



基于树冠变色特征的越冬期雪岭云杉枝干小蠹分布规律及其防控

张伟 郭天刚 叶斯波拉提·木哈买提汗 阿地力·沙塔尔 任利利 俞琳锋 焦继鹏

Crown-discoloration-driven distribution patterns and control of two overwintering bark beetles (*Ips hauseri* and *Pityogenes spessivtsevi*) on *Picea schrenkiana* stems

Zhang Wei, Guo Tiangang, Yesibolati · Muhamaitihan, Adil · Sattar, Ren Lili, Yu Linfeng, Jiao Jipeng

引用本文:

张伟, 郭天刚, 叶斯波拉提·木哈买提汗, 阿地力·沙塔尔, 任利利, 俞琳锋, 焦继鹏. 基于树冠变色特征的越冬期雪岭云杉枝干小蠹分布规律及其防控[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(9):79–87. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260173

Zhang Wei, Guo Tiangang, Yesibolati · Muhamaitihan, Adil · Sattar, Ren Lili, Yu Linfeng, Jiao Jipeng. Crown-discoloration-driven distribution patterns and control of two overwintering bark beetles (*Ips hauseri* and *Pityogenes spessivtsevi*) on *Picea schrenkiana* stems[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2026, 48(9):79–87. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260173

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260173>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于Maxent模型的长林小蠹的全球及中国适生区预测

Prediction of the potential geographical distribution of *Hylurgus ligniperda* at the global scale and in China using the Maxent model
北京林业大学学报, 2022, 44(11): 90–99. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210345>

短毛切梢小蠹幼虫头部感器的类型、分布与数量特征

Type, distribution and quantitative characteristics of sensory organs on the larval head of *Tomicus brevipilosus* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae)
北京林业大学学报, 2024, 46(4): 63–73. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230105>

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>

东北地区榛园内一种小蠹的外部形态特征描述及分子鉴定

Description of external morphological characteristics and molecular identification of a bark beetle in hazel garden of northeastern China
北京林业大学学报, 2025, 47(10): 120–127. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230359>

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.1000-1522.20260173

基于树冠变色特征的越冬期雪岭云杉枝干 小蠹分布规律及其防控

张 伟¹ 郭天刚² 叶斯波拉提·木哈买提汗¹ 阿地力·沙塔尔¹
任利利³ 俞琳锋⁴ 焦继鹏¹

(1. 新疆农业大学林学与风景园林学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆天山东部国有林管理局乌鲁木齐板房沟分局, 新疆 乌鲁木齐 830002;
3. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 4. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091)

摘要:【目的】天山东部雪岭云杉天然林因受天山重齿小蠹与天山星坑小蠹持续为害而日趋衰退。越冬期清理虫源木是重要防控措施, 但冬季作业多局限于地上受害木。为精准清除虫源, 本研究阐明越冬期两种小蠹在不同受害阶段雪岭云杉枝干中的分布规律, 为制定科学、精准的越冬防控策略提供依据。【方法】于越冬初期, 依据树冠针叶变色程度(从全绿至全灰)将雪岭云杉样木划分为 5 个受害阶段, 共选取 15 株样木。伐倒后对主干分段解剖, 并按树冠上、中、下层采集侧枝, 系统调查并记录两种小蠹的虫口数量、虫态与分布位置。【结果】越冬初期, 天山重齿小蠹与天山星坑小蠹活虫仅分布于早期、中期和晚期受害木中, 健康木与枯立木无活虫分布, 其中早期受害木为林内越冬虫源的主要载体。两种小蠹在受害木上表现出显著的生态位分化: 天山重齿小蠹主要分布于主干中下段(4~5 m), 且几乎全部为成虫; 天山星坑小蠹则主要分布于寄主主干中上段及树冠侧枝, 在主干垂直分布上则主要集中于 4~5 m 和 10~11 m 两个高度区间, 在主干 4~5 m 处以幼虫为主, 在主干 10~11 m 及侧枝中则以成虫为主。【结论】越冬初期, 天山重齿小蠹与天山星坑小蠹集中分布于树冠明显失绿变色的受害木上, 两种小蠹呈现出显著的生态位分化。在越冬期小蠹的灾害管控实践中, 建议以树冠变色特征为指示, 优先对早期至晚期受害木实施分级精准清理, 并结合枝干部不同虫态的空间分布特征采取差异化处理, 以期最大程度压低次年虫口发生基数。

关键词: 雪岭云杉; 天山重齿小蠹; 天山星坑小蠹; 树冠变色; 生态位分化; 越冬分布; 森林害虫防控

中图分类号: S763.38 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2026)09-0079-09

引文格式: 张伟, 郭天刚, 叶斯波拉提·木哈买提汗, 等. 基于树冠变色特征的越冬期雪岭云杉枝干小蠹分布规律及其防控[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(9): 79-87. Zhang Wei, Guo Tiangang, Yesibolati·Muhamaitihan, et al. Crown-discoloration-driven distribution patterns and control of two overwintering bark beetles (*Ips hauseri* and *Pityogenes spessivtsevi*) on *Picea schrenkiana* stems[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(9): 79-87.

Crown-discoloration-driven distribution patterns and control of two overwintering bark beetles (*Ips hauseri* and *Pityogenes spessivtsevi*) on *Picea schrenkiana* stems

Zhang Wei¹ Guo Tiangang² Yesibolati·Muhamaitihan¹ Adil·Sattar¹
Ren Lili³ Yu Linfeng⁴ Jiao Jipeng¹

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China;
2. Urumqi Banfanggou Branch, Eastern Tianshan State-owned Forest Administration Bureau, Urumqi 830002, Xinjiang, China;
3. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
4. Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

收稿日期: 2026-04-12 修回日期: 2026-08-22

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划(2026B02001)。

第一作者: 张伟。主要研究方向: 森林保护。Email: 18096993201@163.com 地址: 830052 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市沙依巴克区农大东路 311 号新疆农业大学林学与风景园林学院。

责任作者: 焦继鹏, 讲师。主要研究方向: 森林保护。Email: jiaojipeng@xjau.edu.cn 地址: 同上。

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

Abstract: [Objective] In the eastern Tianshan Mountains, natural *Picea schrenkiana* forests are progressively declining as a result of persistent damage by *Ips hauseri* and *Pityogenes spessivtsevi*. Removing infested source trees during the overwintering period is an important control measure, but winter operations are largely confined to aboveground damaged trees. To enable the precise removal of these beetle sources, this study clarified the distribution patterns of the two bark beetle species in the trunks and branches of *Picea schrenkiana* at different damage stages during the overwintering period. The findings provide a basis for developing scientific and precise overwintering control strategies. [Method] In the early overwintering period, *Picea schrenkiana* trees were assigned to five damage stages according to the degree of crown needle discoloration (from fully green to fully gray), and 15 sample trees were selected in total. After felling, the trunk was divided into sections and dissected, and lateral branches were collected from the upper, middle, and lower crown layers. The abundance, developmental stage, and distribution of the two bark beetle species were then systematically surveyed and recorded. [Result] In the early overwintering period, live *I. hauseri* and *Pityogenes spessivtsevi* occurred only in early-, mid-, and late-stage damaged trees, whereas none were found in healthy or standing dead trees. Early-stage damaged trees were the principal reservoir of overwintering beetles within the forest. The two species showed marked niche differentiation on infested trees. *I. hauseri* was concentrated in the middle and lower trunk (4–5 m) and consisted almost entirely of adults. In contrast, *Pityogenes spessivtsevi* mainly occupied the middle and upper trunk and the lateral branches of the crown. On the trunk, it was concentrated at two height intervals, 4–5 m and 10–11 m. Larvae dominated at 4–5 m, whereas adults dominated at 10–11 m and in the lateral branches. [Conclusion] In the early overwintering period, *I. hauseri* and *Pityogenes spessivtsevi* were concentrated on damaged trees with pronounced crown discoloration, and the two species showed marked niche differentiation. For managing bark beetle damage during the overwintering period, we recommend using crown discoloration as an indicator and prioritizing the graded, precise removal of early- to late-stage damaged trees. Treatments should be differentiated according to the spatial distribution of the different developmental stages on the trunk and branches, so as to minimize the beetle population base in the following year.

Key words: *Picea schrenkiana*; *Ips hauseri*; *Pityogenes spessivtsevi*; crown discoloration; niche differentiation; overwintering distribution; forest pest control

全球气候变化,特别是气候变暖及其伴随的干旱事件加剧,正在重塑森林生态系统的扰动格局并加剧蛀干害虫的发生^[1-2],进而对小蠹种群暴发产生强烈的放大效应^[3-4]。频繁发生的干旱和高温事件会严重削弱树木的防御能力^[5-6],使其更容易受到小蠹的侵害^[7]。研究表明,气候变暖不仅通过直接缩短昆虫发育周期促进其种群增长^[8],更关键的途径是通过加剧寄主树木的生理胁迫,间接为小蠹的暴发创造机会窗口^[9-10]。长期干旱导致的森林生长衰退与树木活力下降,已被证实是小蠹大规模暴发的关键前兆^[11-12];气候变暖与干旱胁迫通过削弱寄主抗性,使小蠹成为驱动森林衰退的关键驱动力^[13]。

雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)主要分布在新疆天山山脉的高海拔地区,在水源涵养、气候调节和生物多样性保护等方面发挥着重要生态功能^[14-15]。近年来,受区域气候变化影响,天山东部林区的雪岭云杉天然林出现异常枯死现象,该现象已对区域森林

生态系统健康及生态安全构成严重威胁。通过实地调查发现,天山东部雪岭云杉天然林的衰退与本土小蠹的猖獗危害存在密切关联。其优势种类为天山重齿小蠹(*Ips hauseri*)与天山星坑小蠹(*Pityogenes spessivtsevi*),其持续侵染可导致雪岭云杉树势急剧衰弱直至植株枯死。

国内外学者已对多种小蠹的分类鉴定与生物学特性开展了大量研究^[16-17],并对其生活史与越冬习性等有了较深入的认识^[18-19],这些研究为了解小蠹的种群动态奠定了重要基础。对于越冬期这一种群延续和次年发生基数的关键阶段,害虫在寄主上的分布规律及其与树木健康状况的关系研究也尤为重要。识别越冬虫源木,明确越冬期害虫的分布位置与数量,是实施精准虫源控制、降低次年虫口基数的关键^[20]。鉴于以清理虫源木为核心的越冬期管理是当前天山林区重要且可操作性强的防控措施,而冬季采伐作业主要针对地上部分的受害木,因此,明确

害虫在树干与侧枝中的空间分布对于精准定位并高效清除虫源具有最直接的指导意义。

在此背景下,本研究以新疆天山东部国有林管理局乌鲁木齐板房沟分局的雪岭云杉天然林为研究对象,于越冬初期依据树冠针叶变色程度将样木划分为5个受害阶段(由健康木至枯立木),通过主干分段解剖与树冠侧枝分层取样,系统调查两种小蠹的虫口数量、虫态及分布位置,旨在阐明越冬期天山重齿小蠹与天山星坑小蠹在不同受害阶段雪岭云杉树干及树冠侧枝中的分布规律,为科学制定越冬期虫源木清理策略、实现天山林区小蠹的精准监测与可持续治理提供理论与实践依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 试验地概况

试验地位于新疆天山东部国有林管理局乌鲁木齐板房沟分局水西沟(43°26'43"N, 87°30'43"E),海拔约1800 m,坡向为半阴坡(偏北),坡度约25°。林地土壤为山地灰褐色森林土,土层较厚,枯枝落叶层发育良好。该区域为雪岭云杉天然纯林,林相整齐,林分结构较为均一,林木胸径多在15~30 cm,树高多在12~18 m。近年来,该林区受小蠹持续危害,林分整体呈现中度至重度受害状态。

1.2 样地设置与样木选取

在小蠹危害典型的林段内,设置3块面积为30 m×30 m的标准地。在各标准地内,选择胸径15~25 cm、树高15 m左右,无明显机械损伤及其他严重病虫害的林木作为样木。依据树冠针叶变色程度将雪岭云杉划分为5个受害阶段(详见1.3),在3块标准地中,每个受害阶段各选取3株样木用于后续解剖调查,共计选取15株雪岭云杉样木。

1.3 不同受害阶段雪岭云杉样木的划分

根据雪岭云杉树冠针叶颜色,从健康木至枯立

木之间,将雪岭云杉划分为5个不同的受害阶段:健康木(树冠全部为绿色,针叶饱满有光泽,无枯黄与变红现象,树势良好,无明显衰弱迹象)、早期受害木(树冠出现局部枯黄,枯黄部分占冠幅的20%~40%,其余仍为绿色,树势略有衰弱)、中期受害木(树冠绿色部分所剩无几,绿色部分占冠幅不足30%,其余枯黄并有部分枝条干枯,树势明显衰弱)、晚期受害木(树冠全部变红,针叶无绿色部分,树木基本丧失光合作用能力)、枯立木(树冠全部呈灰色,针叶干枯脱落,树木完全枯死,树皮易剥离,韧皮部失去活性)(图1)。

1.4 雪岭云杉主干、侧枝取样及解剖

2025年11月,样木从树干基部伐倒,将主干按照1 m分段并标记序号,将0~1 m、4~5 m、7~8 m、10~11 m、13~14 m、16~17 m、19~20 m的木段带回实验室进行解剖;侧枝取样时,将每株样木的树冠纵向平均划分为上、中、下3个区间,在每个区间的中部、南北方向各取1条完整侧枝带回实验室(图2),解剖树皮,记录小蠹的种类、数量及虫态。

1.5 小蠹的采集、鉴定与计数

在对主干木段和侧枝进行剥皮解剖时,收集并记录天山重齿小蠹与天山星坑小蠹的成虫、蛹及幼虫数量。成虫的形态学鉴定主要参照《中国经济昆虫志第二十九册(鞘翅目 小蠹科)》^[21]。幼虫和蛹的区分与鉴定,主要依据其所处坑道系统的典型结构特征,并结合同一坑道系统内共存的已鉴定成虫进行综合判定。解剖过程中发现的所有活虫与死虫均分别进行统计,标本保存于75%乙醇中以备后续复核。

1.6 数据分析

采用Excel 2024对调查的原始数据进行初步整理与汇总。采用GraphPad Prism 10.1.2软件对不同受害阶段样木及枝干不同高度区间的小蠹虫口数量进行统计分析,通过差异显著性检验与多重比较(显



图1 不同受害阶段的雪岭云杉样木

Fig. 1 *Picea schrenkiana* sample trees at different damage stages



左侧为侧枝取样点示意, 在每个取样点的南北方向各选取 1 条完整侧枝; 右侧为主干取样示意, 星号标记的位置为取样木段。

图2 主干及侧枝取样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sampling positions on trunk and branches
著性水平 $\alpha = 0.05$), 分析两种小蠹分布的差异, 由 GraphPad Prism 10.1.2 软件完成绘图。虫口数量数据均以平均值 $\pm$ 标准误表示。

2 结果与分析

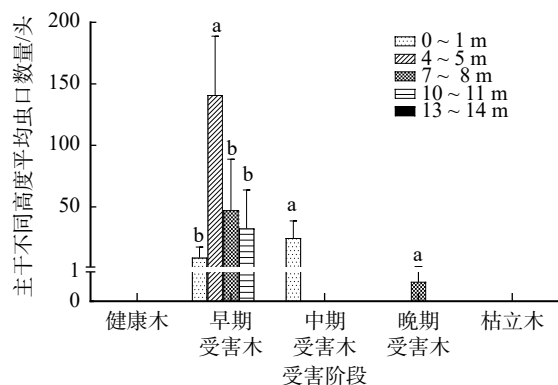
通过对树皮和侧枝的系统解剖, 确定越冬期雪岭云杉样木枝干中的小蠹种类为天山重齿小蠹和天山星坑小蠹。天山重齿小蠹以成虫为主, 而天山星坑小蠹则以幼虫和成虫为主。侧枝中仅发现天山星坑小蠹的危害, 未发现天山重齿小蠹的危害。

2.1 雪岭云杉主干中天山重齿小蠹的垂直分布

2.1.1 主干中天山重齿小蠹种群的垂直分布

根据解剖的 15 株 5 个受害阶段的样木, 天山重齿小蠹在 5 个受害阶段样木的主干中分布存在差异, 仅在早期受害木、中期受害木和晚期受害木的主干中发现活虫, 虫口数量分别占 90.0%、9.7%、0.3%, 健康木和枯立木的主干中未发现活虫。天山重齿小蠹在早期受害木的 3 株样木主干中的平均每株活虫数量为 (229.3 ± 116.2) 头, 在中期受害木的 3 株样木主干中的平均每株活虫数量为 (24.7 ± 13.9) 头, 在晚期受害木的 3 株样木主干中的平均每株活虫数量为 (0.7 ± 0.7) 头(图 3)。

早期受害木、中期受害木、晚期受害木和枯立木的主干中均有天山重齿小蠹死虫分布。死虫的虫态分布上, 早期受害木中 92.1% 为成虫, 7.9% 为蛹; 中期受害木中 90.7% 为成虫, 9.3% 为蛹; 晚期受害木中 98.7% 为成虫, 1.3% 为蛹; 枯立木中的死虫全部为成虫。死虫的数量分布上, 在早期受害木的 3 株样木主干中的平均每株死虫数量为 (181.3 ± 45.7) 头,



柱形图上的误差线表示标准误 (SE); 柱上方不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著, 下同。

图3 不同受害阶段样木主干中天山重齿小蠹活虫的分布

Fig. 3 Distribution of live *Ips hauseri* in trunks of sample trees at different damage stages

在中期受害木的 3 株样木主干中的平均每株死虫数量为 (232.0 ± 70.3) 头, 在晚期受害木的 3 株样木主干中的平均每株死虫数量为 (521.0 ± 73.5) 头, 在枯立木的 3 株样木主干中的平均每株死虫数量为 (101.0 ± 39.1) 头, 健康木的树皮上发现极少量小蠹侵入痕迹, 但未发现小蠹虫体(图 4)。

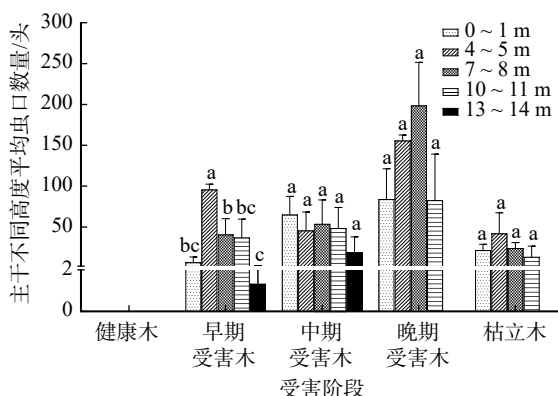


图4 不同受害阶段样木主干中天山重齿小蠹死虫的分布

Fig. 4 Distribution of dead *Ips hauseri* in trunks of sample trees at different damage stages

2.1.2 主干中天山重齿小蠹不同越冬虫态活虫的垂直分布

在雪岭云杉侧枝中未发现天山重齿小蠹危害。由于天山重齿小蠹活虫主要集中分布于早期受害木中, 能够清晰反映其在主干上的垂直分布特征, 因此重点分析该受害阶段 3 株样木主干中天山重齿小蠹的垂直分布情况。

通过解剖早期受害木的 3 株样木可知, 天山重齿小蠹在主干上的垂直分布具有明显的集中性, 主要分布于主干 4~5 m, 占主干虫口数量的 61.5%, 此外 0~1 m、7~8 m 和 10~11 m 的虫口分别占主干虫口数量的 3.8%、20.6% 和 14.1%。天山重齿小蠹在早期受害木的每株样木主干中各虫态数量比例为

幼虫(5.7 ± 5.7)头, 占 2.5%)、蛹(6.3 ± 6.3)头, 占 2.7%)、成虫(217.3 ± 114.2)头, 占 94.8%), 虫态构成以成虫为主, 且主要集中在主干 4~5 m(图 5)。

2.2 雪岭云杉植株中天山星坑小蠹的垂直分布

2.2.1 主干中天山星坑小蠹种群的垂直分布

根据解剖的 15 株 5 个受害阶段的样木, 仅在早期受害木、中期受害木的主干中发现天山星坑小蠹活虫, 虫口数量分别占 96.9% 和 3.1%, 健康木、晚期受害木和枯立木的主干中未发现活虫(图 6)。天山星坑小蠹在早期受害木 3 株样木主干中的平均每株活虫数量为($1\ 824.7 \pm 566.8$)头; 在中期受害木 3 株样木主干中的平均每株活虫数量为(58.7 ± 34.1)头。

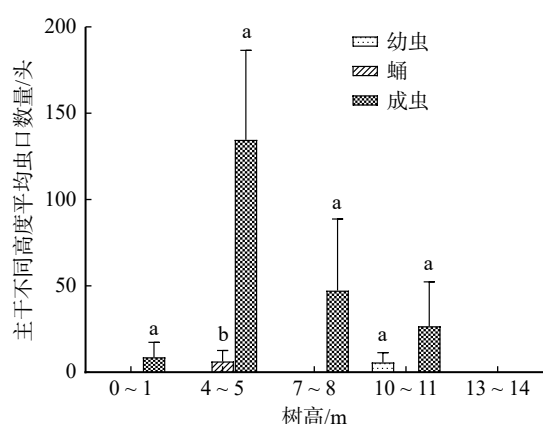


图 5 天山重齿小蠹活虫在早期受害木主干中的垂直分布

Fig. 5 Vertical distribution of live *Ips hauseri* in the trunks of early-stage damaged trees

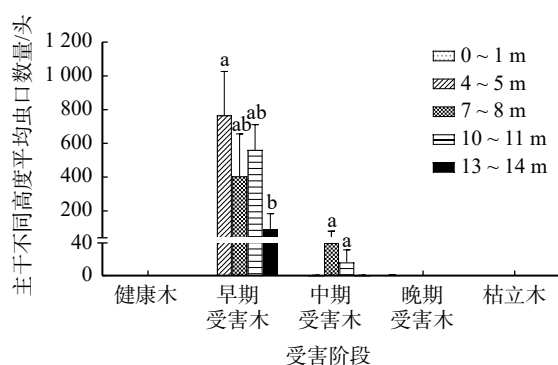


图 6 不同受害阶段样木主干天山星坑小蠹活虫的分布

Fig. 6 Distribution of live *Pityogenes spessivtsevi* in trunks of sample trees at different damage stages

除健康木中未发现天山星坑小蠹死虫, 其他 4 个受害阶段样木主干中均发现天山星坑小蠹死虫。天山星坑小蠹在早期受害木 3 株样木主干中的平均每株死虫数量为(313.0 ± 123.1)头, 在中期受害木 3 株样木主干中的平均每株死虫数量为(25.3 ± 9.2)头, 在晚期受害木 3 株样木主干中的平均每株死虫数量为(32.7 ± 30.2)头, 在枯立木 3 株样木主干中的平均每株死虫数量为(8.3 ± 8.3)头; 健康木样木的树皮上仅发现极少量侵入痕迹, 未发现天山星坑小蠹虫体

(图 7)。

2.2.2 侧枝中天山星坑小蠹活虫种群的垂直分布

解剖结果表明, 雪岭云杉树冠的侧枝中仅有天山星坑小蠹, 未发现天山重齿小蠹及其危害状。仅在早期受害木、中期受害木和晚期受害木树冠的侧枝中发现天山星坑小蠹活虫, 虫口数量分别占 6.1%、79.2%、14.7%。早期受害木 3 株样木树冠取样侧枝中的平均每株取样侧枝上的活虫数量为(40.0 ± 17.5)头; 中期受害木 3 株样木树冠取样侧枝中的平均每株取样侧枝上的活虫数量为(520.0 ± 60.1)头, 主要分布在树冠的中、上层; 晚期受害木 3 株样木树冠取样侧枝中的平均每株取样侧枝上的活虫数量为(90.7 ± 58.1)头, 主要分布在树冠的上层(图 8)。树冠侧枝中天山星坑小蠹的分布情况为树冠下层(占 4.7%)、树冠中层(占 37.7%)、树冠上层(占 57.7%)。健康木树冠侧枝中未发现小蠹虫体, 枯立木树冠侧枝中偶见个别死虫。

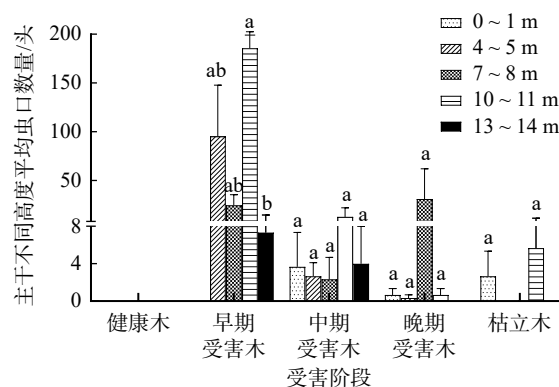


图 7 不同受害阶段样木主干中天山星坑小蠹死虫的分布

Fig. 7 Distribution of dead *Pityogenes spessivtsevi* in trunks of sample trees at different damage stages

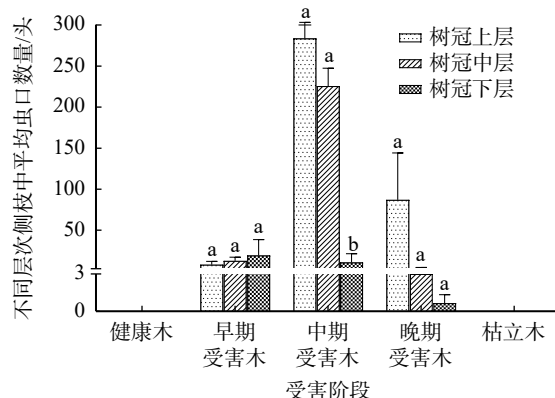


图 8 天山星坑小蠹在不同受害阶段样木树冠不同高度侧枝的分布

Fig. 8 Distribution of *Pityogenes spessivtsevi* in lateral branches of different crown heights of sample trees at different damage stages

2.2.3 主干中天山星坑小蠹不同越冬虫态活虫的分布

天山星坑小蠹活虫主要集中分布于早期受害木中, 能够清晰反映其在主干上的垂直分布特征, 因此

本研究重点分析该受害阶段3株样木主干中天山星坑小蠹活虫的垂直分布情况。通过解剖早期受害木的3株样木可知,天山星坑小蠹主要分布于主干4~5 m、7~8 m和10~11 m,分别占主干虫口数量的42%、22.2%和30.8%,13~14 m的虫口占主干虫口数量的5%。早期受害木主干内越冬的天山星坑小蠹以幼虫和成虫为主,蛹次之,平均每株样木主干中各虫态数量为幼虫($1\,045.7 \pm 628.6$)头,占57.3%、蛹(179.7 ± 118.4)头,占9.8%、成虫(600.0 ± 222.3)头,占32.9%(图9)。天山星坑小蠹幼虫主要分布于样木主干4~5 m、7~8 m和10~11 m;天山星坑小蠹成虫主要分布于主干4~5 m和10~11 m;主干13~14 m有少量幼虫和成虫分布,主干0~1 m未发现天山星坑小蠹。

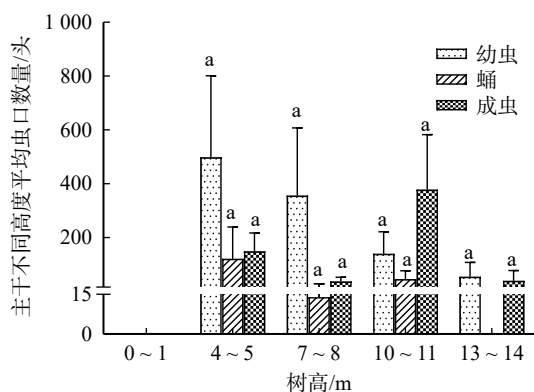


图9 天山星坑小蠹在早期受害木主干中的垂直分布

Fig. 9 Vertical distribution of live *Pityogenes spessivtsevi* in the trunks of early-stage damaged trees

2.2.4 侧枝中天山星坑小蠹不同越冬虫态活虫的分布

大量天山星坑小蠹活虫集中于中期受害木的树冠侧枝,能够清晰反映其在侧枝上的垂直分布特征,因此本研究重点分析该受害阶段3株样木侧枝中天山星坑小蠹的垂直分布情况。中期受害木树冠侧枝中的天山星坑小蠹主要分布在树冠中、上层,全部为成虫,平均每株取样侧枝的虫口数量为(520.0 ± 60.1)头(图10)。此外,在早期受害木的树冠侧枝中除了成虫外,还发现了少量的幼虫和蛹。

3 讨论

3.1 越冬期小蠹在不同受害阶段雪岭云杉上的分布格局

本研究发现,越冬期天山重齿小蠹和天山星坑小蠹的活虫仅分布于早期受害木、中期受害木和晚期受害木,而健康木和枯立木上无活虫分布。这一格局与寄主的生理状态和防御能力密切相关。健康雪岭云杉具有完整的防御系统,能够有效抵御小蠹的初始入侵或清除已入侵的个体,这可能是未发现

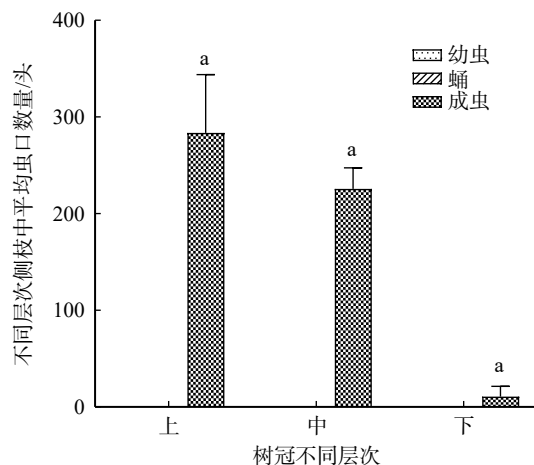


图10 天山星坑小蠹在中期受害木树冠不同层次侧枝上的虫态分布
Fig. 10 Distribution of developmental stages of *Pityogenes spessivtsevi* in lateral branches at different crown layers of mid-stage damaged trees

活虫的主要原因,这与目前关于针叶树诱导防御机制的研究结论一致,即健康树木能够通过合成萜烯类化合物、维持树脂流等方式抑制小蠹的定殖^[22-23],且这类化学防御的强度与寄主的生理状态密切相关^[24-25]。而枯立木韧皮部组织干燥,较低的韧皮部含水量不利于小蠹繁殖^[26]。

需要指出的是,林木从健康至枯死的衰退过程,在时序上受小蠹种群密度及环境胁迫的驱动,在小蠹呈常态化低密度发生时,林木的枯死往往是害虫多年反复侵染与寄主抗性长期博弈的积累结果;然而,在极端干旱等气候事件导致的小蠹大暴发期,先锋种可通过聚集攻击迅速突破寄主的防御系统,切断营养输导和水分运输,从而在单一生长季内(即当年)导致林木迅速枯死^[6, 11, 27]。因此,本研究所划分的5个林木受害阶段,不仅反映了害虫长期侵染下树势的渐进衰退,同样也涵盖了暴发期短期内急剧致死的不同阶段。明确小蠹在这些不同受害状态林木上的越冬分布,对于无论是常态化管控还是暴发期的应急清理,均具有重要的指导价值。本研究提出利用树冠变色特征快速识别虫源木,为越冬期实施虫源木分级精准清理提供了直接的科学依据,即将有限的人力与物力优先集中于清理早期受害木、中期受害木和晚期受害木,可显著提高越冬虫源清除效率。

3.2 两种小蠹生态位分化

在垂直分布上,天山重齿小蠹与天山星坑小蠹在受害木上表现出明显的生态位分化。天山重齿小蠹活虫主要集中于主干中下段,而天山星坑小蠹不仅在主干中上段分布,还大量分布于树冠侧枝。这与其他云杉林生态系统中齿小蠹属和星坑小蠹属的共存分布规律一致。在欧洲云杉林中,体型较大的

云杉八齿小蠹(*I. typographus*)常占据树皮较厚的主干中下部,而体型较小的中穴星坑小蠹(*Pityogenes chalcographus*)则偏好树皮较薄的主干上部及树冠侧枝^[28-29]。这种基于昆虫体型与寄主树皮厚度匹配度的空间分离,可能有助于降低种间竞争^[30]。

此外,本研究在侧枝中未发现天山重齿小蠹越冬及危害。这可能与侧枝韧皮部较薄、可利用资源有限有关;同时,天山高海拔林区冬季寒冷,较细侧枝树皮的热缓冲能力可能较弱^[31],因而不利于天山重齿小蠹安全越冬。结合野外调查发现,越冬期该林区约90%的天山重齿小蠹以成虫在土壤及枯枝落叶层中越冬^[32],仅有少量成虫留在主干坑道内越冬,进一步佐证了其对应越冬生境保温特性的严格选择。

3.3 两种小蠹潜在的先锋-跟随关系

两种小蠹在越冬期的种群动态与虫态结构,提示二者在入侵时序上可能存在“先锋-跟随”关系。据此推测,天山重齿小蠹作为先锋种,凭借较强的侵染攻击力,在寄主防御下降早期实现初始入侵,其取食活动直接破坏寄主韧皮部输导系统,可能是削弱树木树脂分泌、降低整体抗性的关键起点。而天山星坑小蠹对寄主衰弱程度更为敏感,很难单独突破健康寄主的防御屏障,但在先锋种创造的适宜条件下,能展现出较强的种群增长潜力,其幼虫在早期受害木内已大量出现,至中期受害木树势进一步衰弱时,在侧枝形成新的种群增长高峰,这一格局与其跟随先锋种危害的生态特征相符。该现象与欧洲云杉林内云杉八齿小蠹与中穴星坑小蠹的种间互作规律类似。Hedgren^[33]通过林间试验发现,中穴星坑小蠹自身攻克健康寄主的能力较弱,仅8%被其单独侵害的云杉枯死;云杉死亡与云杉八齿小蠹的存在密切相关,且中穴星坑小蠹在二者共存的寄主上繁殖成功率更高。本研究观察到的两种小蠹共存格局与上述现象相似,但尚不足以直接证明二者形成稳定的“先锋-跟随”协同危害关系。近期关于云杉八齿小蠹与中穴星坑小蠹生态与演化的系统综述亦归纳了二者在寄主利用、种间竞争和定殖特征等方面的差异^[34]。这与北美松林生态系统中山松大小蠹(*Dendroctonus ponderosae*)作为关键先锋害虫克服寄主防御,进而改变树皮环境并驱动害虫复合体共存与竞争的规律也高度相似^[27]。

值得注意的是,在早期受害木中,天山星坑小蠹在主干垂直分布上呈现出4~5 m与10~11 m的“双高峰”分布特征,且表现为4~5 m以幼虫为主、10~11 m以成虫为主的虫态分化现象。这一现象可能是由两种小蠹入侵时间的先后差异以及对不同高度生境的偏好共同造成的。据此推测,4~5 m高度可能

是天山重齿小蠹的早期集中侵入部位,天山星坑小蠹随后利用其危害后形成的局部有利条件实现跟随入侵^[33],该区域的天山星坑小蠹利用先锋种危害后留下的剩余空间,至越冬初期调查时已发育为较大的幼虫群体。与此同时,该高度也是天山重齿小蠹完成世代发育后,少数未入土成虫留树越冬的场所。因此,4~5 m有重叠分布的天山重齿小蠹成虫与天山星坑小蠹幼虫。10~11 m的主干中上段则是天山星坑小蠹天然偏好的生境,该区域在越冬期成虫比例较高。

4 结 论

本研究明确了越冬初期天山重齿小蠹与天山星坑小蠹在不同受害阶段雪岭云杉枝干上的分布规律。越冬活虫仅集中分布于早期、中期和晚期受害木中,其中早期受害木是越冬期林内的主要虫源载体,而健康木与枯立木中无活虫分布。两种小蠹在受害木上表现出显著的生态位分化:留树越冬的天山重齿小蠹主要分布于寄主主干中下段(高度集中在4~5 m),且几乎全部为成虫;而天山星坑小蠹则主要分布于寄主主干的中上段,其在主干呈现出4~5 m(以幼虫为主)与10~11 m(以成虫为主)的双高峰格局,且在树冠中上层侧枝中分布有大量越冬成虫。

据此,越冬期防控可依据树冠变色特征分级识别,优先清理早、中、晚期受害木,并结合两种小蠹在主干与树冠侧枝上的空间分化实施差异化清理与无害化处理,以有效压低次年虫口发生基数。本研究为制定以清理虫源木为核心的越冬期小蠹灾害管理策略提供科学支撑,对实现天山林区害虫的可持续治理具有重要的理论与实践意义。

5 研究展望

本研究初步揭示了越冬初期天山重齿小蠹与天山星坑小蠹在不同受害阶段雪岭云杉枝干上的分布规律,可为越冬期虫源木的精准清理提供参考;受研究尺度与调查条件所限,仍有可进一步拓展和完善之处。在主干取样上,鉴于整株连续剥皮解剖的工作量巨大,本研究采用分段解剖获取小蠹在主干上的垂直分布信息,所设定的取样木段呈非等距间隔,对主干种群连续分布特征的精细刻画可能略有影响,后续可通过等距分段或对重点受害木段进行连续解剖加以改进。同时,本研究结论主要基于特定林区越冬初期的单次调查,其在更大空间尺度上的普适性以及整个越冬期的种群动态演变,尚需多点、多年度的连续观测予以检验。此外,对两种小蠹生态位分化与“先锋-跟随”复合危害模式的分析目前主要

依托林间分布数据, 寄主生理生化指标与环境因子的同步监测尚待补充, 对其种间协同成灾机制与入侵时序关系的揭示亦有待深化。

综上, 未来研究可从两方面加以深化: 一是扩大调查的时空尺度, 系统评估不同立地条件与年际间小蠹越冬分布格局的稳定性, 并借助生长季的连续定位观测厘清两种小蠹的入侵时序, 进一步验证“先锋-跟随”复合危害模式; 二是引入树木生理生化分析手段, 定量刻画寄主衰弱过程中韧皮部理化性质的动态变化, 明确跟随种天山星坑小蠹大量定殖所对应的寄主抗性阈值, 从而更深入地揭示两种小蠹协同成灾的内在机制。

参 考 文 献

- [1] Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 660–684.
- [2] 李博轩, 辛江山, 刘乐, 等. 蛀干害虫对环境温度变化的适应性 [J]. *环境昆虫学报*, 2025, 47(6): 1693–1704.
Li B X, Xin J S, Liu L, et al. Adaptation of wood-boring insects to changes in environmental temperature [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2025, 47(6): 1693–1704.
- [3] Bentz B J, Régnière J, Fettig C J, et al. Climate change and bark beetles of the Western United States and Canada: direct and indirect effects [J]. *BioScience*, 2010, 60(8): 602–613.
- [4] Raffa K F, Aukema B H, Bentz B J, et al. Cross-scale drivers of natural disturbances prone to anthropogenic amplification: the dynamics of bark beetle eruptions [J]. *BioScience*, 2008, 58(6): 501–517.
- [5] Berryman A A. Resistance of conifers to invasion by bark beetle-fungus associations [J]. *BioScience*, 1972, 22(10): 598–602.
- [6] Christiansen E, Waring R H, Berryman A A. Resistance of conifers to bark beetle attack: searching for general relationships [J]. *Forest Ecology and Management*, 1987, 22(1–2): 89–106.
- [7] Erbilgin N, Zanganeh L, Klutsch J G, et al. Combined drought and bark beetle attacks deplete non-structural carbohydrates and promote death of mature pine trees [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2021, 44(12): 3866–3881.
- [8] Mitton J B, Ferrenberg S M. Mountain pine beetle develops an unprecedented summer generation in response to climate warming [J]. *The American Naturalist*, 2012, 179(5): E163–E171.
- [9] Faccoli M. Effect of weather on *Ips typographus* (Coleoptera Curculionidae) phenology, voltinism, and associated spruce mortality in the southeastern Alps [J]. *Environmental Entomology*, 2009, 38(2): 307–316.
- [10] Rouault G, Candau J N, Lieutier F, et al. Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe [J]. *Annals of Forest Science*, 2006, 63(6): 613–624.
- [11] Hlásný T, König L, Krokene P, et al. Bark beetle outbreaks in Europe: state of knowledge and ways forward for management [J]. *Current Forestry Reports*, 2021, 7(3): 138–165.
- [12] 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.
- [13] Karpov A, Pirtskhalava-Karpova N, Singh V V, et al. Response of mature Norway spruce to experimental thermal and drought stress in relation to *Ips typographus* attack: crown temperatures and sap flow [J]. *Forest Ecology and Management*, 2026, 600: 123290.
- [14] 郭仲军, 黄继红, 路兴慧, 等. 基于第七次森林资源清查的新疆天然林生态系统服务功能 [J]. *生态科学*, 2015, 34(4): 118–124.
Guo Z J, Huang J H, Lu X H, et al. Nature tree ecosystem services evaluation in Xinjiang based on the seventh national forest assessment data [J]. *Ecological Science*, 2015, 34(4): 118–124.
- [15] 房园, 梁中, 张毓涛, 等. 天山云杉森林生态系统的水源涵养能力海拔梯度变化特征 [J]. *生态环境学报*, 2023, 32(9): 1574–1584.
Fang Y, Liang Z, Zhang Y T, et al. Characteristics of altitudinal gradient changes in water retention of Tianshan spruce forest ecosystems [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(9): 1574–1584.
- [16] Kašák J, Foit J, Holuša O, et al. *Scolytus koenigi* Schevyrew, 1890 (Coleoptera: Curculionidae): new bark beetle for the Czech Republic and notes on its biology [J]. *Journal of Forest Science*, 2015, 61(9): 377–381.
- [17] Buhroo A A, Pandit R S, Zubair R M. Morpho-molecular identification of the bark beetle *Hylesinus macmahoni* (Stebbing, 1909) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) infesting *Olea europaeasubsp. cuspidata* (Wall. & G. Don) Cif., along with a brief biological synopsis [J]. *Folia Forestalia Polonica*, 2024, 66(1): 1–7.
- [18] 高磊, 孙荣华, 孙雪婷. 黑色枝小蠹生物学特性及越冬成虫耐寒性 [J]. *中国森林病虫*, 2022, 41(1): 12–16.
Gao L, Sun R H, Sun X T. Biological characteristics of *Xylosandrus compactus* and cold tolerance of overwintering adults [J]. *Forest Pest and Disease*, 2022, 41(1): 12–16.
- [19] 王洪波, 王忠, 李东华, 等. 云杉八齿小蠹生物学和生态学研究 [J]. *吉林林业科技*, 2018, 47(2): 31–34.
Wang H B, Wang Z, Li D H, et al. The biological and ecological research of *Ips typographus* Linnaeus [J]. *Journal of Jilin Forestry Science and Technology*, 2018, 47(2): 31–34.
- [20] Kautz M, Peter F J, Harms L, et al. Patterns, drivers and detectability of infestation symptoms following attacks by the European spruce bark beetle [J]. *Journal of Pest Science*, 2023, 96(1): 403–414.
- [21] 殷惠芬, 黄复生, 李兆麟. 中国经济昆虫志 第二十九册 鞘翅目小蠹科 [M]. 北京: 科学出版社, 1984: 121–135.
Yin H F, Huang F S, Li Z L. Economic insect fauna of China, Fasc. 29, Coleoptera: Scolytidae [M]. Beijing: Science Press, 1984: 121–135.

- [22] Celedon J M, Bohlmann J. Oleoresin defenses in conifers: chemical diversity, terpene synthases and limitations of oleoresin defense under climate change [J]. *New Phytologist*, 2019, 224(4): 1444–1463.
- [23] 李青青, 段焰青, 叶辉, 等. 针叶树木对小蠹虫的防御机制 [J]. *中国森林病虫*, 2007, 26(6): 21–24, 44.
- Li Q Q, Duan Y Q, Ye H, et al. Defense mechanisms of coniferous trees against bark beetles [J]. *Forest Pest and Disease*, 2007, 26(6): 21–24, 44.
- [24] Kolb T, Keefover-Ring K, Burr S J, et al. Drought-mediated changes in tree physiological processes weaken tree defenses to bark beetle attack [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2019, 45(10): 888–900.
- [25] Ott D S, Davis T S, Mercado J E. Interspecific variation in spruce constitutive and induced defenses in response to a bark beetle-fungal symbiont provides insight into traits associated with resistance [J]. *Tree Physiology*, 2021, 41(7): 1109–1121.
- [26] Aochi M, Takagi E. Host desiccation and interspecific competition limit reproductive performance of a bark beetle[J]. *Agricultural and Forest Entomology*, 2026: afe. 70070.
- [27] Safranyik L, Carroll A L. The biology and epidemiology of the mountain pine beetle in lodgepole pine forests[M]//Safranyik L, Wilson W R, eds. *The mountain pine beetle: a synthesis of biology, management, and impacts on lodgepole pine*. Victoria: Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, 2006: 3–66.
- [28] Grunwald M. Ecological segregation of bark beetles (Coleoptera, Scolytidae) of spruce [J]. *Journal of Applied Entomology*, 1986, 101(1–5): 176–187.
- [29] Göthlin E, Schroeder L M, Lindelöw A. Attacks by *Ips typographus* and *Pityogenes chalcographus* on windthrown spruces (*Picea abies*) during the two years following a storm felling [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2000, 15(5): 542–549.
- [30] Byers J A. Chemical ecology of bark beetles [J]. *Experientia*, 1989, 45(3): 271–283.
- [31] Chansler J F. Cold hardiness of two species of *Ips* beetles [J]. *Journal of Forestry*, 1966, 64(9): 622–624.
- [32] 焦继鹏, 张伟, 郭天刚, 等. 乌鲁木齐板房沟林区天山重齿小蠹生物学特性 [J/OL]. *北京林业大学学报*, 2026. [2026–08–26]. DOI: [10.12171/j.1000-1522.20260172](https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20260172).
- Jiao J P, Zhang W, Guo T G, et al. Biological characteristics of *Ips hauseri* in the Banfanggou Forest Area of Urumqi[J/OL]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2026. [2026–08–26]. DOI: [10.12171/j.1000-1522.20260172](https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20260172).
- [33] Hedgren P O. The bark beetle *Pityogenes chalcographus* (L.) (Scolytidae) in living trees: reproductive success, tree mortality and interaction with *Ips typographus* [J]. *Journal of Applied Entomology*, 2004, 128(3): 161–166.
- [34] Schebeck M, Schopf A, Ragland G J, et al. Evolutionary ecology of the bark beetles *Ips typographus* and *Pityogenes chalcographus* [J]. *Bulletin of Entomological Research*, 2023, 113(1): 1–10.
- (责任编辑 吴娟 范娟
责任编辑委 骆有庆)