沙枣树对光肩星天牛种群的空间格局影响*

王 萱[1**] 杨宗基[1] 胡玉兄[1] 任利利[2]
骆有庆[2] 陈宇琳[3] 王东兴[4] 王立祥[1***]

（1. 甘肃农业大学植物保护学院，兰州 730070；2. 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；
3. 新疆巴音郭楞蒙古自治州林业有害生物防治检疫局，库尔勒 841000; 4. 酒泉市肃州区林业技术服务中心，酒泉 735000）

摘 要 **【目的】** 光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* 是一种重要的林木蛀干害虫，近年来在甘肃河西走廊和新疆部分地区猖獗危害，对我国三北防护林工程建设造成了极大威胁。本文研究了配植沙枣树 *Elaeagnus angustifolia* 对林分中光肩星天牛种群空间格局的影响，以期为基于配植诱杀树沙枣混交造林生态自控（Ecological self-regulation）光肩星天牛提供依据。**【方法】** 应用地统计学方法，分析了诱杀树沙枣与抗性树种新疆杨 *Populus alba* var. *pyramidalis* 的混交林中光肩星天牛种群的空间分布格局。**【结果】** 不同林分中天牛刻槽、排粪孔+羽化孔和刻槽+排粪孔+羽化孔均为聚集分布，最优拟合模型为指数模型、高斯模型和球状模型。配植沙枣的林分中天牛刻槽和刻槽+排粪孔+羽化孔的聚集程度强于防护林新疆杨纯林。防护林新疆杨纯林中天牛排粪孔+羽化孔的空间依赖范围最大，在 2.89 m 范围内聚集；配植沙枣的混交林中天牛刻槽的空间依赖范围均最大，其中沙枣与线叶柳 *Salix wilhelmsiana*、旱柳 *S. matsudana* 和新疆杨混交的防护林窄林带中天牛刻槽在 2.99 m 范围内聚集，沙枣与新疆杨混交的防护林宽林带中天牛刻槽在 12.98 m 范围内聚集，沙枣与新疆杨混交的园林绿化林中天牛刻槽在 12.37 m 范围内聚集；说明光肩星天牛向沙枣的聚集性强。对比不同林分光肩星天牛危害特征的矢量叠加图与野外调查结果可知，光肩星天牛种群均向沙枣树聚拢，且当沙枣与新疆杨 2 种树种混交时，光肩星天牛向沙枣的聚集性更强，天牛种群分布更集中。**【结论】** 不同林分中光肩星天牛种群均呈聚集分布，在配植沙枣树的混交林中，沙枣能够引诱光肩星天牛刻槽产卵，起到保护新疆杨的作用。

关键词 光肩星天牛；林分模式；空间格局；地统计学；聚集分布

The effect of *Elaeagnus angustifolia* on the distribution of *Anoplophora glabripennis*

WANG Xuan[1**] YANG Zong-Ji[1] HU Yu-Xiong[1] REN Li-Li[2]
LUO You-Qing[2] CHEN Yu-Lin[3] WANG Dong-Xing[4] WANG Li-Xiang[1***]

(1. College of Plant Protection, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;
2. Beijing Key Laboratory for Forest Pest Control of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
3. Forestry Pest Control and Quarantine Bureau of Xinjiang Bayingolin Mongol Autonomous Prefecture, Korla 841000, China;
4. Forestry Technical Service Centre, Suzhou District, Jiuquan City, Jiuquan 735000, China)

Abstract **[Aim]** To investigate the effect of the trap-tree *Elaeagnus angustifolia* on the spatial distribution of the Asian longhorn beetle, *Anoplophora glabripennis*, with the aim of assessing the feasibility of controlling *A. glabripennis* by planting *E. angustifolia*. **[Methods]** Geostatistical methods were employed to analyze the spatial distribution pattern of *A. glabripennis* in mixed forest stands that included *E. angustifolia* and the resistant tree species *Populus alba* var. *pyramidalis*. **[Results]** The distribution of the *A. glabripennis* oviposition scars, frass holes + emergence holes, and oviposition scars +

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金项目（32501666）；嘉峪关市重点研发计划（24-23）；兰州市科技计划项目（2023-QN-47）

**第一作者 First author，E-mail：wangxuan3639@163.com
***通讯作者 Corresponding author，E-mail：wanglx@gsau.edu.cn

收稿日期 Received：2025-02-24；接受日期 Accepted：2025-06-05

frass holes + emergence holes were aggregated in different forest stands. The distribution of these features best fitted exponential, Gaussian, and spherical models, respectively. The aggregation of oviposition scars, oviposition scars + frass holes + emergence holes was more pronounced in stands planted with *E. angustifolia* than in a shelterbelt of pure *P. alba* var. *pyramidalis*. The spatial dependence range of frass holes + emergence holes in a shelterbelt of pure *P. alba* var. *pyramidalis* stands was the largest, with clustering within a range of 2.89 m. The spatial dependence range of oviposition scars was largest in stands with *E. angustifolia*; the clustering range was 2.99 m in narrow shelterbelts comprised of *E. angustifolia*, *Salix wilhelmsiana*, *S. matsudana*, and *P. alba* var. *pyramidalis*, 12.98 m in wide shelterbelts containing *E. angustifolia* and *P. alba* var. *pyramidalis*, and 12.37 m in landscaping forests containing *E. angustifolia* and *P. alba* var. *pyramidalis*, indicating a strong association between *A. glabripennis* and *E. angustifolia*. A comparison of vector overlay maps of pest damage characteristics in different forest stands with the results of field surveys indicates that *A. glabripennis* tends to cluster around *E. angustifolia*. Moreover, in stands containing both *E. angustifolia* and *P. alba* var. *pyramidalis*, *A. glabripennis* tends to be more abundant on *E. angustifolia*, causing the *A. glabripennis* population to become more concentrated. **[Conclusion]** *A. glabripennis* has a clumped distribution in different forest stands. Because *A. glabripennis* prefers to lay eggs on *E. angustifolia*, planting the latter species may protect *P. alba* var. *pyramidalis*.

Key words *Anoplophora glabripennis*; forest stand configuration; spatial pattern; geostatistics; clustered distribution

光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis*，属鞘翅目 Coleoptera，天牛科 Cerambycidae，沟胫天牛亚科 Lamiinae，星天牛属 *Anoplophora*，是重大林木钻蛀性害虫，主要危害杨属 *Populus*、柳属 *Salix*、槭属 *Acer*、榆属 *Ulmus* 等树木（Haack *et al*., 2010; 李浩培等, 2020）。20 世纪 90 年代初，光肩星天牛对部分地区的“三北”防护林一期和二期工程以杨树为主的林分造成了毁灭性危害。目前，光肩星天牛在甘肃河西走廊和新疆部分地区暴发成灾，对我国“三北”防护林体系建设造成了极大威胁（罗立平等, 2018; Wang *et al*., 2023）。美国纽约在 1996 年首次发现光肩星天牛的入侵，现已扩散至北美和欧洲的多个国家和地区（Mason *et al*., 2021）。

沙枣树 *Elaeagnus angustifolia* 属于胡颓子科 Elaeagnaceae 胡颓子属 *Elaeagnus*，落叶乔木，其特点为生长迅速、抗干旱、耐盐碱等，作为西北地区固沙造林优良树种被广泛栽植。李丰等（1999）发现光肩星天牛在沙枣、欧洲三倍体山杨、中林 115 号和中林 34 号等树种上不能完成世代发育，提出诱杀树种的概念。田润民等（2003）研究发现沙枣能引诱光肩星天牛成虫产卵，还能控制其卵不能发育为幼虫，有调节天牛种群数量的功能，因此被认为具有诱杀天牛的特性。桑巴叶等（2010）研究发现沙枣对光肩星天牛具有诱杀功能，建议在天牛疫区造林时选用沙枣树。邵鹏鹏等（2023）研究发现沙枣对光肩星天牛成虫有一定引诱性，且天牛幼虫在沙枣上均未成活。杨宗基等（2024）调查发现，在光肩星天牛入侵的甘肃河西走廊和新疆等地，沙枣树上光肩星天牛补充营养的痕迹和刻槽产卵的数量极高，但由于沙枣自身的泌胶特性，光肩星天牛所产的卵及初孵幼虫多被其刻槽处分泌的树胶包裹窒息，致死率高达 99.8%之上，对光肩星天牛展现出了很强的诱杀能力。

昆虫的空间格局是指昆虫种群在相对静止状态下的空间分布状况，是其生物学习性与其特定环境条件相互作用的结果，反映空间结构异质性程度，对估计种群密度等具有重要意义（孙婧, 2005; 王晨等, 2023）。在研究空间格局时，传统的生物学统计方法只能提供空间分布的定性信息，无法准确确定分布的位置和程度（唐艳龙等, 2018）。地统计学是一种基于区域化变量理论的空间分析方法，用于研究地理数据的空间相关性和结构特征（Liebhold *et al*., 1993）。其优点在于能够精确描述昆虫空间分布的变异性，适合分析森林害虫如蛀干害虫的分布格局（唐艳龙等, 2018）。本研究选用地统计学是由于光肩星天牛作为蛀干害虫，其危害特征具有明显的空间相关性，传统统计方法难以准确呈现其分布特征。地统计学方法能最大理想化描述空间联系和空间范围依托性，克服昆虫种群空间格局动态研究中

处理多维空间数据的难度指数所带来的复杂程度和动态混乱度（Aitta *et al*., 2019; 杨阳等, 2019）。

Zhu 等（2019）在研究森林中蛀干害虫的空间分布时，采用地统计学方法，通过半变异函数分析揭示了虫害的空间自相关性，得出了不同林分结构对昆虫空间分布的调控作用，这一应用实例展示了地统计学方法在昆虫生态学中的重要作用，进一步验证了本研究方法选择的合理性。李友常等（1997）应用地统计学方法，对农田、村庄、干道和干渠防护林内的光肩星天牛卵、幼虫和成虫种群的空间格局进行了深入研究；李建庆等（2016）利用地统计学方法对危害白蜡的云斑白条天牛 *Batocera lineolata* 卵、幼虫、成虫（蛹）的空间格局进行了研究；高丙涛等（2020）应用地统计学方法，分析不同受害程度的油松林内和重度受害油松林内不同时间的红脂大小蠹 *Dendroctonus valens* 成虫侵入孔的空间分布格局。此外，一些研究证实树种配植方式对森林害虫分布格局有影响。对杨盾蚧 *Diaspidiotus slavonicus* 空间分布格局差异的影响因素进行分析发现，混交林较于纯林发生虫害的可能性较小，且不具有扩散性；轻、中、重 3 种不同受害程度纯林中，虫害的发生呈现空间聚集性（付园园等, 2019）；张倩倩等（2025）研究发现，与行带混交林和块状混交林相比，株间混交林内发生白蜡窄吉丁 *Agrilus planipennis* 虫害的可能性小，幼虫数量由聚集中心向周围逐渐减少，且行带混交与块状混交受害林中白蜡窄吉丁幼虫空间分布存在明显的边缘效应，虫害的发生呈空间聚集性，这与刘永华等（2018）研究结果一致。潘杰等（2011）用地统计学方法研究油松纯林和混交林内红脂大小蠹种群的空间分布特性发现，轻度受害纯林与重度受害纯林内红脂大小蠹种群均表现为较强的空间聚集性，而混交林内其种群则表现为随机分布。目前，已有研究发现沙枣树具备高效引诱和强力杀灭光肩星天牛的双重功能，可被用作光肩星天牛的诱杀树种（李呈澄等, 2025），但配植沙枣的混交林中沙枣树是否能够影响光肩星天牛的种群分布尚无报道。利用地统计学方法研究配植沙枣的林分中光肩星天牛的空间格局，可进一步证明配植沙枣的多树种混交林中沙枣对光肩星天牛发挥的诱控能力。

本试验从不同林分角度出发，结合实地条件对现有新疆杨纯林和配植沙枣的防护林窄林带（沙枣树、线叶柳 *Salix wilhelmsiana*、新疆杨 *Populus alba* var. *pyramidalis* 及旱柳 *S. matsudana* 混交）、防护林宽林带（沙枣树和新疆杨混交）及园林绿化林（沙枣树和新疆杨混交）4 种林分中光肩星天牛的危害特征进行调查，并应用地统计学方法，分析光肩星天牛的刻槽、排粪孔和羽化孔在不同林分中的空间格局，以反映不同林分条件下光肩星天牛的危害特性，以期为合理配植诱杀树沙枣与抗性树种新疆杨，持续生态自控光肩星天牛灾害提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究样地位于甘肃省河西走廊的嘉峪关市（龙王滩公园外围：39°44′58.76″N，98°18′14.99″E；黑山湖养护工区：39°47′20.76″N，98°08′30.12″E；阳关路旁：39°46′46.46″N，98°15′4.32″E）和新疆巴音郭楞蒙古自治州的焉耆县（永宁镇西大渠村：42°02′40.92″N，86°31′32.16″E），均属温带大陆性荒漠气候。因地处戈壁腹地，年平均降水量少，蒸发量大，植被稀疏，树种结构单一，物种多样性低，自我调节能力不足（郑岚等, 2021）。试验样地分别选取嘉峪关龙王滩公园外围的新疆杨纯林防护林（以下简称新疆杨纯林）、嘉峪关市黑山湖养护工区的混交防护林（以下简称防护林窄林带）、新疆巴音郭楞蒙古自治州焉耆县永宁镇西大渠村混交防护林（以下简称防护林宽林带）和嘉峪关市阳关路旁混交园林绿化林（以下简称园林绿化林带）。本文中的宽林带指宽度为 10 m 的防护林林带，窄林带指宽度为 4 m 的防护林林带，代表了甘肃河西走廊和新疆等地自然条件下的防护林结构，其中防护林窄林带由沙枣、新疆杨、旱柳和线叶柳组成，其他混交林均由沙枣树和新疆杨组成；上述样地均有光肩星天牛危害。样地基本信息见表 1。

表 1　样地基本情况

Table 1　Basic information of sample lands

地点 Location	具体地名 Detailed location	样地类型 Sample plots type	样方大小 长（m）×宽（m） Sample size Length (m) × width (m)	配植模式 Configuration patterns	树种类型 Tree species type	树种比例（%） Proportion of tree species (%)
甘肃嘉峪关市（39°44′58.76″N，98°18′14.99″E） Jiayuguan City, Gansu Province	甘肃嘉峪关市龙王滩公园外围 Peripheral area of Longwangtan Park, Jiayuguan City, Gansu Province	纯林防护林 Pure stand shelterbelt	10 × 5	—	新疆杨 *P. alba* var. *pyramidalis*	100.0
甘肃嘉峪关市（39°47′20.76″N，98°08′30.12″E） Jiayuguan City, Gansu Province	甘肃嘉峪关市黑山湖养护工区 Heishan Lake Maintenance Zone, Jiayuguan, Gansu	混交防护林（窄林带） Mixed forest shelterbelt (narrow belt)	50 × 4	株间配植 Interplanting between individuals	沙枣树 *E. angustifolia*	22.5
					线叶柳 *S. wilhelmsiana*	39.9
					新疆杨 *P. alba* var. *pyramidalis*	28.9
					旱柳 *S. matsudana*	8.7
新疆焉耆县（42°02′40.92″N，86°31′32.16″E） Yanqi County, Xinjiang Uygur Autonomous Region	新疆巴音郭楞蒙古自治州焉耆县永宁镇西大渠村 Xidaqu Village, Yongning Town, Yanqi County, Bayingolin Mongol Autonomous Prefecture, Xinjiang Uygur Autonomous Region	混交防护林（宽林带） Mixed forest shelterbelt (wide belt)	50 × 10	行间配植 Inter-row planting	沙枣树 *E. angustifolia*	26.2
					新疆杨 *P. alba* var. *pyramidalis*	73.8
甘肃嘉峪关市（39°46′46.46″N，98°15′4.32″E） Jiayuguan City, Gansu Province	甘肃嘉峪关市阳关路旁 Along Yangguan Road, Jiayuguan, Gansu	混交园林绿化林 Mixed-species landscaping forests	50 × 20	株间配植 Interplanting between individuals	沙枣树 *E. angustifolia*	31.7
					新疆杨 *P. alba* var. *pyramidalis*	68.3

1.2 调查方法

对光肩星天牛的个体发育而言，其刻槽、排粪孔和羽化孔之间具有先后关系，卵未孵化之前树皮表面呈现为刻槽；当刻槽内的卵孵化为幼虫后，幼虫取食排粪，此刻槽就变成了排粪孔；幼虫进一步生长发育，化蛹并羽化钻出树体外，形成羽化孔。试验调查时间为 2023 年 5-6 月，此时前一年刻槽内的卵应均已孵化为幼虫，变为排粪孔。但由于多种因素，部分卵未能正常孵化，外观仍为刻槽。

根据光肩星天牛对沙枣和新疆杨的危害特征和树种配植方式，以新疆杨纯林试验样地作为对照，与配植沙枣与新疆杨的其他样地进行对比分析。具体调查方式如下：选取上述不同配植模式林带的样方各一块进行详细调查，每块样方逐一调查全部样树，记录样方内每株样树的树高、胸径，天牛刻槽、排粪孔及羽化孔数量等信息（表 2），同时利用北斗智能手持终端 UG908（北京合众思壮科技股份有限公司）记录每株样树的相对空间位置。沙枣在天牛刻槽处会有树胶流出凝成团状胶块，通过胶块数量记录刻槽数。为明确配植沙枣树的混交林中沙枣是否具有诱杀光肩星天牛的效果，本文分别对天牛的刻槽、排粪孔+羽化孔以及刻槽+排粪孔+羽化孔的分布进行半变异函数理论模型拟合。其中刻槽表示产卵后未能孵化的天牛，排粪孔+羽化孔表示能正常生长发育的天牛，刻槽+排粪孔+羽化孔表示不同树种上天牛的相对密度，以此评估沙枣的诱杀能力和天牛种群的空间格局。

1.3 研究方法

1.3.1 半变异函数 半变异函数也称半方差函数，是地统计学分析中的关键变异函数。由于光肩星天牛种群发生量在空间区域内为变量，所以用该函数分析天牛种群发生量在特定范围内的空间相关性，利于揭示天牛种群的空间分布。计算公式如下：

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[z(x_i)-z(x_i+h)]^2$$

式中：$\gamma(h)$为两样点空间分隔距离 h 的半方差函数值，$N(h)$是间隔 h 的数据对(x_i, x_i+h)的数量，$Z(x_i)$和 $Z(x_i+h)$分别是在点 x_i 和 x_i+h 处样本的测量值。

半变异曲线图（图 1）是 $\gamma(h)$对间隔距离 h 的函数图，图中最重要的参数是块金常数（Nugget）、基台值（Sill）和变程（Range）（柴庆辉, 2013）。C_0 是块金常数，它代表函数曲线在纵轴的截距；这个常数反映了原点处半变异函数的波动性，也反映了区域化变量的局部随机性大小。基台值是半方差函数值达到稳定的平衡值，它反映了区域化变量的变化幅度。变程也称为空间依赖范围，它指的是半方差函数值达到基台值时的间隔距离，反映了区域化变量的自相关范围（Zhu *et al*., 2019），表征天牛刻槽、排粪孔或羽化孔的分布在一定距离内呈聚集性。$C/(C+C_0)$为空间结构比率，反映了空间结构系数在样点变量差异中所占的比率，大小可判定系统内变量的空间相关程度（李建庆等, 2016），介于 25%-75%之间，有中等程度的空间相关性，表征天牛刻槽、排粪孔或羽化孔数量的稳定性较强，大于 75%则具有较强的空间相关性，表征天牛刻槽、排粪孔或羽化孔数量的稳定性较差。利用半变异函数参数定量化天牛聚集特性，分析天牛虫口密度与不同树种空间分布位置的关系，明确沙枣在不同林分模式中对光肩星天牛的引诱能力。

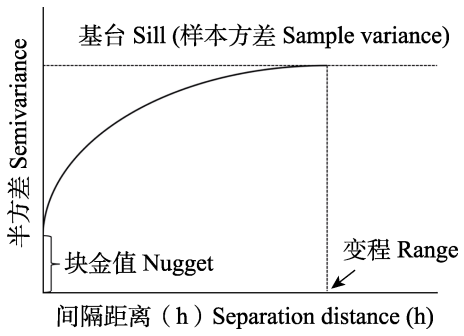

图 1 半变异函数模式图
Fig. 1 A schematic diagram of semivariogram

1.3.2 半变异函数理论模型的拟合 半变异函数的理论模型有多种，其中包括线性模型、指数

模型、球状模型和高斯模型。这些模型被广泛应用于昆虫研究种群在空间上的分布格局和空间依赖关系。线性模型适用于描述昆虫种群在空间上的随机或均匀分布，而其他 3 种模型则适用于描述种群的聚集分布。不同模型所对应的空间结构也存在显著差异。决定系数、残差平方和、变程和块金常数的大小被作为拟合模型最终选择的参考依据（潘杰等, 2011）。本文使用 GS+9.0 软件拟合光肩星天牛不同危害特征空间分布格局的理论模型。

1.3.3　空间分布图的生成　在选择最优拟合模型的基础上，利用 Kriging 插值法对样地中光肩星天牛种群空间布局进行插值分布，并借助 Surfer 8.0 软件生成空间分布图（车磊等, 2017）。

2　结果与分析

2.1　不同林分模式中光肩星天牛危害特征的半变异函数和空间格局

在不同林分模式中，光肩星天牛危害特征呈现出不同的空间格局。通过半变异函数拟合模型参数及空间格局分析发现，不同林分模式下光肩星天牛都呈现聚集分布，但拟合模型与空间结构之间存在显著差异。相较于其他树种，混交林中沙枣树上天牛刻槽数和有虫株率均最高（株均刻槽数：27.83-80.21 个/株；有虫株率：76.92%-100.00%），而新疆杨整体受害程度较低（株均刻槽数≤0.78 个/株；有虫株率≤35.19%）。总体来看，新疆杨纯林光肩星天牛种群的聚集性较弱，配植沙枣的混交林中光肩星天牛种群的聚集性更强，这说明配植沙枣的混交林中沙枣对光肩星天牛的引诱和种群分布调控作用显著。具体的数据见表 2 和表 3。

2.2　防护林新疆杨纯林内光肩星天牛危害特征的空间格局分析

防护林新疆杨纯林中 3 种分析方式的理论模型均为指数模型，空间分布型均为聚集分布。半变异函数的决定系数 R^2 介于 0.45-0.58，平均值为 0.52，R^2>0，说明拟合模型的拟合程度较高（表 3，图 2：A-C）。由图 3 可知，新疆杨纯林中天牛刻槽分布数量极少，仅有几处呈斑块状聚集分布（图 3：A）；排粪孔+羽化孔数量较多，在样地中呈现较明显的片状聚集（图 3：B）；刻槽+排粪孔+羽化孔在样地也呈片状聚集分布（图 3：C）。说明新疆杨纯林中光肩星天牛卵多能正常发育为幼虫。

由拟合函数参数的块金值 C_0 可知（表 3），刻槽块金值最小，为 0.37，刻槽+排粪孔+羽化孔块金值最大，为 2，表明刻槽的随机程度较小，刻槽+排粪孔+羽化孔随机程度较大。刻槽的空间依赖范围最小，在 0.76 m 范围内聚集；排粪孔+羽化孔最大，在 2.89 m 范围内聚集；刻槽+排粪孔+羽化孔在 2.85 m 范围内聚集。由基台值 Sill 可知，刻槽基台值最小，为 0.76，表明刻槽的变化幅度较小，刻槽+排粪孔+羽化孔基台值最大，为 4，表明刻槽+排粪孔+羽化孔数量的变化幅度较大。由空间变异值 C/Sill 可知，刻槽、排粪孔+羽化孔和刻槽+排粪孔+羽化孔的空间变异值均 0.5 左右，说明新疆杨纯林的光肩星天牛危害特征在空间上相关性不强，意味着天牛危害特征在不同空间中相对稳定。

2.3　不同混交防护林光肩星天牛危害特征的空间格局分析

2.3.1　防护林窄林带光肩星天牛危害特征的空间格局分析　嘉峪关黑山湖防护林窄林带由诱杀树沙枣、抗性树种新疆杨与感虫树种线叶柳和旱柳混交组成，天牛的刻槽、排粪孔+羽化孔、刻槽+排粪孔+羽化孔的理论模型均为指数模型，半变异函数的决定系数 R^2 介于 0.22-0.25，平均值为 0.24，R^2>0，拟合程度较好（表 3）。根据拟合模型可知，光肩星天牛危害特征空间分布具有明显的空间结构，指数模型指明的空间分布型为聚集分布（图 4：A-C）。由图 5 可知，天牛刻槽的数量较多，主要在样地右侧沙枣树上呈聚集分布（图 5：A）；排粪孔+羽化孔数量较少，呈条带状聚集，主要分布在线叶柳与旱柳上（图 5：B）；刻槽+排粪孔+羽化孔在样地中呈片状聚集分布（图 5：C）。结合实地调查，

表 2　不同样地光肩星天牛危害情况

Table 2　The damage caused by *Anoplophora glabripennis* in different sampling plots

具体地名 Detailed location	树种类型 Tree species type	调查株数 Number of surveyed plants	平均胸径（cm） Average diameter at breast height (cm)	平均树高（m） Average height (m)	株均刻槽（个） Average oviposition scars per plant	株均排粪孔（个） Average frass holes per plant	株均羽化孔（个） Average emergence holes per plant	有虫株率（%） Rate of infested trees (%)
甘肃嘉峪关市龙王滩公园外围 Peripheral area of Longwangtan Park, Jiayuguan City, Gansu	新疆杨 *P. alba* var. *pyramidalis*	72	8.88±1.44	5.86±0.36	0.78±3.24	3.50±6.42	0.13±0.74	26.39
甘肃嘉峪关市黑山湖养护工区 Heishan Lake Maintenance Zone, Jiayuguan, Gansu	沙枣树 *E. angustifolia*	39	12.04±3.41	5.51±1.20	30.70±9.46	0.00±0.00	0.00±0.00	84.62
	线叶柳 *S. wilhelmsiana*	69	8.32±3.31	4.03±0.78	7.14±9.88	1.62±3.58	1.22±3.31	68.12
	新疆杨 *P. alba* var. *pyramidalis*	50	16.26±5.15	7.68±0.39	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00
	旱柳 *S. matsudana*	15	14.97±5.05	4.05±0.59	0.20±0.75	0.53±1.54	0.02±0.01	20.00
新疆巴音郭楞蒙古自治州焉耆县永宁镇西大渠村 Xidaqu Village, Yongning Town, Yanqi County, Bayingolin Mongol Autonomous Prefecture, Xinjiang	沙枣树 *E. angustifolia*	59	12.78±5.54	6.08±1.79	80.21±85.86	0.00±0.00	0.00±0.00	76.92
	新疆杨 *P. alba* var. *pyramidalis*	166	17.17±6.72	13.51±3.75	0.07±0.38	0.73±1.35	0.24±0.62	16.07
甘肃嘉峪关市阳关路旁 Along Yangguan Road, Jiayuguan, Gansu	沙枣树 *E. angustifolia*	52	13.87±5.17	4.79±0.54	27.83±13.53	0.15±0.77	0. 00±0.00	100.00
	新疆杨 *P. alba* var. *pyramidalis*	112	12.92±3.00	8.08±0.48	0.20±1.47	1.21±8.77	0.29±2.57	35.19

表中数据为平均值±标准差。

Data in the table are mean±SD.

表 3　不同林分光肩星天牛危害特征的半变异函数拟合模型参数及空间格局

Table 3　Semivariogram fitting model parameters and spatial patterns of the harm characteristics of *Anoplophora glabripennis* in different forest

样地名称 Sample site name	危害指标 Hazard indicators	理论模型 Theoretical model	块金常数 C_0 Nugget	拱高 C Partial sill	变程 A Range	基台值 C_0+C Sill	空间变异 C/Sill Spatial variation	决定系数 R^2 Coefficient of determi-nation	残差平方和 RSS Residual sum of squares	分布格局 Spatial distribution pattern
防护林新疆杨纯林 Shelterbelt of pure *P. alba* var. *pyramidalis* stands	刻槽 Oviposition scars	指数模型 Exponential model	0.37	0.39	0.76	0.76	0.51	0.45	0.11	聚集分布 Aggregation distribution
	排粪孔+羽化孔 Frass holes and emergence holes	指数模型 Exponential model	1.39	1.39	2.89	2.77	0.50	0.53	0.56	聚集分布 Aggregation distribution
	刻槽+排粪孔+羽化孔 Oviposition scars, frass holes and emergence holes	指数模型 Exponential model	2.00	2.00	2.85	4.00	0.50	0.58	1.09	聚集分布 Aggregation distribution
防护林窄林带 Narrow shelterbelt	刻槽 Oviposition scars	指数模型 Exponential model	1.85	10.22	2.99	12.07	0.85	0.24	6.78	聚集分布 Aggregation distribution
	排粪孔+羽化孔 Frass holes and emergence holes	指数模型 Exponential model	0.22	0.55	1.10	0.77	0.71	0.25	0.02	聚集分布 Aggregation distribution
	刻槽+排粪孔+羽化孔 Oviposition scars, frass holes and emergence holes	指数模型 Exponential model	1.96	10.22	1.07	12.18	0.84	0.22	7.59	聚集分布 Aggregation distribution
防护林宽林带 Wide shelterbelt	刻槽 Oviposition scars	球状模型 Spherical model	24.12	263.43	12.98	287.55	0.92	0.92	24.29	聚集分布 Aggregation distribution
	排粪孔+羽化孔 Frass holes and emergence holes	高斯模型 Gaussian model	0.28	2.32	0.15	2.60	0.89	0.18	0.16	聚集分布 Aggregation distribution
	刻槽+排粪孔+羽化孔 Oviposition scars, frass holes and emergence holes	指数模型 Exponential model	22.15	271.15	6.86	293.3	0.92	0.92	24.13	聚集分布 Aggregation distribution
园林绿化林带 Landscaping forests	刻槽 Oviposition scars	指数模型 Exponential model	4.13	4.13	12.37	8.26	0.82	0.70	3.95	聚集分布 Aggregation distribution
	排粪孔+羽化孔 Frass holes and emergence holes	指数模型 Exponential model	0.72	0.92	2.44	1.65	0.56	0.59	0.06	聚集分布 Aggregation distribution
	刻槽+排粪孔+羽化孔 Oviposition scars, frass holes and emergence holes	指数模型 Exponential model	1.51	6.76	5.09	8.27	0.62	0.84	4.45	聚集分布 Aggregation distribution

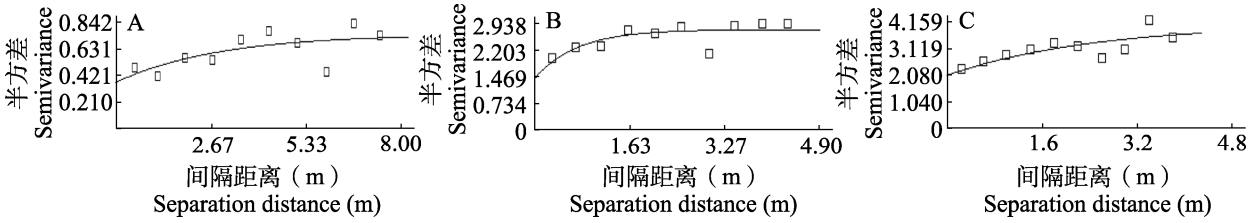

图 2　防护林新疆杨纯林内光肩星天牛危害特征的半变异函数图

Fig. 2　Semivariogram of the damage characteristics of *Anoplophora glabripennis* in the shelterbelt of pure *Populus alba* var. *pyramidalis* stands

A. 光肩星天牛刻槽数量；B. 光肩星天牛排粪孔+羽化孔数量；C. 光肩星天牛刻槽+排粪孔+羽化孔数量。

A. Number of *A. glabripennis* oviposition scars; B. Number of *A. glabripennis* frass holes and emergence holes; C. Number of *A. glabripennis* oviposition scars, frass holes and emergence holes.

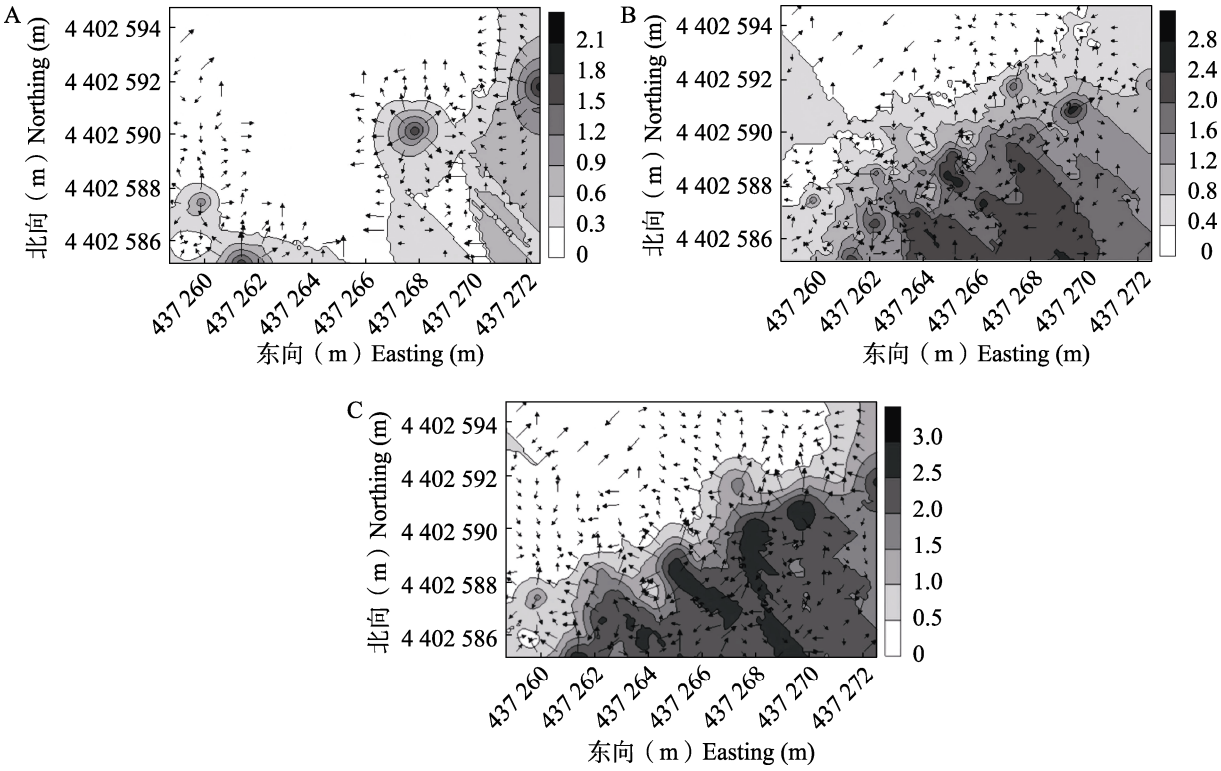

图 3　防护林新疆杨纯林光肩星天牛危害特征的等值线与矢量叠加图

Fig. 3　Contour and vector overlay map of the damage characteristics of *Anoplophora glabripennis* in the shelterbelt of pure *Populus alba* var. *pyramidalis* stands

A. 光肩星天牛刻槽数量；B. 光肩星天牛排粪孔+羽化孔数量；C. 光肩星天牛刻槽+排粪孔+羽化孔数量。右侧柱上标注数字越大表示颜色越深，即光肩星天牛危害特征数量越多；黑色箭头代表光肩星天牛危害特征的空间分布梯度变化；黑色箭头指向代表光肩星天牛危害特征变化方向。图 5、图 7 和图 9 同。

A. Number of *A. glabripennis* oviposition scars; B. Number of *A. glabripennis* frass holes and emergence holes; C. Number of *A. glabripennis* oviposition scars, frass holes and emergence holes. Higher values on the color scale to the right indicate deeper colors and a greater number of *A. glabripennis* infestation features; Black arrows denote the spatial gradient in the distribution of *A. glabripennis* infestation features; The direction of the black arrows indicates the changes in the hazard characteristics of *A. glabripennis*. The same for Fig. 5, Fig. 7 and Fig. 9.

该防护林带中沙枣的株均天牛刻槽数为 30.70 个，线叶柳的株均刻槽数为 7.14 个，新疆杨的株均刻槽数为 0 个，旱柳的株均刻槽数为 0.20 个（表 2），说明沙枣上光肩星天牛卵多未能正常孵化。相对于其他树种，沙枣对天牛展现出极强诱杀效果。

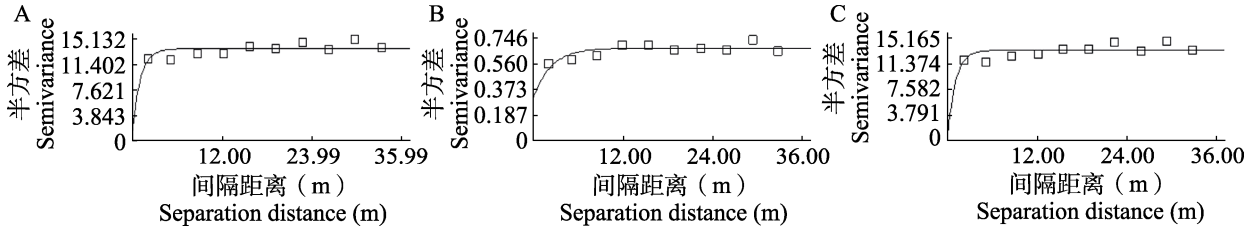

图 4　防护林窄林带内光肩星天牛危害特征的半变异函数图

Fig. 4　Semivariogram of the damage characteristics of *Anoplophora glabripennis* in narrow shelterbelt forests

A. 光肩星天牛刻槽数量；B. 光肩星天牛排粪孔+羽化孔数量；C. 光肩星天牛刻槽+排粪孔+羽化孔数量。

A. Number of *A. glabripennis* oviposition scars; B. Number of *A. glabripennis* frass holes and emergence holes; C. Number of *A. glabripennis* oviposition scars, frass holes and emergence holes.

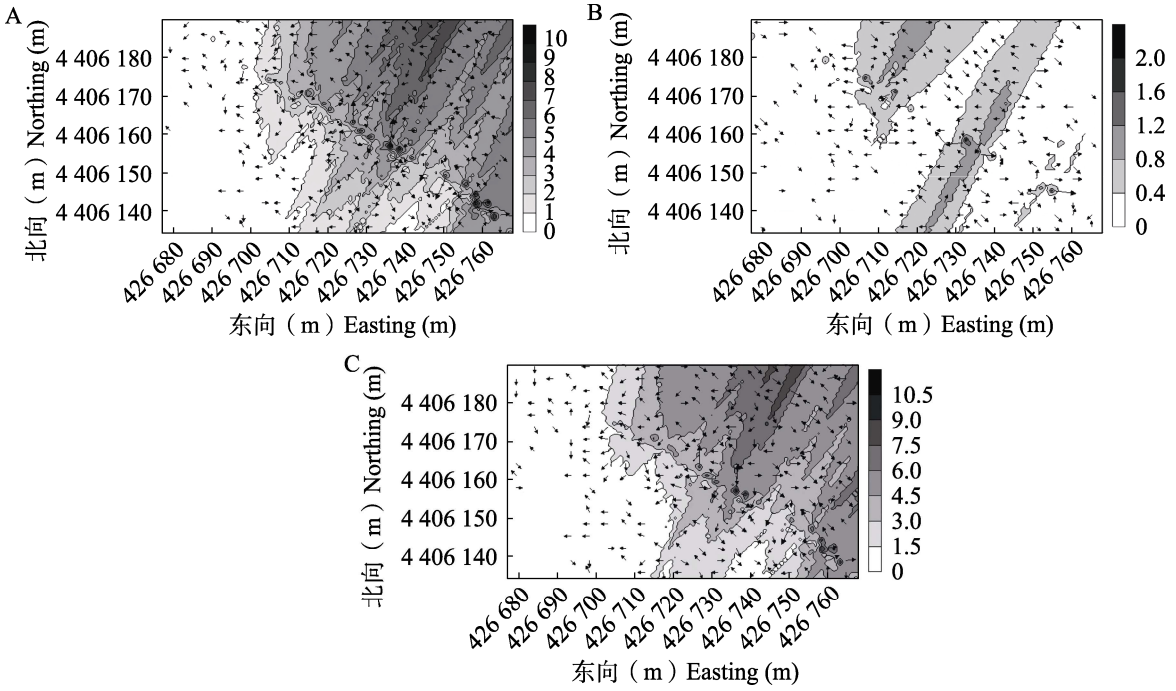

图 5　防护林窄林带光肩星天牛危害特征的等值线与矢量叠加图

Fig. 5　Contour and vector overlay map of the damage characteristics of *Anoplophora glabripennis* in narrow shelterbelt forests

A. 光肩星天牛刻槽数量；B. 光肩星天牛排粪孔+羽化孔数量；C. 光肩星天牛刻槽+排粪孔+羽化孔数量。

A. Number of *A. glabripennis* oviposition scars; B. Number of *A. glabripennis* frass holes and emergence holes; C. Number of *A. glabripennis* oviposition scars, frass holes and emergence holes.

由拟合函数参数的块金值 C_0 可知（表 3），排粪孔+羽化孔块金值最小，为 0.22，刻槽+排粪孔+羽化孔块金值最大，为 1.96，表明天牛排粪孔+羽化孔的随机程度较小，刻槽+排粪孔+羽化孔的随机程度较大。刻槽的空间依赖范围最大，在 2.99 m 范围内聚集；排粪孔+羽化孔在 1.10 m 范围内聚集；刻槽+排粪孔+羽化孔最小，在 1.07 m 范围内聚集。刻槽与刻槽+排粪孔+羽化孔基台值 Sill 均较大，表明刻槽与刻槽+排粪孔+羽化孔数量的变化幅度较大；排粪孔+羽化孔数量的变化幅度较小。天牛刻槽、排粪孔+羽化孔和刻槽+排粪孔+羽化孔的空间变异值 *C*/Sill 均大于 0.71，说明样方内光肩星天牛种群向沙枣树的聚集性很强。

2.3.2　防护林宽林带内光肩星天牛危害特征的空间格局分析　由表 3 和图 6（A-C）可知，3 种分析方式的理论模型为球状、高斯模型和指数模型，半变异函数的决定系数 R^2 介于 0.18-0.92，

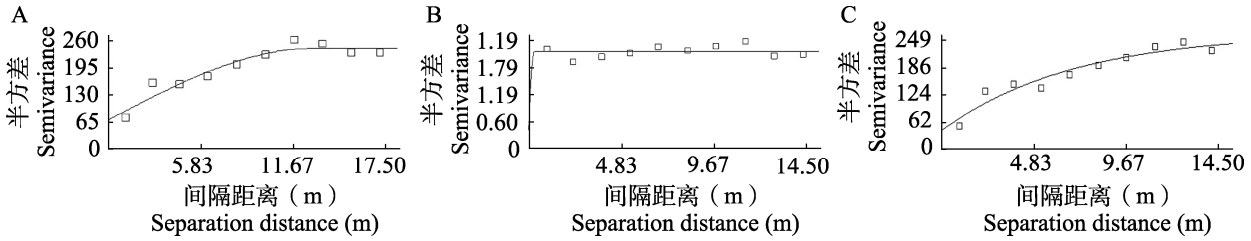

图 6 防护林宽林带光肩星天牛危害特征的半变异函数图

Fig. 6 Semivariogram of the damage characteristics of *Anoplophora glabripennis* in wide shelterbelt forests

A. 光肩星天牛刻槽数量；B. 光肩星天牛排粪孔+羽化孔数量；C. 光肩星天牛刻槽+排粪孔+羽化孔数量。

A. Number of *A. glabripennis* oviposition scars; B. Number of *A. glabripennis* frass holes and emergence holes; C. Number of *A. glabripennis* oviposition scars, frass holes and emergence holes.

平均值为 0.67，R^2>0，说明拟合模型的拟合程度较好。刻槽的残差平方和（Residual sum of squares，RSS）为 24.29，可能是因为该林分较稀疏导致的。根据拟合模型可知，光肩星天牛危害特征空间分布有明显的空间结构，理论模型指明的空间分布型均为聚集分布。由图 7 可知，天牛刻槽和刻槽+排粪孔+羽化孔在样地两侧呈大面积聚集分布（图 7：A，C），与沙枣的分布范围吻合（图 7：A）；排粪孔+羽化孔在样地中部呈聚集分布，是新疆杨分布范围（图 7：B）。结合样方调查数据发现（表 2），防护林宽林带中沙枣株均刻槽数为 80.21 个，株均排粪孔为 0；新疆杨株均刻槽数仅 0.07 个，株均排粪孔为 0.73 个。说明沙枣与新疆杨配植的防护林中光肩星天牛种群向沙枣树聚拢，沙枣对新疆杨起到了保护作用。

由拟合函数参数的块金值 C_0 可知，最小块金值 0.28，表明引起变量的随机程度较小，最大块金值为 24.12，表明引起变量的随机程度较大。刻槽的空间依赖范围最大，在 12.98 m 范围内聚集；排粪孔+羽化孔最小，在 0.15 m 范围内聚集；刻槽+排粪孔+羽化孔在 6.86 m 范围内聚集。

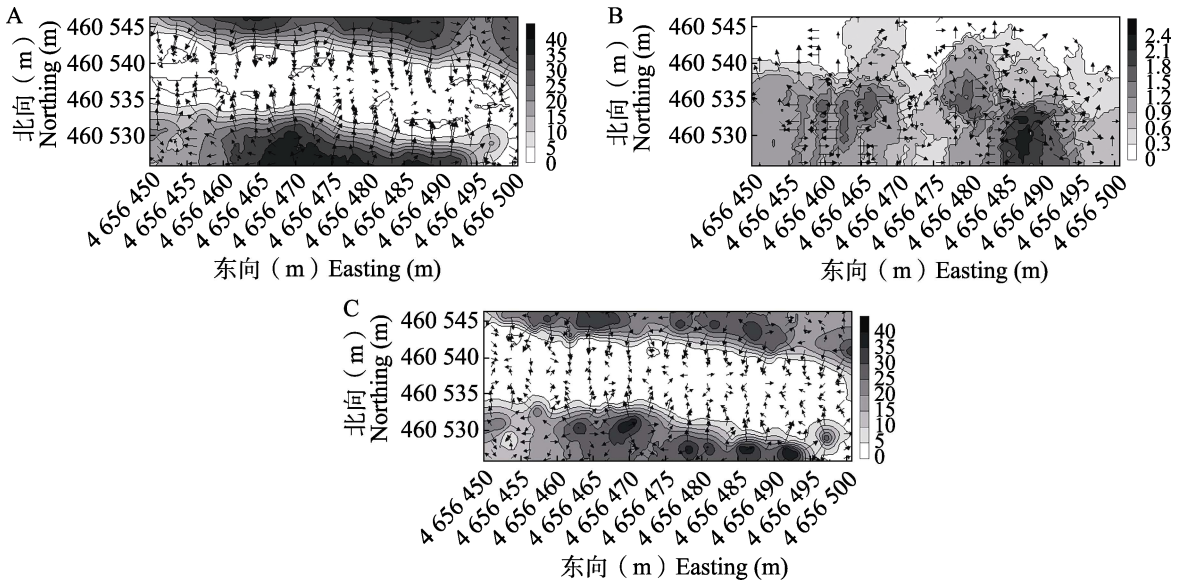

图 7 防护林宽林带光肩星天牛危害特征的等值线与矢量叠加图

Fig. 7 Contour and vector overlay map of the damage characteristics of *Anoplophora glabripennis* in wide protective forest belts

A. 光肩星天牛刻槽数量；B. 光肩星天牛排粪孔+羽化孔数量；C. 光肩星天牛刻槽+排粪孔+羽化孔数量。

A. Number of *A. glabripennis* oviposition scars; B. Number of *A. glabripennis* frass holes and emergence holes; C. Number of *A. glabripennis* oviposition scars, frass holes and emergence holes.

刻槽+排粪孔+羽化孔基台值 Sill 最大，为 293.3，表明刻槽+排粪孔+羽化孔的变化幅度较大；排粪孔+羽化孔基台值 Sill 最小，为 2.6，排粪孔+羽化孔的变化幅度较小。由天牛刻槽、排粪孔+羽化孔和刻槽+排粪孔+羽化孔的空间变异值 *C*/Sill 均大于 0.89，说明样方内光肩星天牛种群向沙枣树的聚集性很强。

由上述可知，在防护林宽林带和窄林带中，沙枣对光肩星天牛均表现出很强的引诱能力，对新疆杨起到了高效的保护作用。因宽林带由沙枣与新疆杨混交，光肩星天牛主要聚集在沙枣周围，沙枣的天牛刻槽空间依赖范围为 12.98 m，聚集区域广泛、聚集性强，天牛种群分布较集中；窄林带由沙枣、新疆杨、线叶柳和旱柳混交，光肩星天牛对沙枣仍表现出很强的聚集性，但线叶柳和旱柳上也有部分天牛种群，导致天牛种群的聚集性出现一定程度的分散。

2.4　混交园林绿化林光肩星天牛危害特征的空间格局分析

园林绿化林由新疆杨和沙枣混交，天牛刻槽、排粪孔+羽化孔、刻槽+排粪孔+羽化孔的理论模型均为指数模型（表 3，图 8：A-C），光肩星天牛在沙枣和新疆杨上危害特征的空间分布具有明显的空间结构，空间分布型均为聚集分布。半变异函数的决定系数 R^2 介于 0.59-0.84，平均值为 0.71，R^2>0，说明拟合模型的拟合程度较好。由图 9 可知，园林绿化林中天牛的刻槽、排粪孔+羽化孔和刻槽+排粪孔+羽化孔均呈聚集分布，但刻槽与刻槽+排粪孔+羽化孔的空间聚集性更强（图 9：A-C）。依据等值线与矢量叠加图（图 9：C），并结合实地调查发现，沙枣与新疆杨株间配植，沙枣上天牛刻槽多（表 2），在样地左上部和中间呈明显的聚集分布，但新疆杨受害很轻。说明沙枣与新疆杨混交的园林绿化林中沙枣对光肩星天牛展现了极强的诱杀能力。

由拟合函数参数的块金值 C_0 可知，排粪孔+羽化孔块金值最小，为 0.72，表明排粪孔+羽化孔的随机程度较小；刻槽块金值最大，为 4.13，表明刻槽的随机程度较大。刻槽的空间依赖范围最大，在 12.37 m 范围内聚集；排粪孔+羽化孔最小，在 2.44 m 范围内聚集；刻槽+排粪孔+羽化孔在 5.09 m 范围内聚集。由基台值 Sill 可知，排粪孔+羽化孔变化幅度较小，刻槽+排粪孔+羽化孔变化幅度较大。由空间变异值 *C*/Sill 可知，天牛刻槽的空间变异值 *C*/Sill 最大，为 0.82，说明样方内光肩星天牛种群向沙枣树的聚集性很强。

2.5　不同林分模式中光肩星天牛危害特征的空间格局对比分析

以新疆杨纯林为对照样地，分析不同林分中光肩星天牛危害特征的空间格局。防护林宽林带和园林绿化林均由新疆杨和沙枣混交，相比于天牛排粪孔+羽化孔及刻槽+排粪孔+羽化孔数量，两样地中天牛刻槽数量的空间依赖范围均

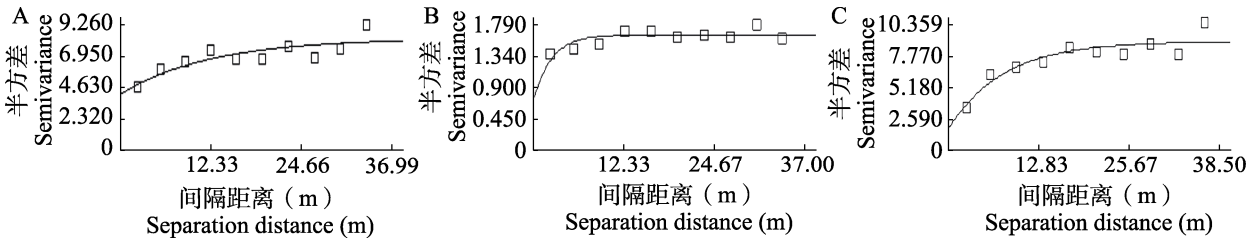

图 8　混交园林绿化林内光肩星天牛危害特征的半变异函数图

Fig. 8　Semivariogram of the damage characteristics of *Anoplophora glabripennis* in mixed-species landscaping greening forests

A. 光肩星天牛刻槽数量；B. 光肩星天牛排粪孔+羽化孔数量；C. 光肩星天牛刻槽+排粪孔+羽化孔数量。

A. Number of *A. glabripennis* oviposition scars; B. Number of *A. glabripennis* frass holes and emergence holes; C. Number of *A. glabripennis* oviposition scars, frass holes and emergence holes.

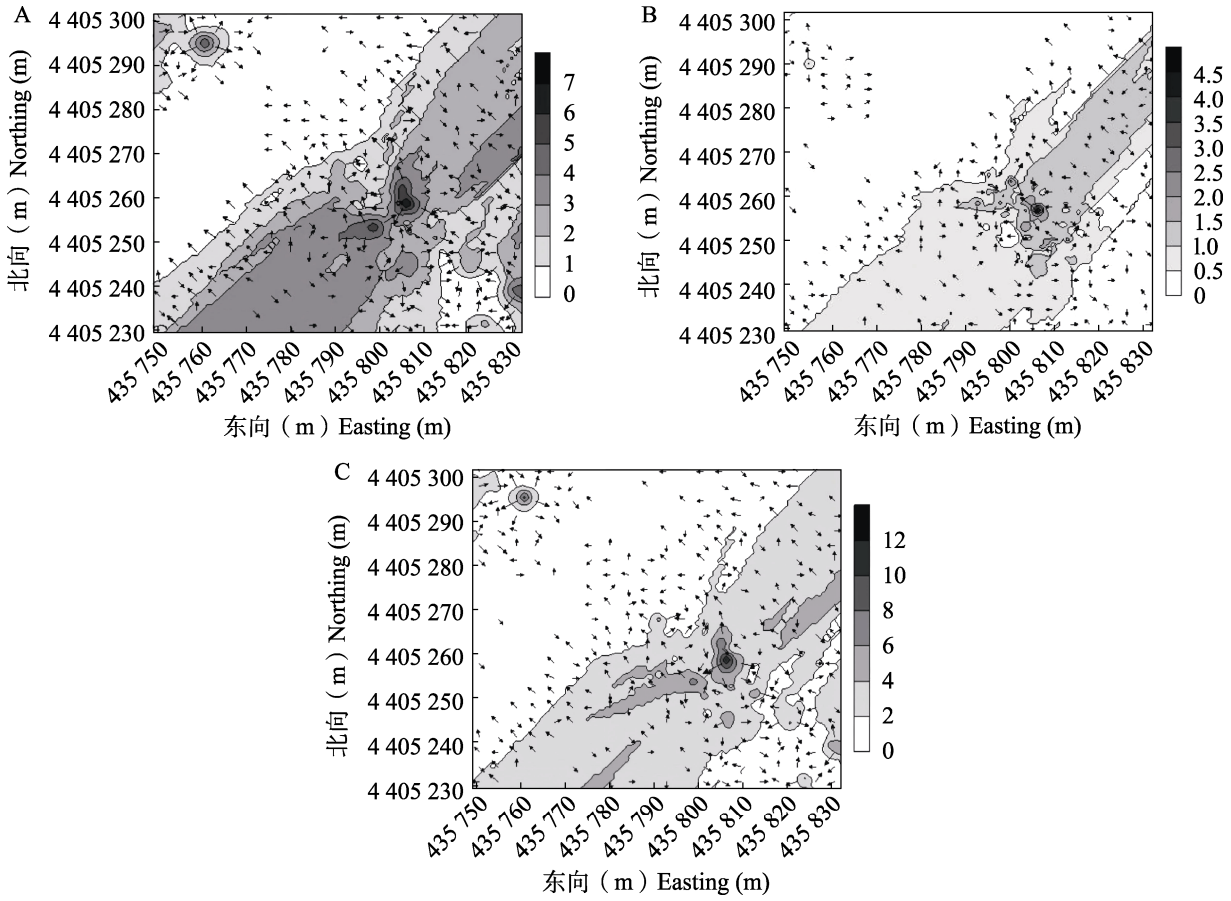

图 9 混交园林绿化林内光肩星天牛危害特征的等值线与矢量叠加图

Fig. 9 Contour and vector overlay map of the damage characteristics of *Anoplophora glabripennis* in mixed-species landscaping greening forests

A. 光肩星天牛刻槽数量；B. 光肩星天牛排粪孔+羽化孔数量；C. 光肩星天牛刻槽+排粪孔+羽化孔数量。
A. Number of *A. glabripennis* oviposition scars; B. Number of *A. glabripennis* frass holes and emergence holes; C. Number of *A. glabripennis* oviposition scars, frass holes and emergence holes.

最大，分别为 12.98 和 12.37 m（图 7，图 9），新疆杨纯林中刻槽空间依赖范围最小，仅为 0.76 m（图 3）；防护林宽林带、防护林窄林带和园林绿化林中天牛刻槽块金值与空间变异系数均高于新疆杨纯林，说明在上述配植沙枣的两样地中，天牛危害特征主要聚集在沙枣上，体现了沙枣对天牛具有很强的诱杀效果。防护林窄林带由线叶柳、旱柳、沙枣和新疆杨混交，样地中天牛刻槽数量的空间依赖范围最大（图 5），天牛刻槽块金值与空间变异系数高于新疆杨纯林（表 3），沙枣上株均刻槽数远高于线叶柳、旱柳和新疆杨，同样表明天牛偏好在沙枣上刻槽产卵，但多数卵未能孵化或发育受阻，表现出较强的诱杀效果。

3 结论与讨论

从昆虫环境适应的动态角度看，昆虫种群在空间中可能散布或聚集，而从静态的角度看，昆虫种群在空间中的分布状况常被称为种群的空间格局（孙婧, 2005; 李建庆等, 2015）。地统计学方法不仅能解决昆虫种群空间格局研究中多维空间数据分析的难题，而且能进行大尺度样本的空间结构特征分析，从而使昆虫种群分布格局和变迁规律的途径研究更有效（Liebhold *et al*., 1993）。本文通过地统计学方法探究了不同林分模式下光肩星天牛的空间格局，重点分析了配植沙枣树对光肩星天牛空间分布特征的影响，结果表明，相比于新疆杨纯林，配植沙枣混交林显著

改变了光肩星天牛的聚集模式，尤其在聚集强度和聚集范围方面表现突出。

不同林分模式下光肩星天牛刻槽、排粪孔+羽化孔和刻槽+排粪孔+羽化孔的空间分布理论模型和模型各参数及等值线矢量叠加图有所差异，这显然受到了树种配植方式及林分中树木分布格局等因素的影响（王晨等，2023）。王涛（2004）研究表明，不同树种配植林分中光肩星天牛的空间格局差异显著，新疆杨与复叶槭 *Acer negundo*、刺槐 *Robinia pseudoacacia*、臭椿 *Ailanthus altissima* 的混交林和合作杨 *Populus opera* 纯林中光肩星天牛种群为聚集分布，但其聚集强度及聚集范围有所不同，这主要由于不同的配植模式所引起。这与本文研究结果一致，本文研究发现不同林分中光肩星天牛种群均为聚集分布。新疆杨纯林中的天牛种群聚集强度较弱，主要表现为均匀分布或轻微聚集；而配植沙枣的混交林中天牛种群聚集强度更大，趋于向沙枣聚集，这与新疆杨纯林形成鲜明对比。

杨宗基等（2024）研究发现在不同配植模式的林带中，沙枣树对光肩星天牛种群的调控能力存在较大差异，防护林带中沙枣树与新疆杨行间或株间配植比例约为 2∶8，园林绿化林中沙枣树与新疆杨以块状或带状配植比例约为 3∶7 时，可达到有虫不成灾，实现光肩星天牛灾害的生态自控。本文研究结果与杨宗基等（2024）的研究结论一致，即相比于多树种混交林，沙枣与新疆杨的混交林中光肩星天向沙枣的聚集性更强，天牛种群分布更集中，进一步体现了合理的树种配植模式在光肩星天牛防控中的重要作用。王涛（2004）研究发现，新疆杨和合作杨株间混交林中天牛的空间格局均表现为完全随机分布或均匀分布，这是由于新疆杨和合作杨以 1∶1 株间混交，株行距 2 m×3 m，天牛在小范围内表现为聚集分布，小面积聚集构成整片林分的均匀分布，即每棵合作杨作为聚集点，构成整片混交林中合作杨上危害的均匀聚集。这与本文结果不同，原因是所选样地树种配植模式与比例差异所致，也进一步说明光肩星天牛的空间分布特征与林分中沙枣分布密切相关。李建庆等（2018）研究发现云斑天牛 *Batocera horsfieldi* 在不同林分杨树林地的空间分布格局均表现为聚集分布，林分类型与云斑天牛聚集分布的习性关系不大，但影响相应虫态的半变异函数模型和模型参数。这一结论与本文研究结果一致，光肩星天牛刻槽、排粪孔+羽化孔在新疆杨纯林、防护林窄林带和园林绿化林均为指数模型，防护林宽林带为球形模型和高斯模型。

本研究经统计分析光肩星天牛种群的空间分布格局与实地调查结果一致，即通过矢量叠加图与野外调查的对比分析发现沙枣的分布区域与天牛种群的聚集区域高度重合，进一步验证了沙枣对光肩星天牛的引诱能力。新疆杨纯林中天牛刻槽数量极少，排粪孔数量多，且新疆杨纯林中天牛排粪孔+羽化孔有明显的空间依赖性，说明大多数光肩星天牛能够由卵发育为幼虫，取食并开始排粪，这与实际情况相符合。沙枣树具有泌胶杀天牛卵的特性，本文调查的沙枣上未发现天牛羽化孔，仅发现个别排粪孔，幼虫已被树胶粘黏致死，其余均为天牛刻槽。在配植沙枣的混交林分中，天牛刻槽在样地中聚集分布区域与沙枣实际分布区域吻合，排粪孔+羽化孔的分布区与新疆杨的实际分布区域吻合，说明沙枣上光肩星天牛卵未能正常孵化为幼虫，对天牛展现出了极强的杀灭能力。天牛刻槽+排粪孔+羽化孔在样地中聚集分布区主要为沙枣的实际分布区，说明沙枣上天牛的相对密度高于新疆杨，且实地调查也发现不同林分模式下沙枣上光肩星天牛刻槽数量远多于新疆杨。这说明在沙枣与新疆杨配植的林分中，沙枣能引诱光肩星天牛成虫刻槽、产卵，并且能强力杀灭子代卵和初孵幼虫，高效保护新疆杨。这一研究结果与张恩光等（1995）和宝山等（1999）的研究结果存在差异，他们认为沙枣是天牛的抗性树种或免疫树种；但与李丰等（1999）、田润民等（2003）和桑巴叶等（2010）的研究结果一致，即沙枣具有诱杀光肩星天牛的功能。造成这种差异的原因可能是不同地区沙枣诱杀光肩星天牛的能力存在差异，或与立地条件有关。

本研究将不同林分中光肩星天牛危害特征

的空间分布进行可视化分析发现，不同林分中天牛刻槽、排粪孔+羽化孔和刻槽+排粪孔+羽化孔均为聚集分布。相较于配植沙枣的混交林，新疆杨纯林中光肩星天牛的聚集性不强。在配植沙枣树的混交林中，光肩星天牛种群均向沙枣树聚拢。相比于多树种混交林，沙枣与新疆杨的混交林中光肩星天牛向沙枣的聚集性更强，天牛种群分布更集中，因沙枣能够引诱光肩星天牛刻槽产卵后泌胶杀卵，高效保护了新疆杨，导致新疆杨几乎未受天牛危害。研究结果为基于诱杀树沙枣与抗性树种新疆杨混交造林持续防控光肩星天牛提供依据。

参考文献 (References)

Aitta A, El-Ramady H, Alshaal T, El-Henawy A, Shams M, Talha N, Elbehiry F, Brevik EC, 2019. Seasonal and spatial distribution of soil trace elements around Kitchener drain in the northern Nile Delta, Egypt. *Agriculture*, 9(7): 152.

Bao S, Shen XH, Tang J, Wu T, Marota H, 1999. Research of controlling poplar longicorn with forestry measures. *Journal of Beijing Forestry University*, 21(4): 73–79. [宝山, 沈向海, 唐杰, 吴彤, 丸田秀士, 1999. 林业措施控制杨树天牛的研究. 北京林业大学学报, 21(4): 73–79.]

Chai QH, 2013. Analysis of forest resources spatial pattern based on geostatistics abstract. Master dissertation. Nanjing: Nanjing Forestry University. [柴庆辉, 2013. 基于地统计学的森林资源空间格局分析. 硕士学位论文. 南京: 南京林业大学.]

Che L, Wang HQ, Fei T, Yan B, Liu Y, Gui L, Chen R, Zhai WL, 2017. Kriging interpolation method optimized by multi-scale least squares support vector machine. *Journal of Geo-information Science*, 19(8): 1001–1010. [车磊, 王海起, 费涛, 闫滨, 刘玉, 桂丽, 陈冉, 翟文龙, 2017. 基于多尺度最小二乘支持向量机优化的克里金插值方法. 地球信息科学学报, 19(8): 1001–1010.]

Fu YY, Jiang P, Liu AH, Zhang JW, Yue ZY, Tian CM, 2019. Geostatistical analysis of the aspatial distribution with different stand types of *Diaspidiotus slavonicus*. *Journal of Northwest Forestry University*, 34(2): 187–193, 205. [付园园, 蒋萍, 刘爱华, 张静文, 岳朝阳, 田呈明, 2019. 不同受害程度林分杨盾蚧空间分布格局地统计学分析. 西北林学院学报, 34(2): 187–193, 205.]

Gao BT, Ren LL, Jiang Q, Liu YZ, Yu LF, Luo YQ, 2020. Geostatistical analysis of the spatial distribution of *Dendroctonus valens* in *Pinus tabuliformis* forests with different levels of infestation. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(6): 1427–1435. [高丙涛, 任利利, 蒋琦, 刘漪舟, 俞琳锋, 骆有庆, 2020. 不同受害油松林内红脂大小蠹空间格局的地统计学研究. 应用昆虫学报, 57(6): 1427–1435.]

Haack RA, Hérard F, Sun JH, Turgeon JJ, 2010. Managing invasive populations of Asian longhorned beetle and citrus longhorned beetle: A worldwide perspective. *Annual Review of Entomology*, 55: 521–546.

Li CC, Ren LL, Wang LX, Pei JH, Zong SX, Luo YQ, 2025. Research foundations and prospects for ecological self-control of Asian longhorned beetle disasters. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 62(1): 31–41. [李呈澄, 任利利, 王立祥, 裴佳禾, 宗世祥, 骆有庆, 2025. 生态自控光肩星天牛灾害的研究基础与展望. 应用昆虫学报, 62(1): 31–41.]

Li F, Liu RG, Bao S, Wu T, 1999. Selection of trap trees for controlling *Anoplophora glabripennis* and *A. nobilis*. *Journal of Beijing Forestry University*, 21(4): 85–89. [李丰, 刘荣光, 宝山, 吴彤, 1999. 选择诱杀树种防治光肩星天牛、黄斑星天牛的研究. 北京林业大学学报, 21(4): 85–89.]

Li HP, Lyu F, Bi YG, Wang ZG, 2020. Reviews on the serious wood-boring pest *Anoplophora glabripennis* in forestry of China. *Forestry and Ecological Sciences*, 35(1): 1–9. [李浩培, 吕飞, 毕拥国, 王志刚, 2020. 我国林业重要蛀干害虫光肩星天牛研究进展. 林业与生态科学, 35(1): 1–9.]

Li JQ, Mei ZX, Yang ZQ, 2015. Spatial distribution pattern and sampling technique of *Batocera lineolata* (Coleoptera: Cerambycidae) population in ash trees. *Forest Research*, 28(6): 877–882. [李建庆, 梅增霞, 杨忠岐, 2015. 危害白蜡树的云斑白条天牛种群空间格局及抽样技术. 林业科学研究, 28(6): 877–882.]

Li JQ, Mei ZX, Yang ZQ, 2016. Geostatistical analysis on the spatial distribution of *Batocera lineolata* (Coleoptera: Cerambycidae) populations in different types of ash tree forests. *Acta Ecologica Sinica*, 36(14): 4540–4547. [李建庆, 梅增霞, 杨忠岐, 2016. 不同林分白蜡树云斑白条天牛种群空间格局地统计学分析. 生态学报, 36(14): 4540–4547.]

Li JQ, Mei ZX, Yang ZQ, 2018. Geostatistical analysis on spatial distribution pattern of *Batocera horsfieldi* (Coleoptera: Cerambycidae) populations in different poplar forest types. *Scientia Silvae Sinicae*, 54(3): 83–90. [李建庆, 梅增霞, 杨忠岐, 2018. 不同林分杨树云斑天牛种群空间格局地统计学分析. 林业科学, 54(3): 83–90.]

Li YC, Xia NB, Tu QH, Luo YQ, Wen JB, 1997. A geostatistical analysis on spatial patterns of *Anoplophora glabripennis* in poplars. *Acta Ecologica Sinica*, 17(4): 393–401. [李友常, 夏乃斌, 屠泉洪, 骆有庆, 温俊宝, 1997. 杨树光肩星天牛种群空间格局的地统计学研究. 生态学报, 17(4): 393–401.]

Liebhold AM, Rossi RE, Kemp WP, 1993. Geostatistics and geographic information systems in applied insect ecology. *Annual Review of Entomology*, 38: 303–327.

Liu YH, Zheng YM, Yan XF, He Y, Lu PF, 2018. Geostatistic

analysis on the spatial distribution of *Trabala vishnou gigantina* Yang early stage larvae. *Acta Ecologica Sinica*, 38(15): 5595–5601. [刘永华, 郑羽墨, 阎雄飞, 贺英, 陆鹏飞, 2018. 栎黄枯叶蛾低龄幼虫空间分布的地统计学分析. 生态学报, 38(15): 5595–5601.]

Luo LP, Wang XY, Yang ZQ, Zhao JX, Tang YL, 2018. Progress in biological control over *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae). *Biological Disaster Science*, 41(4): 247–255. [罗立平, 王小艺, 杨忠岐, 赵建兴, 唐艳龙, 2018. 光肩星天牛生物防治研究进展. 生物灾害科学, 41(4): 247–255.]

Mason CJ, Rubert-Nason K, Lindroth RL, Shi J, Hoover K, 2021. Salicinoid phenolics reduce adult *Anoplophora glabripennis* (Cerambicidae: Lamiinae) feeding and egg production. *Arthropod-Plant Interactions*, 15(1): 127–136.

Pan J, Wang T, Zong SX, Wen JB, Luo YQ, 2011. Geostatistical analysis and sampling technique on spatial distribution pattern of *Dendroctonus valens* population. *Acta Ecologica Sinica*, 31(1): 195–202. [潘杰, 王涛, 宗世祥, 温俊宝, 骆有庆, 2011. 红脂大小蠹种群空间格局地统计学分析及抽样技术. 生态学报, 31(1): 195–202.]

Sangbaye, Zhu YW, Bahatiguli, Aihemaiti, Jilili, 2010. Resistance of several mixed plantation to *Anoplophora nobilis* of Yanqi area. *Protection Forest Science and Technology*, 2010(5): 26–28. [桑巴叶, 朱玉伟, 巴哈提古丽, 艾合买提, 吉力力, 2010. 焉耆地区几种混交林对黄斑星天牛的抗虫性研究. 防护林科技, 2010(5): 26–28.]

Shao PP, Yang BJ, Su Z, Sun ZX, Wang Z, Liu YT, Wei JR, 2023. Preference of *Anoplophora glabripennis* to *Populus alba* var. *pyramidalis* and *Elaeagnus angustifolia*. *Forest Research*, 36(4): 122–128. [邵鹏鹏, 杨兵军, 苏智, 孙佐翔, 王卓, 刘宇婷, 魏建荣, 2023. 光肩星天牛对沙枣和新疆杨的偏好性. 林业科学研究, 36(4): 122–128].

Sun J, 2005. A geostatistical analysis on spatialpatterns of *Saperda papulnea* L. in poplars. Master dissertation. Jinzhong: Shanxi Agricultural University. [孙婧, 2005. 杨树青杨天牛种群空间格局的地统计学研究. 硕士学位论文. 晋中: 山西农业大学.]

Tang YL, Jiang J, Wang XY, Wei K, Yang ZQ, Lu J, 2018. Geostatistic analysis on spatial patterns of *Massicus raddei* and its parasitoid *Dastarcus helophoroides*. *Journal of Environmental Entomology*, 40(2): 290–298. [唐艳龙, 姜静, 王小艺, 魏可, 杨忠岐, 吕军, 2018. 栗山天牛及其天敌花绒寄甲空间分布的地统计学分析. 环境昆虫学报, 40(2): 290–298.]

Tian RM, Yu JB, Zhao WD, 2003. On the function of *Elaeagnus angustifolia* L. to induce and control *Anoplophora glabripennis* (Motsch). *Inner Mongolia Forestry Science & Technology*, 29(4): 23–25. [田润民, 于静波, 赵卫东, 2003. 沙枣树对光肩星天牛种群诱控功能的初步研究. 内蒙古林业科技, 29(4): 23–25.]

Wang C, Dong CP, Long XJ, Chen GF, Chen BW, Yao J, Bai YY, 2023. Geostatistical analysis on the spatial distribution characteristics of *Batocera lineolata* larvae in eucalypti plantations. *Journal of Southwest Forestry University* (*Natural Sciences*), 43(1): 99–107. [王晨, 董昌平, 龙训建, 陈桂芳, 陈本文, 姚佳, 白耀宇, 2023. 基于地统计学的重庆市桉树云斑天牛幼虫空间分布特征研究. 西南林业大学学报(自然科学), 43(1): 99–107.]

Wang LX, Li CC, Luo YQ, Wang GJ, Dou ZP, Haq IU, Shang SQ, Cui MM, 2023. Current and future control of the wood-boring pest *Anoplophora glabripennis*. *Insect Science*, 30(6): 1534–1551.

Wang T, 2004. Preliminary study on population dynamics of *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky) in the stands of multi-tree species disposal. Master dissertation. Beijing: Beijing Forestry University. [王涛, 2004. 多树种配置林分中光肩星天牛种群动态的初步研究. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学.]

Yang ZJ, Wang LX, Luo YQ, Ren LL, Wang XQ, Wang XB, Chen YL, 2024. Study on planting model of dead-end trap tree *Elaeagnus angustifolia* and resistant host tree *Populus alba* var. *pyramidalis* for ecological self-regulation of the *Anoplophora glabripennis* disaster. *Forest Pest and Disease*, 43(6): 44–53. [杨宗基, 王立祥, 骆有庆, 任利利, 王小强, 王小兵, 陈宇琳, 2024. 生态自控光肩星天牛灾害的诱杀树沙枣与抗性树种新疆杨配植模式研究. 中国森林病虫, 43(6): 44–53.]

Yang Y, Li S, He FY, Shi ZL, 2019. A study on effects of variogram and sampling interval in Kriging on analysis of submarine stratum. *Journal of Engineering Geology*, 27(4): 794–802. [杨阳, 李飒, 何福耀, 施展玲, 2019. 半变异函数及取样间距对克里金法在海洋地层分析中的影响研究. 工程地质学报, 27(4): 794–802.]

Zhu XC, Shao MG, Liang Y, Tian ZY, Wang X, Qu LL, 2019. Mesoscale spatial variability of soil-water content in an alpine meadow on the northern Tibetan Plateau. *Hydrological Processes*, 33(19): 2523–2534.

Zhang QQ, Zuo S, Zhang G, Li XF, Wang HL, Li HP, 2025. Spatial distribution of *Agrilus planipennis* larvae in different mixed forests. *Forest Pest and Disease*, 44(2): 41–47. [张倩倩, 左爽, 张刚, 李玺锋, 王华玲, 李会平, 2025. 不同混交林分中白蜡窄吉丁幼虫空间格局分析. 中国森林病虫, 44(2): 41–47.]

Zheng L, Zhang ZB, Da XJ, Ma YX, 2021. Dynamic evaluation and influencing factors of land ecological security in Jiayuguan City. *Arid Land Geography*, 44(1): 289–298. [郑岚, 张志斌, 笪晓军, 马亚兄, 2021. 嘉峪关市土地生态安全动态评价及影响因素分析. 干旱区地理, 44(1): 289–298.]

Zhang EG, Zhou JX, Liu RG, Yang XY, Bai ZJ, Liu YN, 1995. Stand structure of protection forests in Ningxia and damage by longicorn beetles. *Journal of Northwest Forestry College*, 10(2): 16–21, 39. [张恩光, 周嘉熹, 刘荣光, 杨雪彦, 白正甲, 刘益宁, 1995. 宁夏防护林天牛危害调查及林分结构配置. 西北林学院学报, 10(2): 16–21, 39.]