

光肩星天牛两型种群表型多样性分析*

刘昭阳** 李玉蓉 潘忠玉 郭冰 骆有庆 宗世祥 陶静***

(北京林业大学林木有害生物防治北京市重点实验室 北京 100083)

摘要 【目的】光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky) 是国内最重要的林木蛀干害虫之一, 在中国分布范围较广。近年来, 形态学以及分子生物学的研究表明, 光肩星天牛与黄斑星天牛 *A. nobilis* (Ganglbauer) 很可能是同一种的不同型。定量研究光肩星天牛两型的差异与表型多样性。【方法】作者以光肩星天牛的 20 个地理种群的光肩星天牛分布区为研究对象, 采用巢式方差分析和聚类分析对其头长、头后缘宽、前胸后缘宽等 13 个表型性状进行多样性分析。【结果】表型特征在群体间与群体内均存在着广泛的变异, 13 个性状的平均表型分化系数为 11.78%, 群体内变异是其表型性状变异的主要来源; 后翅长度与经度呈极显著负相关, 与海拔极显著正相关以及年降水量呈显著负相关。体长与鞘翅斑纹颜色与海拔高度分别呈显著正相关和负相关关系; 在不同地理种群中, 鞘翅斑纹颜色的分化系数达到最大, 为 50.53%; 而以鞘翅斑纹颜色分类的两型差异显示各性状的表型分化系数均大幅度降低。【结论】本研究首次将鞘翅斑纹的颜色进行数字化处理, 并进行分类, 结果显示各个颜色类群的分化系数均大幅度减小, 说明颜色类群之间的分化要小于地理隔离所造成的差异, 进一步验证了光肩星天牛与黄斑星天牛为同一种的不同型。

关键词 光肩星天牛, 表型性状, 表型多样性

Phenotypic diversity of *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky)

LIU Zhao-Yang** LI Yu-Rong PAN Zhong-Yu GUO Bing
LUO You-Qing ZONG Shi-Xiang TAO Jing***

(Beijing Key Laboratory for Forest Pest Control, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract [Objectives] To quantify phenotypic variation in the Asian long-horned beetle (ALB), *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky), a widely distributed wood-borer in China, which morphological and molecular research indicates is probably synonymous with *A. nobilis* (Ganglbauer). [Methods] Phenotypic variation in 13 phenotypic traits in 20 natural ALB populations was studied and analyzed using ANOVA and hierarchical cluster analysis. [Results] There were significant differences in all 13 traits among populations and among individuals within populations. The main source of phenotypic variation was that within populations, the mean coefficient of phenotypic differentiation (V_{st}) was 11.78 %. Posterior wing length was negatively correlated with longitude, positively correlated with altitude, and negatively correlated with annual precipitation. V_{st} for elytra color between different geographic populations reached the maximum value of 50.53%. However, classification based on elytra color greatly reduced V_{st} between two types. [Conclusion] This study was the first to apply digital quantification of elytra color to coleopteran classification, an approach that drastically reduced the apparent coefficient of phenotypic variation between groups. This indicates that phenotypic differences between groups classified on the basis of elytra color are less than those caused by geographical isolation. Pending further validation, ALB and *A. nobilis* are probably different types of the same species.

Key words *Anoplophora glabripennis*, phenotypic character, phenotypic diversity

*资助项目 Supported projects: 北京市教育委员会科学研究与研究生培养共建项目和国家自然科学基金 (31300546)

**第一作者 First author, E-mail: congcong3166@live.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: taojing1029@hotmail.com

收稿日期 Received: 2016-01-20, 接受日期 Accepted: 2016-02-16

光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky), 是国内最重要的林木蛀干害虫之一, 2003 年被列入我国首次发布的林业危险性有害生物名单。该虫主要危害杨、柳、榆、槭等数十种树木, 尤其在以杨树为主体的速生用材林和防护林中成灾严重。光肩星天牛的虫害木伐倒后, 若未经任何处理被用于制作木质包装材料, 易造成虫源的扩散(骆有庆和李建光, 1999)。光肩星天牛和黄斑星天牛 *A. nobilis* Ganglbauer 原分类地位是属于星天牛属 *Anoplophora* 的不同种, 生物学特性和外部形态极为相似, 鞘翅上的斑纹颜色是区别两者的主要特征, 光肩星天牛显现白色斑纹和黄斑星天牛呈现黄色斑纹。经过国内外学者的深入研究, 形态学、遗传学、分子生物学等多面的研究结果普遍认为两者是同一种的两种型(郎杏茹等, 1997; 骆有庆和李建光, 1999; 高瑞桐等, 2000; 安榆林, 2004; 林晓佳, 2004; 唐桦等, 2004)。白斑型和黄斑型光肩星天牛的原分布区被山西吕梁山、太行山脉阻隔, 但是由于人为的扩散和传播导致随着地理隔离机制被打破, 为两型种群的基因交流提供了条件, 自然种群中的“中间型”现象暗示着渐渗杂交的发生(吴蔚文和陈斌, 2003)。

表型多样性是形态特征的集合, 可用于研究群体在不同分布区域内的表型分化和变异, 也是遗传变异和环境因素共同作用下的表征(夏铭, 1999; Smits *et al.*, 2006; García-Verdugo *et al.*, 2010)。通过有效的采样、合理的数学统计方法能揭示群体的遗传规律及变异大小, 并可客观评价其遗传多样性。前人的表型研究主要针对个体差异进行, 骆有庆等(2000)以超微结构的观察和比较同一寄主的 12 个个体, 认为体色连续变化, 而在触角、下唇须、下颚须、前胸音锉及跗垫部位上则无显著的差异。

本文以地理种群为集合, 对不同地理分布的种群的变异特征, 辅之以地理因子的分析, 探索光肩星天牛表型的变异情况, 并且采用颜色数字化的方式对鞘翅斑纹的颜色变异进行分类分析。旨在揭示光肩星天牛表型分化的规律和变异程度, 为进一步研究其遗传变异和微进化提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料来源

2014—2015 年, 在 20 个光肩星天牛地理种群区域采集样本, 每个地理种群选取 16 个采样点, 每个采样点间隔距离为 25 m 以上, 每个采样点选取 1 头成虫样本。采样群体中心位置采用 GPS 仪定位, 样本采集地点以及地理气候因子列于表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 表型性状选取 参考数值分类依据, 表型性状的测定主要包括了 8 个数量性状以及鞘翅斑纹颜色的数值化分析(陈斌, 1989a, 1989b)。8 个表型数量性状, 如图 1 所示, 包括头部(A 头长 Head length (HL)、B 头后缘宽 Head width (HW))、胸部[C 前胸长 Prothorax length (PL)、D 前胸后缘宽 Prothorax width (PW)]、腹部(E 鞘翅肩宽 Elytron humeral width (EHW)、F 鞘翅长 Elytron length (EL)、G 后翅长 Posterior wing length (PWL) 以及体长 Body length (BL)。同时, 对 4 个形态数量性状的比值进行了分析: 头长/头后缘宽、前胸后缘宽/前胸长、鞘翅长/鞘翅肩宽、体长/鞘翅长。

1.2.2 表型性状测定方法

1.2.2.1 颜色数字化测定 经过遗传学杂交、形态学以及分子生物学等方面的研究结果, 光肩星天牛的种内分化普遍认为是“黄斑型”、“白斑型”以及“过渡型”(郎杏茹等, 1997; 高瑞桐等, 2000; 安榆林, 2004; 林晓佳, 2004)。为避免视觉色差, 更好的区分鞘翅斑纹从白色到黄色的变异, 将鞘翅斑纹颜色数字化处理。取下鞘翅后, 以白纸为背景, 放置在相同光源下, 进行图像获取。采用 LEICA M205FA 体视显微镜, 摄像头 LEICA DFC450C, 结合 LAS V4.5 软件, 全复消除色差。固定参数设置为曝光时间为 19.7 ms, 饱和度 0.65, 微距色彩白平衡模式, 图像采用 300 DPI × 300 DPI, 储存为 TIF 格式。色彩数值化分析采用开放数据源的公共图像处理软件 Image J (NIH, USA) (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>)

表 1 样本采集地以及地理气候因子
Table 1 Sample collection and geographical climate factors

省份 Province	采样地点 Site	寄主 Host	经度 (°) Longitude	纬度 (°) Latitude	海拔 (m) Altitude	年均温 (°C) Mean annual temperature	最高温 (°C) Maximum temperature	最低温 (°C) Minimum temperature	年降水量 (mm) Annual precipitation
河南 Henan	三门峡 Sanmenxia	1	111.2	34.6	815	13.3	30.0	- 5.4	735
山西 Shanxi	运城 Yuncheng	1	110.9	35.1	391	15.4	32.7	- 3.9	681
河北 Hebei	石家庄 Shijiazhuang	1	114.2	38.6	253	13.9	32.2	- 7.5	565
	保定 Baoding	1	115.5	38.9	22	14.5	33.4	- 6.6	609
内蒙古 Inner mogolia	巴彦淖尔 Bayannaoer	1	107.4	40.7	1 039	9.9	31.2	- 12.3	194
	阿拉善 Alxa	2	105.7	38.8	1 572	9.5	30.3	- 11.7	267
	通辽 Tongliao	1	122.3	43.6	178	8.4	29.4	- 16.0	575
宁夏 Ningxia	银川 Yinchuan	1	106.1	38.5	1 112	10.9	30.9	- 10.1	246
	固原 Guyuan	2	106.2	36.1	1 772	10.9	30.9	-10.1	246
	彭阳 Pengyang	4	106.6	35.6	1 565	10.7	28.3	- 7.0	673
	盐池 Yanchi	3	107.4	37.8	1 352	10.2	30.0	- 10.2	366
	青铜峡 Qingtongxia	1	105.9	37.9	1 179	11.0	31.1	- 10.0	260
	平罗 Pingluo	1	106.5	38.9	1 335	10.4	32.7	- 11.6	173
陕西 Shaanxi	杨凌 Yangling	1	108.1	34.3	471	16.2	33.3	- 1.0	759
甘肃 Gansu	武威 Wuwei	1	102.6	37.9	1 535	4.9	21.6	- 14.9	578
	张掖 Zhangye	3	100.6	38.9	1 483	9.7	31.2	- 13.2	178
	酒泉 Jiuquan	4	98.5	39.8	1 452	9.9	31.0	- 11.8	107
吉林 Jilin	长春 Changchun	5	125.3	43.9	221	7.5	29.3	- 18.0	786
新疆 Sinkiang	库尔勒 Korla	4	85.7	41.7	898	13.8	35.7	- 9.0	64
北京 Beijing	北京 Beijing	1	116.4	39.6	42	10.4	32.7	- 11.6	173

寄主列中的数字 1~5 分别代表垂柳、馒头柳、旱柳、新疆杨和糖槭。
Numbers 1 to 5 of the host column represents *Salix babylonica*, *Salix matsudana* var. *matsudana*, *Salix matsudana* Koidz., *Populus alba* L. var. *pyramidalis* Bunge and *Acer saccharum* Marsh.

的 RGB 三色空间进行测量。固定选取左鞘翅基部第一块斑纹的正方形 0.02 mm×0.02 mm 区域的部分测定, 每个样本重复测定 3 次, 得到鞘翅斑纹颜色 (Color of stain, COS)。

1.2.2.2 表型性状测定 每个地理种群选取 16 头成虫用电子游标卡尺测量, 每个数值重复测量 3 次, 测量精度均为 0.01 cm。

1.2.3 统计分析方法 使用软件 EXCEL2010、PASW Statistics18.0 和 Minitab 16 Statistical Software 进行数量性状遗传参数的统计和分析, 对各性状采用巢式设计方差分析 (竺利波等,

2007; 齐明, 2009; 张振等, 2015)。线性模型为: $X_{ijk} = \mu + S_i + T_{j(i)} + \varepsilon_{ijk}$ 式中: 每个观察值 X_{ijk} 为第 i 个群体第 j 个个体的第 k 个观测值, μ 为总体平均值。 $S_i = \mu_i - \mu$ 为种群间处理效应, $T_{i(i)} = \mu_{ij} - \mu$ 为种群内处理效应以及 $\varepsilon_{ijk} = X_{ijk} - \mu_{ij}$ 为随机误差。

表型分化系数 (V_{st}), 以说明种群内和种群间的变异在总变异中的比例, 反映群体间的表型分化公式: $V_{st} = (\sigma_{ts}^2) / (\sigma_{ts}^2 + \sigma_s^2)$, 式中: σ_{ts}^2 为群体间的方差分量, σ_s^2 为群体内的方差分量

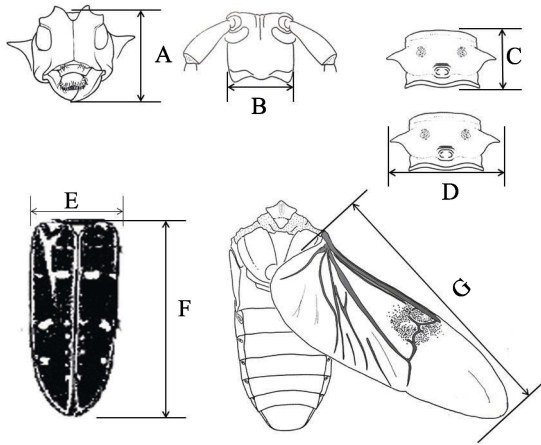


图 1 表型性状的选取示意图
(仿 Lingafelter and Hoebeke, 2002)

Fig. 1 Diagram of Phenotypic traits (after Lingafelter and Hoebeke, 2002)

A. 头长 Head length (HL); B. 头后缘宽 Head width (HW); C. 前胸长 Prothorax length (PL); D. 前胸后缘宽 Prothorax width (PW); E. 鞘翅肩宽 Elytron humeral width (EHW); F. 鞘翅长 Elytron length (EL); G. 后翅长 Posterior wing length (PWL).

(葛颂等, 1988)。

对数量性状进行变异系数 (CV) 分析, 描述数量性状的离散程度。 $CV = S/X$, S 为标准差, X 为平均值。聚类分析使用 SAS V9.2 软件, 欧式平均距离方法进行分层聚类分析。

2 结果与分析

2.1 鞘翅斑纹颜色数字化分析

对测量得到的 RGB 3 个通道的数值分别做散点图, 线性回归方程显示, R^2 均大于 0.6, 说明 3 个颜色两两分别呈紧密的线性回归关系 (图 3)。而我们主要分析的黄斑型和白斑型, 主要的颜色区分在黄色与白色之间, 结合色彩原理, 黄色主要体现在 B 通道的数值, 因此本研究采用 B 通道的数值进行计算分析。

2.2 不同地理种群表型性状分析

2.2.1 光肩星天牛种群间与种群内的形态变异特征 光肩星天牛表型性状方差分析结果如表 2 所示。13 个性状指标无论是在种群间还是种群内均存在着显著差异。说明光肩星天牛的表型特征在

20 个地理种群的群间与群内均存在着广泛的变异。

2.2.2 光肩星天牛形态变异来源与群体间的表型分化 按照嵌套式 (巢式) 设计, 将各表型性状的变异分解为群体间变异、群体内变异和个体内变异 (机误)。计算得到的方差分量占总变异的比例来表示群体的表型分化系数 V_{st} , 并以此来定量分析光肩星天牛 13 个表型性状的变异来源。各性状的变异在种群间、种群内及个体间的分布情况如表 3 所示。表型性状的表型分化系数 V_{st} 变异幅度为 1.96%~50.53%, 平均 11.78%, 其中最大的是鞘翅斑纹的颜色, 最小的头后缘宽。鞘翅斑纹颜色这一性状在群体间的变异大于群体内的变异, 也就是说群体间的变异占相对优势。而其余性状的表型分化系数相对较小, 表明其在群体间相对稳定。总的来说, 平均方差分量百分比在种群间和种群内分别为 20.74% 和 68.88%, 变异都很丰富, 且种群内的变异大于种群间的变异, 但鞘翅斑纹颜色这个性状的种群间差异略高于种群内。

2.2.3 表型性状的变异特征 各个性状值的离散性特征以及表型的多样性丰富程度, 用变异系数来表示。变异系数越大, 则性状值离散程度越大, 变异幅度越高, 多样性越丰富。如表 4 所示, 就均值而言, 变异最大的是鞘翅斑纹的颜色和前胸长, 而鞘翅长/鞘翅肩宽与体长/鞘翅长的数值最小, 相对较稳定。鞘翅斑纹的颜色的变异值, 在宁夏固原、甘肃武威和酒泉最大, 这 3 个地方也是光肩星天牛黄斑和白斑型的混合发生区域; 而在北京大兴、河南、河北变异系数最小。

2.2.4 表型性状与地理因子的相关分析 将各个性状平均值与采样地点的地理因子进行相关分析和检验。结果如表 5 所示, 后翅长度与经度呈极显著负相关, 与海拔极显著正相关以及与年降水量呈显著负相关。体长与鞘翅斑纹颜色与海拔高度分别呈显著正相关和负相关关系。前胸后缘宽/前胸长与年均温和最低温呈显著负相关, 其余性状与地理因子相关性均不显著。

2.2.5 基于表型性状的聚类分析 采用 SAS 软件对数据标准化后, 群体间欧氏距离 UPGMA 聚类结果如图 3 所示。其结果并没有完全依据地理距离而聚类, 表型性状的变异也没有随地域连续

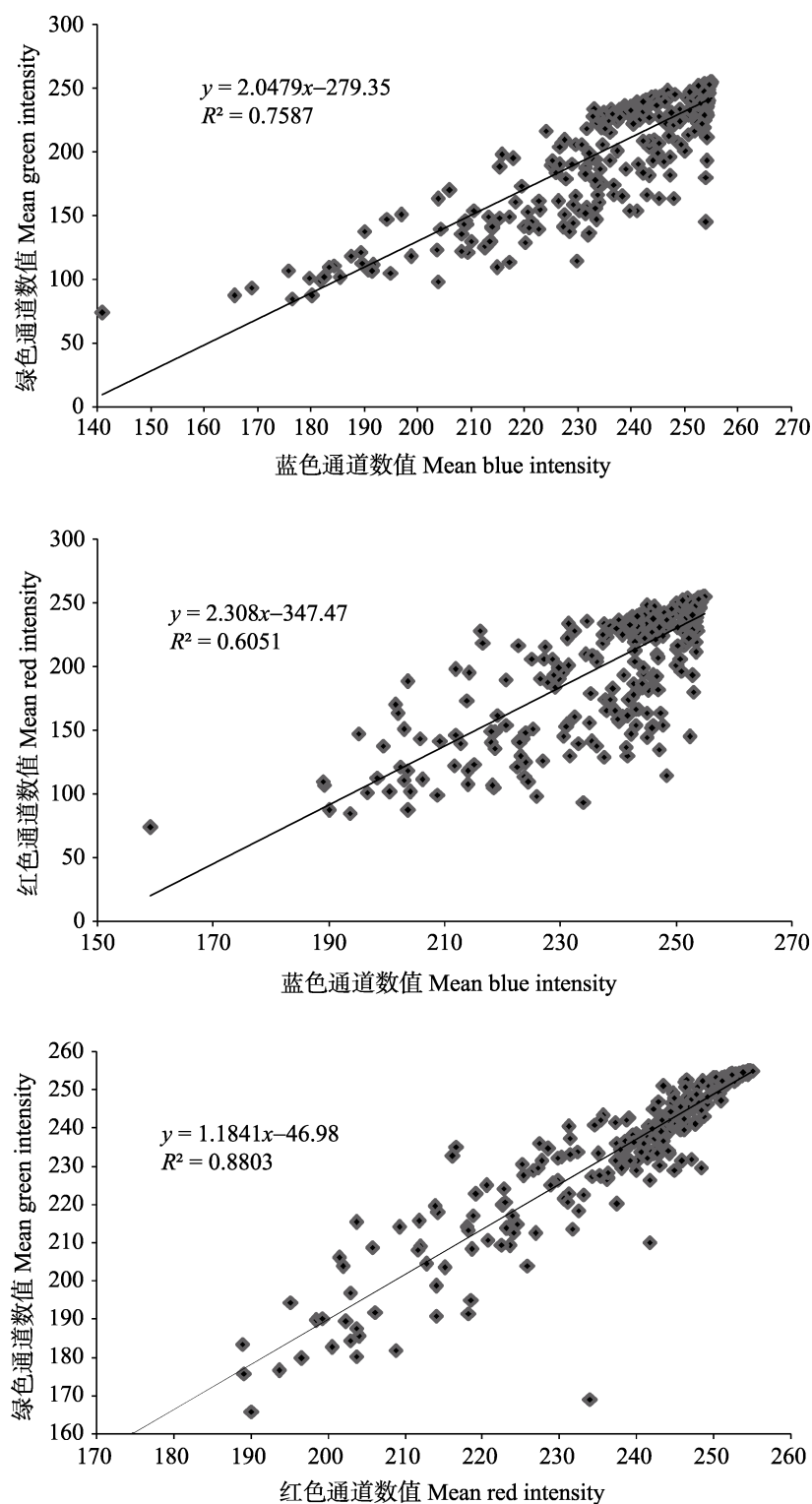


图2 RGB色彩空间的线性回归图
Fig. 2 Linear regression diagram of RGB

变化。在以 0.8 阈值为界, 将 20 个地理种群划分为六大类。第 I 大类为吉林长春的种群, 被单独划分出来。第 IV 大类主要包括了新疆、内蒙古、

宁夏的种群, 北京的种群也被分在了这一大类中。第 V 大类为宁夏、甘肃以及山西的种群。第 VI 大类为河北和河南的种群。

表 2 光肩星天牛表型性状方差分析结果

Table 2 Variance analysis of phenotypic characters among populations and within population in *Anoplophora glabripennis*

性状 Characters		均方 Mean square			F 值 F value	
		种群间	种群内	机误	种群间	种群内
		Among populations	Within population	Random errors	Among populations	Within population
头部 Head	头长 HL	13.6543	3.0334	0.0306	4.5010**	98.9980**
	头后缘宽 HW	5.0292	1.5499	0.0207	3.2450**	74.7660**
	头长/头后缘宽 HL/HW	0.2559	0.0304	0.0022	8.4050**	14.0010**
胸部 Thorax	前胸后缘宽 PW	15.3576	3.5186	0.0453	4.3650**	77.6760**
	前胸长 PL	71.8469	2.1053	0.0193	34.1260**	109.0870**
	前胸后缘宽/前胸长 PW/PL	4.1628	0.1318	0.0046	31.5840**	28.4210**
腹部 Abdomen	鞘翅肩宽 EHW	13.9794	4.0383	0.0615	3.4620**	65.7090**
	鞘翅长 EL	76.2650	18.1729	0.2682	4.1970**	67.7500**
	后翅长 PWL	127.1239	28.4561	0.4326	4.4670**	65.7830**
	鞘翅长/鞘翅肩宽 EL/EHW	0.1234	0.0212	0.0057	5.8200**	3.7140**
	鞘翅斑纹颜色 COS	57 043.7683	3 351.9192	31.4179	17.0180**	106.6880**
全长 Overall length	体长 BL	133.0392	32.1328	0.5797	4.1400**	55.4310**
	体长 / 鞘翅长 BL/EL	0.0262	0.0093	0.0026	2.8080**	3.5410**

**表示差异极显著 ($P<0.01$)。 ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

2.3 光肩星天牛种内分化分析

鞘翅斑纹颜色的变异系数在 20 个地理种群中其他表型特征的变异系数中达到了极高的数值,因此,本研究以颜色数字化的方法,按照 B 通道的数值将所有个体均等分为六个类群,主要包括白斑型 (1)、黄斑型 (6) 以及 4 个过渡型 (2~5),结合性状特征对其种内分化进行探讨分析。

2.3.1 鞘翅斑纹颜色类群分布 根据颜色类群的分类,各个地理种群中颜色类群的分布如图 4 所示。北京种群均有 1 类群 (白斑型) 组成,保定、平罗、石家庄和三门峡均由 1~2 类群组成,5~6 类群 (黄斑型) 主要分布在长春、固原、酒泉、彭阳、武威、运城和张掖。可知,白斑型的个体所占比例居多,分布较为广阔,而过渡型普遍发生在有黄斑型个体出现的区域。

2.3.2 不同颜色类群的表型分化 对不同颜色的 6 个类群进行嵌套方差分析 (表 6),种群间的方差分量百分比在所有表型性状中均有不同程度的减小,随之表型分化系数均也减小。由此可知,颜色类群的划分使其他性状在群间相对稳定,且以群体内部的变异为主。

6 个颜色类群由 1 至 6,由白色向黄色过渡。就各个类群的均值而言 (表 7),随着鞘翅颜色逐渐变黄,总体的变化差异不大,但是在头长、鞘翅长、体长这个 3 个表型特征上,是随着白斑到黄斑过渡而数值逐渐增加。

3 讨论

3.1 光肩星天牛种内两型变异与区域化分析

陈斌 (1989b) 根据这两种天牛的 42 个雄性

表 3 光肩星天牛表型方差分量及群体间与群体内表型分化系数
Table 3 Variance component and differentiation coefficients of phenotypic characters among and within populations in *Anoplophora glabripennis*

性状 Characters		方差分量			方差分量百分比			表型分化系数 Differentiation coefficient of phenotypic traits (%)
		Variance component			Percentage of variance component (%)			
		种群间 Among populations $\sigma_{u/s}^2$	种群内 Within population σ_s^2	个体 Individual σ_e^2	种群间 Among populations	种群内 Within population	个体 Individual	
头部 Head	头长 HL	0.221	1.001	0.031	17.660	79.890	2.450	4.648
	头后缘宽 HW	0.072	0.510	0.021	12.020	84.540	3.440	1.954
	头长/头后缘宽 HL/HW	0.005	0.009	0.002	28.820	57.830	13.340	23.585
胸部 Thorax	前胸后缘宽 PW	0.247	1.158	0.045	17.010	79.860	3.120	4.352
	前胸长 PL	1.453	4.695	0.019	23.561	76.131	0.308	8.741
	前胸后缘宽/前 胸长 PW/PL	0.084	0.242	0.005	25.378	73.112	1.511	10.753
腹部 Abdomen	鞘翅长 EL	1.210	5.968	0.268	16.250	80.150	3.540	3.948
	后翅长 PWL	2.056	9.341	0.433	17.380	78.970	3.660	4.621
	鞘翅肩宽 EHW	0.207	1.326	0.061	12.990	83.150	3.870	2.379
	鞘翅长/鞘翅 肩宽 EL/EHW	0.002	0.005	0.006	16.380	39.720	43.910	13.793
	鞘翅斑纹颜色 COS	1 118.580	1 106.834	31.418	49.560	49.040	1.390	50.528
全长 Overall length	体长 BL	2.102	10.518	0.580	15.930	79.680	4.390	3.841
	体长/鞘翅长 BL/EL	0.001	0.002	0.003	16.670	33.330	50.490	20.000
	均值 Mean				20.739	68.877	10.417	11.780

个体的头长、前胸长、鞘翅长、鞘翅斑颜色等 27 个性状进行了数值分类研究, 得出鞘翅斑纹的颜色是一个指明进化方向的性状, 且二者已经达到了种的秩级。骆有庆等 (2010) 用扫描电镜对光肩星天牛与黄斑星天牛的超微形态特征的研究中, 认为二者差异主要表现在斑纹的颜色。本文研究结果显示鞘翅斑纹的颜色在不同地理种群中分化系数高达 50.53%, 而其余均表型性状分化较小 (1.96%~23.59%)。说明光肩星天牛的表型性状在地理区域分布上分化不明显, 而最大分变异源自鞘翅斑纹的颜色。此结果同样验证了其两型种群之间的大部分表型性状差异不大, 主要差别在于鞘翅斑纹的颜色的结论。相较于前人研究而言, 本文以鞘翅斑纹颜色的数值为依

据, 分为 6 个颜色过渡类群, 在对其不同斑型颜色类群的表型分化的探究中发现, 相较于地理种群而言, 其群体内的分化系数大幅度减小。说明在光肩星天牛两型的表型变异中, 地理的隔离效应要大于鞘翅斑纹颜色的分化效应, 进一步以表型变异的统计方法验证了光肩星天牛与黄斑星天牛在表型上为同一种的不同型。

白斑型和黄斑型的混合现象明显, 笔者认为主要有两方面原因。一方面是地理因素造成, 聚类分析中显示甘肃与宁夏中南部、陕西中部与山西南部划为一类, 结合颜色数值, 这一类也为黄斑型、白斑型以及中间过渡型的混合种群, 该结果与文献记载一致, 认为此区域为黄斑型与白斑型混合发生的地带 (高瑞桐和李国宏, 2001)。

表 4 光肩星天牛表型性状的变异系数
Table 4 Variable coefficient of quantitative traits for *Anoplophora glabripennis* population

地点 Site	性状 Characters	头长	头后缘宽	前胸后缘宽	鞘翅肩宽	前胸长	鞘翅长	体长	后翅长	鞘翅斑纹	均值
		HL	HW	PW	EHW	PL	EL	BL	PWL	颜色 COS	Mean
河南 Henan	三门峡 Sanmenxia	12.28	14.01	13.62	12.61	19.88	12.92	12.63	18.96	3.81	13.11
山西 Shanxi	运城 Yuncheng	18.16	13.83	13.28	14.30	11.85	13.46	13.57	12.28	21.10	12.04
河北 Hebei	石家庄 Shijiazhuang	15.60	11.90	11.67	10.05	11.52	11.76	9.48	12.01	4.92	9.77
	保定 Baoding	16.35	12.22	16.24	15.88	15.65	14.18	13.64	14.06	5.18	11.65
内蒙古 Inner Mongolia	巴彦淖尔 Bayannaoer	13.35	14.33	14.26	12.09	13.66	12.07	11.28	11.46	12.28	10.99
	阿拉善 Alxa	15.16	11.87	12.51	11.16	12.21	12.00	11.58	11.64	11.25	10.47
	通辽 Tongliao	17.47	16.05	16.11	16.07	27.25	16.02	16.25	11.74	18.18	14.67
宁夏 Ningxia	银川 Yinchuan	15.57	14.69	16.16	15.43	18.00	15.35	14.03	14.20	16.10	12.79
	固原 Guyuan	16.86	12.01	13.53	12.12	13.73	13.35	12.13	11.84	29.55	12.48
	彭阳 Pengyang	13.36	15.04	13.77	12.48	14.05	11.47	11.02	11.83	25.83	12.03
	盐池 Yanchi	10.96	10.21	9.21	9.92	12.03	9.27	8.80	14.44	22.12	10.14
	青铜峡 Qingtongxia	12.62	11.03	10.61	9.60	11.99	9.53	7.78	8.16	18.83	9.73
	平罗 Pingluo	12.32	13.23	11.46	11.62	31.85	11.08	10.60	11.47	5.27	11.66
陕西 Shaanxi	杨凌 Yangling	10.54	8.28	9.13	9.19	9.40	7.72	9.34	12.69	14.51	9.43
甘肃 Gansu	武威 Wuwei	9.48	9.74	9.92	8.77	11.92	9.11	9.17	9.59	28.57	9.80
	张掖 Zhangye	10.89	8.76	10.61	7.36	13.23	7.95	7.23	6.98	14.73	9.09
	酒泉 Jiuquan	12.41	14.65	14.93	13.01	17.59	12.90	12.36	13.24	27.07	12.77
吉林 Jilin	长春 Changchun	14.25	12.29	11.08	11.71	16.13	11.23	11.49	13.48	17.34	11.28
新疆 Sinkiang	库尔勒 Korla	13.16	14.46	14.77	12.76	14.51	13.05	13.14	11.94	18.79	12.13
北京 Beijing	北京 Beijing	15.59	12.49	13.09	12.62	12.07	12.25	11.14	14.50	4.23	10.04
	均值 Mean	13.73	12.57	12.69	11.92	15.32	11.84	11.28	12.10	15.52	11.24

同时, 本文结果表明这种混合地带有逐渐向华北扩散的趋势。另外一方面可能与寄主分布有关。骆有庆和李建光(1999)记录光肩星天牛在国内主要寄主树种是杨属、柳属、榆属、槭属四大类, 本文经野外调查发现黄斑型寄主多为杨树, 几乎未在柳树上发现; 而白斑型主要危害柳树, 中间过渡型的寄主包括了柳树和杨树。而吉林长春的地理种群作为偏白斑型的混合种群, 在阈值为 1.6 时单独列为一类, 在野外采集的样本其寄主均为糖槭树, 寄主有别于其它地理种群, 导致其表型性状有所差异, 而具体的原因有待于进一步的验证。

3.2 地理气候因子对表型分化的影响

存在于群体间的变异反映的是地理、生殖隔离上的变异, 群体间变异的多样性是种内多样性变异的重要组成部分, 同时也受到了不同环境选择的结果 (Hartl and Clark, 1989)。光肩星天牛在中国分布广泛, 其中后翅长度与经度呈极显著负相关, 也就是说, 我国西部的地理种群, 其后翅的长度要略大于东部, 且存在渐进的关系。据文献记载光肩星天牛有一定飞翔能力, 但是不喜飞, 而后翅长度主要与飞行有关 (骆有庆和李建光, 1999)。可能是由于西部的寄主与东部相较

表 5 性状与地理气候因子的相关性分析
Table 5 Correlation analysis between traits and geographical climatic factors

性状 Characters		经度 (°) Longitude	纬度 (°) Latitude	海拔 (m) Altitude	年均温 (°C) Mean annual temperature	最高温 (°C) Maximum temperature	最低温 (°C) Minimum temperature	年降水量 (mm) Annual precipitation
头部 Head	头长 HL	- 0.34	- 0.12	0.31	- 0.09	- 0.13	- 0.03	- 0.40
	头后缘宽 HW	- 0.38	- 0.07	0.37	- 0.14	- 0.26	- 0.05	- 0.30
	头长/头后缘宽 HL/HW	- 0.08	- 0.07	0.06	- 0.01	0.07	- 0.02	- 0.24
胸部 Thorax	前胸长 PL	0.24	- 0.27	- 0.33	0.41	0.13	0.37	0.27
	前胸后缘宽 PW	- 0.23	- 0.23	0.32	- 0.08	- 0.29	0.04	- 0.18
	前胸后缘宽/前胸长 PW/PL	- 0.26	0.31	0.40	- 0.05*	- 0.24	- 0.44*	- 0.36
腹部 Abdomen	鞘翅肩宽 EHW	- 0.31	- 0.21	0.31	- 0.03	- 0.23	0.07	- 0.18
	鞘翅长 EL	- 0.35	- 0.24	0.41	- 0.10	- 0.27	0.04	- 0.23
	后翅长 PWL	- 0.56**	- 0.06	0.66**	- 0.35	- 0.30	- 0.21	- 0.46*
	鞘翅长/鞘翅肩宽 EL/EHW	- 0.14	- 0.11	0.31	- 0.17	- 0.16	- 0.05	- 0.15
	鞘翅斑纹颜色 COS	0.26	0.01	- 0.45*	0.35	0.41	0.22	0.18
全长 Overall length	体长 BL	- 0.37	- 0.20	0.49*	- 0.18	- 0.36	- 0.02	- 0.22
	体长/鞘翅长 BL/EL	0.00	0.16	0.13	- 0.21	- 0.22	- 0.20	0.12

**表示差异极显著 ($P<0.01$), *表示差异显著 ($P<0.05$)。
** indicates extremely significant difference ($P<0.01$), * indicates significant difference($P<0.05$).

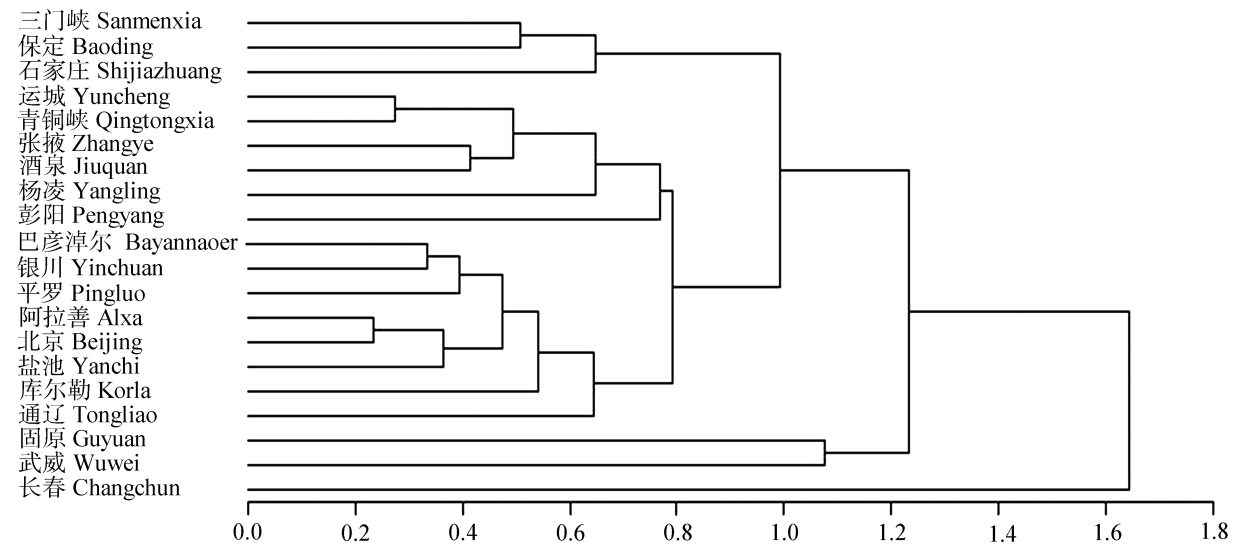


图 3 基于表型性状的聚类图
Fig. 3 Dendrogram analysis based on phenotypic traits

而言,更为零星分散。由于本文尚未对采集地区寄主的林分密度进行定量的调查,因此还需进一步的探讨。
关于垂直分布的争议,阎浚杰(1985)的调

查结果显示,我国东部光肩星天牛垂直分布在海拔 1 000 m 以下,此后高瑞桐等(2001)研究认为其发生区域在宁夏、甘肃以及内蒙古最为严重,且分布海拔在 1 000 m 以上。前者关注于东部种

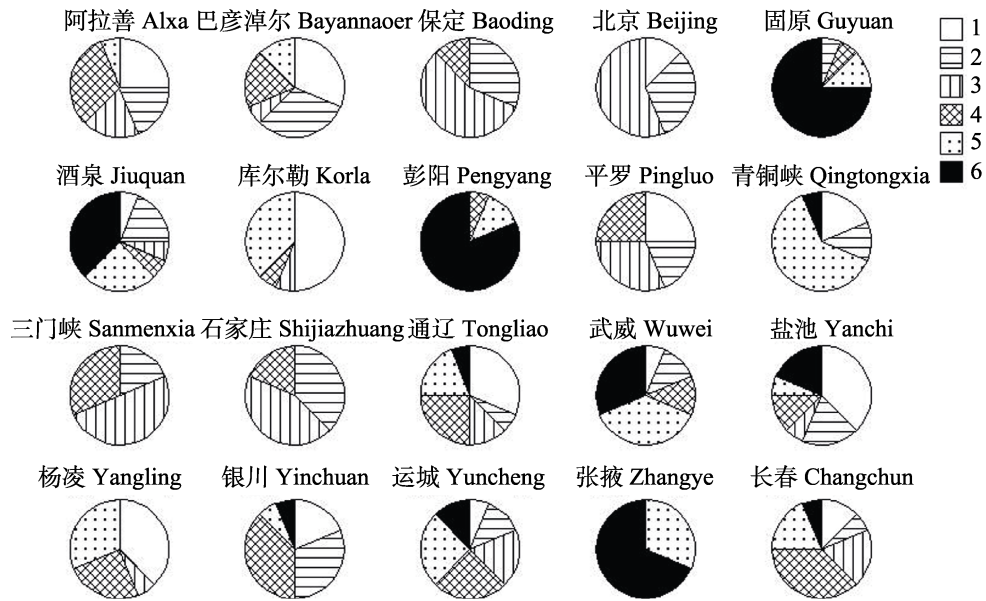


图 4 20 个地理种群的颜色类群组成图

Fig. 4 The color group composition of 20 geographic populations

1 为白斑型, 2~5 为过渡型, 6 为黄斑型。

Numbers 1 to 6 represent white type (1), transitional type (2-5), yellow type(6), respectively.

表 6 光肩星天牛不同颜色类群的表型性状方差分析结果

Table 6 Variance analysis of phenotypic characters among different color groups in *Anoplophora glabripennis*

性状 Characters		方差分量			方差分量百分比			表型分化系数 Differentiation coefficient of phenotypic traits (%)
		Variance component			Percentage of variance component (%)			
		种群间 Among populations $\sigma_{t/s}^2$	种群内 Within population σ_s^2	个体 Individual σ_e^2	种群间 Among populations	种群内 Within population	个体 Individual	
头部 Head	头长 HL	0.058	1.164	0.031	4.620	92.930	2.450	0.248
	头后缘宽 HW	0.004	0.576	0.021	0.680	95.870	3.450	0.005
	头长/头后缘宽 HL/HW	0.001	0.014	0.002	2.870	83.670	13.460	0.508
胸部 Thorax	前胸后缘宽 PW	0.009	1.386	0.045	0.640	96.220	3.150	0.004
	前胸长 PL	0.426	1.727	0.019	19.610	79.500	0.890	5.736
	前胸后缘宽/前 胸长 PW/PL	0.023	0.103	0.005	17.470	78.990	3.540	4.750
腹部 Abdomen	鞘翅长 EL	0.274	6.896	0.268	3.680	92.710	3.610	0.158
	后翅长 PWL	0.544	10.850	0.433	4.600	91.740	3.660	0.251
	鞘翅肩宽 EHW	0.028	1.500	0.061	1.730	94.400	3.870	0.035
	鞘翅长/鞘翅肩 宽 EL/EHW	0.001	0.007	0.006	5.070	51.060	43.860	2.000
全长 Overall length	体长 BL	0.360	12.225	0.580	2.730	92.870	4.400	0.087
	体长/鞘翅长 BL/EL	0.000	0.002	0.003	2.230	47.310	50.460	0.249
	均值 Mean				5.494	83.106	11.400	1.169

表 7 光肩星天牛 6 个颜色类群的均值与标准差
Table 7 The mean value and standard deviation of six color groups in *Anoplophora glabripennis*

类群 Groups		1	2	3	4	5	6
特征 Characters							
头部 Head	头长 HL	6.79±1.06	6.76±0.93	7.18±1.04	7.14±1.07	7.37±1.26	7.42±1.14
	头后缘宽 HW	5.39±0.70	5.48±0.77	5.66±0.79	5.65±0.84	5.66±0.78	5.67±0.72
	头长/头后缘宽 HL/HW	1.26±0.14	1.24±0.12	1.27±0.11	1.27±0.10	1.30±0.15	1.31±0.13
胸部 Thorax	前胸长 PL	4.35±0.80	5.28±1.46	6.12±1.98	5.22±1.57	4.46±0.73	4.55±0.80
	前胸后缘宽 PW	8.08±1.10	8.12±1.09	8.56±1.22	8.31±1.30	8.32±1.25	8.44±1.15
	鞘翅肩宽 EHW	9.18±1.12	9.24±1.20	9.73±1.28	9.63±1.34	9.65±1.36	9.62±1.13
	前胸后缘宽/前胸长 PW/PL	1.88±0.24	1.62±0.36	1.52±0.44	1.69±0.40	1.88±0.21	1.88±0.24
腹部 Abdomen	鞘翅长 EL	19.53±2.40	19.61±2.55	20.62±2.68	20.44±2.96	20.66±2.76	21.12±2.58
	后翅长 PWL	24.12±3.12	23.81±3.07	25.14±4.00	25.34±3.44	25.28±3.46	26.14±2.81
	鞘翅长/鞘翅肩宽 EL/EHW	2.13±0.12	2.13±0.10	2.12±0.12	2.12±0.10	2.15±0.12	2.20±0.10
全长 Overall length	体长 BL	27.30±3.15	27.66±3.37	28.69±3.44	28.80±4.01	29.06±3.92	29.08±3.38
	体长/鞘翅长 BL/EL	1.40±0.07	1.41±0.07	1.40±0.07	1.41±0.09	1.41±0.07	1.38±0.05

群，主要为白斑型；后者着重于西部，主要为黄斑型以及过渡型。而本研究显示鞘翅斑纹的颜色数值随海拔的升高则降低，颜色由白色向黄色过渡，且与均值结果一致。结合野外调查研究发现，认为其垂直分布的差异在于两型之间的差异，研究结果显示翅斑纹的颜色数值随海拔的升高则降低，也就是鞘翅斑纹颜色随海拔的升高而逐渐由白色向黄色过渡。

3.3 表型数字化的分析

数字化是将许多复杂多变的信息转变为可以度量的数字、数据，再以这些数字、数据建立起适当的数字化模型，把它们转变为一系列二进制代码，引入计算机内部，进行统一处理，这就是数字化的基本过程。将性状数值化应用于昆虫分类学，最早见于朱弘复等（1975）对蚜虫的数值分类研究。刘友樵（1980）对草蛾属的数值分类进行了研究，此后，在夜蛾科、天牛科等昆虫的分类研究中也利用了表型数字化分析的方法（周静芋和宋世德，1996；郑福山等，2007）。陈斌（1989b）对光肩星天牛与黄斑星天牛进行数值分类，将鞘翅斑纹的颜色定义黄与白为质量性状，而光肩星天牛存在过渡型个体，其颜色略

有区别，但又难以区分，而且传统的目测法虽简单易行，却主观性过强，易受外界环境影响。因此，将颜色数字化分析引入昆虫表型变异的研究中具有重要的意义。目前，颜色数字化广泛应用于植物的分类，李欣（2011）在观赏海棠的叶、果、花色彩上采用数字化的方法，来反映品种间差异作为品种描述和新品种选育的指标，而王晓慧（2012）对大丽花的表型性状遗传多样性研究分析，再次验证了色彩数字化的准确定及可行性。前人对光肩星天牛鞘翅斑纹的叙述以文字性的描述为主，本文将主观的颜色，科学地量化来研究光肩星天牛两型的表型差异，一方面便于数据的分析，另外一方面为昆虫物种鉴定以及种内分化的研究提供了可行的技术路线（李鸣明，2013）。

综上所述，本文首次将光肩星天牛鞘翅斑纹的颜色数字化处理，定量分析颜色的数值差异。并且在颜色类群中，各个表型分化系数均大幅度减小，说明白斑型、黄斑型与过渡型之间的表型差异较小，再次验证了光肩星天牛与黄斑星天牛为同一种的不同型，而遗传信息的差异有待于进一步的研究。

参考文献 (References)

- An YL, 2004. Sino-America joint study on genetic varieties and PCR identification of *Anoplophora glabripennis*. Doctoral dissertation. Nanjing: Nanjing Forestry University. [安榆林, 2004. 光肩星天牛分子遗传多样性及 PCR 鉴定技术的研究. 博士学位论文. 南京: 南京林业大学.]
- Chen B, 1989. Study on numerical taxonomy of the genus *Anoplophora* (Coleoptera: Cerambycidae). *Zoological Systematics*, 14(1): 96–103. [陈斌, 1989a. 星天牛属的数值分类研究初探 (鞘翅目: 天牛科). 动物分类学报, 14(1): 96–103.]
- Chen B, 1989. Study on numerical classification of *Anoplophora nobilis* and *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae). *Acta Entomol. Sin.*, 32(3): 341–349. [陈斌, 1989b. 黄斑星天牛和光肩星天牛的数值分类研究(鞘翅目: 天牛科). 昆虫学报, 32(3): 341–349.]
- Gao RT, Wang BD, Li GH, Richard R, Wu Y, Yun H, 2000. Report on the crossbreeding between *Anoplophora glabripennis* (Motsch.) and *A. nobilis* Ganglbauer (Coleoptera: Cerambycidae). *Journal of Beijing Forestry University*, 22(3): 23–26. [高瑞桐, 王保德, 李国宏, Richard Reardon, 吴云, 运虎, 2000. 光肩星天牛和黄斑星天牛杂交研究. 北京林业大学学报, 22(3): 23–26.]
- Gao RT, Li GH, 2001. Review and prospect of research on *Anoplophora glabripennis* in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 38(4): 252–258. [高瑞桐, 李国宏, 1999. 我国光肩星天牛研究回顾及发展趋势. 应用昆虫学报, 38(4): 252–258.]
- García-Verdugo C, Méndez M, Velázquez-Rosas N, Balaguer L, 2010. Contrasting patterns of morphological and physiological differentiation across insular environments: phenotypic variation and heritability of light-related traits in *Olea europaea*. *Oecologia*, 164(3): 647–655.
- Ge S, Wang MM, Chen YW, 1988. Study on genetic structure of *Pinus massoniana* population by Isozyme. *Scientia Silvae Sinicae*, 24(4): 399–409. [葛颂, 王明麻, 陈岳武, 1988. 用同工酶研究马尾松群体的遗传结构. 林业科学, 24(4): 399–409.]
- Hartl DL, Clark AG, 1989. Principles of population genetics. *Biometrics*, 117(2): 143–144.
- Smits W, Kuipers O, Veening J, 2006. Phenotypic variation in bacteria: the role of feedback regulation. *Nature Reviews Microbiology*, 4(4): 259–271.
- Lang XR, Sun P, Wu JN, Zhang J, 1997. Preliminary study on *Anoplophora glabripennis* and *A. nobilis* mating test. *Journal of Northwest Forestry University*, 12 (S1): 58–60. [郎杏茹, 孙普, 吴建宁, 张娟, 1997. 光肩星天牛与黄斑星天牛交配试验初报. 西北林学院学报, 12 (S1): 58–60.]
- Li MM, 2013. Digital color theory and application. Doctoral dissertation. Nanjing: Nanjing Forestry University. [李鸣明, 2013. 色彩数字化理论及其运用. 南京: 南京林业大学.]
- Li X, 2011. Breeding and digital description of new varieties of ornamental (*Malus* sp.). Doctoral dissertation. Shandong: Shandong Agricultural University. [李欣, 2011. 观赏海棠(*Malus* sp.)新品种选育及数字化描述. 硕士学位论文. 山东: 山东农业大学.]
- Lin XJ, 2004. Genetic difference of mtDNA CO I gene of *A. glabripennis* and its sibling species and PCR identification kit of *A. glabripennis*. Doctoral dissertation. Nanjing: Nanjing Forestry University. [林晓佳, 2004. 光肩星天牛及其近缘种线粒体 DNA CO I 基因遗传差异及其 PCR 鉴定试剂盒的研究. 南京: 南京林业大学.]
- Lingafelter SW, Hoebeke ER, 2002. Revision of *Anoplophora* (Coleoptera: Cerambycidae). Washington, DC: Entomological Society of Washington. 236.
- Liu YQ, 1980. A study of Chinese *ethmia hubner* (lepidoptera: Ethmiidae) in classification, distribution and numerical taxonomy. *Entomotaxonomia*, 2(4): 267–284. [刘友樵, 1980. 中国草蛾属(鳞翅目: 草蛾科)的种类、分布及数值分类研究. 昆虫分类学报, 2(4): 267–284.]
- Luo YQ, Li JG, 1999. Bionomics and occurrence of *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky). *Plant Quarantine*, 13(1): 5–7. [骆有庆, 李建光, 1999. 光肩星天牛的生物学特性及发生现状. 植物检疫, 13(1): 5–7.]
- Luo YQ, Huang SM, Zhao N, Li JG, 2000. Comparison of microscopic characters of mixed population of *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky) and *A. nobilis* (Ganglbauer). *Journal of Beijing Forestry University*, 22(1): 56–60. [骆有庆, 黄少鸣, 赵楠, 李建光, 2000. 光肩星天牛和黄斑星天牛混合种群的显微特征比较. 北京林业大学学报, 22(1): 56–60.]
- Maureen C, Casa AM, Mahmoud Z, Mitchell SE, Stephen K, 2009. Isolation and characterization of microsatellite loci for the Asian longhorned beetle, *Anoplophora glabripennis*. *Molecular Ecology Resources*, 9(3): 925–928.
- Qi M, 2009. New Development of Test and Statistics of Genetic Breeding in Forest Trees. Beijing: China Forestry Publishing House. 54–64. [齐明, 2009. 林木遗传育种中试验统计法新进展. 北京: 中国林业出版社. 54–64.]
- Tang H, Zheng ZM, Li Kai, 2004. Systematic status research of *Anoplophora glabripennis* and *A. nobilis*. *Journal of Nanjing Forestry University*, 28(6): 67–72. [唐桦, 郑哲民, 李恺, 2004. 光肩星天牛与黄斑星天牛分类地位的研究. 南京林业大学学报: 自然科学版, 28 (6): 67–72.]
- Wang XH, 2012. Studies on genetic diversity of the phenotype

- characteristics in dahlias. Doctoral dissertation. Shandong: Shandong Agricultural University. [王晓慧, 2012. 大丽花表型性状遗传多样性研究. 山东农业大学.]
- Wu WW, Chen B, 2003. Reviews of research on the *glabripennis* species group of the genus *Anoplophora* in china. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 40(1): 19–24. [吴蔚文, 陈斌, 2003. 光肩星天牛种组研究现状. 应用昆虫学报, 40(1): 19–24.]
- Xia M, 1999. Research progress of genetic diversity. *Chinese Journal of Ecology*, 18(3): 60–66. [夏铭, 1999. 遗传多样性研究进展. 生态学杂志, 18(3): 60–66.]
- Yan LJ, 1985. Study on the distribution of *Anoplophora glabripennis* in the eastern China. *Journal of Northeast Forestry University*, 13(1): 62–69. [阎浚杰, 1985. 中国东部光肩星天牛分布区的研究. 东北林学院学报, 13(1): 62–69.]
- Zhang Z, Zhang HG, Zhou Y, Liu L, Yu HY, Wang X, Feng WJ, 2015. Variation of seed characters in korean pine (*Pinus koraiensis*) multi-clonal populations. *Journal of Beijing Forestry University*, 37(2): 67–78. [张振, 张含国, 周宇, 刘灵, 于宏影, 王绪, 冯万举, 2015. 红松多无性系群体的种实性状变异研究. 北京林业大学学报, 37(2): 67–78.]
- Zheng FS, Du YZ, 2007. Numerical character variations of geographical populations of *Galerucella birmanica* Jacoby (Coleoptera: Chrysomelidae) in China. *Entomotaxonomia*, 29(3): 209–214. [郑福山, 杜予州, 蔡超, 徐冉, 2007. 菱角萤叶甲不同地理种群数量性状变异(鞘翅目: 叶甲科). 昆虫分类学报, 29(3): 209–214.]
- Zhou JY, Song SD, 1996. Numerical taxonomy of eggs in Noctuidae (Lepidoptera: Noctuidae). *Entomotaxonomia*, 18(2): 145–149. [周静芋, 宋世德, 1996. 夜蛾科卵的数值分类研究(鳞翅目: 夜蛾科). 昆虫分类学报, 18(2): 145–149.]
- Zhu HF, Zhang GX, Zhong TS, 1975. Numerical taxonomy of aphid. *Acta Entomol. Sin.*, 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.]
- Zhu LB, Gu WC, Li B, 2007. Study on phenotypic diversity of population in *cersis chinensis*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 23(3): 138–145. [竺利波, 顾万春, 李斌, 2007. 紫荆群体表型性状多样性研究. 中国农学通报, 23(3): 138–145.]