



南俊科, 杨越翔, 张玲华, 李鹏飞, 郭丽洁, 贺虹, 魏琮. 松墨天牛在秦巴林区不同寄主上的危害规律 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (6): 1376–1388.

松墨天牛在秦巴林区不同寄主上的危害规律

南俊科¹, 杨越翔², 张玲华², 李鹏飞³, 郭丽洁³, 贺虹^{2*}, 魏琮^{1*}

(1. 西北农林科技大学植物保护学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学林学院, 西部森林生物灾害治理国家林业和草原局重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 陕西省森林病虫害防治检疫总站, 西安 710082)

摘要: 松墨天牛 *Monochamus alternatus* 是次期性蛀干害虫, 也是松材线虫病的主要传播媒介, 廓清该害虫在秦巴林区不同寄主上的危害程度和发生规律, 对于控制松材线虫病的扩散蔓延具有重要意义。本研究对秦巴林区遭受松材线虫病严重危害的 3 种主要松树 (油松 *Pinus tabulaeformis*、华山松 *P. armandii* 和马尾松 *P. massoniana*) 进行了冬季疫木野外解析, 并在统计不同胸径、不同高度疫木树干上松墨天牛侵入孔和幼虫数量的基础上, 采用聚集度指标分析方法, 对该害虫在不同寄主上的危害差异进行了比较研究。结果表明, 松墨天牛在 3 种寄主上的危害程度具有显著差异, 以华山松受害最重, 其次分别为马尾松和油松; 越冬幼虫在油松上主要危害皮下 1~2 cm 的边材; 在华山松和马尾松上危害比较多样, 以髓心部位受害最重, 其后依次为心材、边材和树皮; 在油松和华山松上, 松墨天牛主要在树干 7 m 以下部分危害, 而在马尾松上主要危害树干 7 m 以上部分, 且虫口数量均与寄主胸径呈显著正相关。松墨天牛侵入孔和越冬幼虫在不同寄主树干上均呈聚集性分布。本研究揭示了松墨天牛在秦巴林区 3 种主要寄主上的危害规律, 对于进一步开展大尺度地理范围松墨天牛的寄主选择性及其危害规律研究提供了基础信息, 也为秦巴林区松墨天牛的有效防治和松材线虫病的蔓延控制提供了新的重要信息。

关键词: 松墨天牛; 油松; 华山松; 马尾松; 空间分布; 松材线虫病

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2021) 06-1376-13

The damage of *Monochamus alternatus* on different host pine species in Qinling-Daba Mountains

NAN Jun-Ke¹, YANG Yue-Xiang², ZHANG Ling-Hua², LI Peng-Fei³, GUO Li-Jie³, HE Hong^{2*}, WEI Cong^{1*} (1. College of Plant Protection, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 2. College of Forestry, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration for Control of Forest Biological Disasters in Western China, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 3. Shaanxi Province General Station of Forest Pest Control and Quarantine, Xi'an 710082, China)

Abstract: *Monochamus alternatus*, a secondary longhorned borer, is the main vector of the pine nematode disease. Clarifying the damage and regularity of outbreak of this pest in different host plants in the Qinling-Daba Mountains is particularly important to control the spread of pine nematode disease. The number of entrance holes and the population of overwintering larvae of *M. alternatus* in the trunk of three pine species

基金项目: 陕西省林业科技创新计划专项项目 (SXLK2021-0101); 陕西省森林病虫害防治检疫总站专项基金 (20191217000008, 20191217000009)

作者简介: 南俊科, 男, 1993 年生, 山西阳泉人, 博士研究生, 主要从事森林昆虫研究, E-mail: junkenan@163.com

* 共同通讯作者 Authors for correspondence: 贺虹, 女, 博士, 教授, 研究方向为森林昆虫学, E-mail: hehong@nwsuaf.edu.cn; 魏琮, 男, 博士, 教授, 研究方向为森林昆虫学, E-mail: congwei@nwsuaf.edu.cn

收稿日期 Received: 2021-08-27; 接受日期 Accepted: 2021-10-09

(*Pinus tabulaeformis*, *P. armandii* and *P. massoniana*) were investigated, and their correlations to the diameter at breast height (DBH) and the height of damaged site on the trunk were analyzed using the aggregation index analysis method, aiming to reveal the damage difference of *M. alternatus* in different tree species. The results showed that the damage degree of this pest to the three pine tree species were significantly different, among which the damage to *P. armandii* was most severe, followed by that to *P. massoniana* and *P. tabulaeformis* subsequently. The overwintering larvae of *M. alternatus* damage *P. tabulaeformis* mainly in the sapwood about 1 ~ 2 cm underneath the bark. Whereas, in both *P. armandii* and *P. massoniana* the overwintering larvae damage the pith most severely, followed by the heartwood, sapwood and the bark subsequently. In *P. tabulaeformis* and *P. armandii*, the larvae of *M. alternatus* mainly distributed in the trunk where the height of the damaged site was usually less than 7 m above the ground. However, the larvae damage *P. massoniana* mainly in the trunk where the height of the damaged site was usually higher than 7 m above the ground. The number of entrance holes and the number of overwintering larvae were significantly, positively correlated with DBH. The entrance holes and overwintering larvae of *M. alternatus* in different pine trees were aggregated. The damage characteristic of *M. alternatus* to different hosts in the Qinling-Daba Mountains provided information to future studies of host selection and damage mechanism of this pest in large-scale geographic patterns, which were helpful to the control of this vector sawyer beetle and the related pine wilt disease in the Qinling-Daba Mountains.

Key words: *Monochamus alternatus*; *Pinus tabulaeformis*; *P. armandii*; *P. massoniana*; spatial distribution; pine wilt disease

秦巴林区处于中国陕西省南部, 由秦岭山地和大巴山山地组成 (李晶, 2003; 翟雅倩等, 2018)。其中, 秦岭是中国南北方的气候和地理分界线 (马新萍等, 2015), 整体上以暖温带落叶阔叶林为优势植被; 大巴山区以北亚热带常绿与落叶阔叶混交林为优势植被 (李晶, 2003; 翟雅倩等, 2018)。秦巴林区是中国地理格局的重要枢纽和生态走廊, 也是最高级别的生态安全保障区, 以复杂、多样和独特的自然环境孕育了丰富的天然动、植物资源 (陈超男等, 2019)。松材线虫病是我国重大外来入侵有害生物, 对我国的松林资源造成严重危害 (Mamiya, 1983; 宁眺等, 2004; Zhao *et al.*, 2014)。在秦巴林区, 该病害最初于 2009 年发现于商洛市柞水县, 目前已扩散至商洛市其他县区及安康市、汉中市和西安市的 25 个县级行政区 (国家林业和草原局 2021 年第 5 号公告), 发生面积达 320 km², 造成大量华山松 *Pinus armandii*、马尾松 *P. massoniana*、油松 *P. tabulaeformis*、白皮松 *P. bungeana* 死亡, 对秦巴林区及周围区域的森林植被和生态安全造成严重威胁, 仅 2019 年冬季至 2020 年春季, 因该病害爆发而遭砍伐的松树已达 112 万株 (Futai, 2013; Wang *et al.*, 2020)。

松墨天牛 *Monochamus alternatus* Hope 又名松

褐天牛, 属鞘翅目 Coleoptera 天牛科 Cerambycidae 沟胫天牛亚科 Lamiinae (萧刚柔, 1992; 张星耀和骆有庆, 2003), 在我国分布广泛, 是松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Buhner) Nickle 的主要传播媒介 (Kobayashi *et al.*, 1984; Li *et al.*, 2007; 朱彦鹏, 2009; 蔡梦玲, 2019)。截至目前, 许多学者对中国南方的松墨天牛危害特点、发生规律等开展了较广泛的研究 (王玲萍等, 2002; 杨子祥等, 2010), 但是关于松墨天牛在秦巴林区的生物生态学一直缺乏研究, 严重影响了该区域的松材线虫病综合防控。因此, 本研究以秦巴林区主要受害松树为研究对象, 对不同种类受害木上松墨天牛的空间分布和危害差异进行了调查, 以明晰秦巴林区松墨天牛的发生特点和危害规律, 为该地区及邻近区域松材线虫病的综合防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 调查地点

根据陕西省秦巴林区松材线虫病的疫区分布, 分别选择位于巴山的岚皋县、西乡县和秦岭南坡的柞水县、佛坪县、宁陕县作为研究区域。前期关于该区域松材线虫病感病树种的调查结果表明,

秦巴林区受害松树有油松、华山松、马尾松、白皮松、日本黑松 *P. thunbergii* 和巴山松 *P. tabulaeformis* var. *henryi*; 其中秦岭林区的主要感病树种为油松、华山松和马尾松, 巴山林区主要感病树种为马尾松和白皮松。油松是北方主要松科树种, 马尾松是南方主要松科树种, 华山松则为

秦巴林区代表性的本土树种; 它们在整个秦巴林区分布广、林分面积大, 因此本研究根据松材线虫病发生区的地形、林分 and 海拔等因素, 选取分布有不同寄主的松林 (多为混交林) 作为试验地, 对不同胸径的受害松树上松墨天牛的危害情况进行比较研究 (见表 1)。

表 1 秦巴林区松墨天牛调查地点

Table 1 Investigation sites of *Monochamus alternatus* in Qinling-Daba Mountains

调查地点 Investigation sites	松树种类 Pine species	经度 (E) Longitude	纬度 (N) Latitude	海拔 (m) Altitude
凤凰镇凤凰村 Fenghuang Village, Fenghuang Town	华山松 <i>P. armandii</i>	109°21'34"	33°43'59"	659.00
柞水县 Zhazhui County	油松 <i>P. tabulaeformis</i>			
营盘镇药王堂村 Yaowangtang Village, Yingpan Town	华山松 <i>P. armandii</i>	109°06'03"	33°74'21"	931.33
油松 <i>P. tabulaeformis</i>				
下梁镇沙坪社区 Shaping Community, Xialiang Town	油松 <i>P. tabulaeformis</i>	109°08'54"	33°37'42"	736.06
大河坝镇五四村 Wusi Village, Daheba Town	马尾松 <i>P. massoniana</i>	108°03'26"	33°30'08"	605.97
佛坪县 Foping County	马尾松 <i>P. massoniana</i>	108°61'34"	33°29'43"	769.05
大河坝镇沙坪村 Shaping Village, Daheba Town	马尾松 <i>P. massoniana</i>	108°01'28"	33°27'48"	1078.06
油松 <i>P. tabulaeformis</i>				
城关镇旱坝村 Hanba Village, Chengguan Town	华山松 <i>P. armandii</i>	108°19'51"	33°17'59"	822.83
宁陕县 Ningshan County	油松 <i>P. tabulaeformis</i>	108°19'48"	33°18'00"	807.02
城关镇汤坪村 Tangping Village, Chengguan Town	华山松 <i>P. armandii</i>	108°14'37"	33°18'56"	725.11
西乡县 Xixiang County	马尾松 <i>P. massoniana</i>	107°50'42"	32°59'46"	509.88
堰口镇古城社区 Gucheng Community, Yankou Town				
城关镇堰溪村 Yanxi Village, Chengguan Town	马尾松 <i>P. massoniana</i>	108°54'35"	32°18'30"	758.63
岚皋县 Langao County	马尾松 <i>P. massoniana</i>	108°53'01"	32°30'32"	412.10
佐龙镇杜坝村 Duba Village, Zuolong Town	马尾松 <i>P. massoniana</i>	108°53'08"	32°30'19"	457.31

1.2 研究方法

1.2.1 疫木解析

在 2019 年 11 月至 2020 年 1 月与 2020 年 11 月至 2021 年 1 月, 根据试验地内松材线虫病危害造成的死树分布情况, 对同一种枯死松树, 在每个试验地至少选取 3 株疫木 (当年感染松材线虫导致死亡), 记录其胸径、树高以及所处海拔等信

息。然后, 用油锯将死树齐地面伐倒, 从树干基部开始截成长度为 0.3 m 的小段及树梢 (12 m 以上部分), 并按顺序依次编号。疫木解析之前, 先对每截木段进行剥皮, 记录皮下天牛数量、种类和皮下侵入孔数; 然后将木段用斧头劈成直径不超过 2 cm 的小木条 (减小松墨天牛数量调查误差), 统计其中的天牛幼虫数量 (张彦龙, 2012)。

将收集到的新鲜标本先用无水乙醇浸泡 24 h, 然后置换新的无水乙醇, 于 -20°C 保存。天牛幼虫的种类通过以下 2 种方法确定: (1) 将采集的标本带回实验室在体式显微镜下进行形态观察鉴定 (蒋书楠等, 1989; 钟觉民, 1990); (2) 选取部分天牛幼虫标本提取基因组 DNA, 对线粒体 *COI* 基因扩增和测序, 进行分子鉴定。另外, 将部分带有天牛幼虫的木段带回实验室进行饲养、观察, 待天牛羽化之后, 进一步对成虫进行鉴定 (杨星科和林美英, 2017)。

1.2.2 空间分布格局分析

空间分布格局数据分析均采用指标法进行 (陈顺立等, 2001; 张彦龙, 2012), 所用指标具体如下:

(1) 扩散系数 C : 扩散系数是方差与均值的比值, 为检验种群扩散是否属于随机型的系数, 公式为 $C = \sum (x_i - \bar{X})^2 / \bar{X} (n - 1) = S^2 / \bar{X}$ 。其中, S^2 为方差, $\bar{X}$ 为虫口平均数。当 $C < 1$ 时, 种群为均匀分布; $C = 1$ 时, 种群为随机分布; $C > 1$ 时, 种群为聚集分布。

(2) 聚集指标 I : David & Moore (1954) 提出用聚集指标 I 测定种群分布型, $I = S^2 / \bar{X} - 1$ 。当 $I < 0$ 时, 为均匀分布; $I > 0$ 时, 为聚集分布; $I = 0$ 时, 为随机分布。

(3) 负二项分布 K 值: $K = \bar{X} / I = \bar{X} / (S^2 / \bar{X} - 1) = \bar{X}^2 / (S^2 - \bar{X})$ 。一般情况下, 当 $K > 8$ 时, 为随机分布; 当 $8 > K > 0$ 时, 为聚集分布; 当 $K < 0$ 时, 为均匀分布。另外, Cassie (1962) 提出指标 C_A , $C_A = 1/K$, 即 $C_A = (S^2 - \bar{X}) / \bar{X}^2$, 当 $C_A = 0$ 时, 为随机分布; $C_A > 0$ 时, 为聚集分布; $C_A < 0$ 时, 为均匀分布。

(4) 平均拥挤度 m^* : $m^* = \bar{X} + (S^2 / \bar{X} - 1)$, m^* 表示样方内生物个体的拥挤程度。Lloyd (1967) 提出了样本拥挤度 m^* / m , $m^* / m = m^* / \bar{x}$; $m^* / m = 1$ 时, 为随机分布; $m^* / m > 1$ 时, 为聚集分布; $m^* / m < 1$ 时, 为均匀分布。

(5) Iwao 法: Iwao (1968) 提出平均拥挤度 m^* 与均数 $\bar{x}$ 之间存在直线关系, $m^* = \alpha + \beta \bar{X}$, 其中 2 个系数 α 、 β 能解释种群分布特征。 α 是平均拥挤度基本成份的大小分布, 当 $\alpha = 0$ 时, 分布的基本成份是单个个体; 当 $\alpha > 0$ 时, 表示个体间相互吸引, 分布的基本成份是个体群; 当 $\alpha < 0$ 时, 表示个体间相互排斥。当 $\beta = 1$ 时, 呈随机型分布; $\beta > 1$ 时, 呈聚集分布; $\beta < 1$ 时, 呈均匀

分布。

(6) Talyor 幂法则: Taylor (1961) 认为在自然种群中, 均数与方差之间的关系是不独立的, 方差随着均数的增加而增加, 两者通常呈幂函数关系 $S^2 = a \bar{X}^b$, 将这种曲线直线化可得出方差与均数的对数值存在回归关系, 即 $\log (S^2) = \log a + b \log (\bar{X})$, 当 $b = 1$ 时为随机分布, $b > 1$ 时为聚集分布, $b < 1$ 时为均匀分布。

1.2.3 数据分析

利用 Microsoft Excel 2017 和 SPSS 22.0 软件对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 松墨天牛危害情况

2.1.1 松墨天牛在不同寄主上的危害情况

冬季疫木解析结果表明, 松墨天牛侵入孔数在华山松上平均为 295 个/株, 在马尾松上平均为 154 个/株, 在油松上平均只有 54 个/株; 越冬幼虫数在华山松上平均为 259 个/株, 在马尾松上平均为 106 个/株, 在油松上平均为 69 个/株。这些结果表明华山松受害最重, 其次为马尾松和油松。此外, 松墨天牛幼虫在寄主树皮、木质部和髓心均有分布, 但在不同寄主的分布部位存在差异 (图 1)。在华山松上主要以 4~5 龄幼虫越冬, 在马尾松上主要以 3~4 龄幼虫越冬, 两种受害松树在皮下、木质部 (心材和边材) 和髓心均有越冬幼虫分布 (图 1-A~D), 且以髓心部数量最多, 其次为心材、边材及皮下; 而在油松上主要以 2~3 龄幼虫越冬, 主要分布在皮下及木质部 1~2 cm 处 (图 1-E)。

松墨天牛幼虫在寄主树干上的取食轨迹均呈“C”型 (图 1-E~G), 即幼虫在侵入到树干后, 先沿着树干向髓心部侵入, 然后再沿着树干垂直啃食, 但当幼虫发育到一定程度后又会沿着树干向远离髓心的部分蛀食, 直到羽化飞出。幼虫的坑道长度平均约为 9 cm ($N = 40$)。

2.1.2 松墨天牛危害情况与松树胸径的关系

相关性分析结果表明, 松墨天牛侵入孔数量和越冬幼虫数量均与寄主松树胸径显著相关 ($P < 0.05$)。将松墨天牛侵入孔数量与寄主松树胸径大小拟合方程可得, 华山松 $y = 19.6350x - 23.1320$; 马尾松 $y = 11.2470x - 65.0430$; 油松 $y = 7.1692x - 45.4050$; 将松墨天牛越冬幼虫数量与寄主松树胸

径大小拟合方程可得, 华山松 $y = 20.9700x - 90.0700$; 马尾松 $y = 7.7672x - 36.5770$; 油松 $y = 10.0950x - 71.3210$ 。研究表明, 随着胸径增加, 松墨天牛侵入孔数量和越冬幼虫数量相应增加, 受害加重, 这种趋势在油松、华山松和马尾松上均表现一致 (图 2)。此外, 在胸径较小

(6~15 cm) 的松树上, 松墨天牛只危害主干; 但随着胸径增加, 主干受害程度加重的同时, 侧枝也受到危害; 当松树胸径大于 15 cm 时, 树干、侧枝一般都受害, 且胸径越大侧枝受害越重。在相同胸径条件下, 华山松的受害最为严重, 其次分别是马尾松和油松。

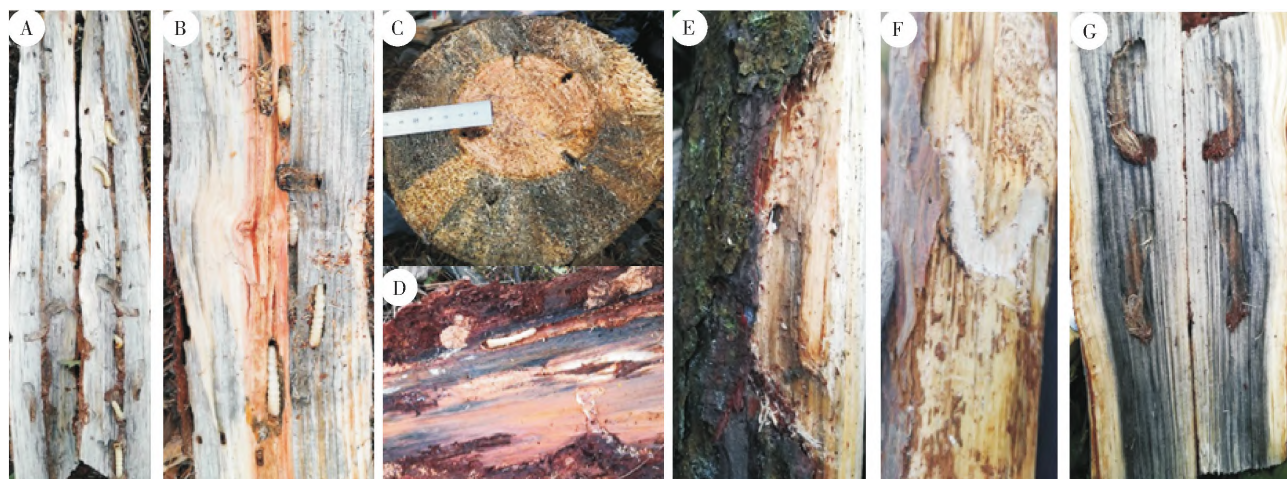


图 1 松墨天牛对不同寄主的危害情况

Fig. 1 Damage of *Monochamus alternatus* in different host pine species

注: A, 马尾松树干顶部 13 m 处纵截面 (两面); B, 华山松树干中部 7 m 处纵截面 (单面); C, 华山松树干横截面危害状; D, 华山松树皮下天牛危害状; E, 油松树皮下危害状; F, 马尾松树皮下危害状; G, 马尾松树干纵截面危害状。
Note: A, Cross-section of the trunk of *P. massoniana* at 13 m above the ground (both sides); B, Cross-section of the trunk of *P. armandii* at 7 m above the ground (one-side); C, Damage of *M. alternatus* at the cross-section of *P. armandii* trunk; D, Damage of *M. alternatus* under the bark of *P. armandii*; E, Damage of *M. alternatus* under the bark of *P. tabuliformis*; F, Damage of *M. alternatus* under the bark of *P. massoniana*; G, Damage of *M. alternatus* at the longitudinal section of *P. massoniana* trunk.

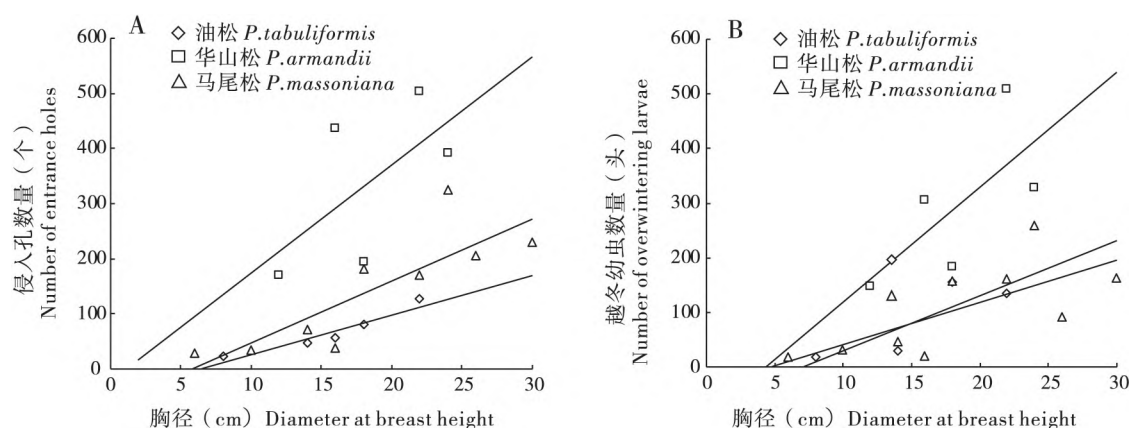


图 2 松墨天牛危害程度与三种寄主胸径的关系

Fig. 2 Relationship between damage of *Monochamus alternatus* and the diameter of breast height in three pine species

注: A, 松墨天牛侵入孔数量与松树胸径的关系; B, 松墨天牛越冬幼虫数量与松树胸径的关系。Note: A, Correlation between the number of entrance holes of *M. alternatus* and the diameter of breast height in three pine species; B, Correlation between the number of overwintering larvae of *M. alternatus* and the diameter of breast height in three pine species.

2.2 松墨天牛在 3 种寄主树干上的垂直分布规律

2.2.1 松墨天牛在 3 种寄主树干上的侵入规律

松墨天牛在 3 种寄主松树上侵入孔的分布存在明显差异 (图 3-A ~ D)。在马尾松上, 侵入孔数量随着距地面高度增加而增加, 主要集中在树干中上部 (7 m 以上), 占整棵树侵入孔数量的 73.17% (图 3-C)。在油松和华山松上, 侵入孔数量均集中于树干中下部 (0 ~ 7 m), 分别占整棵树侵入孔数量的 75.17% (油松) 和 76.33% (华山松) (图 3-A ~ B), 且侵入孔数量均随着距地面高度的增加而减少, 但减少的速率存在明显差异, 在树干 0 ~ 7 m 部位, 侵入孔数量在华山松上随着

距地面高度的增加而减少的速率较为缓慢, 说明侵入孔数量在华山松 0 ~ 7 m 的聚集度比油松高。

针对松墨天牛在不同寄主上的垂直分布差异拟合得到相应的回归方程 (图 3-A ~ C), 通过对方程进行求导, 结果表明, 在定义域内其理论极大值点及对应值分别为: 油松 ($x = 0, y = 7.5272$); 华山松 ($x = 1.2541, y = 34.3833$)。因此, 理论上松墨天牛侵入孔在油松和华山松基部 0 ~ 2 m 处最为密集, 这与疫木解析调查结果一致。上述结果表明松墨天牛在秦巴林区不同寄主上的危害差异明显, 以华山松受害最为严重, 马尾松次之, 油松较轻 (图 3-D)。

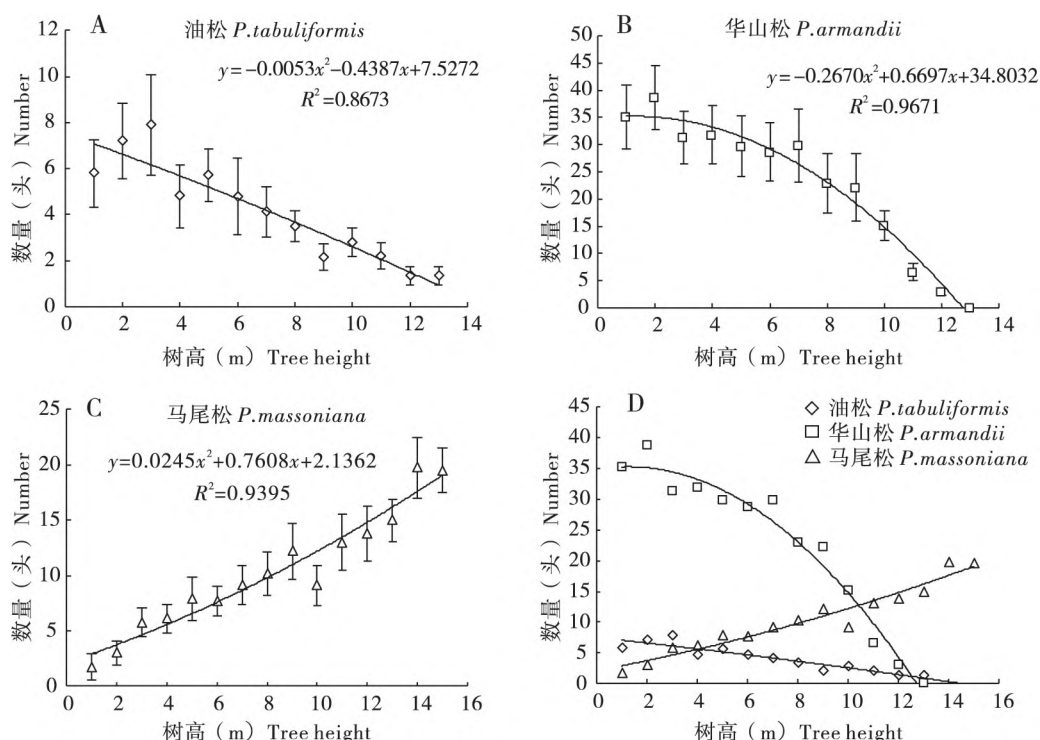


图 3 松墨天牛侵入孔在 3 种松树上的分布规律

Fig. 3 Distribution of entrance holes of *Monochamus alternatus* in three pine species

注: A, 油松上的分布; B, 华山松上的分布; C, 马尾松上的分布; D, 3 种松树上松墨天牛幼虫侵入孔的垂直分布差异。Note: A, Distribution of entrance holes of *M. alternatus* in trunk of *P. tabulaeformis*; B, Distribution of entrance holes of *M. alternatus* in trunk of *P. armandii*; C, Distribution of entrance holes of *M. alternatus* in trunk of *P. massoniana*; D, The difference of vertical distribution of entrance holes of *M. alternatus* in trunk of three pine species.

2.2.2 3 种松树上松墨天牛越冬幼虫的分布规律

松墨天牛越冬幼虫在 3 种松树上的垂直分布具有明显差异, 尤其在马尾松上的分布与其他树种差异显著 (图 4)。在马尾松上, 松墨天牛越冬幼虫数量随着距地面高度增加而增加, 主要集中在树干中上部 (7 m 以上), 占整棵树越冬幼虫数量的 75.27% (图 4-C); 而在油松和华山松上,

越冬幼虫数量都随着距地面高度增加而减少, 且都集中于树干中下部 (0 ~ 7 m), 分别占整棵树越冬幼虫数量的 81.50% (油松) 和 75.84% (华山松) (图 4-A ~ B)。

针对松墨天牛在不同寄主上的垂直分布差异拟合得到相应的回归方程 (图 4-A ~ C), 通过对方程进行求导, 结果表明, 在定义域内其理论极

大值点及对应值分别为：油松 ($x = 0, y = 19.2620$)；华山松 ($x = 1.9291, y = 33.9136$)。因此，理论上松墨天牛越冬幼虫在油松和华山松基部 0~2 m 处分布最为密集，这与疫木解析调查

结果一致。上述结果表明松墨天牛在秦巴林区不同寄主上的危害差异明显，以华山松受害最为严重，马尾松次之，油松较轻（图 4-D）。

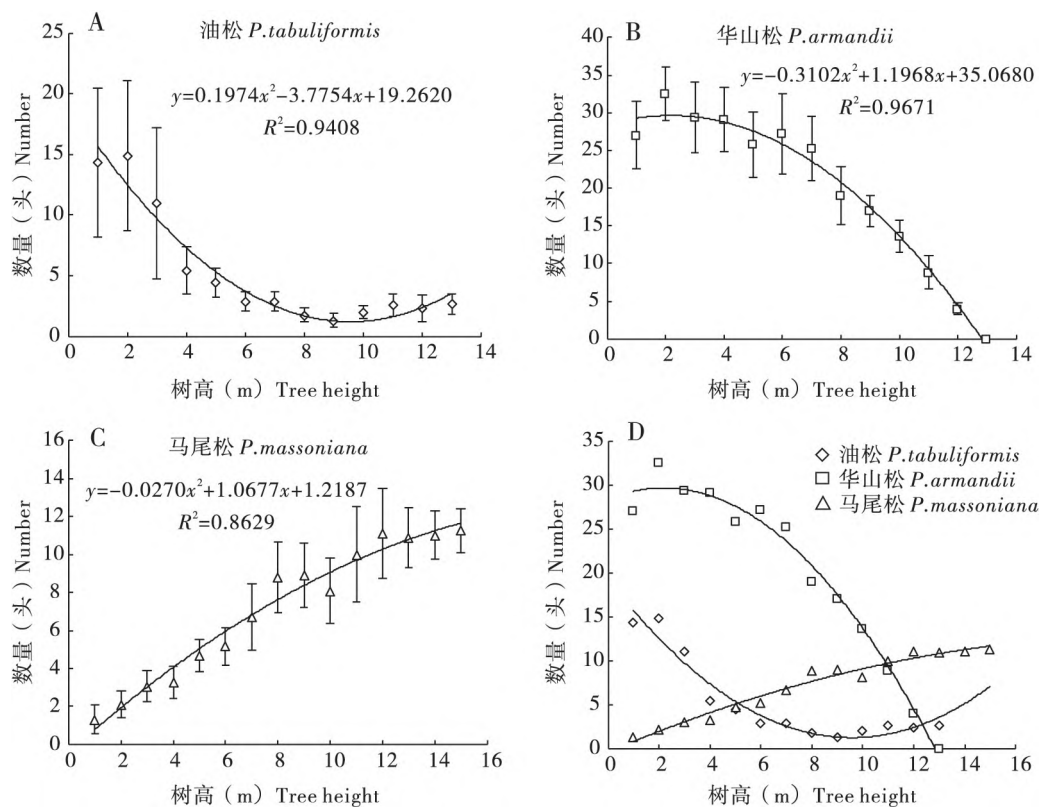


图4 松墨天牛越冬幼虫在3种松树上的垂直分布规律

Fig. 4 Distribution of overwintering larvae of *Monochamus alternatus* in three pine species

注：A，油松上的分布；B，华山松上的分布；C，马尾松上的分布；D，松墨天牛越冬幼虫在3种松树上的垂直分布差异。Note: A, Distribution of overwintering larvae of *M. alternatus* in *P. tabulaeformis*; B, Distribution of overwintering larvae of *M. alternatus* in *P. armandii*; C, Distribution of overwintering larvae of *M. alternatus* in *P. massoniana*; D, The difference of vertical distribution of overwintering larvae of *M. alternatus* in trunk of three pine species.

2.3 侵入孔与越冬幼虫分布关系

松墨天牛侵入孔与越冬幼虫的相关性分析和回归分析表明，越冬幼虫数量与侵入孔数量在 $P < 0.01$ 水平上显著相关 ($P = 0.953$)。经过回归分析建立回归方程为 $y = 0.8176x + 0.5656$, $R^2 = 0.9086$ ，说明越冬幼虫数量与侵入孔数量呈线性关系（图5），即越冬幼虫数量会随着侵入孔数量增加而增加。

2.4 三种松树上松墨天牛的空间分布格局

2.4.1 松墨天牛侵入孔的空间分布格局

应用聚集度指标法对松墨天牛侵入孔在3种松树上的聚集度进行计算（表2~4），结果表明侵入孔在油松、华山松和马尾松树干上不同高度处的各项聚集度指标分别为 $I > 0$, $C_A > 0$, $m^*/m > 1$,

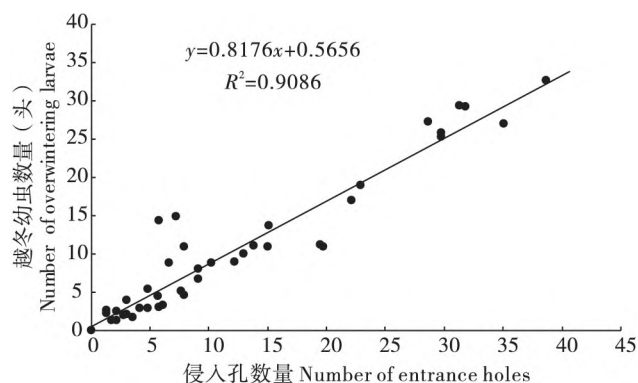


图5 松墨天牛幼虫侵入孔数量与树体内越冬幼虫数量的关系

Fig. 5 Relationship between number of entrance holes and number of overwintering larvae of *Monochamus alternatus*

$C > 1$ 和 $K > 0$ ，这说明侵入孔在 3 种松树上均呈整体聚集性分布。根据 I_{WAO} 回归分析法 $m^* = \alpha + \beta \bar{X}$ 可得，油松 $m^* = 1.6333 \bar{X} - 0.8319$ ， $R^2 = 0.9202$ ；华山松 $m^* = 1.2479 \bar{X} + 3.0099$ ， $R^2 = 0.9141$ ，在油松和华山松上 $\beta > 1$ ，说明松墨天牛侵入孔在这两种寄主为聚集分布；而马尾松 R^2 仅仅为 0.6757，说明 I_{WAO} 回归分析法不适用于分析侵入孔在该树种上的分布类型。根据 Talyor 幂法则 $\log(S^2) = \log a + b \log(\bar{X})$ 分析可得，油松 $\log(S^2) =$

$1.8588 \log(\bar{X}) - 0.1040$ ， $R^2 = 0.9174$ ；华山松 $\log(S^2) = 1.8114 \log(\bar{X}) - 0.1352$ ， $R^2 = 0.9366$ ，在油松和华山松上 $b > 1$ ，说明侵入孔在油松和华山松上为聚集分布；而马尾松 R^2 仅仅为 0.6855，说明 Talyor 幂法则运算不适用于分析侵入孔在该寄主上的分布类型。上述结果表明，松墨天牛侵入孔在油松、华山松和马尾松树干上呈整体聚集性分布。

表 2 松墨天牛侵入孔在油松上的空间分布格局
Table 2 Spatial distribution pattern of entrance holes of *Monochamus alternatus* on *Pinus tabulaeformis*

树高 (m) Tree height	样本数 N Sample number	平均值 $\bar{X}$ Average	方差 S^2 Variance	拥挤度 m^* Crowding degree	I 指标 Index of I	m^*/m	C_A 指标 Index of C_A	扩散系数 C Diffusion coefficient	K 指标 Index of K
0 ~ 1	10	5.7000	20.4100	8.2807	2.5807	1.4528	0.4528	3.5807	2.2087
1 ~ 2	10	7.3000	25.8100	9.8356	2.5356	1.3473	0.3473	3.5356	2.8790
2 ~ 3	10	7.9000	46.8900	12.8354	4.9354	1.6247	0.6247	5.9354	1.6007
3 ~ 4	10	4.8000	18.3600	7.6250	2.8250	1.5885	0.5885	3.8250	1.6991
4 ~ 5	10	5.7000	13.2100	7.0175	1.3175	1.2311	0.2311	2.3175	4.3262
5 ~ 6	9	4.7778	27.7284	9.5814	4.8036	2.0054	1.0054	5.8036	0.9946
6 ~ 7	9	4.1111	12.0988	6.0541	1.9429	1.4726	0.4726	2.9429	2.1159
7 ~ 8	8	3.1111	4.9877	3.7143	0.6032	1.1939	0.1939	1.6032	5.1579
8 ~ 9	7	2.1429	3.2653	2.6667	0.5238	1.2444	0.2444	1.5238	4.0909
9 ~ 10	5	1.4286	3.1020	2.6000	1.1714	1.8200	0.8200	2.1714	1.2195
10 ~ 11	5	3.0000	10.3333	5.4444	2.4444	1.8148	0.8148	3.4444	1.2273
11 ~ 12	3	3.0000	7.5000	4.5000	1.5000	1.5000	0.5000	2.5000	2.0000
> 12	3	2.2500	6.1875	4.0000	1.7500	1.7778	0.7778	2.7500	1.2857

2.4.2 松墨天牛越冬幼虫的空间分布格局

利用聚集度指标法对松墨天牛越冬幼虫在不同寄主上的聚集度进行测定（表 5 ~ 表 7），结果表明越冬幼虫在油松、华山松和马尾松树干上不同高度处的各项聚集度指标分别为 $I > 0$ ， $C_A > 0$ ， $m^*/m > 1$ ， $C > 1$ 和 $K > 0$ ，表明越冬幼虫在 3 种松树上均呈聚集性分布。根据 I_{WAO} 回归分析法 $m^* = \alpha + \beta \bar{X}$ 可得，油松 $m^* = 3.0056 \bar{X} - 3.3552$ ， $R^2 = 0.9241$ ；华山松 $m^* = 1.2260 \bar{X} + 2.3686$ ， $R^2 = 0.9335$ ；油松和华山松 $\beta > 1$ ，说明越冬幼虫为聚集分布；而马尾松 R^2 仅仅为 0.6562，说明

I_{WAO} 回归分析法不适用于分析越冬幼虫在该寄主上的分布类型。根据 Talyor 幂法则 $\log(S^2) = \log a + b \log(\bar{X})$ 分析可得，油松 $\log(S^2) = 2.2595 \log(\bar{X}) - 0.0971$ ， $R^2 = 0.9388$ ；华山松 $\log(S^2) = 1.6198 \log(\bar{X}) + 0.0741$ ， $R^2 = 0.8662$ ；油松和华山松 $b > 1$ ，说明越冬幼虫为聚集分布；而马尾松 R^2 仅仅为 0.6529，说明 Talyor 幂法则运算不适用于分析越冬幼虫在马尾松上的分布类型。上述分析结果也表明，松墨天牛越冬幼虫在油松、华山松和马尾松树干上呈整体聚集性分布。

表 3 松墨天牛侵入孔在华山松上的空间分布格局

Table 3 Spatial distribution pattern of entrance holes of *Monochamus alternatus* on *Pinus armandii*

树高 (m) Tree height	样本数 N Sample number	平均值 $\bar{X}$ Average	方差 S^2 Variance	拥挤度 m^* Crowding degree	I 指标 Index of I	m^*/m	C_A 指标 Index of C_A	扩散系数 C Diffusion coefficient	K 指标 Index of K
0 ~ 1	11	35.0909	368.4463	44.5907	9.4998	1.2707	0.2707	10.4998	3.6939
1 ~ 2	11	38.6364	373.6860	47.3082	8.6719	1.2244	0.2244	9.6719	4.4554
2 ~ 3	11	31.2727	252.1983	38.3372	7.0645	1.2259	0.2259	8.0645	4.4268
3 ~ 4	11	31.8182	315.4215	40.7314	8.9132	1.2801	0.2801	9.9132	3.5698
4 ~ 5	11	29.7273	329.4711	39.8104	10.0831	1.3392	0.3392	11.0831	2.9482
5 ~ 6	11	28.6364	314.4132	38.6159	9.9795	1.3485	0.3485	10.9795	2.8695
6 ~ 7	9	29.7778	497.5062	45.4851	15.7073	1.5275	0.5275	16.7073	1.8958
7 ~ 8	9	22.8889	326.7654	36.1650	13.2762	1.5800	0.5800	14.2762	1.7241
8 ~ 9	7	22.1429	423.2653	40.2581	18.1152	1.8181	0.8181	19.1152	1.2223
9 ~ 10	7	15.1429	81.5510	19.5283	4.3854	1.2896	0.2896	5.3854	3.4530
10 ~ 11	5	6.6000	27.4400	9.7576	3.1576	1.4784	0.4784	4.1576	2.0902
11 ~ 12	2	3.0000	4.0000	3.3333	0.3333	1.1111	0.1111	1.3333	9.0000
> 12	1	0.0000	0.0000						

表 4 松墨天牛侵入孔在马尾松上的空间分布格局

Table 4 Spatial distribution pattern of entrance holes of *Monochamus alternatus* on *Pinus massoniana*

树高 (m) Tree height	样本数 N Sample number	平均值 $\bar{X}$ Average	方差 S^2 Variance	拥挤度 m^* Crowding degree	I 指标 Index of I	m^*/m	C_A 指标 Index of C_A	扩散系数 C Diffusion coefficient	K 指标 Index of K
0 ~ 1	19	2.6000	51.0400	21.2308	18.6308	8.1657	7.1657	19.6308	0.1396
1 ~ 2	19	3.9000	38.8900	12.8718	8.9718	3.3005	2.3005	9.9718	0.4347
2 ~ 3	19	6.5000	49.4500	13.1077	6.6077	2.0166	1.0166	7.6077	0.9837
3 ~ 4	19	7.0000	47.8000	12.8286	5.8286	1.8327	0.8327	6.8286	1.2010
4 ~ 5	19	9.2000	124.7600	21.7609	12.5609	2.3653	1.3653	13.5609	0.7324
5 ~ 6	18	8.8889	45.4321	13.0000	4.1111	1.4625	0.4625	5.1111	2.1622
6 ~ 7	17	9.0000	85.7778	17.5309	8.5309	1.9479	0.9479	9.5309	1.0550
7 ~ 8	15	10.8571	89.5510	18.1053	7.2481	1.6676	0.6676	8.2481	1.4979
8 ~ 9	14	13.1429	160.1224	24.3261	11.1832	1.8509	0.8509	12.1832	1.1752
9 ~ 10	12	9.3333	39.2222	12.5357	3.2024	1.3431	0.3431	4.2024	2.9145
10 ~ 11	11	10.8333	84.1389	17.6000	6.7667	1.6246	0.6246	7.7667	1.6010
11 ~ 12	10	13.0000	107.6000	20.2769	7.2769	1.5598	0.5598	8.2769	1.7865
12 ~ 13	8	11.4000	71.4400	16.6667	5.2667	1.4620	0.4620	6.2667	2.1646
13 ~ 14	7	16.0000	69.5000	19.3438	3.3438	1.2090	0.2090	4.3438	4.7850
> 14	4	12.7500	112.6875	20.5882	7.8382	1.6148	0.6148	8.8382	1.6266

表 5 松墨天牛越冬幼虫在油松上的空间分布格局

Table 5 Spatial distribution pattern of the larvae of *Monochamus alternatus* on *Pinus tabulaeformis*

树高 (m) Tree height	样本数 <i>N</i> Sample number	平均值 $\bar{X}$ Average	方差 S^2 Variance	拥挤度 m^* Crowding degree	<i>I</i> 指标 Index of <i>I</i>	m^*/m	C_A 指标 Index of C_A	扩散系数 <i>C</i> Diffusion coefficient	<i>K</i> 指标 Index of <i>K</i>
0 ~ 1	9	13. 8000	347. 3600	37. 9710	24. 1710	2. 7515	1. 7515	25. 1710	0. 5709
1 ~ 2	9	14. 3000	335. 6100	36. 7692	22. 4692	2. 5713	1. 5713	23. 4692	0. 6364
2 ~ 3	9	10. 1000	337. 0900	42. 4752	32. 3752	4. 2055	3. 2055	33. 3752	0. 3120
3 ~ 4	9	5. 0000	31. 8000	10. 3600	5. 3600	2. 0720	1. 0720	6. 3600	0. 9328
4 ~ 5	9	4. 8000	19. 9600	7. 9583	3. 1583	1. 6580	0. 6580	4. 1583	1. 5198
5 ~ 6	8	3. 1111	5. 8765	4. 0000	0. 8889	1. 2857	0. 2857	1. 8889	3. 5000
6 ~ 7	8	2. 6667	5. 3333	3. 6667	1. 0000	1. 3750	0. 3750	2. 0000	2. 6667
7 ~ 8	8	1. 5556	2. 9136	2. 4286	0. 8730	1. 5612	0. 5612	1. 8730	1. 7818
8 ~ 9	6	1. 4286	3. 9592	3. 2000	1. 7714	2. 2400	1. 2400	2. 7714	0. 8065
9 ~ 10	6	1. 8571	2. 6939	2. 3077	0. 4505	1. 2426	0. 2426	1. 4505	4. 1220
10 ~ 11	5	2. 3333	7. 5556	4. 5714	2. 2381	1. 9592	0. 9592	3. 2381	1. 0426
11 ~ 12	3	2. 2500	8. 1875	4. 8889	2. 6389	2. 1728	1. 1728	3. 6389	0. 8526
> 12	3	2. 0000	6. 0000	4. 0000	2. 0000	2. 0000	1. 0000	3. 0000	1. 0000

表 6 松墨天牛越冬幼虫在华山松上的空间分布格局

Table 6 Spatial distribution pattern of the larvae of *Monochamus alternatus* on *Pinus armandii*

树高 (m) Tree height	样本数 <i>N</i> Sample number	平均值 $\bar{X}$ Average	方差 S^2 Variance	拥挤度 m^* Crowding degree	<i>I</i> 指标 Index of <i>I</i>	m^*/m	C_A 指标 Index of C_A	扩散系数 <i>C</i> Diffusion coefficient	<i>K</i> 指标 Index of <i>K</i>
0 ~ 1	14	33. 8571	200. 5510	38. 7806	4. 9234	1. 1454	0. 1454	5. 9234	6. 8767
1 ~ 2	14	38. 6429	190. 6582	42. 5767	3. 9339	1. 1018	0. 1018	4. 9339	9. 8232
2 ~ 3	14	34. 2143	295. 5969	41. 8539	7. 6396	1. 2233	0. 2233	8. 6396	4. 4786
3 ~ 4	14	32. 6429	396. 0867	43. 7768	11. 1339	1. 3411	0. 3411	12. 1339	2. 9318
4 ~ 5	14	28. 7857	338. 3112	39. 5385	10. 7527	1. 3735	0. 3735	11. 7527	2. 6771
5 ~ 6	14	30. 6429	453. 9439	44. 4569	13. 8140	1. 4508	0. 4508	14. 8140	2. 2182
6 ~ 7	12	28. 7500	253. 0208	36. 5507	7. 8007	1. 2713	0. 2713	8. 8007	3. 6856
7 ~ 8	12	20. 3333	201. 7222	29. 2541	8. 9208	1. 4387	0. 4387	9. 9208	2. 2793
8 ~ 9	9	18. 5556	73. 1358	21. 4970	2. 9415	1. 1585	0. 1585	3. 9415	6. 3083
9 ~ 10	9	14. 2222	61. 0617	17. 5156	3. 2934	1. 2316	0. 2316	4. 2934	4. 3184
10 ~ 11	7	9. 0000	74. 8571	16. 3175	7. 3175	1. 8131	0. 8131	8. 3175	1. 2299
11 ~ 12	2	4. 0000	9. 0000	5. 2500	1. 2500	1. 3125	0. 3125	2. 2500	3. 2000
> 12	1	0. 0000	0. 0000						

表 7 松墨天牛越冬幼虫在马尾松上的空间分布格局

Table 7 Spatial distribution pattern of the larvae of *Monochamus alternatus* on *Pinus massoniana*

树高 (m) Tree height	样本数 N Sample number	平均值 $\bar{X}$ Average	方差 S^2 Variance	拥挤度 m^* Crowding degree	I 指标 Index of I	m^*/m	C_A 指标 Index of C_A	扩散系数 C Diffusion coefficient	K 指标 Index of K
0 ~ 1	19	4.1000	30.2900	10.4878	6.3878	2.5580	1.5580	7.3878	0.6418
1 ~ 2	19	3.4000	17.6400	7.5882	4.1882	2.2318	1.2318	5.1882	0.8118
2 ~ 3	19	5.6000	21.6400	8.4643	2.8643	1.5115	0.5115	3.8643	1.9551
3 ~ 4	19	4.5000	19.8500	7.9111	3.4111	1.7580	0.7580	4.4111	1.3192
4 ~ 5	19	5.5000	20.2500	8.1818	2.6818	1.4876	0.4876	3.6818	2.0508
5 ~ 6	18	5.2222	21.9506	8.4255	3.2033	1.6134	0.6134	4.2033	1.6303
6 ~ 7	17	7.2222	79.0617	17.1692	9.9470	2.3773	1.3773	10.9470	0.7261
7 ~ 8	15	10.4286	89.3878	18.0000	7.5714	1.7260	0.7260	8.5714	1.3774
8 ~ 9	14	12.2857	53.9184	15.6744	3.3887	1.2758	0.2758	4.3887	3.6255
9 ~ 10	12	10.3333	61.2222	15.2581	4.9247	1.4766	0.4766	5.9247	2.0983
10 ~ 11	11	8.3333	101.2222	19.4800	11.1467	2.3376	1.3376	12.1467	0.7476
11 ~ 12	10	10.6000	79.4400	17.0943	6.4943	1.6127	0.6127	7.4943	1.6322
12 ~ 13	8	9.8000	68.5600	15.7959	5.9959	1.6118	0.6118	6.9959	1.6344
13 ~ 14	7	11.7500	36.6875	13.8723	2.1223	1.1806	0.1806	3.1223	5.5363
> 14	4	8.2500	48.6875	13.1515	4.9015	1.5941	0.5941	5.9015	1.6832

3 结论与讨论

松墨天牛是一种重大林业有害生物,为松材线虫病的主要传播媒介,在秦巴林区主要危害油松、华山松、马尾松、白皮松、日本黑松和巴山松等。本研究对秦巴林区 3 种主要受害松树(油松、华山松、马尾松)的冬季疫木进行了松墨天牛危害解析,结果表明该害虫在不同寄主上的危害程度差异显著,以华山松受害最重,其次为马尾松和油松。松墨天牛越冬幼虫在油松上主要危害皮下 1~2 cm 的边材;在华山松和马尾松上分布比较多样,以髓心部位危害最重,其后依次为心材、边材和树皮。在油松和华山松上,松墨天牛主要在 0~7 m 主干上危害;而在马尾松上,松墨天牛主要危害树干 7 m 以上部分。另外,本研究明确了松墨天牛侵入孔和越冬幼虫在不同寄主(油松、华山松和马尾松)树干上均呈聚集性分布,并发现侵入孔和越冬幼虫数量分别与寄主胸径呈显著正相关,且侵入孔数量的增长速率高于

幼虫数量的增长速率。这些研究结果对于进一步全面揭示松墨天牛在秦巴林区的危害特点提供了基础信息。

本研究涉及的马尾松主要分布于秦岭的佛坪县和大巴山的西乡县、岚皋县。松墨天牛在该区域的马尾松上的越冬幼虫数量和侵入孔数量均随着树干部位离地距离的增加而增加,且主要集中在树干中上部(7 m 以上);另外,越冬幼虫主要分布在心材和髓心部分。这些结果与以往在其它地区开展的松墨天牛在马尾松上的危害研究存在明显差异。例如,孟俊国等(2012)对浙江省富阳地区松墨天牛幼虫在马尾松上的分布规律研究发现,其幼虫及侵入孔数量随着树干部位距离地面高度的增加而呈“钟形”分布,即主要集中在树干中部,其中 2~5 m 处树干的幼虫数量占幼虫总数的 62.44%、侵入孔数量占侵入孔总数的 64.88%。涂业苟等(2018)关于江西万安县的松墨天牛幼虫在马尾松树干的危害研究发现,其虫口数量大小依次为下段(1~4 m)、中段(5~8 m)、梢段,且 2 m 以下树干的虫量占整株虫口

数量的 20.35%。卢桦等 (2019) 对松墨天牛在江西赣州马尾松林的危害研究发现, 其侵入孔在受害致死树的树干中段数量最多, 其次分别为下段和上段。以上结果表明, 不同地区马尾松上松墨天牛幼虫的垂直分布存在明显差异, 这可能与当地的气候、海拔、林分特点等因素有关。

本研究首次对秦巴林区油松和华山松上松墨天牛的侵入孔及越冬幼虫分布规律进行了调查, 结果表明侵入孔与越冬幼虫均主要分布于树干中下部 (0~7 m), 侵入孔在油松和华山松 0~7 m 树干的数量分别占整棵树木侵入孔数量的 75.17% 和 76.33%, 越冬幼虫则分别占整棵树上虫口数量的 81.50% 和 75.84%。但松墨天牛越冬幼虫主要分布在华山松树干的心材和髓心部分, 而在油松中主要分布于树皮 1~2 cm 的边材 (在树干基部尤为明显)。

聚集度分析结果表明, 松墨天牛侵入孔和越冬幼虫在油松、华山松和马尾松上全部呈聚集性分布, 且在华山松、油松上的聚集度较大, 在马尾松上的聚集度较小。其他相关研究也表明松墨天牛在马尾松上呈聚集性分布 (王玲萍等, 2002; 张彦龙, 2012; 曾城等, 2015; 涂业苟等, 2018; 温小遂等, 2018)。在秦巴林区, 松墨天牛在油松、华山松上的聚集度大于在马尾松上的聚集度, 这应与松墨天牛的寄主选择性以及该林区的树种组成、优势度差异及林分特点等密切相关。鉴于目前松材线虫病北扩西进蔓延加速、危害日益加重 (Wang *et al.*, 2020), 大尺度地理范围下松墨天牛对寄主的选择性研究亟待开展, 其结果有望对该害虫的有效防控和松材线虫病的蔓延控制提供重要信息。

本研究发现松墨天牛侵入孔数量和越冬幼虫数量与松树胸径大小呈正相关, 但侵入孔的增长速率高于幼虫数量的增长速率。这应是由松墨天牛的聚集分布习性及其幼虫的死亡率密切相关。王玲萍等 (2002) 对福建省武夷山地区天牛幼虫的研究表明, 胸径小、长势越弱的马尾松易遭受松墨天牛危害, 且天牛侵入孔密度、幼虫密度与马尾松胸径呈正相关。杨子祥等 (2010) 对云南省昆明市北部金殿林区松墨天牛在云南松上的垂直分布规律研究发现, 在一定胸径范围内, 天牛侵入孔和幼虫数量均与树干胸径呈极显著相关。但孟俊国等 (2012) 关于浙江省富阳地区松墨天牛幼虫在马尾松上的分布规律研究表明, 其侵入孔

和幼虫数量与马尾松树胸径无明显相关性。高尚坤等 (2015) 在贵州遵义县的研究也表明, 松墨天牛幼虫数量与寄主胸径关系不显著。以上相关研究表明, 松墨天牛对寄主的危害特点可能因地理区域及林分、地貌等不同而发生变化, 系统研究不同地区松墨天牛的危害规律及其与寄主的关系, 对于针对性地进行松材线虫综合防控和分区治理具有重要意义。

致谢: 感谢陕西省柞水县、宁陕县、佛坪县、西乡县、岚皋县森防站和龙草坪林业局相关工作人员在外业调查中的支持和帮助。

参考文献 (References)

- Cai ML. Distributing PWN in *Pinus massoniana* and Analysis of Environmental Factors Impacting Adulthood Duration of *Monochamus alternatus* Hope [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019. [蔡梦玲. 松材线虫在树干中的分布与松墨天牛成虫历期影响因素分析 [D]. 福州: 福建农林大学, 2019]
- Cassie RM. Frequency distribution models in the ecology of plankton and other organisms [J]. *Journal of Animal Ecology*, 1962, 31 (1): 65–92.
- Chen CN, Zhu LQ, Tian L, *et al.* Spatial-temporal changes in vegetation characteristics and climate in the Qinling-Daba Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (9): 3257–3266. [陈超男, 朱连奇, 田莉, 等. 秦巴山区植被覆盖变化及气候因子驱动分析 [J]. 生态学报, 2019, 39 (9): 3257–3266]
- Chen SL, Wang LP, Huang JC, *et al.* Study on the vertical distribution of *Monochamus alternatus* Hope larvae on *Pinus massoniana* [J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2001, 21 (4): 297–300. [陈顺立, 王玲萍, 黄金聪, 等. 松墨天牛幼虫在马尾松树上垂直分布的研究 [J]. 福建林学院学报, 2001, 21 (4): 297–300]
- David FN, Moore PG. Notes on contagious distributions in plant populations [J]. *Annals of Botany*, 1954, 18 (1): 47–53.
- Futai K. Pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* [J]. *Annual Review of Phytopathology*, 2013, 51: 61–83.
- Gao SK, Tang YL, Zhang YL, *et al.* Distribution of *Monochamus alternatus* on the trunks of *Pinus massoniana* [J]. *Forest Research*, 2015, 28 (5): 708–712. [高尚坤, 唐艳龙, 张彦龙, 等. 松褐天牛在马尾松树干上的分布规律 [J]. 林业科学研究, 2015, 28 (5): 708–712]
- Iwao S. A new regression method for analyzing the aggregation pattern of animal populations [J]. *Researches on Population Ecology*, 1968, 10 (1): 1–20.
- Jiang SN. *Cerambycid Larvae of China* [M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1989. [蒋书楠. 中国天牛幼虫 [M]. 重庆: 重庆出版社, 1989]
- Kobayashi F, Yamane A, Ikeda T. The Japanese pine sawyer beetle as

- the vector of pine wilt disease [J]. *Annual Review of Entomology*, 1984, 29: 115–135.
- Li HM, Shen PY, Fu P, *et al.* Characteristics of the emergence of *Monochamus alternatus*, the vector of *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda: Aphelenchoididae), from *Pinus thunbergii* logs in Nanjing, China, and of the transmission of the nematodes through feeding wounds [J]. *Nematology*, 2007, 9: 807–816.
- Li J. Value of the Vegetation Ecosystem Services in the QinBa Mountains of Shaanxi [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2003. [李晶. 陕西秦巴山区植被生态调节功能及其生态服务价值测评 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2003]
- Lloyd M. Mean crowding [J]. *Journal of Animal Ecology*, 1967, 36 (1): 1–30.
- Lu H, Chen YS, Luo ZD, *et al.* Vertical distribution of *Monchamus alternatus* in infected *Bursaphelenchus xylophilus* tree trunks [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 34 (2): 229–234. [卢桦, 陈元生, 罗致迪, 等. 松褐天牛在松材线虫病病死树上的垂直分布规律 [J]. 福建农业学报, 2019, 34 (2): 229–234]
- Ma XP, Bai HY, He YN, *et al.* Vegetation phenology and its response to air temperature in Qinling Mountains based on NDVI: A case study in Shaanxi Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35 (12): 1616–1621. [马新萍, 白红英, 贺映娜, 等. 基于 NDVI 的秦岭山地植被遥感物候及其与气温的响应关系——以陕西境内为例 [J]. 地理科学, 2015, 35 (12): 1616–1621]
- Mamiya Y. Pathology of the pine wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus* [J]. *Annual Review of Phytopathology*, 1983, 21: 201–220.
- Meng JG, Liu B, Xu HC, *et al.* Study on distribution of *Monochamus alternatus* larvae on *Pinus massoniana* [J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2012, 32 (2): 41–44. [孟俊国, 刘博, 徐华潮, 等. 松墨天牛幼虫在马尾松上的分布规律研究 [J]. 浙江林业科技, 2012, 32 (2): 41–44]
- Ning T, Fang YL, Tang J, *et al.* Advances in research on *Bursaphelenchus xylophilus* and its key vector *Monochamus* spp. [J]. *Entomological Knowledge*, 2004, 41 (2): 97–104. [宁眺, 方宇凌, 汤坚, 等. 松材线虫及其关键传媒墨天牛的研究进展 [J]. 昆虫知识, 2004, 41 (2): 97–104]
- Taylor LR. Aggregation, variance and the mean [J]. *Nature*, 1961, 189: 732–735.
- Tu YG, Yu AL, Zeng JH, *et al.* Study on distribution of *Monochamus alternatus* Hope [J]. *Biological Disaster Science*, 2018, 41 (2): 138–143. [涂业苟, 喻爱林, 曾吉华, 等. 松褐天牛垂直分布规律 [J]. 生物灾害科学, 2018, 41 (2): 138–143]
- Wang LP, Chen SL, Wu FH, *et al.* Study on the spatial pattern of larvae of *Monochamus alternatus* Hope [J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2002, 22 (1): 78–81. [王玲萍, 陈顺立, 武福华, 等. 松墨天牛幼虫空间格局的研究 [J]. 福建林学院学报, 2002, 22 (1): 78–81]
- Wang Y, Chen FM, Wang LC, *et al.* Investigation of beetle species that carry the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner and Buhner) Nickle, in China [J]. *Journal of Forestry Research*, 2020, 23: 981–987.
- Wen XS, Deng L, Liao FF, *et al.* The spatial structure and distribution pattern of *Monochamus alternatus* Hope larvae on the bait – trees in *Pinus massoniana* forests [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49 (10): 1995–2000. [温小遂, 邓礼, 廖菲菲, 等. 危害松阔木的松褐天牛幼虫空间格局及分布规律 [J]. 南方农业学报, 2018, 49 (10): 1995–2000]
- Xiao GR. Chinese Forest Insects [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1992. [萧刚柔. 中国森林昆虫 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1992]
- Yang XK, Lin MY. Insect Fauna of the Qinling Mountains. 6. Coleoptera. 2. Longicorn [M]. Xi'an: World Book Publishing Xi'an Co., Ltd, 2017. [杨星科, 林美英. 秦岭昆虫志. 6. 鞘翅目. 二. 天牛类 [M]. 西安: 世界图书出版西安有限公司, 2017]
- Yang ZX, Wang JM, Chen XO, *et al.* The vertical distribution characteristics of *Monochamus alternatus* on *Pinus yunnanensis* trunks [J]. *Forest Research*, 2010, 23 (4): 607–611. [杨子祥, 王健敏, 陈晓鸣, 等. 松墨天牛在云南松树干的垂直分布研究 [J]. 林业科学研究, 2010, 23 (4): 607–611]
- Zeng C, Zhou F, Peng LH, *et al.* Distribution characteristics and prediction of population number of *Monochamus alternatus* Hope in Ji'an City, Jiangxi [J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2015, 5 (6): 7–9. [曾城, 周峰, 彭龙慧, 等. 松褐天牛在江西吉安分布特点及虫口数量预测研究 [J]. 农业灾害研究, 2015, 5 (6): 7–9]
- Zhai YQ, Zhang C, Zhou Q, *et al.* Spatio-temporal variation and interrelationship of vegetation cover and soil moisture in Qinling-Daba Mountains [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20 (7): 967–977. [翟雅倩, 张翀, 周旗, 等. 秦巴山区植被覆盖与土壤湿度时空变化特征及其相互关系 [J]. 地球信息科学学报, 2018, 20 (7): 967–977]
- Zhang XY, Luo YQ. Major Biological Disasters in China's Forests [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2003. [张星耀, 骆有庆. 中国森林重大生物灾害 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2003]
- Zhang YL. Studies on Pollution-Free Techniques to Control *Monochamus alternatus* Hope (Coleoptera: Cerambycidae) for Suppression of Pine Wilt Disease [D]. Beijing: Forestry Protection, Chinese Academy of Forestry, 2012. [张彦龙. 无公害技术防治松褐天牛控制松材线虫病研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012]
- Zhao LL, Mota M, Vieira P, *et al.* Interspecific communication between pinewood nematode, its insect vector, and associated microbes [J]. *Trends in Parasitology*, 2014, 30: 299–308.
- Zhong JM. Larval Taxonomy [M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1990. [钟觉民. 幼虫分类学 [M]. 北京: 农业出版社, 1990]
- Zhu YP. Spatial Pattern of *Monochamus alternatus* Population [D]. Haerbin: Northeast Forestry University, 2009. [朱彦鹏. 松墨天牛种群空间格局特征研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009]