



陈晓晓, 谭超, 苑晓伟, 宋月华. 中国斑叶蝉族昆虫地理分布格局聚类分析 [J]. 环境昆虫学报, 2020, 42 (5): 1141 - 1153.

中国斑叶蝉族昆虫地理分布格局聚类分析

陈晓晓, 谭超, 苑晓伟, 宋月华*

(贵州师范大学喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

摘要: 本文分析了斑叶蝉族昆虫在中国以及贵州动物地理区的分布情况, 探讨其分布格局形成、起源和演化原因。根据中国和贵州斑叶蝉族的地理分布数据, 运用 MEGA 6.0、SPSS 22.0 和 ArcGIS 10.2 等软件, 对斑叶蝉族昆虫的区及亚区分布进行支序聚类分析, 结果表明我国斑叶蝉族现代分布中心为西部山地高原亚区、华南区的台湾亚区及滇南山地亚区, 分布热点地区为西双版纳地区、海南地区和台湾地区。贵州斑叶蝉现代分布中心为黔东低山丘陵省、黔北中山峡谷省和黔南低山河谷省, 分布热点地区为铜仁北部的沿河地区、遵义的务川地区及贵州黔东南州的榕江、雷山地区。斑叶蝉族昆虫中国分布区形成的顺序先是东北区, 其次是青藏区和蒙新区, 最后是西南区、华北区、华南区和华中区。贵州分布区形成的顺序先是黔西高原中山省和黔中山原丘陵省, 其次是黔南低山河谷省, 最后是黔北中山峡谷省和黔东低山丘陵省。中国分布区中, B₂₁ 和 B₂₂ 聚类群属级阶元的相似性最高, 区间关联性最强。在贵州分布区中黔东低山丘陵省和黔北中山峡谷省属级阶元的相似性最高, 物种交流最为频繁。目前, 斑叶蝉族昆虫的地理分布格局主要是历史气候变化、当前气候条件以及植被覆盖等生态环境共同作用的结果; 区系起源和演化主要受地质构造运动作用; 斑叶蝉在各区的分布相似性可能与气候变化引起的物种由南向北扩散有关。

关键词: 斑叶蝉族; 动物地理区划; 特有性简约性分析; 聚类分析; 分布中心

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2020) 05-1141-13

Cluster analysis of geographical distribution patterns of Erythroneurini in China

CHEN Xiao-Xiao, TAN Chao, YUAN Xiao-Wei, SONG Yue-Hua* (School of Karst Science, Guizhou Normal University State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001, China)

Abstract: The distribution of the tribe Erythroneurini in China and Guizhou Zoogeographical regions was analyzed, and the reasons for formation, origin and evolution of the distribution pattern were discussed. According to its geographical distribution data in China and Guizhou respectively, the cluster analysis of the distribution of Erythroneurine leafhoppers in regions and subregions was performed by using MEGA 6.0, SPSS 22.0 and ArcGIS 10.2. The result shows that the modern distribution centers of this tribe in China include Western Mountain Plateau Subregion, Southern Taiwan Subregion and Southern Yunnan Hilly Subregion, and its distribution of hot spots are Xishuangbanna area, Hainan area and Taiwan area. The modern distribution centers in Guizhou are the Eastern Guizhou Lower Mountain and Hill Province, Northern Guizhou Middle Mountain and Canyon Province and Southern Guizhou Lower Mountain and River

基金项目: 贵州省科技厅自然科学基金重点项目 (黔科合基础 [2018] 1411 号); 贵州省科技支撑计划 (社会发展领域) (黔科合支撑 [2019] 2855 号)

作者简介: 陈晓晓, 在读硕士研究生, 主要研究方向为昆虫遗传多样性, E-mail: chen75595@163.com

* 通信作者 Author for correspondence: 宋月华, 博士, 教授, 主要研究方向为昆虫分类学和基因组学, E-mail: songyuehua@163.com

收稿日期 Received: 2019-09-05; 接受日期 Accepted: 2019-10-14

Valley Province. The hot spots in Guizhou are Yanhe in the north of Tongren, Wuchuan in Zunyi, Rongjiang and Leishan in Qiandongnan Prefecture. The order of formation of Chinese distribution region of Erythroneurine leafhoppers is firstly Northeast Region, then Qinghai-Tibet Region and Mongolia-Xinjiang Region, and finally Southwest China Region, North China Region, South China Region and Central China Region. The order of formation of distribution region in Guizhou is firstly Western Guizhou Plateau and Middle Mountain Province and Central Guizhou Plain and Hill Province, followed by Southern Guizhou Lower Mountain and River Valley Province, and finally Northern Guizhou Middle Mountain and Canyon Province and Eastern Guizhou Lower Mountain and Hill Province. Among Chinese distribution regions, the similarity of B₂₁ and B₂₂ cluster group at genera level is the highest, and the interval correlation is the strongest. In Guizhou distribution region, the Eastern Guizhou Lower Mountain and Hill Province and the Northern Guizhou Middle Mountain and Canyon Province at genera level have the highest similarity and the most frequent species exchanges. At present, the geographical distribution pattern of the Erythroneurine leafhoppers is mainly the result of interaction of the historical climate change, the current climate conditions and the vegetation cover, and so on. The origin and evolution of the fauna are mainly affected by the geological tectonic movement; the distribution similarity of leafhoppers in different regions is may be related to the spread of species from south to north caused by climate change.

Key words: Erythroneurini; zoogeographic division; simplicity analysis of endemism; cluster analysis; distribution center

斑叶蝉族昆虫隶属于半翅目头喙亚目叶蝉科小叶蝉亚科, 种类丰富, 数量众多, 广泛分布于世界 6 大动物地理区, 是小叶蝉亚科中最大的一族 (宋月华等, 2006, 2007; 王秀爽, 2012)。斑叶蝉族昆虫均为植食性昆虫, 大部分发生在寄主植株上, 少数生活在土壤表面和植物根部, 食性广泛, 弹跳力强, 部分存在寄主转移现象, 不同世代发生于不同植物上, 并因种类、气候、寄主条件等不同, 数量也会发生相应的改变, 但其迁飞能力弱, 适宜做生物地理研究的材料 (葛钟麟, 1966; 李子忠和汪廉敏, 1991; 王秀爽等, 2012)。迄今为止, 在 3I (3I Interactive Keys and Taxonomic Databases) 分类数据库中共记录了斑叶蝉 196 属 1 874 种, 主要分布在东洋界有 138 属, 其次是古北界 47 属, 热带界 45 属, 新北界 15 属, 澳洲界 12 属, 新热带界 8 属。而我国位于古北界和东洋界, 由于气候类型多样, 昆虫物种较为丰富, 目前记录了 52 属 318 种。贵州省大部分位于我国东洋界华中区, 境内降水丰沛, 温度适宜, 植被覆盖率高, 适合斑叶蝉的发生与分化, 共记录了 28 属 113 种, 分别占中国已记录属、种的 53.85%、35.53%。

国内学者对叶蝉科昆虫的生物地理分布已有研究, 分别统计了叶蝉科、蜡蝉总科、沫蝉总科、

隐脉叶蝉亚科、殃叶蝉亚科、耳叶蝉亚科、离脉叶蝉亚科、颖蜡蝉科、瓢蜡蝉科等昆虫在中国记录分布的种类, 分析其地理分布、区系结构以及在动物地理区划中的归属特点, 推论了该类昆虫的区系起源、演化和形成原因 (李子忠, 1998; 王思政等, 2000; 戴仁怀和李子忠, 2002; 李子忠和戴仁怀, 2003; 戴仁怀, 2014; 李玉建, 2009; 范志华和戴仁怀, 2011; 赵正学等, 2018a, b)。蒋晓红、王秀爽和宋月华等分析了铲头叶蝉属 *Hecalus*、小叶蝉族和斑叶蝉族等昆虫在中国的地理分布中心和区系特点 (宋月华等, 2006; 蒋晓红和李子忠, 2011; Yuan *et al.*, 2014)。由于早期的研究材料采集调查不够全面, 内容主要集中在总科和亚科层次级别, 对于小尺度的族、属、种的分析较少, 相关研究未能全面反映当前中国该类群昆虫的分布情况。因此, 本研究结合相关文献, 分别以中国和贵州两个研究尺度的斑叶蝉族昆虫地理分布数据为依据, 采用 MEGA 6.0、SPSS 22.0 和 ArcGIS 10.2 等软件, 对斑叶蝉族昆虫的分布进行聚类分析, 探讨中国以及贵州该族昆虫各分布区形成的先后顺序, 分析各亚区斑叶蝉分布的相似性, 研究当下的分布中心和热点地区, 以期为我国斑叶蝉族昆虫的生物地理学研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

中国在世界动物地理区划中横跨东洋界和古北界,张荣祖根据气候、地貌等自然环境因子将中国动物地理区划分为7个区,19个亚区(张荣祖,1991)。贵州在中国动物地理区划中隶属于华中区和西南区,李子忠等依据贵州植被覆盖、地势高低等自然地理分布特点,把贵州分为5个自然地理省,其中黔西高原中山省划为西南区,其他四省属于华中区的西部高原亚区(李子忠和汪廉敏,1991)。本文根据上述地理区划,基于《中国斑叶蝉和塔叶蝉(半翅目:叶蝉科:小叶蝉亚科)》(宋月华和李子忠,2014)、3I分类数据库、中国斑叶蝉分类研究的相关文献以及实地调查研究数据(Song & Li, 2015, 2016; Song *et al.*, 2016; Dmitry & James, 2017; Song & Li, 2017; Song *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2018; Cao *et al.*, 2018a, 2018b),运用 Excel 软件建立中国和贵州斑叶蝉族昆虫地理分布数据库。

1.2 分析方法

1.2.1 栅格分析

根据斑叶蝉族昆虫在中国与贵州的地理分布统计数据,将每个属的分布信息导入 ArcGIS 10.2 软件中,分别用 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 、 $30' \times 30'$ 等面积栅格的经纬网格单元将生成的中国和贵州斑叶蝉分布图层文件进行划分,叠加分析斑叶蝉族属级分布点和栅格面。根据输出结果,将中国斑叶蝉分布密度划分为5级、贵州斑叶蝉分布密度划分为4级,得到中国以及贵州的斑叶蝉属级阶元分布密度图。

1.2.2 斑叶蝉族昆虫分布区的支序分析

特有性简约分析(PAE)常用于生物地理格局及其特有性分析,是生物地理学研究中普遍采用的方法。研究根据斑叶蝉族的分布数据,构建其在中国和贵州分布的PAE矩阵,分布区有斑叶蝉存在标记为“1”,反之为“0”,并除去只分布在一个区的属。根据PAE原理,原始分布区可能是生物多样性最低的地区(刘殿锋等,2008;王秀爽,2012),选用昆虫分布较少的区作为外群。中国斑叶蝉地理分布中,东北区、蒙新区和青藏区内种类分布相对较少,蒙新区和青藏区海拔较高、植被覆盖少、形成历史晚,以及部分地区常

年低温等相对恶劣的自然条件以致这两个区分布种类较少,因此选用东北区作为外群。在贵州斑叶蝉地理分布中,黔西高原中山省种类分布较少,因此选其作为外群。将编辑的矩阵导入MEGA 6.0系统发育分析软件中进行启发式搜索,并用1000次抽样的自展检验值评估其分支的稳定性,得到分布区支序图。

1.2.3 斑叶蝉族昆虫分布区的聚类分析

根据斑叶蝉族各属在中国地理亚区以及在贵州自然地理省的分布数据,剔除没有分布的区和仅在1个区分布的属,建立PAE矩阵,并导入SPSS 22.0软件中,用最远相邻法, Euclidean 距离系数为度量标准,进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 斑叶蝉族昆虫的地理分布格局

斑叶蝉族昆虫在中国7个动物地理区中均有分布(图1和表1),但在各区分布的物种多样性却是不同的,该族昆虫在中国的分布由南向北、从东至西逐渐减少,在蒙新区和青藏区均分布1属、东北区2属、西南区15属、华北区22属、华中区30属、华南区38属。在各个亚区中,西部山地高原亚区、台湾亚区、滇南山地亚区中较为丰富,分别有28属、23属和20属分布;青海藏南亚区、长白山地亚区、松辽平原亚区及西部荒漠亚区、天山山地亚区分布稀少,均只分布了1属;大兴安岭亚区、东部草原亚区及羌塘高原亚区目前无分布记录。

在确定西部山地高原亚区、台湾亚区及滇南山地亚区是我国斑叶蝉族现代分布中心的基础上,用 ArcGIS 10.2 软件以 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的经纬网格单元统计中国斑叶蝉族昆虫的分布数据,并进行空间叠加分析,绘制属级分布密度成图(图2),推断我国斑叶蝉族各属级阶元分布多样性热点地区。计算结果表明,云南南部的景洪地区、海南地区及台湾地区斑叶蝉属的分布均大于10个,属级阶元分布较为丰富;福建漳浦县、贵州黔南州和黔东南州、湖北东南部、安徽省中部地区在7~9个之间;中南部大多地区均小于5个种,属的分布多样性较低;其余地区大部分没有分布。因此推断西双版纳地区、海南地区和台湾地区为斑叶蝉在我国的分布热点地区。

表 1 中国斑叶蝉族昆虫属级阶元多样性在动物地理区中的统计

Table 1 Statistical analysis of genera of diversity in the zoogeographical region of the Erythroneurini in China

中国动物地理区系 China Zoogeographical realms	数量 Number	特有属 Endemic genera	亚区 Subregion	数量 Number	特有属 Endemic genera
东北区 (I) Northeast China	2	0	大兴安岭亚区 (IA) Greater Khingan Range Subregion	0	0
			长白山地亚区 (IB) Changbai Mountain Subregion	1	0
			松辽平原亚区 (IC) Songliao Plain Subregion	1	0
华北区 (II) North China	22	1	黄淮平原亚区 (IIA) Huanghuai Plain Subregion	14	1
			黄土高原亚区 (IIB) Loess Plateau Subregion	14	0
蒙新区 (III) Mongolia-Xinjiang Region	1	0	东部草原亚区 (IIIA) Eastern Grassland Subregion	0	0
			西部荒漠亚区 (IIIB) Western Desert Subregion	1	0
			天山山地亚区 (IIIC) Tianshan Mountain Subregion	1	0
青藏区 (IV) Qinghai-Tibet Region	1	0	羌塘高原亚区 (IVA) Qiangtang Plateau Subregion	0	0
			青海藏南亚区 (IVB) Qinghai Southern-Tibet Subregion	1	0
西南区 (V) Southwest China	15	6	西南山地亚区 (VA) Southwest Mountain Subregion	15	6
华中区 (VI) Central China	30	3	东部丘陵平原亚区 (VIA) Eastern Hilly Plain Subregion	12	0
			西部山地高原亚区 (VIB) Western Mountain Plateau Subregion	28	3
华南区 (VII) South China	38	13	闽广沿海亚区 (VIIA) Fujian-Guangzhou Coastal Subregion	11	1
			滇南山地亚区 (VIIB) Southern Yunnan Mountain Subregion	20	7
			海南亚区 (VIIC) Hainan Subregion	14	2
			台湾亚区 (VIID) Taiwan Subregion	23	3

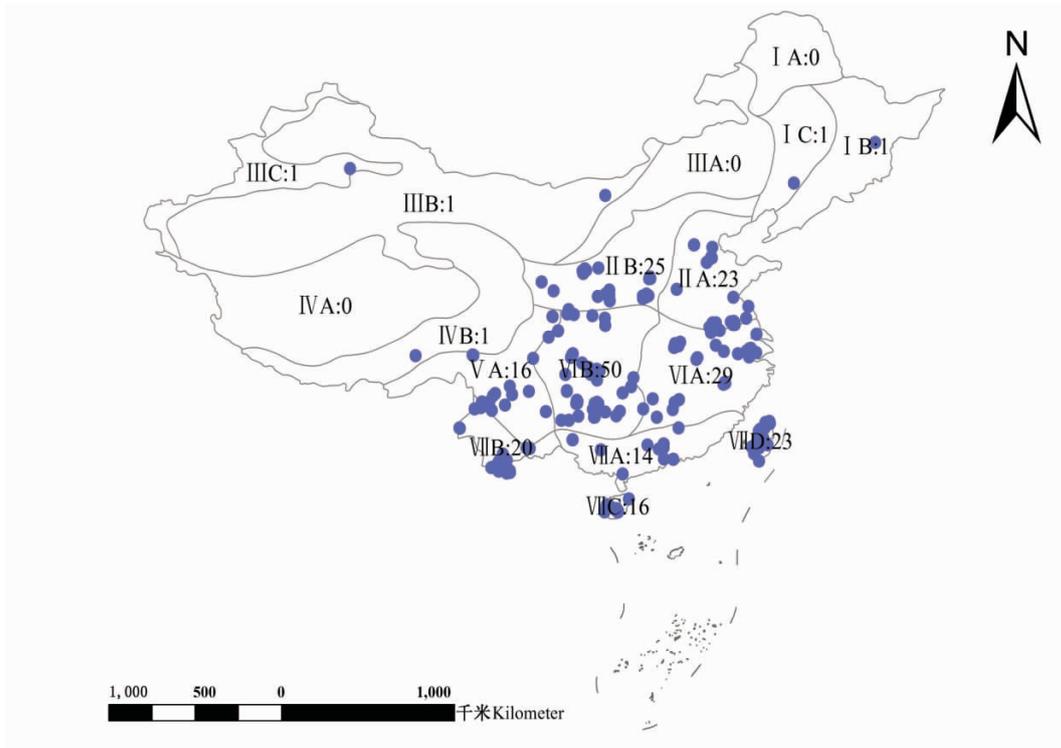


图 1 中国斑叶蝉族昆虫属级阶元地理分布

Fig. 1 Geographical distribution of genera of Erythroneurini in China

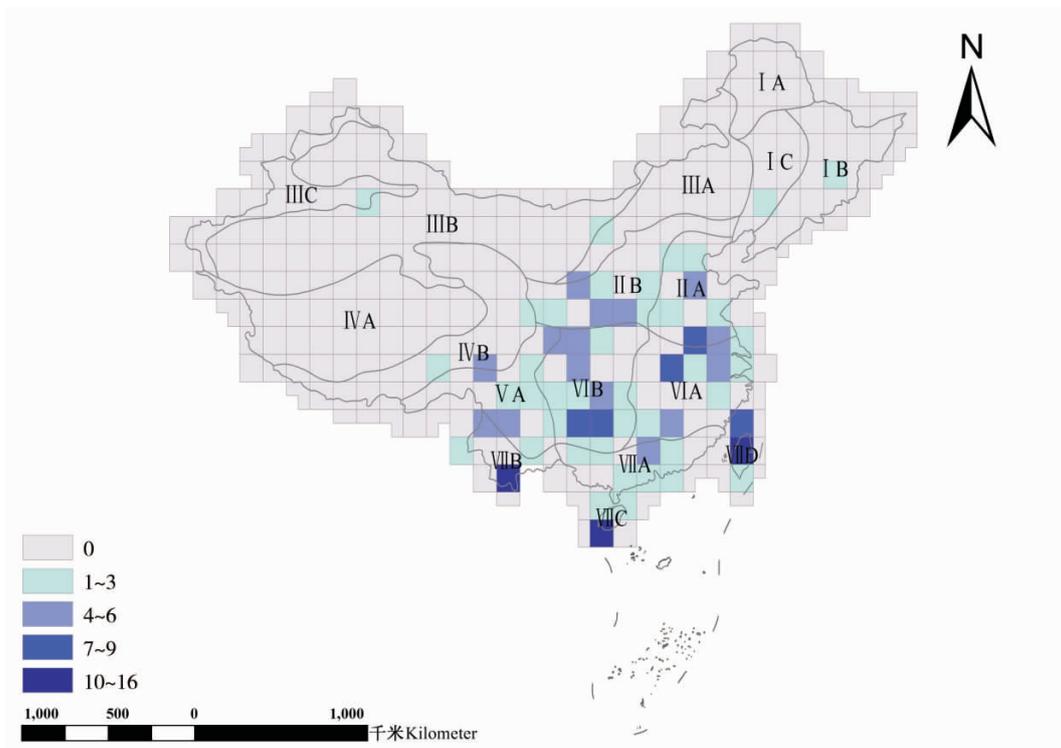


图 2 中国斑叶蝉族属级阶元分布密度

Fig. 2 Distribution density of genera of Erythroneurini in China

斑叶蝉族昆虫在贵州 5 个自然地理省中均有分布 (图 3 和表 2), 整体上较分散, 呈现东多西少、南多北少的分布格局, 在华中区较为丰富,

在西南区较少, 其中黔西高原中山省分布 8 属、黔中山原丘陵省 9 属、黔北中山峡谷省 15 属、黔南低山河谷省 15 属、黔东低山丘陵省 17 属。

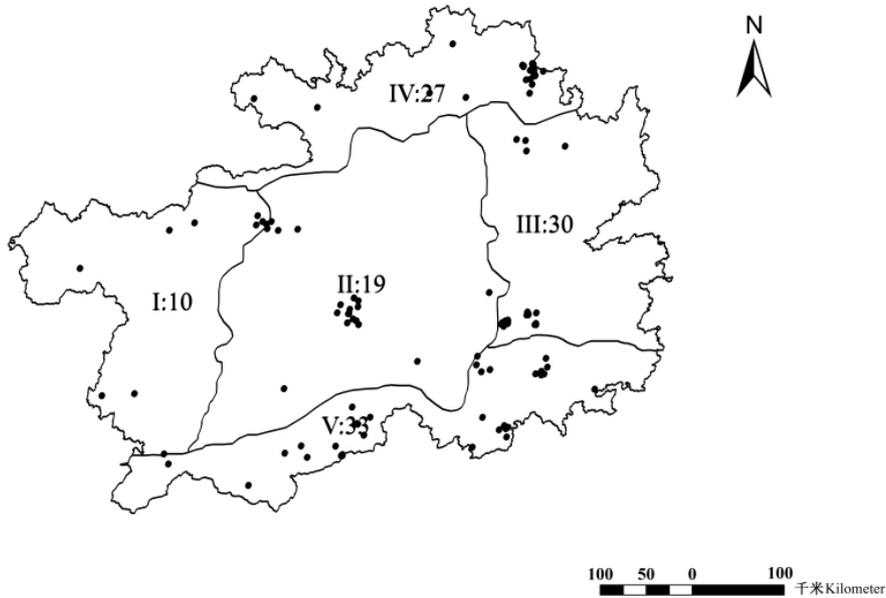


图 3 贵州斑叶蝉族昆虫属级阶元地理分布

Fig. 3 Geographical distribution of genera of Erythroneurini in Guizhou

表 2 贵州斑叶蝉族昆虫属级阶元多样性在动物地理区的统计

Table 2 Statistical analysis of genera of diversity in the zoogeographical region of the Erythroneurini in Guizhou

贵州动物区系 Guizhou Zoogeographical realms	数量 Number	特有属 Endemic genera	自然地理省 Province of physical geography	数量 Number	特有属 Endemic genera
西南区 (V) Southwest China	8	0	黔西高原中山省 (I) Western Guizhou Plateau and Medium Mountain Province	8	0
华中区 (VI) Central China	28	20	黔中山原丘陵省 (II) Central Guizhou Plain and Hill Province	9	1
			黔东低山丘陵省 (III) Eastern Guizhou Lower Mountain and Hill Province	17	2
			黔北中山峡谷省 (IV) Northern Guizhou Medium Mountain and Canyon Province	15	4
			黔南低山河谷省 (V) Southern Guizhou Lower Mountain and River Valley Province	15	3

在确定贵州斑叶蝉现代分布中心为黔东低山丘陵省、黔北中山峡谷省和黔南低山河谷省的基础上, 用 ArcGIS 10.2 软件以 30' × 30' 的经纬网格单元统计贵州斑叶蝉的分布数量, 进行空间叠加

分析, 绘制属分布密度成图 (图 4), 推断贵州斑叶蝉族属级阶元分布多样性热点地区。计算结果表明, 铜仁北部的沿河地区、遵义的务川地区及贵州黔东南州西南的榕江、雷山地区斑叶蝉属的

分布均大于 10 个，属级阶元较为丰富；毕节大方、贵阳南部、黔南罗甸和黔东南州的西南部地区属的分布在 6~10 个之间；其它地区属的分布均小于 5 个，属的分布多样性较低。因此，推断

铜仁北部的沿河地区、遵义的务川地区及贵州黔东南州的榕江、雷山地区为斑叶蝉在贵州的分布热点地区。

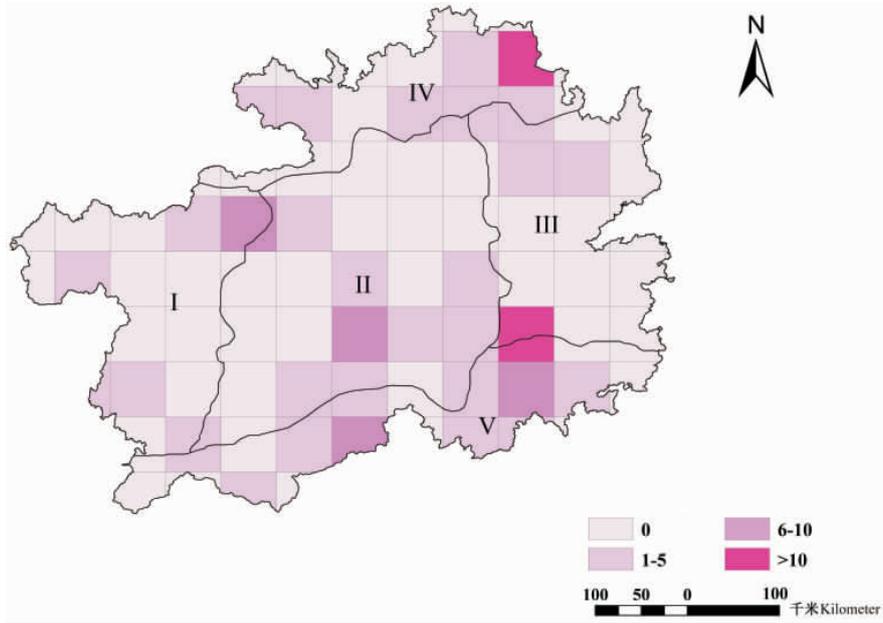


图 4 贵州斑叶蝉族属级阶元分布密度

Fig. 4 Distribution density of genera of Erythroneurini in Guizhou

2.2 斑叶蝉族昆虫分布区支序分析

中国斑叶蝉族昆虫在 7 个地理分区中的分布可分成 4 个聚类群 (图 5)：第一个聚类群是东北区；第二个聚类群是青藏区和蒙新区；而第三个聚类群仅有西南区一支；华北区、华南区和华中区则组成第四个聚类群。第一个聚类群置于分支图基部，是斑叶蝉族昆虫较原始的分布区；第二

个聚类群，靠近底部，表明斑叶蝉族昆虫出现在这个区的时间稍晚于第一个类群，却早于其他类群；第三个聚类群和第四个聚类群处于支序图的中上部，说明该族昆虫出现在这 4 个分布区的时间较晚，同时表明斑叶蝉族昆虫在这 4 个分布区有相对丰富的分布，为斑叶蝉族在我国的现代分布地区。

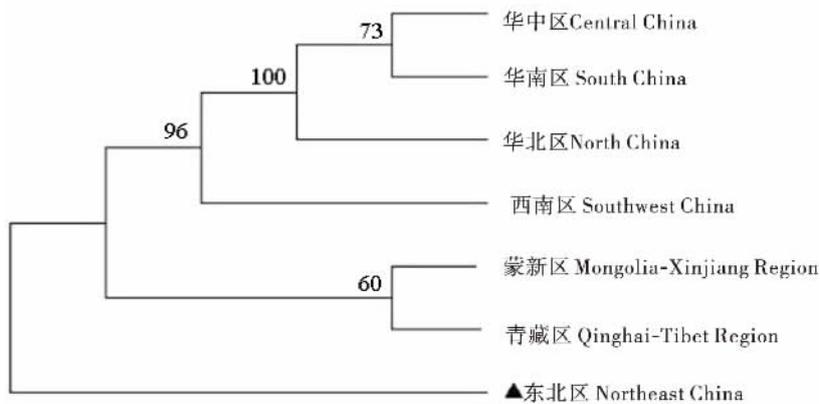


图 5 中国斑叶蝉族昆虫地理分布区支序分析 (数字表示 1 000 次自展检验的置信度)

Fig. 5 The cladogram of distributional regions of Erythroneurini from China (The numbers on the nodes correspond to the percentage bootstrap values for 1 000 replicates)

贵州斑叶蝉族昆虫在 5 个区划中的分布可分成 3 个聚类群 (图 6): 第一个聚类群为黔西高原中山省; 第二个聚类群为黔中山原丘陵省; 黔南低山河谷省、黔北中山峡谷省和黔东低山丘陵省则构成第三个聚类群。由于黔西高原中山省和黔中山原丘陵省置于分支图基部, 表明这两个区是斑叶蝉族昆虫较原始的分布区; 黔南低山河谷省

位于支序图的中部, 斑叶蝉族昆虫在此区的出现时间晚于黔西高原中山省和黔中山原丘陵省, 但早于其他两区; 黔北中山峡谷省和黔东低山丘陵省聚成一支, 处于支序图的顶部, 说明该族昆虫在这两个区出现的时间较晚, 同时表明斑叶蝉族昆虫在这 2 个区有比较丰富的分布, 为斑叶蝉族在贵州的现代分布地区。



图 6 贵州斑叶蝉族昆虫地理分布区支序分析 (数字表示 1 000 次自展检验的置信度)

Fig. 6 The cladogram of distributional regions of Erythroneurini from Guizhou (The numbers on the nodes correspond to the percentage bootstrap values for 1 000 replicates)

2.3 斑叶蝉族昆虫属级阶元聚类分析

将中国斑叶蝉族分布数据进行聚类分析, 整体来看 (图 7 和表 3), 在距离系数最大时 (25 处), 聚类图分为 A、B 两大聚类群。A 聚类群归属于东洋界, 唯有华中区的西部山地高原亚区一支; B 聚类群归属于东洋界和古北界, 包括华北区的 2 个亚区、华南区的 4 个亚区、东北区的

2 个亚区、蒙新区的 2 个亚区、青藏区的青海藏南亚区、华中区的东部丘陵平原亚区及西南区的西南山地亚区, 共 13 个亚区; A 聚类群和 B 聚类群的平均相关性指数为 0.186。在距离系数为 11 处, 聚类图分为 5 个小的聚类群: A、B₁、B₁₁、B₁₂ 和 B₂。B₁₁ 聚类群属于古北界, 仅包括华北区的黄土高原亚区, B₁₂ 聚类群属于古北界和东洋界,

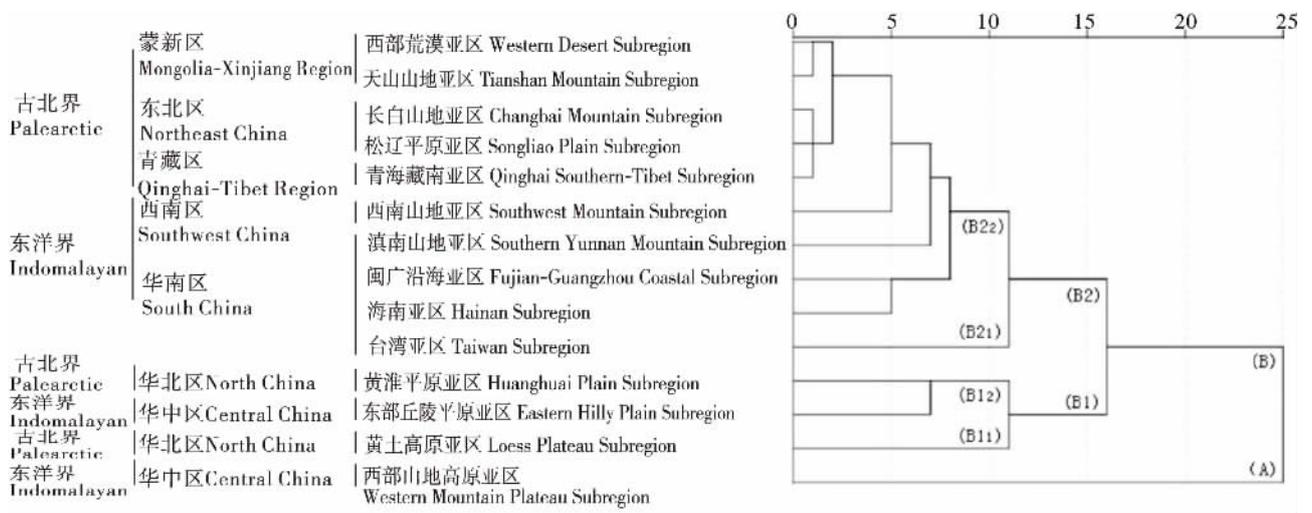


图 7 斑叶蝉族属级阶元在中国动物地理区划中的聚类分析

Fig. 7 Cluster analysis of genera of Erythroneurini in zoogeographic division of China

表 3 中国斑叶蝉族各分布亚区聚类分析相似性矩阵
Table 3 Distribution subregions similarity matrix of Erythroneurini in China

亚区 Subregion	I B	I C	II A	II B	III B	III C	IV B	V A	VI A	VI B	VII A	VII B	VII C	VII D
I B	1.000													
I C	0.994	1.000												
II A	0.712	0.724	1.000											
II B	0.619	0.631	0.570	1.000										
III B	0.950	0.950	0.657	0.657	1.000									
III C	0.950	0.950	0.657	0.657	1.000	1.000								
IV B	0.985	0.985	0.715	0.622	0.942	0.942	1.000							
V A	0.867	0.873	0.672	0.678	0.818	0.818	0.853	1.000						
VI A	0.577	0.565	0.738	0.561	0.510	0.510	0.545	0.581	1.000					
VI B	0.055	0.050	0.387	0.168	0.000	0.000	0.082	0.171	0.225	1.000				
VII A	0.815	0.809	0.636	0.538	0.759	0.759	0.794	0.717	0.625	0.142	1.000			
VII B	0.838	0.832	0.690	0.538	0.788	0.788	0.847	0.727	0.549	0.375	0.698	1.000		
VII C	0.745	0.740	0.551	0.415	0.696	0.696	0.731	0.750	0.483	0.314	0.804	0.767	1.000	
VII D	0.611	0.616	0.620	0.501	0.567	0.567	0.625	0.721	0.383	0.451	0.564	0.669	0.727	1.000

包括华中区的东部丘陵平原亚区和华北区的黄淮平原亚区，两个聚类群之间的平均相关性指数为 0.566；B2₁ 聚类群属于东洋界，仅包括台湾亚区，B2₂ 聚类群属于古北界和东洋界，包括其余 9 个亚区，两个聚类群之间的平均相关性指数为 0.630。

这表明斑叶蝉族昆虫在中国动物地理区划的相关性：B2₁ 和 B2₂ 聚类群属级阶元的相似性最高，区间关联性最强，区内物种交流最为频繁；B1₁ 和 B1₂ 聚类群属级阶元的相似性次之，华中区和华北

区之间的物种交流较多；而 A 聚类群与其他聚类群的相关性指数最低，其物种交流程度也相应最低。总体来说，中国斑叶蝉族昆虫的发生环境与我国动物地理区的特征基本符合。在世界动物地理区中东洋界和古北界的平均相关性指数 > 0.5，彼此之间的联系也较为紧密。

将贵州斑叶蝉的分布数据进行聚类分析，斑叶蝉族昆虫在贵州动物地理区划的相关性如下 (图 8 和表 4)：黔东低山丘陵省和黔北中山峡谷省

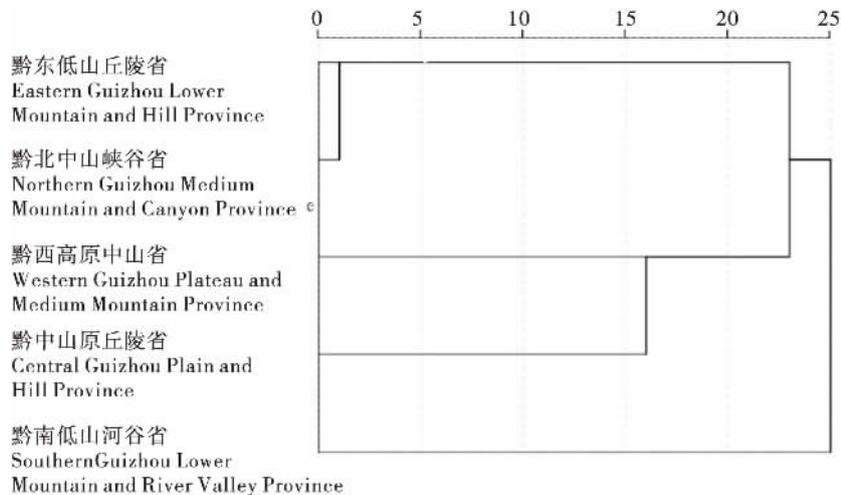


图 8 斑叶蝉族属级阶元在贵州动物地理区划的聚类分析
 Cluster analysis of the genera of Erythroneurini in the zoogeographic division of Guizhou

表 4 贵州斑叶蝉族地理分布区聚类分析相似性矩阵

Table 4 Similarity matrix for cluster analysis of distribution region of Erythroneurini in Guizhou

自然省 Natural Province	I	II	III	IV	V
I	1.000				
II	0.484	1.000			
III	0.205	0.000	1.000		
IV	0.410	0.466	1.000	1.000	
V	0.291	0.243	0.001	0.194	1.000

的距离系数最小, 约为 1.5, 相关性指数为 1; 黔中山原丘陵省的距离系数次之, 约为 16.5; 黔南低山河谷省的距离系数最大, 为 25, 与其他分布区的相关性指数均小于 0.5。这表明黔东低山丘陵省和黔北中山峡谷省属级阶元的相似性最高, 物种交流最为频繁, 分布区之间关联性最强; 而黔南低山河谷省与其他分布区的物种交流程度最低。

3 结论与讨论

3.1 中国及贵州斑叶蝉昆虫区系起源和演化

根据斑叶蝉族昆虫分布支序的初步分析结果, 结合地质、气候演变历史, 对中国及贵州斑叶蝉昆虫区系起源和演化过程做出以下推测。斑叶蝉族昆虫在中国的地理分布格局可能经历了 3 次大的隔离分化事件, 第一次发生在东北区和其他区之间, 第二次发生在青藏区、蒙新区与其他区之间, 第三次发生在西南区、华北区、华南区、华中区与其他区之间。从世界地理区划角度分析, 古北界、东洋界在我国地域部分属于劳亚古陆南缘, 并处于冈瓦纳古陆和劳亚古陆的交接过渡地带, 地质地貌的形成受到板块运动的影响。地质资料表明, 在第三纪晚期, 印度板块与欧亚板块相撞形成喜马拉雅山系, 各区气候、水文、地质、生物等自然环境也发生相应变化。到了第四纪更新世, 青藏高原逐渐隆起, 形成了西北干旱区、东部季风区和青藏高原区, 奠定了我国现代地势地貌环境 (宋春青和张振春, 1996; 梁爱萍, 2003)。东北区位于我国高纬度地区, 在第四纪时受寒流影响, 气候恒定而低温, 斑叶蝉已经适应该区生存环境, 而位于南方地区的其他分区气候温暖炎热, 当冰期来临, 气温骤降, 南方地区的斑叶蝉抵御不住低温环境, 基本灭绝。间冰期时, 东北区斑叶蝉向南扩散, 其他地区斑叶蝉多样性

逐渐恢复, 由此推测东北区的形成较其他区是最早的。更新世后期青藏高原逐渐隆起, 海拔随之升高, 导致温度降低, 植被覆盖减少, 大部分斑叶蝉灭绝; 间冰期时, 少部分斑叶蝉种类向其他邻近地区迁移扩散, 因此青藏区斑叶蝉分布较少。斑叶蝉扩散至东洋界后, 由于气候温暖湿润, 植被层次复杂而丰富, 斑叶蝉发生繁衍也较为迅速, 所以东洋界各区是当前斑叶蝉族昆虫的分布中心。综上, 斑叶蝉区系的起源过程中, 可能经历 3 次大的隔离分化, 并且东北区形成先于青藏区, 形成时间在更新世后期之前, 青藏区则形成于更新世后期之后。

斑叶蝉族昆虫在贵州的地理分布格局演化可能经历 2 个阶段, 第一次发生在黔西高原中山省、黔中山原丘陵省; 第二次发生在黔南低山河谷省、黔北中山峡谷省和黔东低山丘陵省。贵州地处华南板块, 随着地壳作用、板块运动等地质演化活动, 晚白垩世燕山造山作用奠定了贵州地质构造的雏形; 新生代以后的特提斯碰撞造山, 使其发生轻微形变。第四系时根据地质沉积和发育特征, 贵州划分为“威宁区”和“铜仁-兴义区” (王智勇, 2007; 舒良树, 2012)。“威宁区”大多属于西南山地亚区, 包含黔西高原中山省和部分黔中山原丘陵省, 海拔高气温低, 植被覆盖率低, 斑叶蝉分布较少, 间冰期时斑叶蝉分布大多由从北方向南方扩散开来, 而“威宁区”与北部地区连接较为紧密, 斑叶蝉先扩散到黔西高原中山省和黔中山原丘陵省。“铜仁-兴义区”位于贵州黔西北之外的其余地区, 大部分属于西部高原亚区, 包含黔南低山河谷省、黔北中山峡谷省和黔东低山丘陵省, 自然条件较好, 气候温和, 植被层次复杂, 斑叶蝉物种分布丰富, 可能大多源于黔中山原丘陵省和黄土高原亚区的扩散。

3.2 中国及贵州斑叶蝉昆虫分布聚类分析

从斑叶蝉族昆虫分布聚类分析的初步结果和

各区的地理环境条件综合分析,斑叶蝉族昆虫在中国分布区 B₂ 聚类群中,古北界蒙新区的西部荒漠亚区、天山山地亚区,东北区的长白山地、松辽平原亚区,青藏区的青海藏南亚区这 5 个分布亚区的相似性最高,表明这 5 个亚区的生态环境相似性高,并区别于其他亚区。这 5 个亚区受自然条件的制约和人类活动的影响,地势险峻,气候高寒,植被单一,不适于斑叶蝉的生存繁殖,因此斑叶蝉分布较少。东洋界西南区的西南山地亚区邻近青海藏南亚区,在地理上与其具有一定相似性,并且该区是横断山脉的一部分,由于地势高低不同,区内气候东西差异明显,南北差异较小,雨水丰沛,植被丰富,斑叶蝉集中分布于四川西南部和云南北部,并向青海藏南亚区扩散。华南区的滇南山地亚区紧邻西南山地亚区,处于云南省南部,气候温暖湿润,多为雨林气候,植被层次复杂,适合斑叶蝉的生存,两个亚区分布的斑叶蝉物种比较相似,但滇南山地亚区比西南山地亚区更为丰富。闽广沿海亚区和海南亚区位于中国南部沿海地区,受季风气候的影响,常年高温多雨,植被生长茂盛,利于斑叶蝉的发生繁衍,两个亚区相似性高。台湾亚区生存环境与这两个亚区相似,但台湾海峡隔断了物种间的交流,因此台湾亚区与其他亚区相似性较低。在中国分布区 B₁ 聚类群中,古北界华北区的黄淮平原亚区与东洋界华中区的东部丘陵平原亚区相接,两个亚区之间无天然屏障的阻隔和人类活动的影响,斑叶蝉分布种类丰富,相似性较高,分布在东部丘陵平原亚区的斑叶蝉可向北扩散。华北区的黄土高原亚区东与黄淮平原亚区相邻,南与西部山地高原亚区衔接,与两区间无明显天然屏障阻隔,该亚区分布的斑叶蝉可能由其他两个亚区扩散而来。A 聚类群中东洋界华中区的西部高原亚区独为一支,该亚区植被生长茂盛,雨水充足,气温适宜,人类干扰少,生存条件较为优越,适合斑叶蝉的生存与繁衍,并且该亚区与其他 6 个斑叶蝉分布丰富的亚区相接,斑叶蝉分布也可能由这 6 个亚区扩散而来,所以西部高原亚区斑叶蝉分布最丰富。

斑叶蝉族昆虫在贵州分布中,黔东低山丘陵省和黔北中山峡谷省相似性最高,表明这 2 个亚区的生态环境相似性高,气温都较为炎热,降水充沛,植被覆盖丰富,较适于斑叶蝉的生存繁殖。黔西高原中山省与黔北中山峡谷省虽然也相接,

两区具有一定相似性,但其生存环境相对恶劣,石漠化程度高,海拔高气温低,斑叶蝉分布最少,在该区域有分布的斑叶蝉可能由西南山地亚区扩散而来。黔中山原丘陵省与其他 4 个省相接,斑叶蝉分布可能源于黔西高原中山省的扩散,由于受人类活动干扰较大,斑叶蝉分布较少。黔南低山河谷省形状较为狭长,大部分与黔中山原丘陵省接壤,自然条件比较优越,有利于斑叶蝉发生与分化,物种分布较丰富。

3.3 中国及贵州斑叶蝉族昆虫分布格局的形成原因

结合斑叶蝉族昆虫现代分布中心和热点中心等现有数据结果进行分析,该类昆虫在中国的现代分布格局是南部富于北部,东洋界多于古北界。这可能是由地球历史上的气候变化、当前气候条件以及植被覆盖等生态环境共同作用的结果。第四季冰期导致的气候变化对昆虫的分布格局产生很大的影响,降温事件中北方先于南方,在北方地区的气温骤降期间,东北区、华北区和蒙新区的多数斑叶蝉物种灭绝,为寻找庇护,斑叶蝉向南迁移(王开发, 1990; 王秀爽等, 2012)。当前的气候条件也起到至关重要的作用,中国南方地区多属于东洋界,而东洋界位于热带和亚热带地带,气候温暖湿润,多为高山和热带雨林地区,人烟稀少,人类活动对生态环境的干扰少,植被生长茂盛,生态环境相对稳定,尤其是华南区和华中区自然条件更为优越,斑叶蝉寄主植物和食物较为丰富,这些都为斑叶蝉的发生繁衍提供了良好的栖息场所。因此,斑叶蝉在南方地区的物种多样性相对较高,物种交流扩散频繁,并且形成了我国斑叶蝉族昆虫的现代分布中心和分化中心。北方气候干燥,植被覆盖率较低,垦殖率较高,生态环境较恶劣,寄主植物和食物稀少而单一。其中东北区气候寒冷,人类活动频繁,蒙新区和青藏区地貌多为草原和荒漠类型,所以斑叶蝉现代分布种类较少,大多分布在华北区。此外,我国西南地区的斑叶蝉种类与越南、缅甸和印度等叶蝉分布丰富的东洋界、热带界国家叶蝉物种间有直接或间接交流,而北方与俄罗斯、哈萨克斯坦等叶蝉分布较少的古北界国家接壤,物种间交流较少。

斑叶蝉族昆虫在贵州的分布与气候、植被覆盖、地貌地势等自然环境密不可分,呈现东多西少、南多北少的分布格局。黔南低山河谷省和黔

东低山丘陵省海拔较低, 气候条件较好, 温度适宜, 降雨充沛, 植被覆盖率高且类型丰富, 良好的生存环境促进了斑叶蝉的发生与进化, 这两个分布区中斑叶蝉物种最为丰富。黔中山原丘陵省和黔北中山峡谷省海拔略高, 自然环境也较适宜斑叶蝉的发生与繁衍, 种类亦较丰富。黔西高原中山省海拔较高, 平均气温较低, 地势险峻, 生存环境相对恶劣, 斑叶蝉种类分布最少。该分布格局基本与贵州的自然环境条件相吻合, 且与生物分布规律相一致。

地理分布格局分析、支序分析、聚类分析和地理环境影响因子分析等生物地理学研究结果, 一直受到生物地理学学者的关注, 本文研究结果只能作为斑叶蝉族昆虫生物地理相关研究的参考, 希望以后在采集数据更为丰富的基础上, 能够从不同的研究角度对目前的结果进行比较、检验和修正。

参考文献 (References)

- Cao YH, Dmitry A, Zhang YL. New species of the leafhopper genera *Kusala* Dworakowska and *Diomma* Motschulsky (Hemiptera: Cicadellidae: Typhlocybinae: Erythroneurini) with description of a new subgenus [J]. *Zootaxa*, 2018a, 4514 (2): 263–272.
- Cao YH, Yang MX, Lin SH, et al. Review of the leafhopper genus *Anufrievia* Dworakowska (Hemiptera: Cicadellidae: Typhlocybinae: Erythroneurini) [J]. *Zootaxa*, 2018b, 4446 (2): 203–232.
- Dmitry A, James N. A new species and a new form of leafhopper from the Great Smoky Mountains National Park (Hemiptera: Cicadellidae: Typhlocybinae) [J]. *Zootaxa*, 2017, 4329 (1): 81–85.
- Dai RH. Taxonomic Faunistic and Phylogenetic Studies on the Subfamily Euscelinae from China (Homoptera: Cicadellidae) [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. [戴仁怀. 中国殃叶蝉亚科区系分类及系统发育研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014]
- Dai RH, Li ZZ. Faunistic faunal study on cercopoidea from Guizhou [J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2002, 1: 26–31. [戴仁怀, 李子忠. 贵州沫蝉总科昆虫区系分析 [J]. 贵州大学学报 (农业与生物科学版), 2002, 1: 26–31]
- Fan ZH, Dai RH. Faunal analysis of coelidiinae insects in China [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2011, 39 (11), 99–103. [范志华, 戴仁怀. 中国离脉叶蝉亚科昆虫区系分析 [J]. 贵州农业科学, 2011, 39 (11): 99–103]
- Ge ZL. Homoptera: Cicadellidae. Chinese Economic Insectology (Vol. 10) [M]. Beijing: Science Press, 1996: 1–20. [葛钟麟. 同翅目: 叶蝉科. 中国经济昆虫志 (第十册) [M]. 北京: 科学出版社, 1966: 1–20]
- Jiang XH, Li ZZ. The faunal analysis of *Hecalus* insects from China [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2011, 39 (8): 87–89. [蒋晓红, 李子忠. 中国铲头叶蝉属昆虫区系分析 [J]. 贵州农业科学, 2011, 39 (8): 87–89]
- Liang AP. Zoogeography of the spittlebug superfamily Ceropoidea (Hemiptera) in southern Tibet and the nearby areas [J]. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 2003, 28 (4): 589–598. [梁爱萍. 西藏南部及其邻近地区沫蝉总科 (半翅目) 昆虫的动物地理学研究 [J]. 动物分类学报, 2003, 28 (4): 589–598]
- Liu DF, Dong ZM, Gu YZ, et al. Using parsimony analysis of endemism to analyze the distribution patterns of Chinese Tetrigidae insects [J]. *Biodiversity Science*, 2008, 16 (3): 298–304. [刘殿锋, 董自梅, 谷延泽, 等. 中国蚱科昆虫分布格局的特有性简约性分析 [J]. 生物多样性, 2008, 16 (3): 298–304]
- Li YJ. Taxonomic and Faunal Structure Studies on Ledorinae from China (Hemiptera: Cicadellidae) [D]. Guiyang: Guizhou University, 2009. [李玉建. 中国耳叶蝉亚科区系分类研究 (半翅目: 叶蝉科) [D]. 贵阳: 贵州大学, 2009]
- Li ZZ. Faunal analysis of the cicadellidae in Guizhou Province [J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 1998, 2 (12): 69–77. [李子忠. 贵州叶蝉科昆虫区系分析 [J]. 贵州农学院学报, 1998, 2 (12): 69–77]
- Li ZZ, Dai RH. The faunal structure of Nirvaninae insects in China [J]. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 2003, 19 (3): 129–133. [李子忠, 戴仁怀. 中国隐脉叶蝉亚科昆虫的区系结构分析 [J]. 广西科学院学报, 2003, 19 (3): 129–133]
- Li ZZ, Wang LM. Agroforestry Insects in Guizhou Volume 4 (Homoptera: Cicadidae) [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House. 1991: 6–19. [李子忠, 汪廉敏. 贵州农林昆虫志卷 4 (同翅目: 叶蝉科) [M]. 贵阳: 贵州科技出版社. 1991: 6–19]
- Shu LS. An analysis of principal features of tectonic evolution insouth China block [J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31 (7): 1035–1053. [舒良树. 华南构造演化的基本特征 [J]. 地质通报, 2012, 31 (7): 1035–1053]
- Song QC, Zhang ZC. Geological Basis (3rd Edition) [M]. Beijing: Higher Education Press. 2001, 272–347. [宋春青, 张振春. 地质学基础 (第 3 版) [M]. 北京: 高等教育出版社. 2001, 272–347]
- Song YH. Systematic Study of Erythroneurini from China (Hemiptera: Cicadellidae: Typhlocybinae) [D]. Guiyang: Guizhou University, 2007. [宋月华. 中国斑叶蝉族分类研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2007]
- Song YH, Gao YR, Li C. One new species and new record of the leafhopper genus *Wataria* Dworakowska from Thailand (Hemiptera: Cicadellidae: Typhlocybinae: Erythroneurini) [J]. *Zootaxa*, 2018, 4418 (3): 281–286.
- Song YH, Li C. A new Erythroneurine leafhopper genus and species from Thailand (Hemiptera: Cicadellidae: Typhlocybinae) [J]. *Zootaxa*, 2017, 4319 (2): 379–382.
- Song YH, Li ZZ. Erythroneurini and Zyginiellini from China (Hemiptera: Cicadellidae: Typhlocybinae) [M]. Guiyang: Science and Technology Publishing House. 2014: 12–209. [宋月华, 李子忠. 中国斑叶蝉和塔叶蝉 (半翅目: 叶蝉科: 小叶蝉亚科) [M]. 贵阳: 科技出版社, 2014: 12–209]

- Song YH, Li ZZ. Review of the genus *Arboridia Zachvatkin* (Hemiptera: Cicadellidae: Typhlocybinae), with description of two new species from China [J]. *Zootaxa*, 2015, 3990 (4): 584–592.
- Song YH, Li ZZ. New additions to the leafhopper genus *Salka Dworakowska* (Hemiptera: Cicadellidae: Typhlocybinae) from Hainan and Henan provinces of China [J]. *Zootaxa*, 2016, 4092 (3): 445–450.
- Song YH, Li ZZ, Li C. Research progress of Erythroneurini tribe (Hemiptera: Cicadellidae: Typhlocybinae) in China [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2006, 2: 110–114. [宋月华, 李子忠, 李灿. 斑叶蝉族的研究进展 (半翅目: 叶蝉科: 小叶蝉亚科) [J]. *贵州农业科学*, 2006, 2: 110–114]
- Song YH, Li ZZ, Dai RH. A remarkable new genus and species of Erythroneurini (Hemiptera: Cicadellidae: Typhlocybinae) from China [J]. *Florida Entomologist*, 2016, 99 (3): 371–375.
- Song YH, Li ZZ, Dietrich CH, et al. New contributions to the leafhopper genus *Gladkara* from Thailand (Hemiptera, Cicadellidae, Typhlocybinae, Erythroneurini) [J]. *ZooKeys*, 2017, 725: 31–36.
- Wang HF. Low-temperature events during the warm period of holocene in China and its geological implication [J]. *Quaternary Sciences*, 1990, 2: 168–174. [王开发. 全新世温暖期中低温事件的初步研究 [J]. *第四纪研究*, 1990, 2: 168–174]
- Wang SZ, Wang FX, Xuan LF. Fauna study of fulgoroidea of Hainan province [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2000, S1: 157–161. [王思政, 王方晓, 宣立锋. 中国海南省蜡蝉总科区系研究 [J]. *华北农学报*, 2000, S1: 157–161]
- Wang XS. Biogeography Studies on Typhlocybinae in China Based on GIS (Hemiptera: Cicadellidae) [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2012. [王秀爽. 基于 GIS 的中国小叶蝉亚科生物地理学研究 (半翅目: 叶蝉科) [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2012]
- Wang XS, Huang M, Zhang YL. Cluster analysis of typhlocybinae (Hemiptera: Cicadellidae) distributional pattern in China [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2012, 40 (4): 86–94, 101. [王秀爽, 黄敏, 张雅林. 中国小叶蝉亚科昆虫地理分布格局聚类分析 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2012, 40 (4): 86–94, 101]
- Wang ZY. Evolution of Karst Desertification in Response to Neotectonism in Western Guizhou [D]. Guiyang: Guizhou University, 2007. [王智勇. 新构造运动对贵州西部岩溶石漠化演化的影响 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2007]
- Yuan S, Huang M, Wang XS, et al. Centers of endemism and diversity patterns for Typhlocybinae leafhoppers (Hemiptera: Cicadellidae: Typhlocybinae) in China [J]. *Insect Science*, 2014, 21: 523–536.
- Zhang RZ. Chinazoozoogeography [M]. Beijing: Science Press, 1991: 299–392. [张荣祖. 中国动物地理 [M]. 北京: 科学出版社, 1991: 299–392]
- Zhao ZX, Chang ZM, Chen XS. The faunal analysis of Issidae (Hemiptera: Fulgoroidea) in China [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2018a, 40 (4): 853–865. [赵正学, 常志敏, 陈祥盛. 中国瓢蜡蝉科昆虫区系分析 (半翅目: 蜡蝉总科) [J]. *环境昆虫学报*, 2018a, 40 (4): 853–865]
- Zhao ZX, Long JK, Chen XS. Fauna of Achilidae (Hemiptera: Fulgoroidea) in China [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2018 b, 47 (6): 650–654. [赵正学, 龙见坤, 陈祥盛. 中国颖蜡蝉科 (半翅目: 蜡蝉总科) 昆虫区系研究 [J]. *福建农林大学学报 (自然科学版)*, 2018b, 47 (6): 650–654]