学基金项目(30670361, 31040010); 山西省回国留学人员科研资助项目

作者简介: 庞雅文, 女, 1988 年 8 月生, 山西晋城人, 硕士研究生, 主要从事分子生态学方面的研究, E-mail: yawen570@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Corresponding author, Tel.: 0351-7018871; E-mail: zmren@sxu.edu.cn

收稿日期 Received: 2010-11-17; 接受日期 Accepted: 2011-03-21

Schlechtendalia, *F. meitanensis* and *M. elongallis*, and two species from *Nurudea* and two subspecies from the genus *Kaburagia* are clustered as three groups I, II and III, respectively. The group I and II have relatively close relationship, but with very low bootstrap value ($< 50\%$). It is necessary to collect more species and use more molecular data to resolve the phylogeny of *Rhus* gall aphids.

Key words: *Rhus* gall aphids; *Melaphis rhois*; numerical taxonomy; COI gene sequence; phylogeny

五倍子蚜属同翅目 (Homoptera) 瘿绵蚜科 (Pemphigidae) 五节根蚜亚科 (Fordinae) 倍蚜族 (Melaphidini) 昆虫, 是唯一对人类有益的蚜虫类群, 其原生寄主为漆树科盐肤木属 *Rhus* 植物, 寄生在植物上形成的虫瘿特称为五倍子 (张广学等, 1999), 是重要的医药和化工原料。

五倍子蚜主要分布东亚, 此外仅在北美分布 1 属 1 种, 呈现出典型的东亚北美间断分布格局。Bell (1851) 最早将在中国发现的形成五倍子虫瘿的蚜虫作为一个新种定名为 *Aphis chinensis*, Fitch (1866) 在北美 Virginia 采到寄生在 *Rhus glabra* 上的五倍子, 将其中寄生的蚜虫定名为 *Byrsocrypta rhois*, Walsh (1867) 将其修订为 *Melaphis rhois*, Baker (1917) 认为 *Schlechtendalia* 为 *Melaphis* 的同物异名, 将其更名为 *M. chinensis*。所有这些研究均认为来自北美和中国的五倍子蚜属于同一个种, 直到 Eastop 和 Hille Ris Lambers (1976) 在世界蚜虫纵览中将这两个种分开, 把来自北美和中国的五倍子蚜分别确认为北美倍蚜 *Melaphis rhois* (Fitch, 1866) 和角倍蚜 *Schlechtendalia chinensis* (Lichtenstein, 1883)。

我国是五倍子蚜的主要分布地, 上世纪中期开始我国学者对该类群进行了深入的调查研究、描述新种、开发资源等 (唐觉和蔡邦华, 1957; 向和, 1980; 夏定久, 1985)。蚜虫学专家张广学综合分

析后将我国五倍子蚜归类合并, 分为 5 属 11 种, 认为 *M. rhois* 与中国的五倍子蚜是不同的属, 但并未对 *M. rhois* 给出具体的形态描述, 至此五倍子蚜共有 6 属 12 种 (Eastop and Hille Ris Lambers, 1976; 张广学等, 1999)。基于该分类系统, 杨子祥等 (2008) 采用数值支序分类的方法, 任竹梅 (2009) 和 Yang 等 (2010) 采用分子序列方法分别对我国的五倍子蚜部分种类进行了系统发育研究, 彼此之间的关系还没有很好得到解决, 尚未见对北美五倍子蚜形态学特征进行详细描述的研究报道。

鉴于此, 本研究对北美倍蚜的形态学特征进行详细的观察和描述, 同时测定其线粒体 DNA COI 基因序列, 采用数值分类和分子系统发育分析方法对其与我国五倍子蚜种类之间的关系进行研究, 确定其系统发育地位, 同时为该类群的生物地理学及其与寄主植物的之间的协同进化研究等提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 实验材料

标本于 2004 – 2009 年采自野外自然种群, 一个倍子里的蚜虫分别保存在 75% 和无水乙醇中, 分别用于形态鉴定和 DNA 序列测定实验。标本采集信息见表 1。

表 1 五倍子蚜虫样本采集信息
Table 1 Sample information of *Rhus* gall aphids in this study

种名 Species	采集地 Localities	样本数 Number of samples	经度 Longitude	纬度 Latitude
北美倍蚜 <i>Melaphis rhois</i>	美国新泽西州 New Jersey, USA	24	75°00'	41°03'
角倍蚜 <i>Schlechtendalia chinensis</i>	云南麻栗坡 Malipo, Yunnan	20	104°42'	23°07'
倍蛋蚜 <i>Schlechtendalia peitan</i>	湖南桑植 Sangzhi, Hunan	20	110°10'	29°39'
铁倍花蚜 <i>Floraphis meitanensis</i>	湖南桑植 Sangzhi, Hunan	19	110°10'	29°39'
红倍花蚜 <i>Nurudea yanoiella</i>	陕西城固 Chenggu, Shaanxi	19	107°21'	33°06'
倍花蚜 <i>Nurudea shiraii</i>	广西龙胜 Longsheng, Guangxi	18	110°00'	25°47'
红小铁枣蚜 <i>Meitanaphis elongallis</i>	陕西城固 Chenggu, Shaanxi	20	107°21'	33°06'
肚倍蚜蛋铁亚种 <i>Kaburagia rhusicola ovogallis</i>	湖北五峰 Wufeng, Hubei	20	110°40'	30°11'
肚倍蚜枣铁亚种 <i>Kaburagia rhusicola ensigallis</i>	山西夏县 Xiaxian, Shanxi	19	111°24'	35°05'
云龙角瘿绵蚜 <i>Baizongia yunlongensis</i>	湖北五峰 Wufeng, Hubei	25	110°40'	30°11'
扁蚜 <i>Hormaphis hamamelidis</i>	美国阿肯色州 Arkansas, USA	16	92°52'	35°43'

1.2 形态特征数值分类

1.2.1 形态性状特征的选择: 依据虫体性状特征的完好程度进行标本选择, 按照独立性、稳定性和同源性的标准选择形态特征(朱弘复等, 1975; 陈斌, 1989), 共选取 108 个性状特征进行分析, 其中量度特征 48 个, 量度间比例特征 31 个, 转换为数值的描述特征 29 个(张广学和钟铁森, 1983; 张广学等, 1999; 杨子祥等, 2008)。

1.2.2 性状的观察与测量: 在 Olympus MVX10 体式解剖镜下制作蚜虫玻片标本(高占林等, 2009), 每个种的蚜虫标本制作数量为 20 头左右, 分别用 Olympus BX51 显微镜的 DP2 系统和 Olympus IX71 显微镜的 IPP 测量软件对蚜虫玻片标本进行拍照和性状测量。

1.2.3 形态特征聚类分析: 将原始数据标准化处理, 用 SPSS 统计软件对每个性状测量值进行统计

分析, 计算欧氏距离和相关系数, 采用 UPGMA 方法进行聚类分析(卢纹岱, 2004)。

1.3 分子系统发育分析

五倍子蚜单头样本 DNA 提取及 COI 基因序列的扩增及序列数据的分析参考任竹梅等(2002)和任竹梅(2009), 引物设计参考 Folmer 等(1994)和 Simon 等(1994)。对位排列校准后的序列用 Paup 软件构建 MP 和 ML 系统树(Felsenstein, 1985; Posada and Buckley, 2004)。

2 结果与分析

2.1 形态性状特征

观察北美倍蚜 *M. rhois* 的标本个体数为 24 头, 其重要形态特征图如下(图 1)。

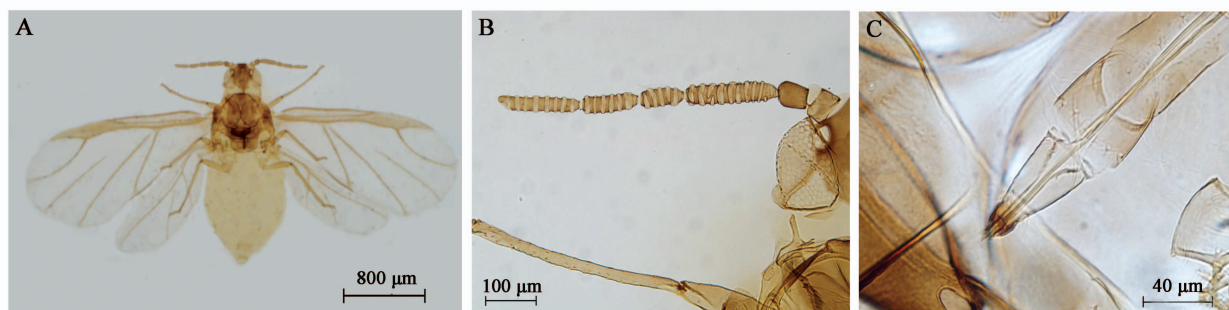


图 1 北美倍蚜 *Melaphis rhois* 形态特征

Fig. 1 Morphological characters of North America species *Melaphis rhois*

A: 整体形态 Whole body view; B: 触角 Antenna; C: 喙端部 Ultimate rostral segment.

测量 *M. rhois* 标本得到的形态性状特征值为平均值(单位 mm), 分别为: 体长, 1.570 ± 0.095 ; 体宽, 0.776 ± 0.059 ; 头长, 0.239 ± 0.032 ; 头宽(包括复眼), 0.371 ± 0.019 ; 头宽(不含复眼), 0.222 ± 0.008 ; 胸长, 0.465 ± 0.038 ; 胸宽, 0.589 ± 0.035 ; 腹长, 0.867 ± 0.055 ; 翅长, 2.027 ± 0.074 ; 翅宽, 0.843 ± 0.048 ; 触角全长, 0.554 ± 0.019 ; 触角 I 长, 0.037 ± 0.003 ; 触角 II 长, 0.050 ± 0.004 ; 触角 III 长, 0.159 ± 0.011 ; 触角 III 毛长, 0.006 ± 0.001 ; 触角 III 直径, 0.040 ± 0.003 ; 触角 IV 长, 0.074 ± 0.007 ; 触角 V 长, 0.096 ± 0.005 ; 触角 VI 长, 0.137 ± 0.008 ; 触角末节基部长, 0.124 ± 0.006 ; 触角末节鞭部长, 0.014 ± 0.001 ; 尾片全长, 0.029 ± 0.005 ; 尾片基宽, 0.088 ± 0.012 ; 尾片中宽, 0.057 ± 0.008 ; 尾板全长, 0.040 ± 0.010 ; 尾板基宽, 0.186 ± 0.037 ; 尾

板中宽, 0.122 ± 0.024 ; 头顶毛长, 0.006 ± 0.001 ; 前股节长, 0.297 ± 0.009 ; 前股节宽, 0.049 ± 0.006 ; 前胫节长, 0.391 ± 0.016 ; 前胫节宽, 0.030 ± 0.003 ; 中股节长, 0.250 ± 0.008 ; 中股节宽, 0.048 ± 0.006 ; 中胫节长, 0.384 ± 0.016 ; 中胫节宽, 0.031 ± 0.003 ; 后股节长, 0.290 ± 0.011 ; 后股节宽, 0.051 ± 0.006 ; 后胫节长, 0.462 ± 0.018 ; 后胫节宽, 0.032 ± 0.003 ; 前跗节 I 长, 0.025 ± 0.002 ; 前跗节 II 长, 0.095 ± 0.005 ; 中跗节 I 长, 0.024 ± 0.002 ; 中跗节 II 长, 0.095 ± 0.005 ; 后跗节 I 长, 0.026 ± 0.002 ; 后跗节 II 长, 0.108 ± 0.004 ; 喙 IV + V 长, 0.070 ± 0.004 ; 喙 IV + V 宽, 0.037 ± 0.005 。

形态性状比例值分别为: 触角 III 长: 触角 I 长, 4.316; 触角 III 长: 触角 II 长, 3.180; 触角 III 长: 触角 IV 长, 2.159; 触角 III 长: 触角 III 直径, 4.035; 触

角Ⅲ长:触角末节鞭部长, 11.490; 触角Ⅲ长:尾板中宽, 1.367; 触角末节基部长:触角末节鞭部长, 8.943; 触角全长:触角Ⅲ长, 3.490; 头长+胸长:触角全长, 1.272; 喙Ⅳ+Ⅴ长:喙Ⅳ+Ⅴ宽, 1.920; 后跗节Ⅱ长:喙Ⅳ+Ⅴ长, 1.553; 后股节长:触角Ⅲ长, 1.827; 后股节长:后股节宽, 5.715; 后胫节长:后股节长, 1.596; 后胫节长:后胫节宽, 14.639; 后胫节长:后跗节Ⅱ长, 4.265; 头宽(复眼间):头宽(不含复眼), 1.677; 头长+胸长:后胫节长, 1.524; 头长+胸长:后股节长, 2.431; 翅长:体长, 1.295; 体长:头长+胸长, 2.235; 体长:体宽, 2.028; 尾片长度:尾片基宽, 0.339; 前股节长:前股节宽, 6.223; 前胫节长:前股节长, 1.314; 前胫节长:前胫节宽, 13.348; 前胫节长:前跗节Ⅱ长, 4.126; 中股节长:中股节宽, 5.335; 中胫节长:中股节长, 1.536; 中胫节长:中胫节宽, 12.634; 中胫节长:中跗节Ⅱ长, 4.051。

描述特征如下:有翅孤雌蚜头部有背中缝;无蜡片;额平直;喙Ⅳ+Ⅴ形状为楔状(长为基宽的2.5倍以下);触角节数为6节;触角节Ⅲ的长度短于Ⅳ+Ⅴ+Ⅵ;触角节Ⅲ-Ⅵ(或Ⅴ)无一大型片状

感觉器覆于触角表面的大部分;触角次生感觉圈形态为纵椭圆形;触角的原生感觉圈和次生感觉圈均无睫;前翅翅痣形态伸长,但不达翅顶;前翅 Cu_1 与 Cu_2 不共柄,基部靠近;前翅 Cu_1 与 Cu_2 的区域小;前翅中脉单一;后翅有两条斜脉,基部远离;体背有匙形毛;有翅型无腹管;尾片半月形(基部宽度为长度的两倍以上);生殖突不显或有1个或2个;大多数蜡片由两种大小的蜡胞组成;有翅孤雌蚜第一寄主植物为 *Rhus glabra* 或 *R. typhina*;无翅孤雌蚜和幼蚜至少前足和中足跗节1节;无翅孤雌蚜局部有蜡片;有翅孤雌蚜第1跗节毛序为2, 2, 2或3, 3, 2或3, 2, 2或3, 3, 3;虫瘿着生于复叶小叶背面的中脉上;虫瘿梨状或球状,较小;虫瘿次生开口位于倍子(虫瘿)的端部位置;有翅孤雌蚜迁飞时间为9月以后。

2.2 形态特征聚类分析

基于张广学等(1999)的分类系统选择与五倍子关系较近的种云龙角瘿绵蚜和扁蚜作为外类群,基于欧氏距离和相关系数构建五倍子蚜 UPGMA 树,结果均显示 *M. rhois* 与倍蚜属关系密切,基于欧氏距离构建的 UPGMA 树见图 2 (A)。

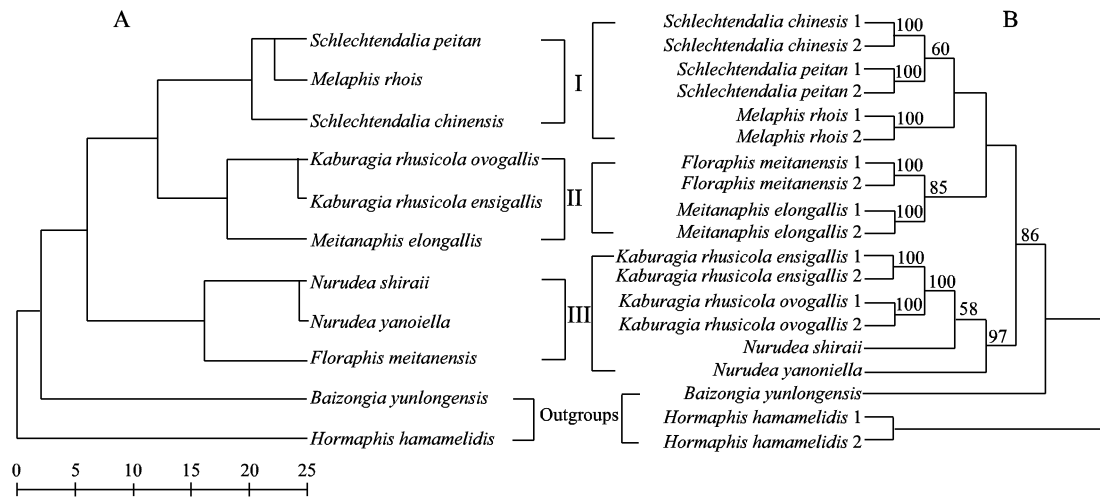


图2 基于形态特征(A)和 mtDNA COI 基因序列(B)的五倍子蚜系统发育关系

Fig. 2 Phylogeny of *Rhus* gall aphids based on Euclidean distance using UPGMA method (A) and mtDNA COI sequences using MP method (B)

A 图中标尺为聚类重新标定距离; B 图中支上数值为 1 000 次自展检验置信度。Scale in figure A indicates the rescaled distance for cluster analysis. Numbers on the branches in figure B are bootstrap values for 1 000 replicates.

由图显示,五倍子蚜 8 个种共形成 3 个大的聚类簇,北美倍蚜 *M. rhois* 与倍蚜属关系密切,与倍蚜属的角倍蚜和倍蛋蚜优先相聚构成聚类簇 I,铁倍蚜属的肚倍蚜枣铁亚种和肚倍蚜蛋铁亚种与小

铁枣蚜属的红小铁枣蚜构成聚类簇 II,聚类簇 III 由圆角倍蚜属的倍花蚜和红倍花蚜与铁倍花蚜属的铁倍花蚜构成,聚类簇 I 和 II 关系相对密切,同一个属的倍蚜聚为一支,该聚类关系与形态分类结

果基本一致。

2.3 分子系统发育分析

基于 mtDNA COI 基因序列, 以云龙角瘿绵蚜和扁蚜为外类群, 建立五倍子蚜 MP 和 ML 系统发育树, 二者得到基本一致的聚类关系, 其中北美倍蚜 *M. rhois* 与倍蚜属聚到一起, 与基于形态特征得到的结果一致。MP 方法建立的系统发育关系见图 2 (B)。

分子系统树显示, 五倍子蚜 8 个种也形成 3 个大的聚类簇, 北美倍蚜 *M. rhois* 与倍蚜属的角倍蚜和倍蛋蚜构成聚类簇 I, 与形态聚类结果一致, 但是其余两个簇与形态结果略有不同, 铁倍花蚜属的铁倍花蚜与小铁枣蚜属的红小铁枣蚜构成聚类簇 II, 铁倍蚜属的肚倍蚜枣铁亚种和肚倍蚜蛋铁亚种与圆角倍蚜属的倍花蚜和红倍花蚜构成聚类簇 III, 属内各种和种内不同个体之间优先以很高的置信度相聚, 然后再与其他属相聚。

3 讨论

对北美倍蚜较为详细的形态描述最早是 Fitch 的研究, 他在 Virginia 采集到五倍子, 详细描述了其形状、大小、倍壁厚度、形态、颜色、绒毛状态及其寄生部位、寄生后引起的寄主植物叶片变化等, 同时对有翅雌性倍蚜的大小、体色和头、触角、眼睛、翅膀、足等的颜色、触角节的相对长度等形态学特征进行描述, 并将该种定名为 *Byrsocrypta rhois* (Fitch, 1866)。后来对该种的分类主要是基于 Fitch 的模式种进行的修订, 近年来, 有对其与其他蚜虫类群的分子系统方面的研究报道 (von Dohlen *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2010), 但都没有对北美五倍子蚜进行过详细的形态学描述。

本研究对采自美国 New Jersey 的五倍子蚜标本进行详细的形态学观察记录, 同时测定其 mtDNA COI 基因序列, 采用数值分类和分子系统发育分析方法对其与东亚倍蚜的关系进行研究。结果显示, 北美的五倍子蚜聚于其他倍蚜中间, 与倍蚜属亲缘关系密切, 由此可以说明, 五倍子蚜起源于东亚, 北美的倍蚜与东亚分布较广、数量较多的种——角倍蚜关系密切。

Moran (1989) 对亚利桑那州采集到的五倍子蚜的第一和第二寄主植物和生活史特点进行研究, 结合古生物学和生物地理学证据, 认为该种是与我国角倍蚜相同的种, 它们与寄主植物之间的寄生关系

早在始新世之前就已经形成了, 当时它们在北美和东亚之间的分布是通过白令大陆桥连在一起而呈连续分布的; 第三纪由于气候的变化和地球的构造运动, 倍蚜随着寄主植物的地理分隔和迁移而分布, 这样五倍子蚜在两个大陆上独立进化, 呈现出典型的东亚北美间断分布格局 (Moran, 1989; 李勇民和田泽军, 1993; 李勇民, 1994)。本研究对 Moran (1989) 的结果增加了新的证据, 说明北美倍蚜 *M. rhois* 起源于东亚。

另外, 杨子祥 (2008) 基于数值支序分类研究了我国五倍子蚜 5 属 7 种 10 个分类单元之间的关系, 结果显示 7 个种分为 3 个组, 铁倍蚜属和小铁枣蚜属、圆角倍蚜属和铁倍花蚜属分别聚为一个分支, 倍蚜属单独成支, 与其他五倍子蚜的亲缘关系较远; 本研究在增加北美倍蚜类和增加更多的性状特点后, 得到的聚类关系显示 6 个属分为 3 个支, 北美倍蚜与角倍蚜聚为一支, 彼此之间关系密切, 其余两个分支和杨子祥的研究结果一致, 唯一不同的是 3 个支之间的关系有点差异, 本研究显示倍蚜属与铁倍蚜和小铁枣蚜关系密切, 而圆角倍蚜属和铁倍花蚜属聚为一个单独分支, 与其他五倍子蚜亲缘关系相对较远, 该结果应该更能反应其合理性。虫瘿的形态是蚜虫重要的生物学特征, 也是鉴定倍蚜种类的重要依据之一 (陈静和乔格侠, 2009), 倍花类虫瘿在进化程度上是比较高级的 (张合彩等, 2006), 圆角倍蚜属和铁倍花蚜属的倍蚜虫瘿都为倍花类, 外形如花, 直径较大, 与其他倍蚜的虫瘿区别较大, 它们应该是关系较近的类群。

用 mtDNA COI 基因序列构建的五倍子蚜分子系统发育树显示, 铁倍花蚜属与小铁枣蚜属聚为一支, 圆角倍蚜属与铁倍蚜属聚为一支; 而数值分类结果显示, 铁倍花蚜属与圆角倍蚜属聚为一个分支, 这两个属的亲缘关系较近, 基于形态特征的倍蚜发育关系与分子系统发育关系没有得到完全一致的结果; Yang 等 (2010) 使用 EF-1 α 和 COII 基因对五倍子蚜进行系统发育研究, 结果显示, 铁倍蚜属与小铁枣蚜属和倍蚜属聚为一支, 铁倍花蚜属与北美倍蚜 *M. rhois* 聚为一支, 圆角倍蚜属聚为一支, 各属以较高的置信度单独聚为一支, 圆角倍蚜属处于较原始的地位, 这与我们的结果也不太一致。这种差异可能一是由于数值分类本身的局限性, 尽管我们选择尽可能多的特征, 但是由于倍蚜独特的繁殖方式和生活方式使它获得了高度的适应和变异能力 (张利军等, 2000), 有些特征本身在

不同个体之间的变异性和偏移可能引起聚类关系的不稳定;再者本研究用一个 mtDNA 基因进行聚类分析, Yang 等(2010)选择了一个核基因和一个 mtDNA 基因进行聚类分析,有些种之间尽管聚为一支,但是其置信度比较低,还没有很好地解决彼此之间的关系,这也可能是导致结果不一致的原因,尚需选择更多的基因序列对倍蚜之间的关系进行深入研究。

总之,本研究对北美五倍子蚜的形态特征进行详细描述,从形态和分子水平对其分类地位进行研究,结果显示该种与倍蚜属关系密切,该类群起源于东亚。在进一步的研究中,我们将采集更多的标本,选择更多的分子序列标记,结合化石记录进行时间估计来探讨五倍子蚜的起源及其目前分布格局的形成机制,为更好地利用这一生物资源提供基础资料。

参 考 文 献 (References)

- Baker AC, 1917. Chinese galls. *Entomol. News*, 28: 385–393.
- Bell J, 1851. Chinese galls. *Pharmaceutical Journal*, 10: 128.
- Chen B, 1989. A preliminary study on the numerical taxonomy of the genus *Anoplophora*. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 14(1): 96–103. [陈斌, 1989. 星天牛属的数值分类研究初探. 动物分类学报, 14(1): 96–103]
- Chen J, Qiao GX, 2009. A study on diversity of aphid's galls of Hormaphidinae. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 34(2): 269–276. [陈静, 乔格侠, 2009. 扁蚜亚科昆虫虫瘿多样性研究(半翅目, 蚜科). 动物分类学报, 34(2): 269–276]
- Eastop VF, Hille Ris Lambers D, 1976. Survey of the World's Aphids. Springer-Verlag, Germany. 584 pp.
- Felsenstein J, 1985. Confidence-limits on phylogenies: an approach using the bootstrap. *Evolution*, 39: 783–791.
- Fitch A, 1866. Sumac gall-aphids: *Byrsocrypta rhois*, new species (Order Homoptera, Family Aphidae). *Journal of the New York State Agricultural Society*, 17: 73.
- Folmer O, Black M, Hoeh W, Lutz R, Vrijenhoek R, 1994. DNA primers for amplification of mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I from diverse metazoan invertebrates. *Molecular Marine Biology and Biotechnology*, 3: 294–299.
- Gao ZL, Li YY, Dang ZH, Pan WL, Tian SB, 2009. Making method and skill of aphid glass specimen. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 13(3): 159, 168. [高占林, 李耀友, 党志红, 潘文亮, 田士波, 2009. 蚜虫玻片标本的制作方法与技术. 河北农业科学, 13(3): 159, 168]
- Li YM, 1994. Gallnuts in North America. *Journal of Guizhou Agricultural College*, 13(1): 24–27. [李勇民, 1994. 北美的五倍子. 贵州农学院学报, 13(1): 24–27]
- Li YM, Tian ZJ, 1993. Research on Gallnuts in Foreign. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, (3): 35–39. [李勇民, 田泽君, 1993. 国外五倍子研究进展. 四川林业科技, (3): 35–39]
- Lichtenstein J, 1883. *Schlechtendalia chinensis*. *Stettiner Entomologische Zeitung*, 64: 242.
- Lu WD, 2004. SPSS (Statistical Package for the Social Science) for Windows Statistical Analysis. 2nd ed. Publishing House of Electronics Industry, Beijing. 338–395. [卢纹岱, 2004. SPSS for Windows 统计分析(第2版). 北京: 电子工业出版社. 338–395]
- Moran NA, 1989. A 48-million-year-old aphid-host plant association and complex life cycle; biogeographic evidence. *Science*, 245: 173–175.
- Posada D, Buckley TR, 2004. Model selection and model averaging in phylogenetics: advantages of Akaike information criterion and Bayesian approaches over likelihood ratio tests. *Systematic Biology*, 53: 793–808.
- Ren ZM, 2009. Molecular phylogeny and coevolution of Chinese gallnut aphid and its host-plant inferred from DNA sequences. *Journal of Shanxi University*, 32(4): 614–620. [任竹梅, 2009. 五倍子蚜与寄主植物 DNA 序列系统发育关系及其协同进化. 山西大学学报, 32(4): 614–620]
- Ren ZM, Ma EB, Guo YP, 2002. The studies of the phylogeny of Acridoidea based on mtDNA sequences. *Acta Genetica Sinica*, 29(4): 314–321. [任竹梅, 马恩波, 郭亚平, 2002. 蝗总科部分种类 Cyth 基因序列及系统进化研究. 遗传学报, 29(4): 314–321]
- Simon C, Frati F, Beckenbach A, Crespi B, Liu H, Flook P, 1994. Evolution, weighting, and phylogenetic utility of mitochondrial gene sequences and a compilation of conserved polymerase chain reaction primers. *Annals of the Entomological Society of America*, 87: 651–701.
- Tang J, Cai BH, 1957. Studies on the Chinese gall-nuts of Meitan, Kweichow. *Acta Entomologica Sinica*, 7(1): 131–140. [唐觉, 蔡邦华, 1957. 贵州湄潭五倍子的研究. 昆虫学报, 7(1): 131–140]
- Von Dohlen CD, Kurosu U, Aoki S, 2002. Phylogenetics and evolution of the eastern Asian-eastern North American disjunct aphid tribe, Hormaphidini (Hemiptera: Aphididae). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 23: 257–267.
- Walsh BD, 1867. On the insects coleopterous, hymenopterous and dipterous, inhabiting the galls of certain species of willow. *Proceedings of the Entomological Society of Philadelphia*, 6: 281–282.
- Xia DJ, 1985. The natural resources of gallnuts in China. *Chemistry and Industry of Products*, 5(4): 40–46. [夏定久, 1985. 我国的五倍子资源. 林产化学与工业, 5(4): 40–46]
- Xiang H, 1980. Studies of Chinese gall-nut aphids on *Rhus potaninii* Maxim. *Entomotaxonomia*, 2(4): 303–313. [向和, 1980. 中国青肤杨五倍子蚜虫的研究. 昆虫分类学报, 2(4): 303–313]
- Yang ZX, Chen XM, Feng Y, Chen H, 2008. A numerical taxonomic study of Chinese gall aphids (Hemiptera: Pemphigidae). *Entomotaxonomia*, 30(1): 16–24. [杨子祥, 陈晓鸣, 冯颖, 陈航, 2008. 五倍子蚜虫的数值分类(半翅目: 瘿绵蚜科). 昆虫分类学报, 30(1): 16–24]

- Yang ZX, Chen XM, Havill NP, Feng Y, Chen H, 2010. Phylogeny of *Rhus* gall aphids (Hemiptera: Pemphigidae) based on combined molecular analysis of nuclear EF1a and mitochondrial COII genes. *Entomological Science*, 13: 351–357.
- Zhang GX, Qiao GX, Zhong TS, Zhang WY, 1999. Fauna Sinica, Insecta Vol. 14. Homoptera, Mindaridaea and Pemphigidae. Science Press, Beijing. 256–272. [张广学, 乔格侠, 钟铁森, 张万玉, 1999. 中国动物志, 昆虫纲, 第14卷. 同翅目, 蚜科, 瘿绵蚜科. 北京: 科学出版社. 256–272]
- Zhang GX, Zhong TS, 1983. Economic Insect Fauna of China. Science Press, Beijing. 65–68. [张广学, 钟铁森, 1983. 中国经济昆虫志. 北京: 科学出版社. 65–68]
- Zhang HC, Qiao GX, Zhang GX, 2006. A study on diversity of aphid's galls in Pemphigidae. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 31(1): 48–54. [张合彩, 乔格侠, 张广学, 2006. 瘿绵蚜科虫瘿的多样性研究. 动物分类学报, 31(1): 48–54]
- Zhang LJ, Cao H, Li YL, 2000. A summary of aphids taxonomy. *Journal of Shanxi Agricultural University*, (4): 360–363. [张利军, 曹挥, 李友莲, 2000. 蚜虫分类研究综述. 山西农业大学学报, (4): 360–363]
- Zhu HF, Zhang GX, Zhong TS, 1975. A numerical taxonomic study of some Chinese aphids. *Acta Entomologica Sinica*, 18(2): 211–216. [朱弘复, 张广学, 钟铁森, 1975. 蚜虫的数值分类. 昆虫学报, 18(2): 211–216]

(责任编辑: 袁德成)