



天山天然云杉林小蠹优势种及其空间分布格局

王一帆 雷耀翔 张旭东 伍永明 裴玉亮 焦继鹏 任家儒 葛思勋 任利利 骆有庆

Dominant bark beetle species and their spatial distribution patterns in natural *Picea schrenkiana* forests of the Tianshan Mountains

Wang Yifan, Lei Yaoxiang, Zhang Xudong, Wu Yongming, Pei Yuliang, Jiao Jipeng, Ren Jiaru, Ge Sixun, Ren Lili, Luo Youqing

引用本文:

王一帆, 雷耀翔, 张旭东, 伍永明, 裴玉亮, 焦继鹏, 任家儒, 葛思勋, 任利利, 骆有庆. 天山天然云杉林小蠹优势种及其空间分布格局[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(9):49–59. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260243

Wang Yifan, Lei Yaoxiang, Zhang Xudong, Wu Yongming, Pei Yuliang, Jiao Jipeng, Ren Jiaru, Ge Sixun, Ren Lili, Luo Youqing. Dominant bark beetle species and their spatial distribution patterns in natural *Picea schrenkiana* forests of the Tianshan Mountains[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2026, 48(9):49–59. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260243

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260243>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

新疆哈密林区天山重齿小蠹发生及其时空分布规律

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

北京林业大学学报, 2026, 48(9): 1–9. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260082>

太行山南段油松林火烧迹地优势草本生态位及种间关系

Niche and interspecific association of dominant species in herb layer of burned *Pinus tabulaeformis* forest in the southern Taihang Mountain of northern China

北京林业大学学报, 2021, 43(4): 35–46. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210044>

基于Ripley L函数的云冷杉针阔混交林优势树种幼树的空间格局分析

Spatial pattern analysis of dominant tree species saplings in spruce–fir coniferous and broadleaved mixed forests based on Ripley L function

北京林业大学学报, 2024, 46(10): 1–10. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230237>

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>

马尾松次生林林窗初期灌木层优势物种生态位研究

Niche of dominant species in shrub layer of *Pinus massoniana* secondary forest at the initial stage of forest gap

北京林业大学学报, 2023, 45(7): 27–35. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220084>

DOI:10.12171/j.1000-1522.20260243

天山天然云杉林小蠹优势种及其空间分布格局

王一帆¹ 雷耀翔¹ 张旭东¹ 伍永明² 裴玉亮³ 焦继鹏⁴
任家儒¹ 葛思勋¹ 任利利¹ 骆有庆¹

(1. 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; 2. 新疆维吾尔自治区天山东部国有林管理局, 新疆 乌鲁木齐 830099;
3. 新疆林业有害生物防治检疫中心, 新疆 乌鲁木齐 830099; 4. 新疆农业大学林学与风景园林学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:【目的】新疆天山东部天然云杉林受虫害严重, 现有研究对该地区钻蛀性害虫群落及分布格局认识不足。本研究旨在明确雪岭云杉林钻蛀性害虫群落组成及优势种群空间分布规律, 为虫灾精准监测和有效治理提供科学依据。【方法】通过样地调查、信息素诱集和树干解析, 构建林分综合危害指数, 分析不同受害程度林分内蛀干害虫群落组成、优势种及其空间生态位关系。【结果】天山东部林区雪岭云杉受害水平高于西部; 林分综合危害指数与诱捕器平均诱捕数量呈极显著正相关($r_s = 0.881$, $P < 0.01$), 与钻蛀性害虫群落多样性无显著关联。天山重齿小蠹是天山东部林区蛀干害虫的优势种, 天山星坑小蠹为次优势种; 前者主要分布树干中下部(4~10 m)及较大径级($D > 10$ cm)的干与枝; 后者集中分布于树干中上部(9~17 m)及较小径级($D \leq 10$ cm)的干与枝; 两种小蠹在垂直高度和水平径级上生态位重叠指数、相似性比例及种间竞争系数均较低, 具有明显的空间生态位分化。【结论】本研究从区域、群落和单木 3 个尺度明确了天山雪岭云杉受害程度的空间分异特征及两种优势小蠹的空间生态位分化; 天山重齿小蠹的高种群密度是天山东部雪岭云杉林受害的关键生物因子。建议建立区域风险分级与优势种动态调查相结合的多尺度综合监测体系, 提升早期预警和精准治理能力。

关键词: 天山; 雪岭云杉; 蛀干害虫; 小蠹; 优势种; 空间生态位; 生态位分化; 多尺度监测

中图分类号: S763.38 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2026)09-0049-11

引文格式: 王一帆, 雷耀翔, 张旭东, 等. 天山天然云杉林小蠹优势种及其空间分布格局 [J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(9): 49-59. Wang Yifan, Lei Yaoxiang, Zhang Xudong, et al. Dominant bark beetle species and their spatial distribution patterns in natural *Picea schrenkiana* forests of the Tianshan Mountains [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(9): 49-59.

Dominant bark beetle species and their spatial distribution patterns in natural *Picea schrenkiana* forests of the Tianshan Mountains

Wang Yifan¹ Lei Yaoxiang¹ Zhang Xudong¹ Wu Yongming² Pei Yuliang³ Jiao Jipeng⁴
Ren Jiaru¹ Ge Sixun¹ Ren Lili¹ Luo Youqing¹

(1. Beijing Key Laboratory for Forest Pest Control, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Eastern Tianshan State-owned Forest Bureau, Urumqi 830099, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China;

3. Xinjiang Uygur Autonomous Region Forestry Pest Control and Quarantine Center, Urumqi 830099,
Xinjiang Uygur Autonomous Region, China;

4. College of Forestry and Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052,
Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

Abstract: [Objective] Severe damage has been observed in the natural *Picea schrenkiana* forests of eastern Tianshan, Xinjiang, while research on wood-boring pest communities and their distribution patterns in the

收稿日期: 2026-05-17 修回日期: 2026-09-11

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划(2026B02001-1)。

第一作者: 王一帆。主要研究方向: 森林保护。Email: 18033896609@163.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。

责任作者: 任利利, 高级实验师。主要研究方向: 森林保护。Email: lily_ren@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

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

region remains limited. This study aimed to characterize the community composition and spatial distribution patterns of wood-boring pest in *Picea schrenkiana* forests and to identify the dominant pest species and their spatial niches, providing a scientific basis for precise monitoring and effective management. [Method] Field surveys, pheromone trapping, and stem analysis were used to assess wood-boring pest communities across stands with different damage severities. A Stand Integrated Damage Index (SI) was developed to quantify stand damage severity, and community composition, dominant species, and spatial niche relationships were analyzed. [Result] Damage severity was higher in the eastern than in the western Tianshan Mountains. SI was strongly and positively correlated with the mean number of individuals captured per trap ($r_s = 0.881$, $P < 0.01$), but was not significantly associated with community diversity. *Ips hauseri* was the absolute dominant species in the Eastern Tianshan, followed by *Pityogenes spessivtsevi*. *I. hauseri* predominantly occupied the lower-middle trunk (4–10 m) and on larger-diameter stems and branches ($D > 10$ cm), *P. spessivtsevi* was concentrated in the upper-middle trunk (9–17 m) and on smaller-diameter stems and branches ($D \leq 10$ cm). The two species showed low niche overlap, niche similarity, and interspecific competition along both vertical and diameter gradients, indicating pronounced spatial niche differentiation. [Conclusion] At the regional, community and individual-tree scales, damage severity of *P. schrenkiana* stands in the Tianshan Mountains showed clear spatial differentiation, and the two dominant bark beetles exhibited distinct spatial niche differentiation. The high population density of *I. hauseri* was a key biotic factor for the damage in the eastern Tianshan Mountains. A multi-scale monitoring system integrating regional risk zonation and dominant-species surveys is recommended to improve early warning and precision management.

Key words: Tianshan Mountains; *Picea schrenkiana*; wood-boring pest; bark beetle; dominant species; spatial niche; niche differentiation; multi-scale monitoring

雪岭云杉(*Picea schrenkiana*), 隶属松科(Pinaceae)云杉属(*Picea*), 在中国仅分布于新疆地区, 是构成天山森林生态系统的物质基础与功能主体^[1]。全球气候变暖及极端干旱频发加剧了针叶林生长衰退与大面积枯死^[2], 新疆天然林也普遍出现不同程度的退化现象^[3–7], 尤以天山中东部的天然云杉林更为严重。国际上针对针叶林衰退与钻蛀性害虫的互作及相关机制已开展了大量研究, 气候变暖和干旱胁迫可削弱云杉寄主防御能力, 进而促进次期性钻蛀害虫种群扩张。云杉八齿小蠹(*Ips typographus*)等小蠹的大规模暴发已成为欧洲云杉(*Picea abies*)林衰退的重要生物驱动因素^[8–9]。而我国天然针叶林生态系统同样面临“干旱致树势衰弱—次期性钻蛀性害虫暴发—林分大规模退化”的共性生态问题, 天山雪岭云杉天然林的衰退进程中, 蛀干害虫的侵害已成为加剧林分枯死的直接因素^[10–12]。因此, 明确天山雪岭云杉林优势小蠹种类及其空间生态位, 对保障天山森林生态系统稳定具有现实必要性与理论意义。

蛀干害虫群落组成、种群密度和优势度能够在一定程度上反映林分健康状况, 并受到寄主树势、林分结构及可利用衰弱木和枯死木资源的共同影响^[13]。随着寄主树势衰弱和适生繁殖材料增加, 部分次期

性蛀干害虫的种群密度可能迅速上升, 形成明显的种群优势, 进一步加剧林分衰退^[8]; 但群落多样性的响应方面可能因昆虫类群、林分结构和调查尺度而异^[14–15]。天山天然林区的虫害相关研究多集中于局部区域或历史数据^[16], 难以反映当前气候变化背景下天山地区钻蛀性害虫的群落结构及多样性分布格局。天山东部和西部雪岭云杉天然林的受害程度与特点是否存在空间分异, 以及这种分异与蛀干害虫种群分布之间的关系亟待研究。

生态位理论在阐释昆虫种群关系、种间资源利用及物种共存机制等方面具有重要意义^[17–19]。其中空间生态位反映物种在空间资源维度上的分布范围与利用能力, 通过生态位相关指标, 可量化物种对空间资源的占据程度与种间竞争强度^[20–22]。此前, 已针对云南松上切梢小蠹、华山松上小蠹和海南橡胶上的小蠹的种群等开展相关研究^[23–27], 通过将寄主树的空间资源不同维度的划分, 揭示了蛀干害虫种群在多维空间资源上的分布规律^[28–30]。

针对上述科学问题, 本研究以天山雪岭云杉天然林蛀干害虫群落为研究对象, 选取天山东西部典型样地开展调查研究, 综合评价不同区域林分的蛀干害虫危害状况, 并分析害虫群落组成及多样性格局。进一步针对重度受害区域, 通过受害木树干解

析,从垂直高度和水平径级两个维度分析优势小蠹的空间生态位,明确其空间分布格局与种间资源分配机制,为优势小蠹的分层监测和精准防控提供生态学依据。

1 研究区概况

研究区位于新疆维吾尔自治区境内的天山山脉,属温带干旱大陆性气候,区域气候以西部“暖湿”和东部“干热”为特征。雪岭云杉林是新疆分布面积最大的针叶林,其自然分布区西起喀什西端的西昆仑山地,沿天山南麓向东延伸至哈密以北的巴里坤—哈尔里克山地。本研究空间生态位研究样地设置于新疆维吾尔自治区乌鲁木齐县板房沟镇东白杨沟的天然雪岭云杉林(43°09′~43°28′N, 87°12′~87°50′E),该区域雪岭云杉林主要分布在海拔 1 600~2 300 m 的中山地区,伴生黑果小檗(*Berberis atrocarpa*)、宽刺蔷薇(*Rosa platyacantha*)等灌木,以及天山早熟禾(*Poa tianschanica*)、天山羽衣草(*Alchemilla tianschanica*)等草本。

2 研究方法

2.1 样本采集与处理

2.1.1 踏查区样地设置与样本采集

沿天山山脉选取 8 个代表性调查样地(表 1),覆盖天山东部干热区和西部暖湿区的典型云杉林分布区。每样地设 30 m×30 m 标准样方 2~3 个,共计 21 个。每样方内随机选取 100~200 株 DBH>20 cm 的雪岭云杉,统计有虫株率和枯死率。在上述 8 个样地内及天山东部国有林管理局的乌南、奇台、木垒、吉木萨尔 4 个分局布设诱集点;采用黑色十字挡板式诱捕器,以及广谱性林木钻蛀性害虫信息素混合物^[3],搭配齿小蠹引诱剂产品(北京中捷四方)。诱捕器间距为 50~100 m,悬挂距地面高度 1.0~1.5 m

处,每 30 d 调查一次,收集诱捕器内钻蛀性害虫并统计种类及数量。

2.1.2 诱捕器内昆虫样本处理与计数

统计 7 月 13 日—8 月 23 日每个诱捕器内全部钻蛀性害虫种类与数量。基于 Python 语言开发小蠹样品分类与计数程序对小蠹进行自动识别与数量统计。随机抽取 800 个样本进行人工复核,该方法对天山重齿小蠹和天山星坑小蠹的识别准确率分别为 99.50% 和 93.50%,两种小蠹之间未出现相互误判。

2.1.3 空间生态位研究区样本采集

于 2025 年 5 月底,在板房沟分局东白杨沟南台子试验地选取 3 株当年新受侵染雪岭云杉样木进行伐倒解析。取样时间处于越冬代成虫集中侵入和产卵、子代集中发育的阶段。所选样木树冠完整,针叶全绿,无明显枯萎症状,树干表面可见侵入孔及伴随的树脂流和新鲜蛀屑。平均树高为(16.67±0.88)m,平均胸径为(18.83±1.28)cm。样木自基部伐倒后按 1 m 间隔切割,共获得 50 个木段,逐段编号并记录侵入孔数量,木段运回后蜡封两端保存。6 月下旬对全部木段罩网并进行剥皮解析,记录羽化孔数量及天山重齿小蠹、天山星坑小蠹的成虫、幼虫和蛹数量。

2.2 成虫形态和危害特征观察

参照《中国昆虫生态大图鉴》《中国森林昆虫》《新疆森林昆虫》《新疆天牛志》《中国经济昆虫志·第二十九册》等对诱捕器内标本进行鉴定。选取两种小蠹共同危害的雪岭云杉木段,随机测量完整、无破损的天山重齿小蠹和天山星坑小蠹的羽化孔各 20 个;沿树干纵向剖开剥离韧皮部与木质部,选择完整母坑道、子坑道进行测量并绘示意图。

2.3 数据分析

本研究围绕区域林分危害程度差异、钻蛀性害虫群落特征、优势小蠹种群空间资源利用及种间关系 3 个层次展开数据分析。

表 1 天山地区钻蛀性害虫调查样地基本信息
Tab. 1 Basic information on the survey sites of wood-boring pests in the Tianshan Mountains

样地分布	样地全称	简称	林分类型	海拔/m	地理坐标	样方个数	诱捕器个数
天山东部区域	哈密市巴里坤哈萨克自治县花园乡西黑沟	巴里坤西黑沟	西伯利亚落叶松+雪岭云杉	2 158	43°32'N, 92°56'E	3	6
	哈密市伊州区白石头乡	伊州白石头乡	西伯利亚落叶松+雪岭云杉	2 269	43°19'N, 93°41'E	3	6
	乌鲁木齐市乌鲁木齐县板房沟镇东白杨沟	乌鲁木齐东白杨沟	雪岭云杉	1 937	43°25'N, 87°14'E	3	14
	乌鲁木齐市米东区铁厂沟镇	乌鲁木齐哈熊沟	雪岭云杉	1 884	43°48'N, 87°59'E	3	7
	乌苏市塔布勒合特蒙古民族乡夏尔苏木	乌苏夏尔苏木	雪岭云杉	1 825	44°08'N, 84°20'E	3	8
天山西部区域	伊犁哈萨克自治州巩留县库尔德宁镇库尔德宁风景区	巩留库尔德宁	雪岭云杉	1 602	43°08'N, 82°50'E	2	6
	伊犁哈萨克自治州新源县坎苏镇坎苏沟	新源坎苏沟	雪岭云杉	1 728	43°28'N, 84°00'E	2	6
	巴音郭楞蒙古自治州和静县巩乃斯镇巩乃斯林场	和静巩乃斯	雪岭云杉	2 003	43°15'N, 84°36'E	2	6

2.3.1 林分综合危害指数分析与差异性检验

本研究参照 OECD 多指标综合评价方法中的 Z-score 标准化框架^[32],通过等权重合成有虫株率和枯死率,构建林分综合危害指数(stand integrated damage index, SI),量化评估不同区域林分的蛀干害虫危害程度。

$$P_{inf,i} = \frac{N_{inf,i}}{N_{total,i}} \times 100\% \tag{1}$$

式中: $P_{inf,i}$ 为有虫株率, $N_{inf,i}$ 为第*i*块样地样地内雪岭云杉有虫株数, $N_{total,i}$ 为第*i*块样地样地内随机调查雪岭云杉总株数,%。

$$P_{mor,i} = \frac{N_{mor,i}}{N_{total,i}} \times 100\% \tag{2}$$

式中: $P_{mor,i}$ 为枯死率, $N_{mor,i}$ 为第*i*块样地样地内雪岭云杉枯死株数, $N_{total,i}$ 为第*i*块样地样地内随机调查雪岭云杉总株数,%。

对以上指标进行 Z-score 无量纲标准化。

$$Z(X_i) = \frac{X_i - \mu}{\sigma} \tag{3}$$

式中: $Z(X_i)$ 为第*i*块样地对应指标的标准化 Z 值; X_i 为第*i*块样地的指标实测值(有虫株率/枯死率),%; μ 为对应指标的全局均值(全部调查样地的指标平均值),%; σ 为对应指标的全局总体标准差(全部调查样地的指标总体标准差),%。

林分综合危害指数为

$$H_i = 0.5Z(P_{inf,i}) + 0.5Z(P_{mor,i})$$

式中: H_i 代表为第*i*块样方的 SI 值, $Z(P_{inf,i})$ 、 $Z(P_{mor,i})$ 分别为第*i*块样地有虫株率、枯死率的标准化 Z 值。

区域总体林分综合危害指数为

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n (H_i \times N_i)}{\sum_{i=1}^n N_i}$$

式中: H 为区域总体 SI 值, N_i 为第*i*块样地的调查总株数, n 为对应尺度内的样地总数量。

以样地 SI 均值为独立观测单元,采用独立样本 *t* 检验比较天山东部与西部林分综合危害程度的差异,同时以样地为单元进行 Wilcoxon 秩和检验。统

计分析在 R 4.4.1 中完成。

2.3.2 蛀干害虫群落结构与林分综合危害指数关联分析

对各样地单诱捕器平均捕获量进行标准化,计算钻蛀性害虫相对多度及群落多样性指数:Shannon-Wiener 多样性、Simpson 优势度、Pielou 均匀度、Margalef 丰富度。采用 Spearman 秩相关系数(r_s)分析 SI 与钻蛀性害虫群落多样性参数及种群密度的相关关系;以 Bray-Curtis 相异度指数结合 NMDS 排序分析样地间群落组成差异,并以 PERMANOVA 检验其统计显著性。以上分析在 R4.4.1 中完成。

2.3.3 寄主树空间资源单元划分与优势小蠹种群空间生态位计算

将雪岭云杉解析木样本按垂直高度与水平径级 2 个空间资源单元划分^[29]。垂直高度以 1 m 为一个梯度;水平径级按其平均直径 *D* 划分为 5 个梯度($D \leq 5$ cm、 5 cm $< D \leq 10$ cm、 10 cm $< D \leq 15$ cm、 15 cm $< D \leq 20$ cm、 $D > 20$ cm),分析小蠹种群的空间资源利用及种间共存与竞争关系。生态位宽度和生态位重叠采用 Levins^[33]和徐汝梅^[34]公式计算,同时采用 Hurlbert^[35]标准化修正。生态位相似性系数采用 Levins^[33]和 Colwell^[36]等的测定公式计算,种间竞争采用 Pianka^[37]的生态位重叠指数。采用 Jackknife 法估计生态位指数标准误^[38]。

2.3.4 种间关联分析

采用 Yates 连续性校正卡方检验和 Fisher 精确检验分析两种小蠹的种间关联性,通过 CMH 检验(Cochran-Mantel-Haenszel)控制样木间差异。以上分析在 R4.4.1 中完成,用 Graphpad Prism10.1.2 进行制图。

3 结果与分析

3.1 天山不同区域云杉林林分综合危害指数

天山不同区域云杉林蛀干害虫危害程度差异显著(表 2)。天山东部 SI 均值为 0.268 ± 0.166 ,天山西部为 -0.669 ± 0.162 ,天山东部与西部 SI 差异极显著($t = 3.296$, $df = 19$, $P = 0.004$)。重度危害点集中于天山东部,西部以中度和轻度危害为主。乌鲁木齐

表 2 天山不同区域的林分综合危害指数及危害程度

Tab. 2 Stand integrated damage index and severity degree of different regions in the Tianshan Mountains

调查点	东部					西部		
	乌鲁木齐东白杨沟	乌苏夏尔苏木	乌鲁木齐哈熊沟	巴里坤西黑沟	伊州白石头乡	和静巩乃斯	新源坎苏沟	巩留库尔德宁
林分综合危害指数	1.192	0.503	0.237	0.016	-0.497	-0.290	-0.796	-0.945
危害程度	重度危害	重度危害	重度危害	重度危害	中度危害	中度危害	轻度危害	轻度危害

注:林分综合危害指数(SI)以全调查区域均值为0基准,正值代表危害程度高于全区域平均水平,负值代表危害程度低于全区域平均水平。SI ≥ 0,重度危害;-0.5 ≤ SI < 0,中度危害;SI < -0.5,轻度危害。

东白杨沟和巩留库尔德宁分别表现出最高和最低的 SI, 不同区域天山雪岭云杉林危害程度具空间分异。

3.2 天山云杉林钻蛀性害虫的群落组成

所有布设诱捕器内共诱集钻蛀性害虫 16 355 头, 隶属 2 目 3 科 12 属 13 种(表 3)。小蠹类是该区域钻蛀性害虫群落的主要组成类群, 个体数占总诱集量的 97.82%。其中, 天山重齿小蠹(*Ips hauseri*)为优势种, 天山星坑小蠹(*Pityogenes spessittsevi*)次之。此外, 林间踏查和树干解析采集并鉴定有木小蠹属 *Trypodendron* sp.(哈密分局、米东分局、板房沟分局)、云杉根小蠹 *Hylastes parallelus*(板房沟分局)和云杉大小蠹 *Dendroctonus micans*(乌苏分局)。

3.3 天山云杉林钻蛀性害虫群落多样性及相关性分析

天山不同区域钻蛀性害虫群落多样性特征差异明显(表 4), 各样地诱捕器平均诱捕数量与样地 SI 呈极显著正相关($r_s = 0.881, P = 0.004$)。林分内样木枯死率与诱捕器平均诱捕数量呈极显著正相关($r_s =$

0.911, $P = 0.004$), 而钻蛀性害虫群落多样性各指数与枯死率均无显著相关($P > 0.05$)。这表明林分受害主要与诱捕器平均诱捕数量相关, 而非群落多样性水平(表 5)。钻蛀性害虫群落多样性指数与样地 SI 均无显著相关性($P > 0.05$)。

3.4 天山地区钻蛀性害虫群落结构相似性分析

害虫群落组成呈明显的东西分化格局(表 6)。天山东部 5 个样地之间的 Bray-Curtis 距离为 0.010 ~ 0.155, 群落组成高度相似; 天山西部 3 个样地内部距离为 0.261 ~ 0.404。东、西部样地间距离均达到 0.868 以上。PERMANOVA 检验显示, SI 对钻蛀性害虫群落组成有显著影响($F = 5.708, R^2 = 0.695, P = 0.044$)。

3.5 优势小蠹种类的鉴别特征

试验地受害木中的优势种为天山重齿小蠹(图 1)和天山星坑小蠹(图 2)。两种小蠹可通过以下 3 个特征快速区分。(1)体型: 天山重齿小蠹体长($4.59 \pm$

表 3 天山地区多效引诱剂诱捕的钻蛀性害虫种类组成及相对多度

Tab. 3 Species composition and relative abundance of wood-boring pests captured with multi-component attractant-baited traps in the Tianshan Mountains

目	科	种	数量/头	相对多度/%
鞘翅目 Coleoptera	象虫科 Curculionidae	天山重齿小蠹 <i>Ips hauseri</i>	15 823	96.74
		天山星坑小蠹 <i>Pityogenes spessittsevi</i>	176	1.08
	天牛科 Cerambycidae	密点断眼天牛 <i>Tetropium staudingeri</i>	184	1.12
		脊鞘幽天牛 <i>Asemum striatum</i>	32	0.20
		<i>Aegomorphus</i> sp.	11	0.07
		云斑短头花天牛 <i>Dokhtouroffia nebulosa</i>	3	0.02
		松皮花天牛 <i>Rhagium japonicum</i>	2	0.01
		黄肩长尾树蜂 <i>Xeris spectrum</i>	13	0.08
膜翅目 Hymenoptera	树蜂科 Siricidae	泰加大树蜂 <i>Urocerus gigas taiganus</i>	5	0.03
		杜克树蜂 <i>Sirex dux</i>	104	0.64
		蓝黑树蜂 <i>Sirex juvencus</i>	2	0.01

表 4 天山地区钻蛀性害虫群落多样性分析

Tab. 4 Analysis of wood-boring pest community diversity indicators in the Tianshan Mountains

调查点	Shannon-Weiner 多样性指数	Simpson 优势度指数	Pielou 均匀度指数	Margalef 丰富度指数	诱捕器平均 诱捕数量/头	样地内雪岭 云杉枯死率/%
乌鲁木齐东白杨沟	0.094	0.030	0.043	1.120	1 261.8 ± 20.5	31.73
乌苏夏尔苏木	0.120	0.039	0.058	1.017	976.3 ± 18.0	24.75
乌鲁木齐哈熊沟	0.150	0.054	0.083	0.717	1 067.3 ± 18.8	25.81
伊州白石头乡	0.054	0.016	0.030	0.729	950.5 ± 17.8	4.10
巴里坤西黑沟	0.143	0.048	0.073	0.854	1 123.0 ± 19.3	41.56
和静巩乃斯	1.003	0.544	0.723	6.424	2.50 ± 0.65	9.36
新源坎苏沟	1.190	0.645	0.859	5.753	2.2 ± 0.6	10.28
巩留库尔德宁	0.683	0.490	0.985	0	0.30 ± 0.24	3.67

注: 诱捕器平均诱捕数量为平均值 ± 标准差。

表 5 天山地区钻蛀性害虫群落特征与林分危害指标的相关性分析

Tab. 5 Correlation analysis between community characteristics of wood-boring pests and forest damage indicators in the Tianshan Mountains

群落特征指数	林分综合危害指数	雪岭云杉枯死率
诱捕器平均诱捕数量	$r_s = 0.881, P = 0.004$	$r_s = 0.911, P = 0.004$
Shannon-Weiner多样性指数	$r_s = -0.524, P = 0.197$	$r_s = -0.238, P = 0.570$
Simpson优势度指数	$r_s = -0.524, P = 0.197$	$r_s = -0.238, P = 0.570$
Pielou均匀度指数	$r_s = -0.619, P = 0.115$	$r_s = -0.357, P = 0.385$
Margalef丰富度指数	$r_s = 0.214, P = 0.619$	$r_s = 0.190, P = 0.651$

表 6 天山地区蛀干害虫群落的 Bray-Curtis 距离矩阵

Tab. 6 Bray-Curtis distance matrix of wood-boring pest community in the Tianshan Mountains

调查点	乌鲁木齐东白杨沟	乌苏夏尔苏木	乌鲁木齐哈熊沟	伊州白石头乡	巴里坤西黑沟	和静巩乃斯	新源坎苏沟
乌苏夏尔苏木	0.069						
乌鲁木齐哈熊沟	0.087	0.079					
伊州白石头乡	0.099	0.125	0.155				
巴里坤西黑沟	0.067	0.073	0.093	0.085			
和静巩乃斯	0.924	0.885	0.891	0.924	0.932		
新源坎苏沟	0.916	0.868	0.894	0.914	0.915	0.261	
巩留库尔德宁	0.937	0.919	0.897	0.946	0.934	0.404	0.339



图 1 天山重齿小蠹成虫形态特征
Fig. 1 Morphological characteristics of *Ips hauseri* adults

图 2 天山星坑小蠹成虫形态特征
Fig. 2 Morphological characteristics of *Pityogenes spessivtsevi* adults

0.74)mm($n = 50$), 天山星坑小蠹体长(2.69 ± 0.46)mm($n = 50$)。 (2)鞘翅齿突:前者翅盘两侧各 4 齿,后者各 3 齿^[39-40]。 (3)头部特征:天山重齿小蠹额面中心偏下具一突出颧瘤,天山星坑小蠹仅雌虫额顶具一扁椭圆形陷坑^[40-41]。野外可依据蛀孔直径(天山重齿小蠹约 2.0 mm,天山星坑小蠹约 1.0 mm)进行判别。两种小蠹的母坑道形态差异显著(图 3):天山重齿小蠹母坑道为复纵坑型,长 4~7 cm,多呈“X”或“倒 Y”形;天山星坑小蠹母坑道 2~6 条,各自成圆弧形,

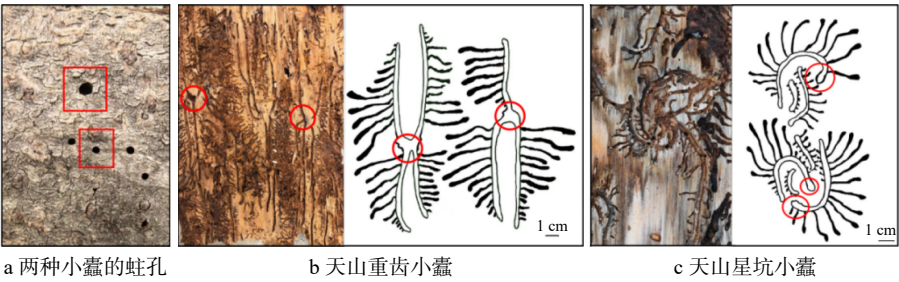
长 5~7 cm,多呈螺旋弧花状,子坑道出自弧线凸侧,间距较密^[40]。

3.6 优势小蠹种类的空间分布

经对 50 个木段的解析,平均每株样木小蠹总数量为($19\,626 \pm 1\,326$)头,其中天山重齿小蠹平均每株($15\,922 \pm 2\,537$)头(81.1%),天山星坑小蠹平均每株($3\,703 \pm 2\,091$)头(18.9%)。

3.6.1 垂直高度分布格局

两种小蠹在垂直梯度上形成明显的生态位分离



a 两种小蠹的蛀孔
b 天山重齿小蠹
c 天山星坑小蠹
红色方框为蛀孔,上为天山重齿小蠹蛀孔,下为天山星坑小蠹蛀孔;红色圆框为交配室。

图 3 两种小蠹坑道形态特征对比
Fig. 3 Gallery morphology comparison of two bark beetle species

(表 7, 图 4): 天山重齿小蠹主要分布于树干中下部(10 m 以下), 在 3~9 m 范围内最为集中, 于 8~9 m 处达到峰值(12.22 ± 2.31)%, 在 10 m 以上仍有分布。天山星坑小蠹则集中于树干中上部(9~17 m), 在 15~16 m 处达到峰值(20.16 ± 7.74)%, 5 m 以下几乎未见分布。

3.6.2 水平径级分布格局

天山重齿小蠹主要分布于直径较大($D > 10$ cm)的干段, 在 $10\text{ cm} < D \leq 15\text{ cm}$ 和 $15\text{ cm} < D \leq 20\text{ cm}$ 两个区段分布比例分别为(43.23 ± 10.00)%

和(40.33 ± 7.35)%(表 8, 图 5); 天山星坑小蠹则集中于直径较小($D \leq 10$ cm)的干段, 在 $5\text{ cm} < D \leq 10\text{ cm}$ 和 $D \leq 5\text{ cm}$ 区段分别为(41.83 ± 17.09)% 和 (30.33 ± 7.08)%。

3.7 两种小蠹的空间生态位及种间关联性

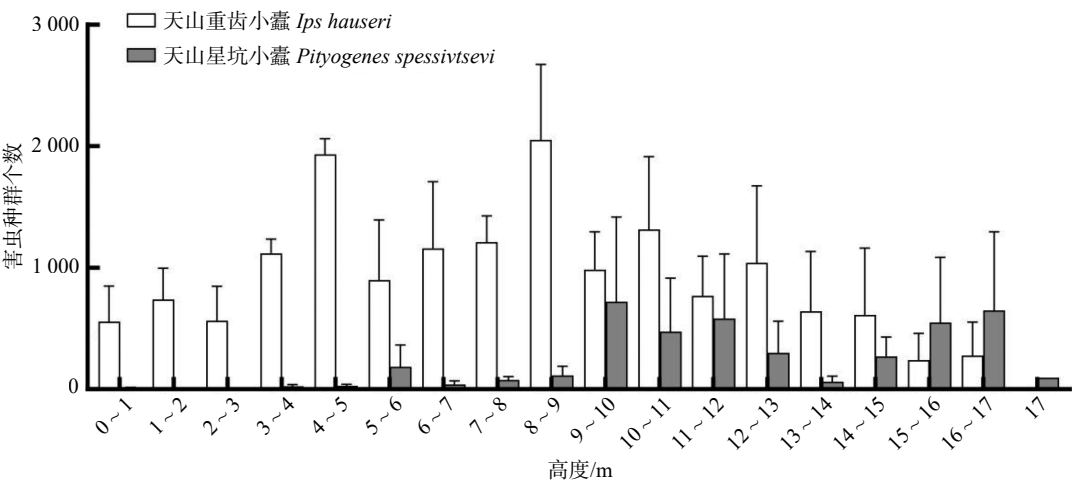
两种小蠹在垂直高度和水平径级两个维度的生态位指数如表 9 所示: 在垂直高度上, 天山重齿小蠹的生态位宽度显著大于天山星坑小蠹; 在水平径级上, 两种小蠹的生态位宽度相近。两个维度上的生态位重叠指数均处于极低水平, 生态位相似性比例

表 7 雪岭云杉树干垂直高度单元上两种小蠹分布比例

Tab. 7 Distribution proportion of two bark beetle species in vertical height units of <i>Picea schrenkiana</i>										%
害虫种类	树高/m									
	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	
天山重齿小蠹	3.36 ± 1.48	5.22 ± 2.20	3.86 ± 1.85	7.76 ± 2.30	12.89 ± 2.49	5.85 ± 2.72	8.49 ± 4.51	8.37 ± 2.61	12.22 ± 2.31	
天山星坑小蠹	4.36 ± 4.13	0.02 ± 0.01	0.00 ± 0.00	4.39 ± 3.66	0.49 ± 0.25	4.41 ± 2.25	0.60 ± 0.40	6.65 ± 4.48	1.96 ± 1.03	

害虫种类	树高/m									
	9~10	10~11	11~12	12~13	13~14	14~15	15~16	16~17	17	
天山重齿小蠹	5.80 ± 1.23	7.51 ± 2.88	4.36 ± 1.57	5.74 ± 3.30	3.44 ± 2.65	3.28 ± 2.96	1.30 ± 0.96	1.49 ± 1.21	0.00	
天山星坑小蠹	12.16 ± 8.49	6.78 ± 5.84	9.26 ± 6.56	4.44 ± 3.40	3.47 ± 2.20	13.30 ± 5.44	20.16 ± 7.74	20.10 ± 12.45	2.60	

注: 表中数据以平均值±标准误表示, 下同。各垂直高度虫口分布比例为单株样木该高度虫口数量占其总虫口数量的比例, 最终取3株重复样木占比的平均值。



害虫种群数量为 3 株重复样木在各 1 m 木段内虫口数量的平均值, 误差条代表标准误, 下同。

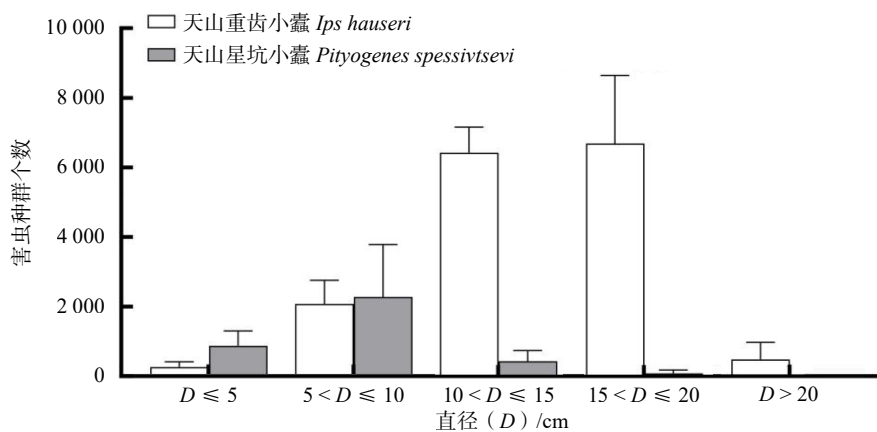
图 4 两种小蠹在雪岭云杉垂直高度单元上的分布数量

Fig. 4 Abundance of the two bark beetle species across vertical height units of *Picea schrenkiana*

表 8 雪岭云杉树干水平径级单元上两种小蠹分布比例

Tab. 8 Distribution proportion of two bark beetle species in diameter classes of <i>Picea schrenkiana</i>						%
害虫种类	直径(D)/cm					
	$D \leq 5$	$5 < D \leq 10$	$10 < D \leq 15$	$15 < D \leq 20$	$D > 20$	
天山重齿小蠹	1.55 ± 0.71	12.29 ± 2.78	43.23 ± 10.00	40.33 ± 7.35	2.60 ± 2.60	
天山星坑小蠹	30.33 ± 7.08	41.83 ± 17.09	14.56 ± 4.39	12.60 ± 9.02	0.67 ± 0.67	

注: 各径级虫口分布比例为单株样木该径级虫口数量占其总虫口数量的比例, 最终取3株重复样木占比的平均值。



害虫种群数量为 3 株重复样木分别按径级单元汇总后的各径级虫口数量的平均值

图 5 两种小蠹在雪岭云杉水平径级单元上的分布数量

Fig. 5 Abundance of the two bark beetle species across diameter classes of *Picea schrenkiana*

表 9 两种小蠹在雪岭云杉上垂直高度和水平径级的空间生态位变化

Tab. 9 Spatial niche of two bark beetle species in height and width classes of *Picea schrenkiana*

分布位置	害虫种类	生态位宽度		生态位重叠		生态位相似性比例		种间竞争系数	
		天山星坑小蠹	天山重齿小蠹	天山星坑小蠹	天山重齿小蠹	天山星坑小蠹	天山重齿小蠹	天山星坑小蠹	天山重齿小蠹
垂直高度	天山重齿小蠹	0.601 ± 0.051		0.024 ± 0.003		0.306 ± 0.045		0.313 ± 0.055	
	天山星坑小蠹	0.306 ± 0.070		0.012 ± 0.003		0.306 ± 0.045		0.313 ± 0.055	
水平径级	天山重齿小蠹	0.392 ± 0.072		0.065 ± 0.015		0.394 ± 0.125		0.458 ± 0.135	
	天山星坑小蠹	0.428 ± 0.115		0.080 ± 0.037		0.394 ± 0.125		0.458 ± 0.135	

注: 表中数据以平均值 ± 标准误表示, 标准误采用Jackknife刀切法估计。

和种间竞争指也均偏低,表明两种小蠹在寄主树干上的空间资源利用方式存在显著分化。在垂直高度上,两种小蠹种间关联不显著($\chi^2=0.315$, $P=0.575$; Fisher $P=0.560$), Yule's $Q=-1.000$,反映二者存在完全负关联趋势,趋向占据树干不同高度区段。在水平径级上,两种小蠹呈极显著正关联($\chi^2=7.594$, $P=0.006$; Fisher $P=0.010$; Yule's $Q=+1.000$),说明两种小蠹在同一径级内共同发生,但因虫口密度分布差异明显,资源利用仍表现为低相似性(表 10)。

4 讨 论

4.1 林分受害的区域分异及其潜在气候驱动

本研究基于 SI 的比较表明,天山东部雪岭云杉林的受害程度显著高于西部,且重度受害样地主要分布于东部。该格局与天山区域降水和水热条件的空间梯度一致^[42],也与雪岭云杉对水分较为敏感的生理生态特性相吻合^[43]。欧洲云杉林的相关研究表

明,持续高温和干旱既可削弱寄主的防御能力,也可能改变小蠹的生长发育条件,从而提高林分受侵染和死亡的风险^[8,44]。据此推测,天山东部受害较重可能是区域水热条件限制、寄主树势衰弱和小蠹种群积累共同作用的结果。需要说明的是,巴里坤西黑沟调查点在调查前开展过枯立木伐除作业。尽管本研究将可识别的伐桩纳入枯死木统计,仍可能低估该样地伐除前的实际枯死水平。此外,本研究未同步监测土壤水分、树体水分状况及长期气象过程,因此,水热条件影响林分受害的具体路径仍需结合多年连续监测加以验证。

4.2 优势种种群扩张是雪岭云杉林受害加剧的关键生物因子

信息素诱捕捕获量常用于评估小蠹虫林间种群相对水平,样地统一布设方案下其诱捕器平均诱捕量能够反映种群相对密度^[45]。因此,在本研究的调查尺度上,优势种种群相对密度较群落多样性指标

表 10 两种小蠹种间关联分析检验结果

Tab. 10 Test results of interspecific association analysis for the two bark beetle species

分布位置	χ^2 检验(Yates连续性校正)	Fisher精确检验	Yule's Q 系数	CMH检验
垂直高度	$\chi^2=0.315$, $df=1$, $P=0.575$	$P=0.560$, $OR=0$	-1.000	$\chi^2=0.280$, $P=0.597$
水平径级	$\chi^2=7.594$, $df=1$, $P=0.006$	$P=0.010$, $OR=Inf$	+1.000	$\chi^2=3.781$, $P=0.051$

更能反映林分受害水平。天山重齿小蠹是天山东部雪岭云杉林中应优先关注的蛀干害虫。这一结果与国际上少数暴发性小蠹在适宜条件下快速增殖,并主导云杉林损失的相关认识一致^[44,46-47]。优势种暴发不仅主导了林分危害,也通过生态位垄断压缩了其余物种的生存空间,导致东部各样地群落组成高度同质化^[48-49]。由于信息素诱集对不同类群的吸引效率存在差异,如树干解析中天山星坑小蠹的实际种群比例大于诱捕数据,云杉大小蠹在林间调查中已有发现但未被诱捕器捕获。基于诱捕数据的多样性分析存在物种低估问题,本研究综合采用信息素诱集、树干剥皮解析和林间调查等多种方法,可以更全面地反映受害林分内蛀干害虫群落的组成结构。

4.3 两种主要小蠹的树干空间分化及其可能机制

两种主要小蠹在树干高度和径级两个维度上表现出较为一致的空间资源分化趋势:天山重齿小蠹的分布偏向树干中下部和较粗干段,天山星坑小蠹则偏向树干中上部和较细干段。较低的生态位重叠指数、相似性比例和竞争指数表明,二者对树体空间资源的利用存在明显差异。该分布模式与云杉八齿小蠹和中穴星坑小蠹(*Pityogenes chalcographus*)在欧洲云杉上的空间分布特征相似^[50]。结合本研究测得的虫体大小差异,推测小蠹体型与树皮、韧皮部厚度梯度之间的匹配关系可能参与塑造这种空间分化。较粗干段能够提供适合较大体型齿小蠹属利用的韧皮部空间,而树干上部及细枝可能为较小体型星坑小蠹属提供相对独立的繁殖资源。本研究所得空间生态位分化规律基于3株初侵染期伐倒样木,样木径级和侵染阶段一致,对于不同林龄或不同受害阶段的解释度受限。但3株样木间各生态位指数的Jackknife标准误较小,说明本研究的空间分化模式在同一侵染阶段和径级范围内具有较好的重复性。后续研究应扩大样本量,覆盖不同地区、林龄、径级及受害阶段,并联合监测气象条件、树体水分、树皮和韧皮部性状以及小蠹种群动态综合分析。

5 结 论

本研究从区域、群落和单木3个尺度揭示了天山雪岭云杉林蛀干害虫的主要分布特征。天山东部是当前雪岭云杉受害的重点区域,优势小蠹种群相对密度较群落多样性更能反映林分受害水平,天山重齿小蠹应作为优先监测和防控对象。天山重齿小蠹与天山星坑小蠹对树干空间资源的分化利用,使不同树体部位均面临潜在侵染压力。因此,天山雪岭云杉林虫害监测宜由单一诱捕方式转向区域风险分级、优势种动态预警、树体空间分层调查的综合监

测体系,并将虫口动态与寄主树势及气象数据纳入连续监测,以提高虫害早期预警和精准治理能力。

参 考 文 献

- [1] 王圣杰. 基于树轮记录的中国天山地区近三百年温湿变化研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
Wang S J. Study on temperature and humidity changes during the past 300 years in Tianshan Mountains region of China based on the tree-ring records [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2020.
- [2] Korolyova N, Buechling A, Ďuračiová R, et al. The last trees standing: climate modulates tree survival factors during a prolonged bark beetle outbreak in Europe [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 322: 109025.
- [3] 张瑞波, 杨田娥, 张齐兵, 等. 新疆夏尔希里 1850—1870 年森林生长抑制事件及启示 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 2025, 19(3): 51—58.
Zhang R B, Yang T E, Zhang Q B, et al. Suppression of forest growth from 1850 to 1870 and its implications in xiaerxili, Xinjiang [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2025, 19(3): 51—58.
- [4] 张昕宇, 高露双, 刘可祥, 等. 新疆天山西部伊犁河流域不同海拔雪岭云杉生长衰退特征 [J]. *应用生态学报*, 2024, 35(5): 1196—1204.
Zhang X Y, Gao L S, Liu K X, et al. Growth decline characteristics of *Picea schrenkiana* at different altitudes in Yili River Basin, western Tian-Shan Mountains, Xinjiang, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(5): 1196—1204.
- [5] Wang Y J, Zhou B T, Qin D H, et al. Changes in mean and extreme temperature and precipitation over the arid region of northwestern China: observation and projection [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(3): 289—305.
- [6] Wang T, Bao A M, Xu W Q, et al. Tree-ring-based assessments of drought variability during the past 400 years in the Tianshan mountains, arid Central Asia [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107702.
- [7] He J N, Shen Z H, Ning C W, et al. Elevational effects of climate warming on tree growth in a *Picea schrenkiana* forest in the eastern Tianshan Mountains [J]. *Forests*, 2024, 15(12): 2052.
- [8] 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.
- [9] Biedermann P H W, Müller J, Grégoire J C, et al. Bark beetle population dynamics in the anthropocene: challenges and solutions [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2019, 34(10): 914—924.
- [10] Hlásný T, Zimová S, Merganičová K, et al. Devastating outbreak of bark beetles in the Czech Republic: drivers, impacts, and management implications [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 490: 119075.
- [11] Jaime L, Batllori E, Lloret F. Bark beetle outbreaks in coniferous forests: a review of climate change effects [J]. *European Journal of Forest Research*, 2024, 143(1): 1—17.

- [12] Fettig C J, Asaro C, Nowak J T, et al. Trends in bark beetle impacts in North America during a period (2000–2020) of rapid environmental change [J]. *Journal of Forestry*, 2022, 120(6): 693–713.
- [13] Stork N E, McBroom J, Gely C, et al. New approaches narrow global species estimates for beetles, insects, and terrestrial arthropods [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(24): 7519–7523.
- [14] Germain S J, Lutz J A. Stand diversity increases pine resistance and resilience to compound disturbance [J]. *Fire Ecology*, 2024, 20(1): 53.
- [15] Bergmark P, Hjaltnén J, Svensson J, et al. Trait-environment interactions of saproxylic beetles as a guide to biodiversity conservation strategies [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 360: 121080.
- [16] 孟祥永, 胡茵, 吴天虹. 新疆森林病虫生态地理区划及主要病虫害种类 [J]. *森林病虫通讯*, 1998(1): 19–25.
- Meng X Y, Hu Y, Wu T H. Ecogeographic divisions of forest pests and main pests in Xinjiang [J]. *Forest Pest and Disease*, 1998(1): 19–25.
- [17] 王刚, 赵松岭, 张鹏云, 等. 关于生态位定义的探讨及生态位重叠计测公式改进的研究 [J]. *生态学报*, 1984, 4(2): 119–127.
- Wang G, Zhao S L, Zhang P Y, et al. On the definition of niche and the improved formula for measuring niche overlap [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, 4(2): 119–127.
- [18] 朱春全. 生态位态势理论与扩充假说 [J]. *生态学报*, 1997, 17(3): 324–332.
- Zhu C Q. The niche ecostate-ecorole theory and expansion hypothesis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(3): 324–332.
- [19] 张光明, 谢寿昌. 生态位概念演变与展望 [J]. *生态学杂志*, 1997, 16(6): 46–51.
- Zhang G M, Xie S C. Development of niche concept and its perspectives: a review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, 16(6): 46–51.
- [20] 宗世祥, 姚国龙, 骆有庆, 等. 沙棘主要蛀干害虫种群生态位 [J]. *生态学报*, 2005, 25(12): 3264–3270.
- Zong S X, Yao G L, Luo Y Q, et al. Niche of main boring pests in *Hippophae rhamnoides* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3264–3270.
- [21] 王凤, 鞠瑞亭, 李跃忠, 等. 生态位概念及其在昆虫生态学中的应用 [J]. *生态学杂志*, 2006, 25(10): 1280–1284.
- Wang F, Ju R T, Li Y Z, et al. Niche concept and its application in insect ecology [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(10): 1280–1284.
- [22] 袁菲, 骆有庆, 石娟, 等. 阿尔山落叶松主要蛀干害虫的种群空间生态位 [J]. *生态学报*, 2011, 31(15): 4342–4349.
- Yuan F, Luo Y Q, Shi J, et al. Spatial ecological niche of main insect borers in larch of Aershan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(15): 4342–4349.
- [23] 沈绍伟, 骆有庆, 俞琳锋, 等. 两种切梢小蠹危害云南松的时空生态位 [J]. *应用昆虫学报*, 2018, 55(2): 279–287.
- Shen S W, Luo Y Q, Yu L F, et al. Temporal and spatial niches of two sympatric *Tomicus* species pests of *Pinus yunnanensis* Faranch [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2018, 55(2): 279–287. [.]
- [24] 殷涛. 海南橡胶小蠹虫多样性和生态位调查初步 [D]. 海口: 海南大学, 2018.
- Yin T. Preliminary investigation on diversity and ecological niche of rubber borer in Hainan [D]. Haikou: Hainan University, 2018.
- [25] 陈辉, 唐明, 叶宏谋, 等. 秦岭华山松小蠹生态位研究 [J]. *林业科学*, 1999, 35(4): 40.
- Chen H, Tang M, Ye H M, et al. Niche of bark beetles within *Pinus armandi* ecosystem in Inner Qinling Mountains [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, 35(4): 40.
- [26] Meng L Z, Wang J, Liu Y H. Impact of vegetation and climate types on vertical stratification of wood-boring longhorn and bark beetles (Coleoptera: Cerambycidae and Scolytinae) along altitude gradients in Yunnan, Southwest China [J]. *Agricultural and Forest Entomology*, 2022, 24(3): 320–331.
- [27] Foit J, Čermák V, Kudláček T. Spatial distribution of saproxylic beetles on trunks of standing Scots pine trees [J]. *Agricultural and Forest Entomology*, 2023, 25(4): 601–611.
- [28] Iidzuka H, Osawa N. Horizontal niche differentiation of *Ambrosia* beetles (Coleoptera: Scolytidae and Platypodidae) within the standing trunk of *Quercus serrata* [J]. *Journal of Forest Research*, 2016, 21(6): 319–323.
- [29] 刘丽, 阎伟, 骆有庆, 等. 青海云杉天然林内小蠹种群空间生态位的研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(5): 165–169.
- Liu L, Yan W, Luo Y Q, et al. Spatial niches of bark beetle population in *Picea crassifolia* natural forests [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(5): 165–169.
- [30] 王明, 敏敏, 敖特根, 等. 两种共同危害樟子松的树蜂的种群分布格局及生态位对比 [J]. *应用昆虫学报*, 2017, 54(6): 924–932.
- Wang M, Bao M, Ao T G, et al. Population distribution patterns and ecological niches of two *Sirex* species damaging *Pinus sylvestris* var. *mongolica* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2017, 54(6): 924–932.
- [31] Roques A, Ren L L, Rassati D, et al. Worldwide tests of generic attractants, a promising tool for early detection of non-native cerambycid species [J]. *NeoBiota*, 2023, 84: 169–209.
- [32] Nardo M, Saisana M, Saltelli A, et al. Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide[M]. Paris: OECD Publishing, 2008.
- [33] Levins R. Evolution in changing environments: some theoretical explorations[M]. Princeton: Princeton University Press, 1968.
- [34] 徐汝梅. 昆虫种群生态学 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1987.
- Xu R M. Insect population ecology [M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 1987.
- [35] Hurlbert H S. The measurement of niche overlap and some relatives [J]. *Ecology*, 1978, 59(1): 67–77.
- [36] Colwell R K, Futuyma D J. On the measurement of niche breadth and overlap [J]. *Ecology*, 1971, 52(4): 567–576.
- [37] Pianka E R. The structure of lizard communities [J]. *Annual*

- Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 53–74.
- [38] Efron B. The Jackknife, the bootstrap and other resampling plans[J/OL]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1982. DOI: 10.1137/1.9781611970319.ch3.
- [39] 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.
- [40] 殷蕙芬, 黄复生, 李兆麟. 中国经济昆虫志: 第29册鞘翅目小蠹科 [M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- Yin H F, Huang F S, Li Z L. Economic insect fauna of China. fasc. 29, Coleoptera: Scolytinae[M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [41] 殷蕙芬. 我国星坑小蠹属的种类鉴别 [J]. 森林病虫通讯, 1988, 7(2): 37–39.
- Yin H F. Identification of *Pityogenes* species (Coleoptera: Scolytinae) in China [J]. Forest Pest and Disease, 1988, 7(2): 37–39.
- [42] 张正勇, 何新林, 刘琳, 等. 中国天山山区降水空间分布模拟及成因分析 [J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 500–508.
- Zhang Z Y, He X L, Liu L, et al. Spatial distribution of rainfall simulation and the cause analysis in China's Tianshan Mountains area [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(4): 500–508.
- [43] King G, Fonti P, Nievergelt D, et al. Climatic drivers of hourly to yearly tree radius variations along a 6°C natural warming gradient [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 168: 36–46.
- [44] Das A K, Baldo M, Dobor L, et al. The increasing role of drought as an inciting factor of bark beetle outbreaks can cause large-scale transformation of Central European forests [J]. Landscape Ecology, 2025, 40(6): 108.
- [45] 方加兴, 武承旭, 卢文娟, 等. 横坑切梢小蠹林间危害与诱捕量之间的相关性分析 [J]. 林业科学, 2019, 55(4): 129–135.
- Fang J X, Wu C X, Lu W J, et al. Correlation analysis between the shoot damages and trap catches of *Tomicus minor* in the *Pinus yunnanensis* Forest [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(4): 129–135.
- [46] Hansen E M, Powell J A, Graves A, et al. Empirical and mechanistic models predict pinyon *Ips* (*Ips confusus*) phenology [J]. Ecological Modelling, 2025, 510: 111282.
- [47] Potterf M, Frühbrodt T, Thom D, et al. Hotter drought increases population levels and accelerates phenology of the European spruce bark beetle *Ips typographus* [J]. Forest Ecology and Management, 2025, 585: 122615.
- [48] 武承旭, 臧丽鹏, 张苏芳, 等. 云南松三种同域共存切梢小蠹梢转干期的空间分布格局 [J]. 生态学报, 2020, 40(11): 3646–3655.
- Wu C X, Zang L P, Zhang S F, et al. Spatial distribution patterns of three sympatric *Tomicus* species initially infesting *Pinus yunnanensis* trunks [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(11): 3646–3655.
- [49] Pec G J, Cahill J F. Large-scale insect outbreak homogenizes the spatial structure of ectomycorrhizal fungal communities [J]. PeerJ, 2019, 7: e6895.
- [50] Byers J A. Avoidance of competition by spruce bark beetles, *Ips typographus* and *Pityogenes chalcographus* [J]. Experientia, 1993, 49(3): 272–275.
- (责任编辑 吴娟 范娟
责任编辑 宗世祥)