

贺兰山榆跳象幼虫空间分布特征及影响因子分析*

李欣芸** 冯亚萍 安旭 杨贵军***

(宁夏大学生命科学学院, 银川 750021)

摘要 【目的】明确贺兰山榆跳象 *Orchestes alni* 幼虫空间分布型及其形成机制, 分析影响榆跳象幼虫空间分布的因子, 以为榆跳象的预测预报及防控措施提供参考。【方法】对贺兰山灰榆林榆跳象幼虫平均密度进行调查, 应用6种聚集度指标法和2种回归模型法分析榆跳象幼虫的空间分布型。【结果】贺兰山中中部沟道灰榆林榆跳象幼虫密度明显高于南北沟道。半阴坡和阴坡榆跳象幼虫平均密度显著高于阳坡和沟道。灰榆树冠不同方向的幼虫平均密度差异不显著, 以树冠中下层最大。榆跳象幼虫密度与树干高呈显著正相关。榆跳象幼虫在贺兰山灰榆林中呈聚集分布, 基本成分是个体群, 个体间相互吸引, 并随种群密度升高, 聚集程度增大。聚集分布是由昆虫行为或环境条件引起。灰榆林海拔和坡度显著影响榆跳象幼虫密度, 榆跳象幼虫主要聚集在海拔1 800 m以上(29.00%)和急坡(24.08%)的灰榆林。【结论】贺兰山中中部沟道的中海拔区域是榆跳象发生的重点监测区域, 背风且水分条件好的坡向密度大, 榆跳象幼虫聚集分布容易造成局部区域密度较高。

关键词 榆跳象幼虫; 空间分布; 灰榆; 地形; 贺兰山

Spatial distribution pattern of the larvae of *Orchestes alni* and influence factors in Helan Mountains

LI Xin-Yun** FENG Ya-Ping AN Xu YANG Gui-Jun***

(School of Life Sciences, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract [Objectives] To analyze the spatial distribution of *Orchestes alni* larvae and identify factors useful for forecasting and controlling this pest. [Methods] The ratio of infested grey elm trees and the population density of the *O. alni* were quantified in the Helan Mountains. The spatial distribution of *O. alni* larvae was investigated using six aggregation indices and regression analysis. [Results] The ratio of infested elm trees in the center of the Helan Mountains was obviously higher than in northern and southern parts. Significantly more larvae were found on semi-shady slopes and more were found on shady slopes than on sunny slopes and valleys. The highest densities were in the lower crowns of grey elm trees, but height and aspect otherwise had no significant effect on abundance. There was a significant positive correlation between larval damage and elm height. Larvae had an aggregated spatial pattern and the basic unit was individual groups. The spatial pattern was density dependent; i.e. aggregation increased with population density. Aggregation was the result of behavior and environmental conditions. The abundance of larvae in grey elm forest was significantly affected by elevation and slope; larvae were mainly concentrated on steep slopes above 1 800 m. [Conclusion] Mid elevation valleys in the central the Helan Mountains are the key areas for monitoring the occurrence of *O. alni* larvae. Larval density was higher on sheltered, semi-cloudy slopes with good water. The aggregated distribution of *O. alni* larvae can easily cause high local densities.

Key words *Orchestes alni* larvae; spatial distribution; grey elm trees; topography; Helan Mountains

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金项目(31760618; 31360511)

**第一作者 First author, E-mail: 1179062798@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: yang_gj@nxu.edu.cn

收稿日期 Received: 2019-05-07; 接受日期 Accepted: 2019-09-30

榆跳象 *Orchestes alni* Linnaeus 属鞘翅目 (Coleoptera) 象虫科 (Curculionidae) 跳象亚科 (Rhyncnaeninae) 昆虫, 是榆属 (*Ulmus*) 树种重要的专一食叶害虫之一, 分布广泛, 国外见于欧洲、俄罗斯和蒙古国, 国内在东北、华北、西北和华东大部分地区均有分布(周嘉熹等, 1987; 李晓燕, 1999)。榆跳象以成虫啃食榆树芽苞及叶片, 造成叶片穿孔或缺刻, 幼虫潜叶危害, 取食叶肉后其取食痕迹不表现为潜道, 使叶片鼓起呈囊泡状。单只幼虫一般潜叶危害一枚叶片, 通常不转移叶片, 可发育至蛹, 叶片囊泡变枯黄甚至变黑, 严重时叶片脱落, 全树如同火烧。国内关于榆跳象的生物学特性、防治(周嘉熹等, 1987; 陈斌, 1988; 司振海等, 1997; 李晓燕, 1999; 王忠武等, 2000; 李玉华和刘洪军, 2004; 杨永刚等, 2018)、幼虫空间分布和对榆树种类的选择(薛杰等, 1990; 阿不都瓦哈·艾再子和阿地力·沙塔尔, 2018)等方面有初步报道, 且上述文献调查均为城市绿化地或防护林榆树。

灰榆 *Ulmus glaucescens* 是贺兰山疏林植被重要树种之一, 基本没有成片的森林存在, 在贺兰山 1 300-2 400 m 中低山区均有分布, 对该区域的水土保持、降低土壤侵蚀、以及提供绿色物质和生物栖息地等方面起到了重要的生态作用(梁存柱等, 2012)。近年来, 由于贺兰山疏林植被植物群落单一, 抑制害虫能力弱, 不利于榆树害虫天敌的生存和繁衍, 天敌种类和数量少, 导致灰榆林的专一性害虫榆跳象危害日趋严重, 并诱发吉丁虫 (*Anthaxia quadripunctata* 和 *Anthaxia hungarica* 等) 等蛀干害虫的发生, 甚至引起部分榆树的死亡。本文对贺兰山灰榆林榆跳象幼虫发生、空间分布和灰榆受害程度进行了系统调查, 并分析了影响榆跳象幼虫空间分布的因子, 旨在为榆跳象的预测预报及综合防控工作提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 调查区域

调查区域地处宁夏西北部 (E105°49'-106°41', N38°19'-39°22'), 海拔 1 200-3 556 m, 气候属

中温带干旱气候区, 具有典型的大陆性季风气候特点。平均气温为 - 0.7 °C, 年平均降水量为 418.1 mm, 降水的季节变化差异明显。植被垂直带谱明显, 分为山前荒漠与荒漠草原带、山麓与低山草原、灌丛带、疏林带、中山针叶林带、高山或亚高山灌丛、草甸带, 其中在较干燥的阳坡与半阳坡形成的灰榆疏林是贺兰山最重要的疏林植被(梁存柱等, 2012)。

1.2 调查方法

于 2018 年 4-9 月选择宁夏贺兰山自南向北的青羊沟、大口子、小口子、拜寺口、樱桃谷、响水沟、贺兰口和大水沟 8 条沟道的灰榆林进行调查。本研究采用平行线法分别在沟谷和两边山坡上, 即阳坡 (Sunny slope, SS)、半阴坡 (Semi-cloudy slope, SCS)、阴坡 (Cloudy slope, CS) 和沟道 (Valley, V) 随机抽样, 样线长 2 km, 样株间距大于 100 m, 并用测高器和游标卡尺测定标准样株的树高 (m)、树干高 (m)、胸径 (cm) 和树冠直径 (m)。以 50 cm 枝条有虫率代表密度, 每株标准树按树冠分上、中、下 3 个冠层及东、南、西、北 4 个方向进行调查, 不同冠层和方向选取长度为 50 cm 样枝, 调查样枝上每枚叶片的榆跳象幼虫数量, 并计算幼虫密度。

$$\begin{aligned} \text{50 cm 枝条有虫率 (\%)} &= \\ &= \frac{\text{50 cm 枝条有虫叶片数}}{\text{50 cm 枝条总叶片数}} \times 100。 \end{aligned}$$

调查时, 记录样株位置的经纬度坐标、海拔 (m)、坡度 (°) 和坡向度 (°) 等地形因子。根据样株位置坡度将样地分为平坡 (Flat slope, FS, <5°)、缓坡 (Gentle slope, GS, 5°-15°)、斜坡 (Slant slope, SIS, 15°-25°)、陡坡 (Steep slope, SS, 25°-35°)、急坡 (Steeper slope, SRS, 35°-45°) 和险坡 (Steepest slope, STS, ≥45°)。坡向采用坡向指数, 即将 0°-360° 的方位角转换为 0-1 之间的 TRASP (Transformation of aspect) 指数(刘秋锋等, 2006)。

1.3 数据统计与分析

1.3.1 空间分布型测定及回归模型 统计样株榆树叶片上的榆跳象幼虫, 并计算出平均密度

表 1 各沟道地理位置信息
Table 1 Geographical information of each valley

样线 Transects	位置 Location	海拔范围 Elevation range (m)	生境类型 Habitat types	主要植被 Main vegetation
樱桃谷 Yingtaogu	E105.93°-105.97°, N38.74°-38.74°	1 479-1 937	落叶阔叶林及灌丛 Deciduous broad-leaved forest and shrub	毛樱桃 <i>Cerasus tomentosa</i> 、灰榆 <i>Ulmus glaucescens</i> 、山杨 <i>Populus davidiana</i> 、山杏 <i>Armeniaca sibirica</i> 、紫丁香 <i>Syringa oblata</i> 、鄂尔多斯小檗 <i>Berberis caroli</i> 、西北栒子 <i>Cotoneaster zabelii</i> 等
青羊沟 Qingyanggou	E105.91°-105.93°, N38.56°-38.56°	1 441-1 628	灰榆疏林草地 Open forest and grassland	灰榆、单瓣黄刺玫 <i>Rosa xanthina</i> 、酸枣 <i>Ziziphus jujuba</i>
响水沟 Xiangshuigou	E105.91°-105.93°, N38.76°-38.78°	1 829-2 158	针阔混交林林缘 Mixed broadleaf-conifer forest edge	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i> 、青海云杉 <i>Picea crassifolia</i> 、山杨、西北栒子、鄂尔多斯小檗、束叶千里光 <i>Senecio</i> sp.、披针叶黄华 <i>Thermopsis lanceolata</i> R.Br.等
贺兰口 Helankou	E106.01°-106.02°, N38.72°-38.74°	1 450-1 650	灰榆疏林草地 Open forest and grassland	灰榆、单瓣黄刺玫、酸枣
拜寺口 Baisikou	E105.95°-105.95°, N38.68°-38.68°	1 389-1 453	灰榆疏林草地 Open forest and grassland	灰榆、猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i> 、单瓣黄刺玫、束叶千里光
大口子 Dakouzi	E105.94°-105.94°, N38.52°-38.59°	1 290-1 451	灰榆疏林草地 Open forest and grassland	灰榆、猪毛蒿、单瓣黄刺玫、束叶千里光
小口子 Xiaokouzi	E105.93°-105.94°, N38.61°-38.61°	1 374-1 610	荒漠半荒漠草地 Desert and semi-desert grassland	斑籽麻黄 <i>Ephedra rhytidosperma</i> 、猪毛蒿、刺旋花 <i>Convolvulus tragacanthoides</i> 、酸枣、虻果芥 <i>Torularia humilis</i> 、胀萼黄耆 <i>Astragalus ellipsoideus</i>
大水沟 Dashuigou	E106.14°-106.15°, N38.89°-38.90°	1 289-1 375	灰榆疏林草地 Open forest and grassland	灰榆、山杨、猪毛蒿

(m), 方差 (S^2), 聚集度指标采用: (1) 扩散系数 $C=S^2/m$, 当 $C<1$ 时, 为均匀分布; $C=1$ 时, 为随机分布; $C>1$ 时, 为聚集分布。(2) K 值法, $K=m^2/(S^2-m)$, 当 $K<0$ 时为均匀分布; $K>0$ 时为聚集分布; $K>8$, 趋近随机分布。(3) C_A 指数法, $C_A=1/K$, 当 $C_A=0$ 时, 为随机分布; $C_A<0$ 时, 为均匀分布; $C_A>0$ 时, 为聚集分布。(4) 丛生指标 (I) 法: $I=S^2/m-1$, 当 $I=0$ 时, 为随机分布; $I<0$ 时, 为均匀分布; $I>0$ 时, 为聚集分布。(5) 聚集指标法即平均拥挤度 m^* 与平均密度 m 的比值, $m^*/m=1$, 为随机分布; $m^*/m<1$, 为均匀分布; $m^*/m>1$ 为聚集分布。(6)

扩散型指标 $I_0=Q \sum [n_i(n_i-1)/[N(N-1)]$, 式中 Q 为抽样数, n_i 为第 i 个样本虫数, N 为总虫数。当 $I_0=1$ 时, 为随机分布; $I_0>1$ 时, 为聚集分布; $I_0<1$ 时, 为均匀分布 (丁岩钦, 1980)。

线性回归方程检验采用 Taylor 幂法则 (Taylor, 1961; 兰星平, 1996; 蒋兴川等, 2013) 和 Iwao m^*-m 回归分析法 (Iwao, 1972; 唐小艳等, 2010; 高贺等, 2016), 分别对榆跳象幼虫的分布型进行检验。

采用 Bliackth 聚集均数 λ (丁岩钦, 1994) 来判断聚集的原因, $\lambda=my/2K$, m 为样本平均数, K 为负二项分布的 K 值, y 为自由度等于 $2K$ 的

卡方分布函数。当 $\lambda < 2$, 聚集是由环境条件引起的; $\lambda \geq 2$, 聚集是由昆虫行为或环境条件引起。

1.3.2 数据分析 采用回归法分析榆跳象发生与灰榆树高、树干高、胸径、树冠直径、海拔、坡向、坡度等的关系。采用单因素方差以及 Tukey 多重比较分析不同坡向、冠层、方向和坡度灰榆的幼虫密度。

数据统计分析采用 Excel 和 SPSS 软件进行, 并用 Origin pro 9.0 作图。

2 结果与分析

2.1 榆跳象空间分布特征

2.1.1 不同沟道榆跳象危害分析 由表 1 可见, 不同沟道灰榆林的榆跳象幼虫密度不同, 即响水沟(32.57%)>小口子(22.13%)>樱桃谷(20.42%)>拜寺口(16.65%)>青羊沟(10.59%)>大水沟(10.07%)>大口子(9.04%)>贺兰口(4.71%)。经方差分析, 表明不同沟道灰榆的幼虫密度差异

显著 ($F=16.54, P<0.05$)。经过多重比较, 其中响水沟灰榆的幼虫密度极显著高于其他沟道 ($P<0.01$), 即中部沟道灰榆林榆跳象的发生程度明显高于南北沟道。

2.1.2 不同坡向和方向灰榆冠层榆跳象幼虫密度 图 1 为不同坡向幼虫密度分布直方图。半阴坡灰榆林 50 cm 枝条有虫率在 2.82%-52.67%, 50 cm 枝条有虫率>10%样株比例为 91.83%; 阳坡灰榆林 50 cm 枝条有虫率在 0.35%-18.76%, 有虫率>10%样株比例为 20%; 阴坡灰榆林 50 cm 枝条有虫率在 9.53%-46.69%, 有虫率>10%样株比例为 90%; 沟道灰榆林 50 cm 枝条有虫率在 0.10%-20.78%, 有虫率>10%样株比例为 15.38%。

由图 2 可以看出, 半阴坡灰榆林榆跳象幼虫密度最大, 平均为 24.60%, 阴坡榆树林次之, 为 18.92%, 且二者差异不显著 ($P>0.05$); 阳坡和沟道灰榆林榆跳象幼虫密度较低, 分别为 7.67%和 6.76%, 明显低于半阴坡和阴坡 ($P<0.05$)。

表 2 贺兰山不同沟道灰榆林榆跳象幼虫密度

Table 2 Larvae density in different mountain valleys in Helan mountains

沟道 Valley	面积 (hm^2) Area	总株数 Total number of plants	总叶片数 Total number of leaves	幼虫叶片数 Number of leaves with larvae	50 cm 枝条有虫率 (%) Pest rate of 50 cm branches
青羊沟 Qingyanggou	17.2	9	28 255	3 390	10.59±2.02cd
大口子 Dakouzi	16.5	9	13 882	1 149	9.04±1.49cd
小口子 Xiaokouzi	13.9	15	27 231	5 773	22.13±2.33b
拜寺口 Baisikou	18.2	12	24 493	3 965	16.65±2.02bc
樱桃谷 Yingtaogu	13.3	14	27 961	5 569	21.41±1.81b
响水沟 Xiangshuigou	18.3	20	30 054	9 429	32.56±2.51a
贺兰口 Helankou	14.4	8	8 683	347	4.71±1.01d
大水沟 Dashuigou	16.5	15	18 632	1 935	10.07±2.65cd

表中数据为平均数±标准误。同列数据后标有不同字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SD, and followed by different letters in the same row indicate significant difference at $P<0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

由图 3 可知, 在不同坡向和方向灰榆树冠垂直空间上层、中层、下层的榆跳象幼虫密度不同。半阴坡灰榆树冠西、南方向幼虫密度大于北、东方向, 西、南方向下层幼虫密度大于上层和中层, 北和东向垂直冠层差异不大。阴坡东、北方向幼虫密度大于西、南方向, 北向中层幼虫密度最大,

东向下层最大, 西、南方向幼虫密度垂直冠层差异不大。阳坡不同方向幼虫密度不显著, 均以树冠下层密度最大, 中层和上层次之。沟道内灰榆以西向幼虫密度较小, 且西向树冠下层密度小于上层和中层, 东和南向树冠幼虫中层的密度大于上、下层, 而北向的树冠下层密度最大。

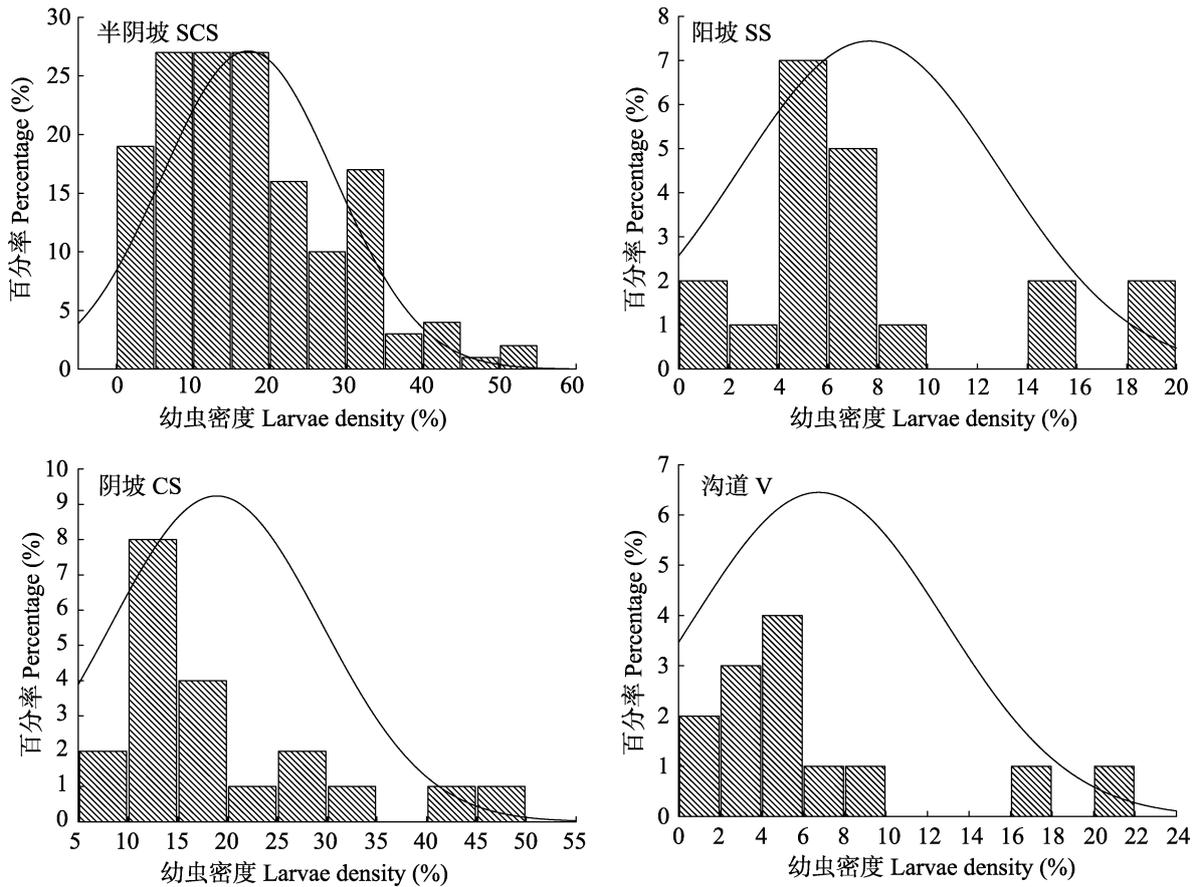


图 1 不同坡向榆跳象幼虫密度分布直方图

Fig. 1 Histogram of density for the larvae density in different aspects

SS: 阳坡; SCS: 半阴坡; CS: 阴坡; V: 沟道。下图同。

SS: Sunny slope; SCS: Semi-cloudy slope; CS: Cloudy slope, V: Valley. The same blow.

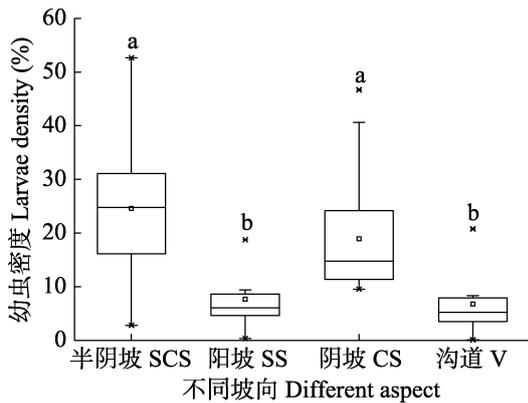


图 2 不同坡向灰榆林榆跳象幼虫密度

Fig. 2 Larvae density in different aspects in Helan mountains

不同字母表示经 Duncan 氏新复极差法

检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。图 5, 图 6 同。

Different letters indicate significant difference at $P < 0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

The same as Fig. 5 and Fig. 6.

2.1.3 榆跳象幼虫空间分布型 由表 3 各项聚集度指标看出, 榆跳象的聚集度指标均符合聚集分布的检验标准, 即 $I > 0$, $m^*/m > 1$, $C_A > 0$, $C > 1$, $K > 0$ 和 $I_8 > 1$, 表明调查的 8 条沟道榆跳象幼虫空间分布型一致, 均为聚集分布。运用 Taylor 幂法则计算得 $\lg S^2 = -0.099 + 1.603 \lg m$ ($R = 0.861$), $b = 1.603 > 1$, 说明榆跳象幼虫空间分布均为聚集型, 且聚集度随种群密度的增大而增加。运用 m^*-m 回归分析法 (Iwao) 得 $m^* = 4.486 + 1.059 m$ ($R = 0.927$), $\alpha = 4.486 > 1$, $\beta = 1.059 > 1$, 说明榆跳象个体间相互吸引, 分布成分为个体群, 空间分布型为聚集分布。

依据 Bliackth 聚集均数 λ 分析榆跳象幼虫聚集的原因, 发现所有调查沟道聚集均数 $\lambda > 2$ (表 3), 表明聚集分布是由昆虫行为或环境条件引起。

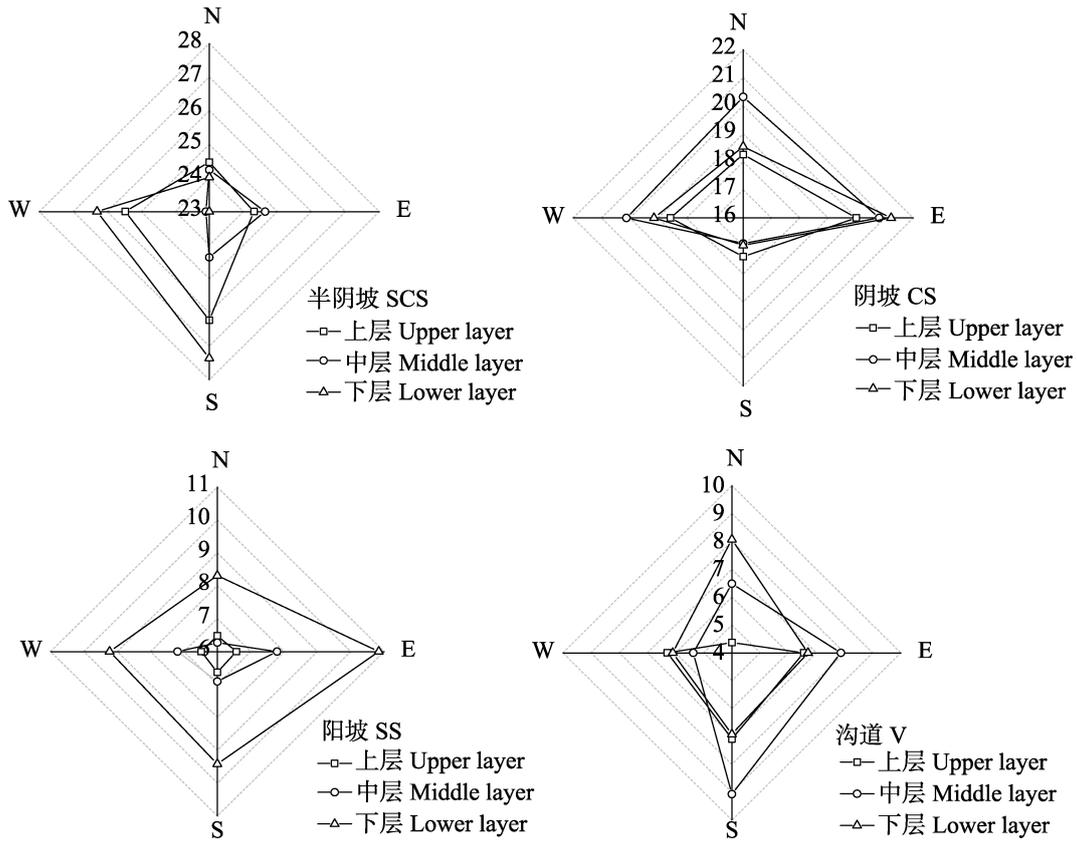


图 3 榆跳象幼虫不同坡向、方向及冠层幼虫密度雷达图
 Fig. 3 Radar chart of density for the larvae in different aspects, direction and canopy

表 3 不同沟道榆跳象幼虫空间分布型的各项指标值
 Table 3 Index values of spatial distribution patterns of the larvae of *Orchestes alni* in different valleys in Helan mountains

沟道 Valley	方差 Variance (S^2)	平均 密度 Mean density (m)	平均拥挤度 Mean crowding (m^*)	丛生 指标 Clumping index (I)	聚集指标 Aggregation index (m^*/m)	C_A 指数 C_A index	扩散系数 Diffusion coefficient (C)	扩散型 指标 Population diffusion index (I_δ)	K 值 K index	聚集均数 Aggregation average (λ)
青羊沟 Qingyanggou	623.694	31.389	50.259	18.870	1.601	0.601	19.870	1.663	1.663	22.361
大口子 Dakouzi	17.088	10.731	11.323	0.592	1.055	0.055	1.592	1.352	18.115	10.468
小口子 Xiaokouzi	135.185	32.072	35.287	3.215	1.100	0.100	4.215	1.309	9.976	31.089
拜寺口 Baisikou	173.008	27.535	32.818	5.283	1.192	0.192	6.283	1.340	5.212	24.673
樱桃谷 Yingtaogu	148.152	33.500	36.922	3.422	1.102	0.102	4.422	1.248	9.788	33.095
响水沟 Xiangshui gou	221.204	48.133	51.729	3.596	1.075	0.075	4.596	1.860	13.386	47.355
贺兰口 Helankou	3.917	3.615	3.699	0.084	1.023	0.023	1.084	1.658	43.272	3.564
大水沟 Dashuigou	145.891	10.750	23.321	12.571	2.169	1.169	13.571	2.523	0.855	8.737

2.2 榆跳象空间分布影响因子分析

2.2.1 榆跳象幼虫密度与灰榆生长性状的关系
 对榆跳象幼虫密度 y (%) 与灰榆树高 x_1 (m)、树干高 x_2 (m)、胸径 x_3 (cm) 和林冠直径 x_4 (m) 进行多元回归分析, 回归方程为 $y = 13.284 + 4.795x_2$ ($R^2=0.074, F=7.958, P=0.006$), 表明榆跳象幼虫密度 y 与榆树树干高 x_2 (m) 显著正相关。调查表明贺兰山山地沟道 35.3% 的树干高在 0-0.6 m (<0.6 m), 榆跳象幼虫平均密度为 14.03%; 24% 的树干高在 0.6-1.2 m (≥ 0.6 m), 榆跳象幼虫平均密度为 18.71%; 31.4% 的树干高在 1.2-1.8 m, 榆跳象幼虫平均密度为 19.12%, 9.8% 的树干高在 1.8-2.4 m, 榆跳象幼虫平均密度为 22.18%。不同高度范围树干高幼虫密度之间不显著 (图 4)。

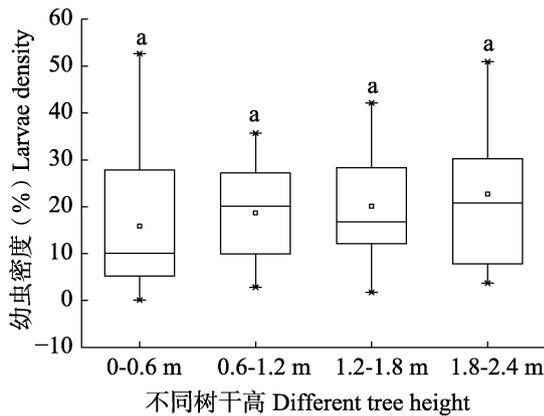


图 4 不同树干高榆跳象幼虫密度
 Fig. 4 Larvae density of grey elm trees in different tree height

同一字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P<0.05$ 水平差异不显著。
 Same letters indicate no significant difference at $P<0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

2.2.2 榆跳象幼虫密度与地形因子的关系
 榆跳象幼虫密度与灰榆林海拔呈极显著正相关 ($R^2=0.438, P<0.001$) (图 5: A)。在海拔 1 800 m 至灰榆林的分布上限幼虫密度为 29%, 最大值 52.67%。在响水沟海拔 2 089 m, 1 400-1 800 m 海拔段 (15.75%), 1 400 m 以下海拔段 (8.22%),

榆跳象幼虫密度依次递减, 且差异显著 ($P<0.05$) (图 5: B)。

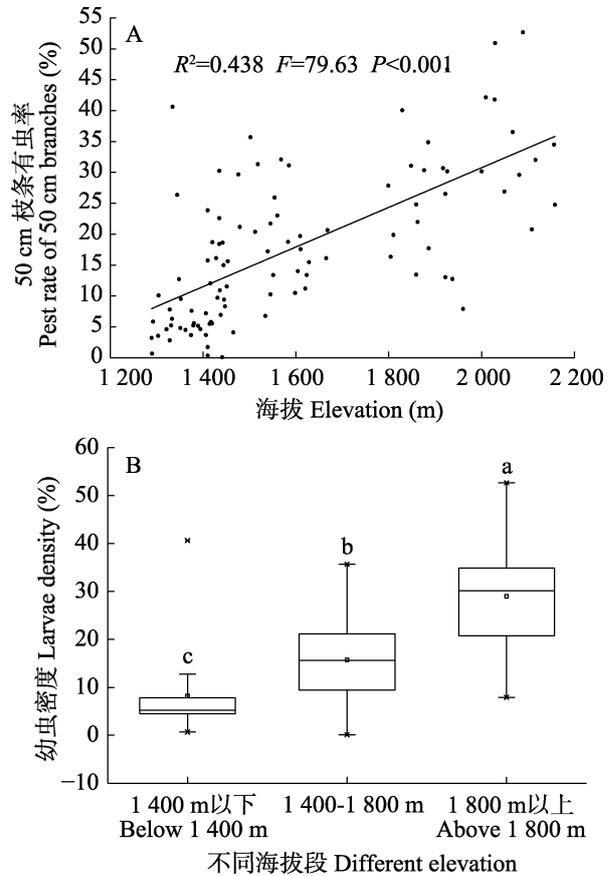


图 5 榆跳象幼虫密度与灰榆林海拔的关系
 Fig. 5 Larvae density of grey elm trees in different elevation

- A. 榆跳象幼虫密度与灰榆林海拔的线性回归关系;
- B. 不同海拔段榆跳象幼虫密度比较。
- A. Linear regression relationship between larval density and altitude of grey elm; B. Comparison of larval density at different altitude.

榆跳象幼虫密度与灰榆林坡向 *TRASP* 指数呈不显著的负相关 ($R^2=0.01, F=2.095, P=0.151$), 表明榆跳象幼虫更趋向于冷湿坡向分布。榆跳象幼虫密度与坡度 ($R^2=0.097, F=7.48, P=0.007$) 呈极显著正相关, 急坡 ($35^\circ-45^\circ$) 榆跳象幼虫密度最大, 为 24.08%, 险坡 ($\geq 45^\circ$)、斜坡 ($15^\circ-25^\circ$)、陡坡 ($25^\circ-35^\circ$) 和缓坡 ($5^\circ-15^\circ$) 依次递减, 但差异不显著, 平坡 (Flat slope, FS) ($<5^\circ$) 最低 (图 6)。

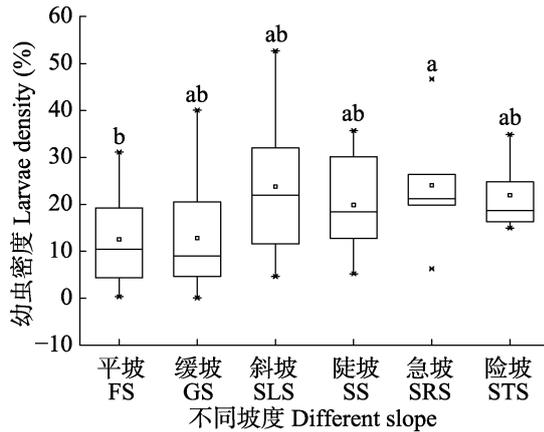


图 6 不同坡度类型榆跳象幼虫密度

Fig. 6 Larvae density of grey elm trees in different slope

FS: Flat slope; GS: Gentle slope; SIS: Slant slope; SS: Steep slope; SRS: Steeper slope; STS: Steepest slope.

3 讨论

贺兰山中部沟道灰榆林榆跳象幼虫密度明显高于南北沟道。灰榆疏林是贺兰山主要的植被类型, 主要分布在 1 300-2 400 m 干旱山坡, 以干旱阳坡为主, 在较低海拔也分布于半阴坡或阴坡、沟谷干河床。贺兰山中部水热条件明显优于南北段, 有利于榆跳象的发生。榆跳象幼虫在不同坡向、方向树冠上层、中层和下层密度不同。半阴坡和阴坡榆跳象幼虫密度明显高于阳坡和沟谷, 半阴坡向灰榆西、南方向树冠下层幼虫密度最大, 阴坡东向树冠下层最大, 阳坡向不同方向幼虫密度不显著, 均以树冠下层密度最大, 沟道内灰榆以西向幼虫密度较小。榆跳象幼虫在灰榆树上的垂直分布特征取决于成虫的产卵选择 (戴小华等, 2011)。阳坡向光照强, 蒸发量大, 灰榆生长情况较差, 沟道内及沟口灰榆受山风影响较大, 贺兰山常年的主导风向为西北偏西风, 春季 4 月底 5 月初风力大, 而这时候正是成虫产卵期, 榆跳象成虫更趋向于选择较背风灰榆生长较好的半阴坡和阴坡方向产卵, 在受风力影响较大的地形优先选择树冠下层产卵, 可能当虫量达到一定数量时, 才会选择更高的高度, 说明幼虫分布与种内竞争、林分的采光条件等相关 (章一巧等, 2012)。本调查发现榆跳象幼虫在树冠不同方向和冠层的分布差异不显著, 可能原因是每个沟谷内风向随长而弯曲的沟谷发生变化, 成虫

会选择在不同坡向的背风方向产卵。

本文研究结果显示, 榆跳象幼虫在贺兰山灰榆林呈聚集分布, 造成局部区域幼虫密度较高, 该结果与山东菏泽和新疆乌鲁木齐市人工榆林地榆跳象的空间分布结果一致 (薛杰等, 1990; 阿不都瓦哈·艾再子和阿地力·沙塔尔, 2016)。λ 值检测榆跳象聚集分布的原因可能是由昆虫行为或环境条件引起。Taylor 幂法则和 Iwao m^*-m 回归分析法分析, 榆跳象分布的基本成分为个体群, 表现为个体间相互吸引, 聚集度随种群密度的增大而增加。野外调查和室内饲养观察发现, 榆跳象将卵产于叶背面主侧脉上, 每叶产卵 1-4 枚, 成虫转移叶片产卵最多 10 余枚, 一般不跨树产卵, 产卵后约 1 周后死亡, 成虫产卵范围较集中。幼虫孵化后从叶脉潜入叶肉组织取食, 使叶片受害部分鼓起呈囊泡状直至化蛹, 不转移叶片危害, 所以幼虫分布型与卵的分布型直接相关 (周嘉熹等, 1987; 戴小华等, 2011), 而卵的分布型是取决于成虫的扩散、补充营养及产卵习性。另外, 成虫会受寄主植物灰榆的生长状况影响 (戴小华等, 2011), 本研究表明榆跳象幼虫密度与树干高呈显著正相关, 幼虫密度有随树干升高而增大的趋势, 这可能与成虫跳跃能力、顶部叶片采光率高于底部叶片采光率等原因有关。榆跳象是榆树的专一性害虫, 寄主植物叶片化学成分必然影响榆跳象的分布 (Hespenheide, 1991; Kang *et al.*, 2009)。此外, 寄主植物叶片的着生位置、朝向、大小、颜色和表皮毛等直接决定潜叶虫成虫的取食和产卵选择, 从而影响幼虫的空间分布和寄主适应 (Cornelissen and Stiling, 2008; 戴小华等, 2011)。有研究表明, 寄主植物种群的大小与潜叶害虫的发生呈负相关 (Bañuelos and Kollmann, 2011)。榆跳象与榆树的选择性适应及与寄主植物种群密度的关系有待于进一步研究。

本文结果显示灰榆林海拔和坡度显著影响榆跳象幼虫发生程度, 海拔 1 800 m 和急坡灰榆林榆跳象幼虫密度最大。在山地景观中, 海拔因子是决定山地生境差异的主导因子 (杨贵军等, 2016; 杨益春等, 2017)。坡向影响地面接收太阳辐射的强度和时

热量条件, 从而影响榆跳象在不同坡向寄主植物聚集, 榆跳象趋向于中段海拔冷湿的坡向的灰榆林聚集。在较陡半阴坡向的灰榆林光照充分, 更有利于榆跳象幼虫聚集。海拔和地形的综合作用, 影响对太阳辐射和降水的空间再分配, 能够对群落结构和物种多样性分布形成显著影响 (Lewis *et al.*, 2004), 不同沟道的气温、降水、太阳辐射等气候因子差异可能会影响榆跳象幼虫的空间分布, 因此, 微景观下气候因子也可能是榆跳象幼虫发生重要影响因素。

参考文献 (References)

- Abduwaha Aziz, Adili Shatar, 2016. Survey on selecting elm types and spatial distribution of larvae of *Raynchaenus alni* Linnaeus. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 39(2): 127–131. [阿不都瓦哈·艾再子, 阿地力·沙塔尔, 2016. 榆跳象对榆树种类的选择性及幼虫空间分布调查. 新疆农业大学学报, 39(2): 127–131.]
- Bañuelos MJ, Kollmann J, 2011. Effects of host-plant population size and plant sex on a specialist leaf-miner. *Acta Oecologica*, 37(2): 58–64.
- Chen B, 1988. Habits and control techniques of *Rhynchaenus alni* Linnaeus. *Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology*, (1): 39–41. [陈斌, 1988. 榆跳象生活习性及其防治技术. 内蒙古林业科技, (1): 39–41.]
- Cornelissen T, Stiling P, 2008. Clumped distribution of oak leaf miners between and within plants. *Basic and Applied Ecology*, 9(1): 67–77.
- Dai XH, Zhu CD, Xu JS, Liu RL, Wang XX, 2011. Effects of physical leaf features of host plants on leaf-mining insects. *Acta Ecologica Sinica*, 31(5): 1440–1449. [戴小华, 朱朝东, 徐家生, 刘仁林, 王学雄, 2011. 寄主植物叶片物理性状对潜叶昆虫的影响. 生态学报, 31(5): 1440–1449.]
- Ding YQ, 1994. *Insect Mathematical Ecology*. Beijing: Science Press. 22–58. [丁岩钦, 1994. 昆虫数学生态学. 北京: 科学出版社. 22–58.]
- Ding YQ, 1980. *Insect Population Mathematical Ecology Principles and Applications*. Beijing: China Science Press. 22–122. [丁岩钦, 1980. 昆虫种群数学生态学原理与应用. 北京: 科学出版社. 22–122.]
- Gao H, Han XQ, Feng AR, Cheng WN, 2016. Spatial distribution pattern and population dynamics of *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) larvae in wheat cultivars with different resistance levels. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(5): 1138–1145. [高贺, 韩宪琪, 冯安荣, 成卫宁, 2016. 不同抗性小麦品种上麦红吸浆虫幼虫的空间分布型与理论抽样数. 应用昆虫学报, 53(5): 1138–1145.]
- Hespenheide HA, 1991. Bionomics of leaf-mining insects. *Annual Review of Entomology*, 36: 535–560.
- Iwao S, 1972. Application of the m^*-m method to the analysis of spatial patterns by changing the quadratic size. *Researches on Population Ecology*, 14 (1): 97–128.
- Jiang XC, Li ZH, Cao ZY, He SQ, Li ZY, Liu JY, Gui FR, 2013. Population dynamics and spatial distribution of thrips on vegetables flowers. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(6): 1628–1636. [蒋兴川, 李志华, 曹志勇, 和淑琪, 李正跃, 刘建业, 桂富荣, 2013. 蔬菜花期蓟马的种群动态与空间分布研究. 应用昆虫学报, 50(6): 1628–1636.]
- Kang L, Chen B, Wei JN, 2009. Roles of thermal adaptation and chemical ecology in *Liriomyza* distribution and control. *Annual Review of Entomology*, 54: 127–145.
- Liang CZ, Zhu ZY, Li ZG, 2012. The Vegetation of Helan Mountains. Yinchuan: Sun Press. 158–165. [梁存柱, 朱宗元, 李志刚, 2012. 贺兰山植被. 银川: 阳光出版社. 158–165.]
- Liu QF, Kang MY, Liu QR, 2006. Quantitative classification and environmental interpretation of forest tree species in Hungou, Zhongtiao Mountain. *Journal of Plant Ecology*, 30(3): 383–391. [刘秋锋, 康慕谊, 刘全儒, 2006. 中条山混沟地区森林乔木种的数量分类与环境解释. 植物生态学报, 30(3): 383–391.]
- Lan XP, 1996. Discussion on the Taylor's law. *Scientia Silvae Sinicae*, 32(1): 86–91. [兰星平, 1996. 关于 Taylor 幂法则的讨论. 林业科学, 32(1): 86–91.]
- Lewis KJ, Trummer LM, Thompson RD, 2004. Incidence of tomentosus root disease relative to spruce density and slope position in south-central Alaska. *Forest Ecology and Management*, 194(1): 159–167.
- Li XY, 1999. Bionomics of *Rhynchaenus alni* Linnaeus and its control. *Entomological Knowledge*, 36(3): 156–158. [李晓燕, 1999. 榆跳象生物学特性及防治. 昆虫知识, 36(3): 156–158.]
- Li YH, Liu HJ, 2004. Research on the occurrence and prevention of *Rhynchaenus alni* Linnaeus. *Liaoning Agricultural Sciences* in 2004. Liaoning. 100. [李玉华, 刘洪军, 2004. 榆跳象发生与防治研究. 2004 年辽宁农业科学研讨会. 辽宁. 100.]
- Si ZH, Shao JX, Shi YH, Liu BT, Dong XZ, 1997. Biological characteristics observation and prevention test of *Rhynchaenus alni* Linnaeus. *The Journal of Hebei Forestry Science and Technology*, (2): 10–12. [司振海, 邵吉祥, 石用虎, 刘保太, 董绪增, 1997. 榆跳象生物学特性观察与防治试验. 河北林业科技, (2): 10–12.]
- Tang XY, Chen B, Li ZY, Li ZY, Wang F, 2010. Spatial distribution

- patterns and theoretical sampling of *Sogatella furcifera* of nymph in rice terrace fields in Yuanyang. *Chinese Bulletin of Entomology*, 47(5): 950–957. [唐小艳, 陈斌, 李正跃, 李梓亦, 王芳, 2010. 云南元阳梯田水稻田白背飞虱若虫空间分布型及理论抽样数. 昆虫知识, 47(5): 950–957.]
- Taylor LR, 1961. Aggregation variance and the mean. *Nature*, 189(4766): 732–735.
- Wang ZW, Fan WZ, Wen GX, Liu XC, 2000. Biological characteristics and control techniques of *Rhynchaenus alni* Linnaeus//To Twenty-first Century Chinese Entomology-Proceedings of the 2000 Academic Annual Conference of the Entomological Society of China. Hubei. 806–807. [王忠武, 范文忠, 魏国先, 刘希才, 2000. 榆跳象生物学特性及防治技术. 走向 21 世纪的中国昆虫学-中国昆虫学会 2000 年学术年会论文集. 湖北. 806–807.]
- Xue J, Guo X, Hu DS, 1990. Study on the distribution pattern and sampling technique of *Rhynchaenus alni*. *Journal of Forestry Engineering*, (2): 33–36. [薛杰, 郭霞, 胡东升, 1990. 榆跳象分布型及抽样技术的研究. 林业科技开发, (2): 33–36.]
- Yang GJ, Jia L, Zhang JY, Yu YZ, 2016. Distribution of darkling beetles and its relationships with topography in Henlan Mountain, Ningxia. *Journal of Environmental Entomology*, 38(1): 77–86. [杨贵军, 贾龙, 张建英, 于有志, 2016. 宁夏贺兰山拟步甲科昆虫分布与地形的关系. 环境昆虫学报, 38(1): 77–86.]
- Yang YC, Yang GJ, Wang J, 2017. Effects of topographic factors on the distribution pattern of carabid species diversity in the Helan Mountains, northwestern China. *Acta Entomologica Sinica*, 60(9): 1060–1073. [杨益春, 杨贵军, 王杰, 2017. 地形对贺兰山步甲群落物种多样性分布格局的影响. 昆虫学报, 60(9): 1060–1073.]
- Yong YG, Wu Y, Cheng XT, Liu ZJ, WU SM, Cheng DH, 2018. Correlation analysis between damaged leaf and number of vesicle of *Rhynchaenus alni*. *Forest Pest and Disease*, 37(1): 21–23. [杨永刚, 吴仪, 程晓甜, 刘忠军, 吴世明, 成东辉, 2018. 新疆地区榆跳象囊泡数与被害叶片相关性分析. 中国森林病虫, 37(1): 21–23.]
- Zhou JX, Li HH, Han CX, 1987. Biological observation and prevention research of *Rhynchaenus alni* Linnaeus. *Shaanxi Forest Science and Technology*, (2): 78–82. [周嘉熹, 李后魂, 韩崇选, 1987. 榆跳象的生物学观察及其防治研究. 陕西林业科技, (2): 78–82.]
- Zhang YQ, Zong SX, Liu YH, Wen JB, Yan ZW, Lou YQ, 2012. Spatial distribution of *Trabala vishnou gigantina* Yang pupae in Shaanxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 32(20): 6308–6317. [章一巧, 宗世祥, 刘永华, 温俊宝, 闫占文, 骆有庆, 2012. 陕西省栎大黄枯叶蛾蛹的空间分布. 生态学报, 30(20): 6306–6317.]