



新疆哈密林区天山重齿小蠹发生规律与空间分布特征

石冰杰 葛舒悦 郭添祎 吴照晨 唐光辉

Spatiotemporal distribution characteristics and occurrence patterns of *Ips hauseri* in the Hami forest region, Xinjiang of northwestern China

Shi Bingjie, Ge Shuyue, Guo Tianyi, Wu Zhaochen, Tang Guanghui

引用本文:

石冰杰, 葛舒悦, 郭添祎, 吴照晨, 唐光辉. 新疆哈密林区天山重齿小蠹发生规律与空间分布特征[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(9):60–68. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260082

Shi Bingjie, Ge Shuyue, Guo Tianyi, Wu Zhaochen, Tang Guanghui. Spatiotemporal distribution characteristics and occurrence patterns of *Ips hauseri* in the Hami forest region, Xinjiang of northwestern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2026, 48(9):60–68. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260082

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260082>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

林隙大小对天山云杉幼树更新的影响

Effects of gap size on regeneration of saplings in *Picea schrenkiana* in Xinjiang of northwestern China

北京林业大学学报, 2023, 45(11): 23–32. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230116>

不同林火烈度对大兴安岭兴安落叶松天然林林木空间分布格局的影响

Effects of different forest fire intensities on the spatial distribution pattern of natural *Larix gmelinii* forests in the Great Xing'an Mountains of northeastern China

北京林业大学学报, 2023, 45(2): 87–95. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210367>

长林小蠹林间种群扬飞日节律观察及飞行能力测定

Flight daily rhythm observation and flight ability assessment of *Hylurgus ligniperda* populations in forests

北京林业大学学报, 2025, 47(4): 1–9. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240236>

基于贝叶斯法的新疆天山云杉树高胸径模型研究

Tree height–DBH model for *Picea schrenkiana* in Tianshan Mountain, Xinjiang of northwestern China based on Bayesian method

北京林业大学学报, 2023, 45(1): 11–20. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220318>

天山云杉天然林优势高估计方法

Estimation methods for dominant height in natural forest of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica*

北京林业大学学报, 2025, 47(12): 48–55. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250299>

基于不同立地等级的天山云杉天然林碳汇潜力

Carbon sink potential of natural forests of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* based on different site grades

北京林业大学学报, 2025, 47(4): 74–81. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240337>

DOI:10.12171/j.1000-1522.20260082

新疆哈密林区天山重齿小蠹发生规律与空间分布特征

石冰杰 葛舒悦 郭添祎 吴照晨 唐光辉

(西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:【目的】明确天山重齿小蠹在新疆哈密林区的发生危害规律, 为开展监测防控工作提供科学依据。【方法】2024—2025 年, 在新疆哈密林区雪岭云杉天然林中, 采用林间样地调查、信息素诱捕与树干剥皮调查相结合的方法, 调查天山重齿小蠹成虫扬飞规律和生活史, 比较不同受害类型云杉树干上成虫的分布特征; 统计样地内云杉健康状况, 结合频次分布拟合与聚集度指标, 分析不同发生程度样地受害云杉的空间分布格局。【结果】(1)天山重齿小蠹在哈密林区自然条件下 1 年发生 1 代, 越冬代成虫于 4 月下旬开始出土活动, 当年羽化的成虫于 8 月中旬至 9 月上旬入土越冬; (2)5—9 月为成虫扬飞期, 其中 5—6 月为越冬成虫扬飞期, 高峰期出现在 6 月 10 日前后。7—9 月为当年新羽化成虫的扬飞期, 高峰期出现在 7 月 16 日前后; 不同时段成虫日扬飞节律存在明显差异, 5 月下旬成虫日扬飞活动呈单峰型, 7 月下旬呈双峰型; (3)成虫在受害云杉树干上整体表现为中段分布密度较高, 上部和下部较低的特点; (4)对不同危害程度样地受害云杉频次分布拟合与聚集度指标分析表明, 随着危害程度加重, 受害云杉的空间分布格局由明显聚集逐渐向弱聚集转变, 并最终趋近随机分布。【结论】研究明确了当前哈密林区天山重齿小蠹成虫扬飞规律和生活史的变化, 同时揭示了其在不同受害类型云杉树干上的分布特征及不同危害样地中受害云杉的空间格局变化。

关键词: 天山重齿小蠹; 雪岭云杉; 生活史; 扬飞规律; 空间分布格局

中图分类号: S763.38 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2026)09-0060-09

引文格式: 石冰杰, 葛舒悦, 郭添祎, 等. 新疆哈密林区天山重齿小蠹发生规律与空间分布特征 [J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(9): 60-68. Shi Bingjie, Ge Shuyue, Guo Tianyi, et al. Spatiotemporal distribution characteristics and occurrence patterns of *Ips hauseri* in the Hami forest region, Xinjiang of northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(9): 60-68.

Spatiotemporal distribution characteristics and occurrence patterns of *Ips hauseri* in the Hami forest region, Xinjiang of northwestern China

Shi Bingjie Ge Shuyue Guo Tianyi Wu Zhaochen Tang Guanghui

(College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to clarify the occurrence patterns and damage dynamics of *Ips hauseri* in the Hami forest region, Xinjiang of northwestern China and to provide a scientific basis for monitoring and control. [Method] From 2024 to 2025, field investigations were conducted in natural *Picea schrenkiana* forests in the Hami region. A combination of plot surveys, pheromone trapping and bark-peeling surveys was used to investigate the flight activity patterns and life history of *I. hauseri* adults, and to compare the distribution of adults on the trunks of spruce trees with different damage types. In addition, the health condition of spruce trees within the plots was recorded, and frequency distribution fitting and aggregation indices were applied to analyze the spatial distribution patterns of damaged spruce trees in plots with different infestation levels. [Result] (1) Under natural conditions in the Hami forest region, *I. hauseri* completed one generation per year. Overwintered adults began to emerge from the soil and become active in

收稿日期: 2026-02-13 修回日期: 2026-04-02

基金项目: 天东林管局哈密分局云杉天山重齿小蠹关键防控技术研究(NO.2025006)。

第一作者: 石冰杰。主要研究方向: 森林病虫害。Email: s2023@nwafu.edu.cn 地址: 712100 陕西省杨凌示范区西北农林科技大学林学院。

责任作者: 唐光辉, 教授。主要研究方向: 林业有害生物防治。Email: tanggh@nwafu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <https://j.bjfu.edu.cn>; <https://journal.bjfu.edu.cn>

late April, while newly emerged adults entered the soil for overwintering from mid-August to early September. (2) Adult flight activity occurred from May to September. The flight period of overwintered adults extended from May to June, peaking around June 10, whereas that of newly emerged adults lasted from July to September, with a peak around July 16. Marked differences were observed in daily flight rhythms among different periods: a single-peak pattern was recorded in late May, while a double-peak pattern occurred in late July. (3) Adults on damaged spruce trees were mainly distributed in the middle sections of trunk, with lower densities in the upper and lower sections. (4) Analysis based on frequency distribution fitting and aggregation indices showed that, with increasing damage severity, the spatial distribution of damaged spruce trees shifted from a highly aggregated pattern to a weakly aggregated pattern, and eventually approached a random distribution. [Conclusion] This paper clarifies the flight activity patterns and life history of adult *I. hauseri* in the Hami forest region of Xinjiang, and reveals the distribution patterns of adults on spruce trunks with different damage types, as well as the spatial pattern changes of damaged spruce trees in plots with different infestation levels.

Key words: *Ips hauseri*; *Picea schrenkiana*; life history; flight activity rhythm; spatial distribution pattern

近年来,随着全球气温持续升高,高海拔及干旱—半干旱地区的针叶林生态系统所面临的干旱、高温等环境胁迫不断加剧^[1]。气温升高、降水时空分布变化以及水文过程改变导致干旱和极端气候事件频发,不仅影响森林生态系统的结构与功能,还会抑制林木生长、降低生态系统稳定性,并增加林业有害生物发生的风险性^[2-3]。小蠹类(Scolytinae)害虫是针叶林中危害较重的一类蛀干害虫,通过取食寄主韧皮部、破坏输导组织,干扰树体正常生理活动,导致林木生长衰弱,严重时甚至造成成片林木死亡^[4-5]。在全球气候变暖背景下,部分地区小蠹类害虫的发生频率、危害范围和程度均有所上升,对针叶林生态系统的稳定性构成了更大威胁^[6]。同时,小蠹虫具有较为明确的生活史节律,其成虫扬飞活动具有显著的时间特征,并依赖信息素介导完成聚集侵染与扩散^[7-8]。此外,小蠹虫物候节律对气温变化较为敏感,气候变暖可能导致其物候期提前、年发生代数增加,并推动其分布范围向高纬度和高海拔地区扩展^[9]。

天山重齿小蠹(*Ips hauseri*)是我国新疆雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)天然林中重要的蛀干害虫,主要危害雪岭云杉,是导致天山地区云杉林衰退的重要生物胁迫因子之一^[10-11]。该虫主要分布于天山山脉区域,在中亚部分国家亦有分布记录,但目前国内外针对该虫的研究整体相对薄弱^[12]。现有研究主要集中于其形态分类、生活史及化学生态学等方面^[10-13],而在气候变暖背景下,该虫在哈密林区高海拔典型区域的发生动态、成虫扬飞规律及空间分布特征等科学问题尚缺乏系统性研究。

本研究以新疆哈密林区雪岭云杉天然林中的天山重齿小蠹为研究对象,采用林间样地调查、树干剥皮调查及信息素诱捕监测等方法,研究该虫在当前

气候条件下的年生活史特征、成虫全年及不同时段扬飞活动规律,以及成虫在不同受害类型雪岭云杉树干上的分布特征;同时,通过对比不同虫害发生程度样地中受害雪岭云杉的空间分布差异,分析天山重齿小蠹在哈密林区不同危害程度下的空间分布格局的变化。本研究旨在揭示全球气候变暖背景下天山重齿小蠹在哈密林区的发生与危害规律,为该虫的精准监测预警及综合防控提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆维吾尔自治区天山东部国有林管理局哈密分局巴里坤营林区西黑沟管护所72、73林班(43°32'33"N、92°56'05"E),海拔2 100 m。该区域属温带大陆性干旱气候,降水稀少,昼夜温差大^[14]。研究区涉及72、73林班多个小班,总面积约528.15 hm²。植被类型是以雪岭云杉为优势树种的天然林^[15]。林分平均胸径为16~32 cm,平均树高8~16 m,林龄为50~160年,郁闭度为0.4~0.8。近年来,天山重齿小蠹在该林区中持续发生并扩散,林间可见针叶失绿、发黄、顶梢枯死及整株死亡等不同受害症状,严重威胁该林区雪岭云杉天然林的生态安全。

1.2 成虫扬飞活动监测

1.2.1 全年扬飞动态

2025年4月下旬至9月上旬,在新疆哈密林区西黑沟设置诱捕样地,对天山重齿小蠹成虫全年扬飞活动进行连续监测。样地内共布设诱捕器9个,诱捕器间距均不小于30 m,悬挂高度1.5 m。诱捕器及天山重齿小蠹诱芯均由中捷四方生物有限公司提供,调查期间共更换诱芯2次。每4 d调查1次,连续监测至9月上旬;当诱捕器连续2次调查均未捕

获天山重齿小蠹成虫时,判定当年扬飞活动基本结束。每次调查时,清理并统计各诱捕器中捕获的成虫数量,分析其全年扬飞活动动态。监测期间记录每日气温、降雨等天气状况。

1.2.2 日扬飞活动节律

利用 1.2.1 所布设的诱捕,分别在越冬成虫活动期(2025 年 5 月 25 日至 31 日)和当年新羽化成虫活动期(2025 年 7 月 25 日至 31 日)开展日扬飞活动节律监测。各时间段选择 3 个晴朗、无风日进行。每日 08:00—21:00 按 1 h 间隔收集并计数诱捕器内成虫,分析不同时间段天山重齿小蠹成虫的日扬飞活动节律。

1.3 生活史调查

2024 年 6 月至 2025 年 9 月,在研究区布设固定样地,采用林间踏查、树干剥皮解剖、信息素诱捕监测和土壤筛样相结合的方法调查天山重齿小蠹生活史。林间踏查每 10 d 进行 1 次,主要观察林间受害木变化及天山重齿小蠹活动情况。每次随机选取 4 株受害木,在树干距地 0.5~1.5 m 范围内剥取 8 cm × 10 cm 样方树皮,记录树皮坑道内卵、幼虫、蛹和成虫的发生情况。信息素诱捕监测具体方法见 1.2.1,记录天山重齿小蠹成虫扬飞活动。于 8 月上旬至 9 月上旬,在当年枯死木样株南侧距树干基部 70 cm 处 0~20 cm 土层取样,利用孔径 2 mm 土壤筛筛土,调查土壤中成虫数量、入土越冬状况。结合各虫态在林间的出现时间及数量变化,明确天山重齿小蠹的世代发生规律。

1.4 不同受害类型雪岭云杉树干上天山重齿小蠹成虫分布调查

2024 年 7 月,选择胸径 15~20 cm、树高 10~12 m 的雪岭云杉样树,根据树冠针叶颜色变化及树干受害症状将样树划分为健康、针叶失绿、针叶发黄和顶梢枯死 4 种类型,每种类型选取样株 3 株。其中,健康样树表现为针叶绿色,树冠完整,小枝和针叶无明显下垂,树干表面未见侵入孔、虫粪等受害症状;针叶失绿样树表现为树冠上部针叶颜色褪绿,尚未出现明显发黄症状,部分枝条失水下垂,树干表面受害症状不明显,少数云杉 2 m 以下可见少量侵入孔或虫粪;针叶发黄样树表现为树冠中上部针叶明显黄化,树势衰弱,树干表面可见侵入孔、虫粪等受害症状;顶梢枯死样树表现为树冠顶部枝梢枯死,中下部针叶失绿或发黄,树干表面可见侵入孔、虫粪等受害症状。样株伐倒后,沿树干自基部至顶部按 1 m 间隔设置取样点,每个取样点设置 3 个 15 cm × 10 cm 样方,剥离树皮并记录样方内天山重齿小蠹成虫数量,调查不同受害类型雪岭云杉树干不同高度

部位天山重齿小蠹成虫分布情况。

1.5 林间危害空间分布格局调查

1.5.1 样地设置与调查方法

2025 年 7 月在林间设置样地,开展危害空间分布格局调查。不同危害程度样地划分标准参照《森林病虫害发生及成灾标准》(LY/T 1681—2006)^[16],并结合研究区实际危害情况,以危害造成的树冠发黄或死亡株率为判据,将样地划分为轻度($\leq 5\%$)、中度($5\% < \text{死亡株率} \leq 10\%$)和重度($> 10\%$)3 类。每个样地面积不小于 100 m × 100 m。调查时观察树干上是否存在天山重齿小蠹典型危害症状(如侵入孔、羽化孔或虫粪等),出现任一症状判定为受害样树。样地内逐株调查样树受害情况,以连续 10 株样树为 1 个调查单元,每个样地调查 60 个单元,共调查 600 株样树。

1.5.2 频次分布拟合分析

以每个调查单元内受害木株数为统计变量(X , $X = 0 \sim 10$),统计不同受害程度样地中各 X 值对应的调查单元频次(F),构建频次分布表^[17-18]。在此基础上,分别采用奈曼分布、负二项分布和泊松分布对实测频次进行拟合^[19]。采用卡方(χ^2)检验比较理论频次与观测频次之间的差异,当 χ^2 计算值小于相应自由度下 $P = 0.05$ 的临界值时,认为拟合差异不显著。

1.5.3 聚集度指标分析

在频次比较的基础上,计算样本均值 m 和样本方差 S^2 ,并采用 5 种聚集度指标对受害雪岭云杉的空间分布特征进行综合判定,包括丛生指数(I)、聚块指数(m^*/m)、Cassie 指数(C_a)、Morisita 扩散指数(I_δ)以及负二项分布参数(K)^[20-22]。 I 的计算式为 $I = S^2/m - 1$,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;聚块指数 $m^*/m = [m + (S^2/m) - 1]/m$,其中, m^* 表示平均拥挤度,其值等于 1、小于 1 和大于 1 时,分别对应随机、均匀和聚集分布, m 为样本均值;Cassie 指数 $C_a = (S^2 - m)/m^2$,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;Morisita 扩散指数 $I_\delta = m^*/(m - 1/n)$,其中 n 为调查单元数, $I_\delta = 1$ 表示随机分布, $I_\delta < 1$ 和 $I_\delta > 1$ 分别表示均匀分布和聚集分布;负二项分布参数 $K = m^2/(S^2 - m)$,当 $K < 0$ 时表示均匀分布, $0 < K < 8$ 时表示聚集分布,随着 K 值增大,聚集程度逐渐减弱,当 K 趋于无穷大时,分布趋近于随机分布。

1.6 数据分析

所有原始数据采用 Excel 2019 进行整理。全年扬飞动态以各调查日 9 个诱捕器 4 d 累计捕获量折算的成虫日平均诱捕量表示,单位为头/(诱捕器·d);日扬飞活动节律以 3 个监测日同 1 小时段 9 个诱捕

器的平均诱捕量表示, 单位为头/(诱捕器·h)。采用 Visio 2019 软件绘制天山重齿小蠹在树干上的分布特点示意图; 采用 DPS 17.10 软件对理论频次与实测频次进行卡方(χ^2)检验, 并计算相应的概率值, 以判定受害雪岭云杉的空间分布类型。数据以均值 $\pm$ 标准差(Mean $\pm$ SD)表示。

2 结果与分析

2.1 天山重齿小蠹成虫扬飞规律

2025 年天山重齿小蠹成虫扬飞活动监测结果表明, 成虫扬飞主要集中于 5—8 月, 呈现出明显的波动变化(图 1)。4 月底至 5 月初开始出现扬飞活动, 5 月中旬出现 1 次扬飞高峰, 随后扬飞数量下降后再次增加, 并于 6 月 10 日前后出现全年最大扬飞高峰。随后扬飞数量再次降低, 并于 7 月中旬形成第 3 个活动高峰期, 此后扬飞数量持续下降, 至 9 月初逐渐趋近于零。

天山重齿小蠹成虫在不同时段的日扬飞活动节律存在明显差异(图 2)。5 月下旬成虫日活动呈单峰型, 自 08:00 开始出现, 10:00 后扬飞数量逐渐增加, 在 12:00—14:00 上升明显, 并于 15:00 达到全日峰值, 为(27.41 $\pm$ 3.98)头/诱捕器。随后扬飞数量逐渐下降, 至 20:00 前后基本结束。7 月下旬成虫日扬飞

节律呈双峰型, 自 08:00 起出现, 于 11:00 出现第 1 个高峰, 为(28.11 $\pm$ 4.43)头/诱捕器。11:00—16:00 扬飞数量相对较低, 16:00 后再次上升, 并于 18:00 出现第 2 个高峰, 为(25.30 $\pm$ 1.39)头/诱捕器, 随后下降, 至 21:00 停止活动。

2.2 哈密林区天山重齿小蠹生活史特征

哈密地区天山重齿小蠹在自然条件下 1 年发生 1 代(表 1)。越冬代成虫于翌年 4 月下旬开始出土活动, 并钻入雪岭云杉树皮内取食、交配及产卵。雌虫于 5 月中旬在母坑道内产卵, 卵期可持续至 6 月中旬; 幼虫期为 6 月上旬至 7 月中旬; 蛹期自 6 月中旬至 8 月上旬。6 月下旬开始出现羽化成虫, 羽化后的成虫在坑道内继续生活补充营养一段时间, 7—8 月期间为新羽化成虫扬飞期, 扬飞的成虫侵入衰弱雪岭云杉树体内继续补充营养, 8 月中旬至 9 月上旬成虫离开树干, 进入树干基部周围土壤中越冬, 至 9 月上旬完成入土越冬, 并在土壤中越冬至翌年 4 月下旬再次出土活动。

2.3 不同受害类型雪岭云杉树干上天山重齿小蠹成虫的分布特征

调查发现, 天山重齿小蠹在失绿型、针叶发黄型和顶梢枯死型 3 种受害类型雪岭云杉树干上均有分布, 而在健康样树上未发现成虫分布。不同受害类

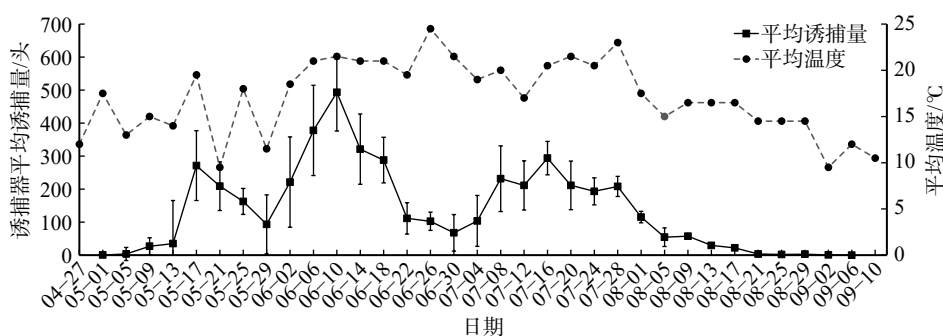


图 1 天山重齿小蠹年扬飞动态

Fig. 1 Annual flight dynamics of *Ips hauseri*

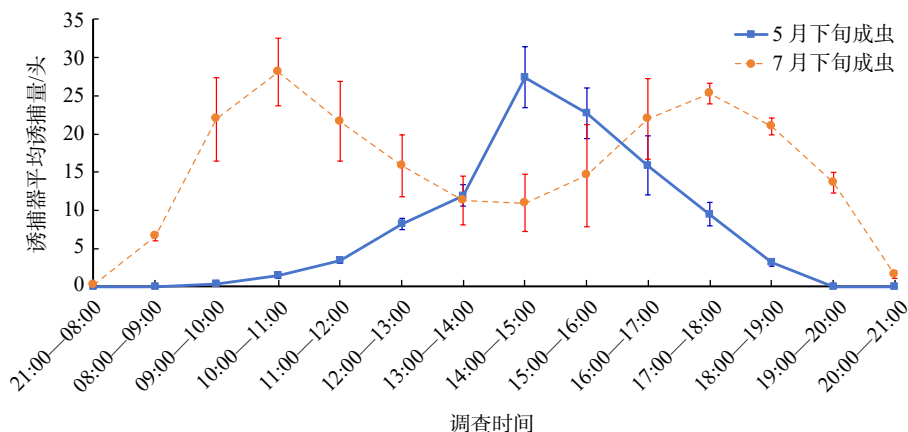


图 2 天山重齿小蠹扬飞日节律

Fig. 2 Daily flight rhythm of *I. hauseri*

表 1 天山重齿小蠹年生活史
Tab. 1 Annual life cycle of *I. hauseri*

虫态	4月		5月		6月		7月		8月		9月		9月中下旬至 翌年4月下旬
	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	
越冬代成虫	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)							
卵			○	○	○	○							
幼虫					—	—	—	—	—				
蛹						△	△	△	△	△			
新羽化成虫							+	+	+	+	+	+	
当年羽化成虫(入土越冬)											(+)	(+)	(+)

注: (+)表示越冬状态成虫, ○表示卵, —表示幼虫, △表示蛹, +表示当年羽化成虫。

型样树中,天山重齿小蠹成虫均表现出树干中部虫口密度较高、树干上部和下部虫口密度相对较低的分布特征。以平均树高 11 m 表示不同受害类型样树树干上天山重齿小蠹成虫的分布情况,如图 3 所示。在顶梢枯死型样树中(图 3a),天山重齿小蠹虫口数量占比超过 10% 的分布区段为 1~6 m,总占比为 75.91%,其中 3~5 m 区段占比为 36.93%,分布相对集中;9~10 m 占比为 1.20%,10 m 以上未发现天山重齿小蠹成虫分布;0~1 m 树干基部占比为 5.19%。在针叶发黄型样树中(图 3b),成虫数量占比超过 10% 的分布区段为 1~8 m,总占比为 84.31%,9~10 m 占比为 2.96%,10 m 以上仍有少量分布,占比为 1.37%;0~1 m 树干基部占比为 7.30%。在针叶失绿型样树中(图 3c),成虫数量占比超过 10% 的分布区段为 2~8 m,总占比为 82.54%,9~10 m 占比为 0.27%,10 m 以上未发现天山重齿小蠹;0~1 m 树干基部未发现成虫分布。

2.4 不同危害程度样地中受害雪岭云杉的空间分布格局

2.4.1 不同危害程度样地中受害雪岭云杉的频次分布特征

在不同危害程度样地中,每个调查单元(10 株样树)内受害木株数的频次分布及其理论分布拟合

结果显示,不同危害程度样地的频次分布特征存在明显差异(表 2)。轻度发生样地中,仅奈曼分布通过拟合检验,负二项分布和泊松分布均未通过,表明受害木株数的频次分布符合奈曼分布特征。中度发生样地中,负二项分布和奈曼分布均通过拟合检验,其中负二项分布的 χ^2 值最低,拟合优度最高,因此可判定中度发生样地中受害木的空间分布以负二项分布为主。重度发生样地中,3 种理论分布均未通过拟合检验,受害木株数的频次分布不符合单一理论分布模型,其分布特征较为复杂,未表现出明显的聚集型分布特征。

2.4.2 不同危害程度样地中受害雪岭云杉的聚集度特征

不同危害程度样地受害雪岭云杉的聚集度指标计算结果(表 3)表明,随着受害程度的加重,受害木的空间分布格局由明显聚集逐渐向弱聚集转变,并最终趋近随机分布。轻度发生和中度发生样地中,丛生指标 I 分别为 0.423 3 和 0.990 4(均大于 0),聚块指数 m^*/m 分别为 1.557 6 和 1.459 2(均大于 1),Cassie 指数 C_a 分别为 0.578 7 和 0.475 1(均大于 0),Morisita 扩散指数 I_δ 分别为 1.594 7 和 1.471 0(均大于 1),且负二项分布参数 K 分别为 1.69 和 2.10(均满足 $0 < K < 8$)。各聚集度指标判定结果一致,表明



图 3 不同受害类型雪岭云杉树干上天山重齿小蠹成虫分布

Fig. 3 Distribution of *Ips hauseri* adults on the trunks of *P. schrenkiana* trees with different damage types

表 2 不同危害程度样地受害雪岭云杉数量的频次分布拟合检验结果

Tab. 2 Goodness-of-fit test results of frequency distribution models for the number of infested *P. schrenkiana* trees in plots with different infestation intensities

危害程度	拟合分布	df	χ^2 (拟合)	χ^2 (临界)	结论
轻度发生	泊松分布	2	11.264	5.991	不适合
	负二项分布	1	4.177	3.841	不适合
	奈曼分布	1	3.177	3.841	适合
中度发生	泊松分布	4	22.345	9.488	不适合
	负二项分布	2	0.841	5.991	适合
	奈曼分布	3	1.653	7.815	适合
重度发生	泊松分布	5	27.247	11.070	不适合
	负二项分布	4	24.655	9.488	不适合
	奈曼分布	4	24.586	9.488	不适合

注: χ^2 (临界)为相应自由度下 $P = 0.05$ 显著性水平的临界值, 自由度 df 按 $df = k - p - 1$ 计算, 其中 k 为有效频数等级数, p 为模型参数估计数。

表 3 不同危害程度样地受害雪岭云杉的聚集度指标

Tab. 3 Aggregation indices of infested *P. schrenkiana* trees in plots with different infestation intensities

危害程度	均值(m)	方差(S^2)	丛生指数(I)	聚块指数(m^*/m)	Cassie 指数(C_a)	Morisita 指数(I_δ)	负二项分布参数(K)	空间分布型
轻度发生	0.72	1.02	0.423 3	1.557 6	0.578 7	1.594 7	1.69	聚集
中度发生	2.08	4.14	0.990 4	1.459 2	0.475 1	1.471 0	2.10	聚集
重度发生	6.98	7.61	0.089 7	1.010 2	0.012 9	1.012 7	77.83	近随机

受害木在轻度发生和中度发生样地中均呈明显聚集分布。重度发生样地中, 丛生指标 I 为 0.089 7, 聚块指数 m^*/m 为 1.010 2, Cassie 指数 C_a 为 0.012 9, Morisita 扩散指数 I_δ 为 1.012 7, 各指标数值均接近随机分布的判定阈值, 负二项分布参数 K 为 77.83, 远大于聚集分布范围 ($0 < K < 8$), 表明空间分布随机性增强。综合判断, 受害木在重度发生样地中的空间分布趋近随机。

3 讨 论

3.1 气候变暖背景下天山重齿小蠹年生活史特征及其变化

在高海拔寒冷地区, 受气温条件及生长季长度限制, 小蠹虫的生活史多表现为 1 年 1 代的特点。相关研究^[22-25]表明, 青海、内蒙古等地区的云杉四眼小蠹 (*Polygraphus polygraphus*)^[22]、多毛切梢小蠹 (*Tomicus pilifer*)^[23]、云杉八齿小蠹 (*I. typographus*)^[24] 及松六齿小蠹 (*I. acuminatus*)^[25] 等, 均以 1 年 1 代发生为主。在气候变暖背景下, 小蠹虫年生活史节律对气温变化的响应也有相关报道。光臀八齿小蠹 (*I. nitidus*) 在不同年份调查中, 其越冬代成虫活动启动时间及年内活动持续时段存在差异, 整体呈现发生期提前、活动期延长的趋势^[26-27]。欧洲云杉八齿小蠹春季活动启动时间和年内活动持续期随气温升高而发生变化, 但在高海拔或高纬度地区, 其年发生代数多数情况下仍以 1 年 1 代为主^[28-29]。哈密巴里坤林区地处高海拔寒冷林区^[14], 天山重齿小蠹生活史

特征总体上与高海拔寒冷地区的发生规律一致。1962 年文守易^[10]在哈密巴里坤林区的调查结果表明, 天山重齿小蠹 1 年发生 1 代, 越冬成虫于翌年 5 月下旬开始活动, 6 月上旬钻入寄主树干内交配并产卵, 6 月中旬出现幼虫, 7 月上旬进入蛹期, 7 月中旬出现当年羽化的新成虫, 8 月中旬开始入土越冬。本研究中天山重齿小蠹的年生活史节律发生了明显变化。调查结果显示, 越冬代成虫于 4 月下旬开始陆续出土活动, 卵期主要集中在 5 月中旬至 6 月中旬。幼虫期出现在 6 月上旬, 蛹期在 6 月中旬至 8 月上旬, 当年新成虫自 6 月下旬起逐渐羽化, 并于 8 月中旬陆续入土, 进入越冬状态。将本研究结果与早期相关研究进行对比发现, 哈密巴里坤林区天山重齿小蠹各虫态在年内的发生时间较以往整体提前, 同时其活动持续时间表现出一定程度的延长。这一变化在宏观尺度上可能与近几十年来哈密地区气候持续变暖有关^[30]。温度作为调控昆虫发育速率和活动的关键因子, 其变化可通过加快个体发育进程、提前越冬后成虫活动启动并延长年内适宜活动时段, 从而调节昆虫的年生活史节律^[9]。需要指出的是, 本研究主要基于哈密林区的调查结果, 关于天山不同区域、不同海拔梯度以及不同年份间天山重齿小蠹生活史节律的差异, 仍有待进一步开展多点位、连续性监测。

3.2 天气条件对天山重齿小蠹成虫扬飞活动的影响

孙晓玲等通过对云杉八齿小蠹越冬代成虫扬飞活动的连续监测发现, 其扬飞高峰通常出现在 5 月下旬至 6 月上旬, 阴雨天气条件下林间活动虫量减

少,天气转晴后可恢复并再次达到较高水平^[31]。有研究认为,短时间不利天气会对扬飞活动的强度和节律暂时产生影响,但不会改变其扬飞活动的总体进程^[32]。本研究结果与上述研究一致,春季天山重齿小蠹越冬代成虫诱捕量随气温升高而逐步增加,5月17日出现第一个扬飞高峰期后至5月底,该阶段内监测区域先后连续出现降雨及低温天气过程。在5月20、21、22及28日出现降雨天气,降雨影响成虫扬飞活动;在降雨结束后的一段时间内,受低温影响,诱捕量仍维持在较低水平。6月上旬天气转晴后,成虫扬飞活动迅速上升并达到全年高峰。这个现象表明,短时间的不利气象条件可能对天山重齿小蠹成虫扬飞活动具有一定的暂时抑制作用,而随着天气条件改善,其扬飞活动能够较快恢复。有研究^[33]表明,不同小蠹在扬飞高峰期过后的活动情况存在差异。多数齿小蠹属小蠹的扬飞活动时间段相对集中,主峰出现后的扬飞强度整体呈下降趋势,但不同物种的衰减速率和持续时间存在差异。例如,松十二齿小蠹(*I. sexdentatus*)成虫发生期较长,但高强度扬飞主要集中于主峰阶段,峰后诱捕量则迅速下降;落叶松八齿小蠹(*I. subelongatus*)的扬飞活动常表现为多个短暂峰值,各峰之间诱捕量明显回落,未形成持续稳定的扬飞特征^[34];光臀八齿小蠹的扬飞曲线则多以单一或少数尖锐峰值为主,峰后强度衰减较快^[26]。与上述研究相比,本研究中天山重齿小蠹在出现明显扬飞高峰后,成虫活动并未迅速降低,而是长时间内维持中等水平的诱捕量,并伴随出现多个次级小高峰,表现出不同于上述齿小蠹属小蠹的扬飞特征。这种差异可能并非仅受时间变化影响,还与不同物种的空间利用方式、扩散行为,以及研究区域虫口基数和寄主空间分布等因素有关。

本研究还发现,不同监测时段天山重齿小蠹成虫在林间的日扬飞节律存在差异,这种差异可能与活动期内温度变化过程有关。5月下旬监测时段内,成虫日活动呈单峰型,主要集中于午后;7月下旬监测时段内,日活动则表现出较为典型的双峰型。结合监测结果分析,春季整体气温较低,适宜成虫扬飞的温度条件主要集中于午后,因此扬飞活动多表现为单峰型;而夏季整体气温显著升高,中午高温可能对飞行活动产生一定抑制作用,使适宜扬飞的时段更多出现在上午和傍晚,因而表现为双峰型。顾颖等^[35]对长林小蠹(*Hylurgus ligniperda*)的研究表明,小蠹成虫林间日扬飞节律会随天气和温度条件变化而变化,在晴朗且温度较高条件下,其活动高峰主要出现在清晨和傍晚,整体表现为双峰型。史全顺等^[36]对东方拟齿小蠹(*Pseudips orientalis*)的研究发现,在

青海黄南地区春季气温较低条件下,越冬成虫日扬飞活动整体呈单峰型,高峰出现在13:00—16:00,这与本研究5月下旬天山重齿小蠹日活动主要集中于午后的结果较为一致。由此来看,在春季低温背景下,小蠹虫的日扬飞活动更可能集中于一天中温度较高的午后时段,而在夏季或较高温条件下则可能转变为双峰型。

3.3 天山重齿小蠹聚集侵染危害的空间分布特征

聚集侵染是多种蛀干害虫普遍具有的重要生态适应性策略,其通过信息素介导的集体攻击,在短时间内聚集大量成虫突破寄主局部防御,取食寄主韧皮部、破坏输导系统,导致寄主林木生长衰弱乃至死亡^[6]。这种单株尺度上的聚集攻击在持续扩展后,往往会进一步在林分尺度上表现为受害木的空间聚集与斑块化分布^[37]。Negrón^[38]研究发现,山松大小蠹(*Dendroctonus ponderosae*)危害导致的死亡木在空间上通常并非随机分布,而是可表现为不同大小的局部死亡斑块;随着危害程度加重,其空间格局会由较强聚集逐渐转向弱聚集甚至近随机分布。类似地,Colombari等^[39]对六齿小蠹(*I. acuminatus*)的研究表明,其暴发过程中被害木始终成组分布于清晰的受害斑块中,在高密度年份表现出更大且更集中的空间格局,而在低密度年份则呈现较小、较弱聚集的分布特征。Avila-Pérez等^[40]对墨西哥松材小蠹(*D. frontalis*)和墨西哥齿小蠹(*D. mexicanus*)2种大小蠹的研究也表明,小蠹虫在林分尺度上的空间分布通常具有明显聚集性,且这种聚集格局会随年份、寄主条件及局部环境差异而发生变化。本研究表明,天山重齿小蠹在不同发生阶段表现出明显不同的空间分布特征。其危害木总体呈空间聚集和斑块化分布,这与前人对小蠹虫空间格局的研究结论^[6,37,40]基本一致。同时,随着危害程度加重,其空间格局由聚集逐渐向弱聚集甚至近随机分布演变,这一变化趋势也与Negrón^[38]关于山松大小蠹的研究结果较为相似。在轻度发生样地中,受害雪岭云杉在空间上呈显著聚集分布,说明天山重齿小蠹在发生初期主要集中在侵染少数易感寄主,并形成局部受害中心。随着虫口数量增加和危害程度加重,受害木由初期的点状分布逐步发展为连续斑块状分布,其空间格局也由显著聚集向弱聚集转变。在重度发生样地中,受害木的空间分布趋于近随机,表明随着危害范围不断扩大,原有聚集中心持续叠加并向更大空间范围扩展,最终使受害木在林分中广泛分布。这一变化过程表明,天山重齿小蠹的危害由早期局部的“点状发生”,逐步向更大尺度林分空间的“面状扩展”演变。

4 结 论

本研究明确了在全球气候变暖背景下, 哈密林区天山重齿小蠹的发生规律及其时空分布特征: 该虫在当地1年发生1代, 生活史较早期报道整体前移, 活动期延长; 其成虫扬飞活动集中在5月至9月, 分别于6月10日前后和7月16日前后出现越冬代和当年羽化成虫的扬飞高峰期, 其日扬飞节律可能受温度调控, 在春季低温时表现为单峰型, 夏季高温时转为双峰型。成虫在不同受害类型雪岭云杉树干呈现中部虫口密度较高、树干上部和下部虫口密度相对较低的特征。随着危害程度加剧, 受害雪岭云杉在林间分布格局由聚集分布逐渐向随机分布转变。上述结论揭示了当前天山重齿小蠹在哈密林区发生危害时空动态规律, 可为该虫的监测预警和精准防控提供理论依据。

致 谢 天山重齿小蠹危害空间分布研究得到西北农林科技大学植物保护学院胡祖庆副教授的指导, 发生规律林间调查得到新疆维吾尔自治区天山东部国有林管理局哈密分局的帮助与支持, 在此一并感谢。

参 考 文 献

- [1] 李育, 张占森, 周雪如, 等. 全球变暖背景下青藏高原北缘气候干湿变化模式的转型与机制——古气候视角[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(6): 1960–1979.
Li Y, Zhang Z S, Zhou X R, et al. Transformation and mechanisms of climate wet/dry change on the northern Tibetan Plateau under global warming: a perspective from paleoclimatology[J]. Science China Earth Sciences, 2024, 54(6): 1960–1979.
- [2] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis[M]. Geneva: IPCC, 2021.
- [3] 骆有庆, 刘宇杰, 黄华国, 等. 应用遥感技术评价森林健康的途径和方法[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(9): 1–13.
Luo Y Q, Liu Y J, Huang H G, et al. Pathway and method of forest health assessment using remote sensing technology[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(9): 1–13.
- [4] Siegert C, Clay N, Pace K, et al. Bark beetle-driven community and biogeochemical impacts in forest ecosystems: a review[J]. Annals of the Entomological Society of America, 2024, 117(3): 163–183.
- [5] Wood D L. The role of pheromones, kairomones, and allomones in the host selection and colonization behavior of bark beetles[J]. Annual Review of Entomology, 1982, 27: 411–446.
- [6] Singh V V, Naseer A, Mogilicherla K, et al. Understanding bark beetle outbreaks: exploring the impact of changing temperature regimes, droughts, forest structure, and prospects for future forest pest management[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2024, 23(2): 257–290.
- [7] Wermelinger B. Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus*: a review of recent research[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 202: 67–82.
- [8] Raffa K F, Berryman A A. The role of host plant resistance in the colonization behavior and ecology of bark beetles[J]. Ecological Monographs, 1983, 53: 27–49.
- [9] Forrest J R K. Complex responses of insect phenology to climate change[J]. Current Opinion in Insect Science, 2016, 17: 49–54.
- [10] 文守易. 哈密林区小蠹虫种类初步调查和防治意见[J]. 新疆农业科学, 1962(11): 456–457.
Wen S Y. Preliminary investigation and control suggestions on bark beetle species in the Hami forest region[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 1962(11): 456–457.
- [11] 王正, 马晓乾, 周勤政, 等. 中国齿小蠹属昆虫的鉴定[J]. 林业科学, 2021, 57(12): 79–91.
Wang Z, Ma X Q, Zhou Q Z, et al. Identification of *Ips* species (Coleoptera: Scolytinae) in China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(12): 79–91.
- [12] Vanhanen H, Veteli T O, Niemelä P. Potential distribution ranges in Europe for *Ips hauseri*, *Ips subelongatus* and *Scolytus morawitzi*: a CLIMEX analysis[J]. EPPO Bulletin, 2008, 38(2): 249–258.
- [13] 方加兴. 单萜类信息化学物质对重要齿小蠹的行为调控机制[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2021.
Fang J X. Behavioral regulation mechanism of monoterpenoid semiochemical on important *Ips* spp.[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2021.
- [14] 李小锋, 倪兆春, 刘秀梅. 天山北坡温性荒漠草原主要植物生物量对气候变化的响应[J]. 草食家畜, 2023(2): 42–48.
Li X F, Ni Z C, Liu X M. Response of aboveground biomass of main plants in temperate desert steppe on the northern slope of Tianshan Mountains to climate change[J]. Grass-Feeding Livestock, 2023(2): 42–48.
- [15] 陈玉雯, 赵善超, 张国林, 等. 天山中部雪岭云杉林土壤团聚体分形特征对地形因素的响应研究[J]. 新疆农业大学学报, 2023, 46(3): 252–260.
Chen Y W, Zhao S C, Zhang G L, et al. Study on the response of fractal characteristics of soil aggregates to topographic factors in *Picea schrenkiana* forest in central Tianshan Mountains[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2023, 46(3): 252–260.
- [16] 国家林业局. 林业有害生物发生(危害)程度和成灾标准: LY/T 1681—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
National Forestry Administration. Grading standard of occurrence (damage) level and disaster-causing of forest pests: LY/T 1681—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [17] 兰珍珍, 王新谱. 两种小蠹发生与林分和立地因子间的关系及最佳抽样模型[J]. 东北林业大学学报, 2025, 53(5): 116–121.
Lan Z Z, Wang X P. Relationships between occurrence of two bark beetle species and stand and site factors, and optimal sampling models[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2025, 53(5): 116–121.
- [18] 张治科, 南紫瑶. 宁夏设施番茄上番茄潜叶蛾的空间分布型及抽样技术[J]. 植物保护学报, 2023, 50(6): 1571–1578.
Zhang Z K, Nan Z Y. Spatial distribution patterns and sampling techniques of tomato leafminer *Tuta absoluta* larvae on tomatoes in greenhouses[J]. Journal of Plant Protection, 2023, 50(6): 1571–1578.
- [19] 耿书宝, 陈磊, 侯贺丽, 等. 灰茶尺蠖越冬蛹在茶园的空间分布型及其过冷却点测定[J]. 植物保护, 2025, 51(4): 235–242.

- Geng S B, Chen L, Hou H L, et al. Spatial distribution pattern and supercooling point of overwintering pupae of *Ectropis grisescens* in tea plantations [J]. *Plant Protection*, 2025, 51(4): 235–242.
- [20] 蒋华, 黄佳聪, 谢胤, 等. 腾冲红花油茶果实桃蛀螟的空间分布及抽样技术 [J]. *植物保护*, 2023, 49(1): 285–290.
- Jiang H, Huang J C, Xie Y, et al. Spatial distribution of *Conogethes punctiferalis* in the fruit of *Camellia reticulata* and sampling technique [J]. *Plant Protection*, 2023, 49(1): 285–290.
- [21] 陈国祥, 魏杨, 郭文超, 等. 核桃园苹果蠹蛾的空间分布型与抽样技术分析 [J]. *新疆农业科学*, 2024, 61(11): 2769–2778.
- Chen G X, Wei Y, Guo W C, et al. Spatial distribution patterns and sampling techniques of *Cydia pomonella* in walnut orchards [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2024, 61(11): 2769–2778.
- [22] 胡岳, 徐炜超, 魏志成, 等. 青海云杉重要蛀干害虫云杉四眼小蠹研究初报 [J]. *中国森林病虫*, 2025, 44(3): 32–36.
- Hu Y, Xu W C, Wei Z C, et al. Preliminary study on the important trunk-boring pest of *Picea crassifolia*, *Polygraphus polygraphus* [J]. *Forest Pest and Disease*, 2025, 44(3): 32–36.
- [23] 祁晓杰, 齐葆新, 钟米娜. 西宁市多毛切梢小蠹发生规律及防治药剂筛选 [J/OL]. *中国森林病虫*, 1–7 [2026–03–16]. <https://doi.org/10.19688/j.cnki.issn1671-0886.20250058>.
- Qi X J, Qi B X, Zhong M N. Occurrence regularity and insecticide screening of *Tomicus pilifer* in Xining City[J/OL]. *Forest Pest and Disease*, 1–7 [2026–03–16]. <https://doi.org/10.19688/j.cnki.issn1671-0886.20250058>.
- [24] 孙文玉, 姚斌, 邹传山, 等. 樟子松云杉八齿小蠹发生规律及防治初探 [J]. *中国植保导刊*, 2022, 42(8): 46–48.
- Sun W Y, Yao B, Zou C S, et al. Preliminary study on occurrence regularity and control of *Ips typographus* in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* [J]. *China Plant Protection*, 2022, 42(8): 46–48.
- [25] 王建军, 曹传旺, 栾庆书, 等. 松材线虫病疫区红松林鞘翅目昆虫种类及松六齿小蠹扬飞规律 [J]. *东北林业大学学报*, 2022, 50(6): 96–101.
- Wang J J, Cao C W, Luan Q S, et al. Coleoptera species in *Pinus koraiensis* forests of *Bursaphelenchus xylophilus* disease-affected area and flying regularity of *Ips acuminatus* [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2022, 50(6): 96–101.
- [26] 刘丽. 青海云杉天然林小蠹虫种类、生态位与监测技术研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- Liu L. Biology, niche and monitoring techniques on main bark beetles in natural spruce forests in Qinghai[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [27] 夏吾加. 麦秀林区光臀八齿小蠹风险分析报告 [J]. *青海农林科技*, 2018(2): 39–41, 95.
- Xia W J. Risk analysis report of *Ips nitidus* in Maxiu Forest Area [J]. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 2018(2): 39–41, 95.
- [28] Jönsson A M, Harding S, Krokene P, et al. Modelling the potential impact of global warming on *Ips typographus* voltinism and reproductive diapause [J]. *Climatic Change*, 2011, 109(3): 695–718.
- [29] Jakoby O, Lischke H, Wermelinger B. Climate change alters elevational phenology patterns of the European spruce bark beetle (*Ips typographus*) [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(12): 4048–4063.
- [30] 阿拉努尔·艾尼瓦尔, 吐尔逊·哈斯木, 买合甫拉提·乃比, 等. 吐鲁番市和哈密市气温与降水特征变化比较 [J]. *西北师范大学学报 (自然科学版)*, 2019, 55(3): 105–111, 134.
- Alannuer A, Tuerxun H, Maihefulati N, et al. A comparison on characteristics of temperature and precipitation in Turpan City and Hami City [J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 2019, 55(3): 105–111, 134.
- [31] 孙晓玲, 程彬, 刘国东, 等. 云杉八齿小蠹的扬飞与物候观测 [J]. *中国森林病虫*, 2011, 30(2): 21–23.
- Sun X L, Cheng B, Liu G D, et al. Emergence dynamics of *Ips typographus* linnaeus and phenological observation [J]. *Forest Pest and Disease*, 2011, 30(2): 21–23.
- [32] Hlávková D, Davidková M, Koudelková J, et al. Population dynamics of *Ips sexdentatus* relating temperature and flight activity in field conditions [J]. *Forests*, 2024, 15(6): 961.
- [33] 孙静双, 卢文锋, 曹宁, 等. 松十二齿小蠹成虫种群数量动态研究 [J]. *中国森林病虫*, 2012, 31(4): 6–7.
- Sun J S, Lu W F, Cao N, et al. Population dynamics of *Ips sexdentatus* Börner adult [J]. *Forest Pest and Disease*, 2012, 31(4): 6–7.
- [34] 袁菲, 骆有庆, 石娟, 等. 落叶松八齿小蠹聚集信息素的时空诱集效果 [J]. *中国森林病虫*, 2010, 29(1): 33–35.
- Yuan F, Luo Y Q, Shi J, et al. Spatiotemporal attractive effect of aggregation pheromone of *Ips subelongatus* [J]. *Forest Pest and Disease*, 2010, 29(1): 33–35.
- [35] 顾颖, 任利利, 骆有庆, 等. 长林小蠹林间种群扬飞日节律观察及飞行能力测定 [J]. *北京林业大学学报*, 2025, 47(4): 1–9.
- Gu Y, Ren L L, Luo Y Q, et al. Flight daily rhythm observation and flight ability assessment of *Hylurgus ligniperda* populations in forests [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2025, 47(4): 1–9.
- [36] 史全顺, 韩富忠, 张庆贺, 等. 隆务河流域天然云杉林东方拟齿小蠹生物学特性观察 [J]. *中国森林病虫*, 2012, 31(6): 13–15, 24.
- Shi Q S, Han F Z, Zhang Q H, et al. Observation on the biological characteristics of *Pseudips orientalis* in natural spruce forests in the Longwu River Basin [J]. *Forest Pest and Disease*, 2012, 31(6): 13–15, 24.
- [37] Raffa K F, Grégoire J C, Lindgren B S. Natural history and ecology of bark beetles [J]. *Annual Review of Entomology*, 2015, 60: 1–26.
- [38] Negrón J F. Within-stand distribution of tree mortality caused by mountain pine beetle, *Dendroctonus ponderosae* [J]. *Insects*, 2020, 11(2): 112.
- [39] Colombari F, Schroeder M L, Battisti A, et al. Spatio-temporal dynamics of an *Ips acuminatus* outbreak and implications for management [J]. *Agricultural and Forest Entomology*, 2013, 15(1): 34–42.
- [40] Avila-Pérez H, Guzmán-Martínez M, Rosas-Acevedo J L, et al. Study of the spatial distribution of the bark beetle in the Ejido Tixtlancingo [J]. *Forests*, 2024, 15(6): 916.

(责任编辑 范娟 李契
责任编辑 骆有庆)