

# 林业小蠹类昆虫在中国的适生性分析综合比较研究



宋昱东<sup>1</sup> 王 聪<sup>2</sup> 潘绪斌<sup>2\*</sup> 曹传旺<sup>1\*</sup>

(1. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; 2. 中国检验检疫科学研究院, 北京 100176)

**摘要:** 小蠹类昆虫是重要的林业害虫类群, 严重威胁我国的林业生产和生态安全, 具有重要的经济意义。综合比较中国林业小蠹类昆虫的适生性分析方法, 有助于把握林业小蠹类昆虫物种分布模型的研究动向。该文归纳整理中国林业小蠹类昆虫的适生性分析文献, 统计文献所使用的模型、适生性等级划分标准以及文献来源等信息, 并对小蠹类昆虫适生性分析未来发展进行展望, 以期为林业有害生物防控提供参考。

**关键词:** 小蠹科; 长蠹科; 物种分布模型; 潜在地理分布; 适生区

## Comprehensive comparative study on the adaptability analysis of bark and ambrosia beetles in China

Song Yudong<sup>1</sup> Wang Cong<sup>2</sup> Pan Xubin<sup>2\*</sup> Cao Chuanwang<sup>1\*</sup>

(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang Province, China;

2. Chinese Academy of Inspection and Quarantine, Beijing 100176, China)

**Abstract:** The bark and ambrosia beetles constitute an important group of forestry pests that pose a serious threat to China's forestry production and ecological security, holding significant economic importance. A comprehensive comparative study on the adaptability analysis methods of these beetles in China helps to understand research trends related to species distribution models. This article summarized and analyzed literature pertaining to the adaptability analysis of bark and ambrosia beetles in China. It organized collected records based on the application of different species distribution models and performed statistical analysis on models used, analysis regions, climatic conditions, classification criteria of suitability grade, literature sources, and other pertinent information. It provided prospects for future development of adaptability analysis, serving as a valuable reference for development of strategies for forest pest prevention and control.

**Key words:** Scolytidae; Bostrichidae; species distribution model; potential geographic distribution; suitable region

小蠹类昆虫是为害林业的最大害虫类群之一 (Marini et al., 2011; Gomez et al., 2018)。在我国, 华山松大小蠹 *Dendroctonus armandi* Tsai et Li、落叶松八齿小蠹 *Ips subelongatus* (Motchulsky) 等林业小蠹类昆虫严重威胁我国的林业生产和生态安全, 具有重要的经济意义 (李孟楼, 2010)。随着气候变化和经济全球化的发展, 目前我国已有许多外来入侵小蠹类害虫的报道 (刘光生等, 2003; 任利利等, 2021; 宋昱

东等, 2022), 也有研究表明还存在其他外来小蠹类昆虫入侵的可能性 (Yu et al., 2019)。从口岸截获的情况来看, 林业小蠹类昆虫的截获次数多, 截获数量大, 进境风险高 (刘玮琦等, 2016; 何佳遥等, 2019)。根据 2021 年 4 月中国农业农村部、海关总署联合发布公告更新的《中华人民共和国进境植物检疫性有害生物名录》及 2013 年原国家林业局第 4 号公告发布的《全国林业检疫性有害生物名单》, 目前, 我国已将红脂大小

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC2600403, 2018YFF0214905), 中央高校基本科研业务费专项资金 (2572019CG04)

\* 通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: xubin.hu.pan@gmail.com, chuanwangcao@nefu.edu.cn

收稿日期: 2023-09-06

蠹 *Dendroctonus valens* LeConte、长林小蠹 *Hylurgus ligniperda* (Fabricius)、赤材小蠹 *Xyleborus ferrugineus* (Fabricius)、南部松齿小蠹 *Ips grandicollis* (Eichhoff)、美松齿小蠹 *Ips pini* (Say)、云杉八齿小蠹 *Ips typographus* (Linnaeus)、双钩异翅长蠹 *Heterobostrychus aequalis* (Waterhousen) 和 中对长小蠹 *Platypus parallelus* (Fabricius) 等林业小蠹类昆虫列为检疫对象。

物种分布模型通过量化物种的分布信息和其所对应的环境变量之间的关系,从而预测给定物种在确定范围内的潜在分布区域 (Soberon & Peterson, 2005; Hui, 2023), 是对入侵物种进行风险分析工作的重要手段。通过构建物种分布模型,对已入侵我国局部地区或有潜在适生性的外来物种进行潜在地理分布分析,确定物种可能的适生范围和栖息地的适宜程度,对防范和阻截其传入、扩散和蔓延具有重要的理论意义和应用价值 (潘绪斌, 2020; 贾栋等, 2020)。当前常用的物种分布模型有最大熵 (maximum entropy, MaxEnt) 模型和生态气候 (climate and expertise, CLIMEX) 模型等 (苏梦可和高灵旺, 2022), 在林业小蠹类昆虫中也常有应用 (崔晓芾等, 2019; Urvois et al., 2021), 但是针对某一类群开展比较研究的工作还很少。本文总结归纳林业小蠹类昆虫适生性分析的研究进展,把握建立林业小蠹类昆虫分布模型的研究动向,以期为后续学者对重要经济小蠹类昆虫的进一步研究提供借鉴。

## 1 林业小蠹类昆虫在中国的适生性分析统计

本文所研究的林业小蠹类昆虫是小蠹科 Scolytidae、长蠹科 Bostrichidae 和长小蠹科 Platypodidae 昆虫的统称。运用“小蠹”“长蠹”“适生区”“预测”“bark beetle”“potential distribution”等组合作为关键词在中国知网 (<http://www.cnki.net>)、万方数据知识服务平台 (<http://wanfangdata.com.cn/index.html>) 和谷歌学术 (<https://scholar.google.com>) 等网站检索并筛选相关文献。通过对文献的整合总结,收集分析区域包含中国的文章,按照文章使用的物种分布模型进行分类。对于会议论文集只有摘要没有全文的文章,本研究未涉及。

在物种适生区研究中,较为常用且实用的模型有 MaxEnt 模型、生物气候分析系统 (bioclimate analysis system, BIOCLIM) 模型等 (张秀玲等, 2015; 潘绪斌, 2020)。本文对收集的文献基于不同物种分布模型进行归纳整理,统计了预测林业小蠹类昆虫适

生区的文献所用模型、分析区域、气候条件、适生性等级划分标准以及文献来源等信息。

### 1.1 林业小蠹类昆虫在中国的适生性分析模型类型

从目前收集的信息来看,共有 33 种 (属) 林业小蠹类昆虫使用物种分布模型进行了分析区域包含中国的潜在分布预测,其中,有 25 次预测使用 MaxEnt 模型 (表 1), 有 17 次预测使用 BIOCLIM 模型 (表 2), 有 13 次预测使用 CLIMEX 模型 (表 3), 使用 ArcView 软件、生态位因子分析 (ecological niche factor analysis, ENFA) 模型和遗传算法 (genetic algorithm for rule-set prediction, GARP) 模型进行预测的均为 1 次 (表 2)。

### 1.2 林业小蠹类昆虫在中国适生性分析模型应用现状

#### 1.2.1 MaxEnt 模型

MaxEnt 模型是基于最大熵理论的物种分布预测模型,它根据物种分布点数据及环境数据进行评价,通过计算物种在目标地区概率分布的最大熵,从而预测该物种在目标地区的潜在地理分布 (Phillips et al., 2006)。统计结果显示,共有 25 次预测利用 MaxEnt 模型对林业小蠹类昆虫进行中国境内潜在地理分布预测,包括枫香刺小蠹 *Acanthotomicus suncei* Cognato、华山松大小蠹、云杉大小蠹 *Dendroctonus micans* Erichson、中对长小蠹、红脂大小蠹、双钩异翅长蠹、长林小蠹、美雕齿小蠹 *Ips calligraphus* Germar、南部松齿小蠹、欧洲榆小蠹 *Scolytus multistriatus* (Marsham)、日本双棘长蠹 *Sinoxylon japonicum* Lesne、克里角梢小蠹 *Trypophloeus klimeschi* Eggers、对粒材小蠹 *Xyleborus perforans* (Wollaston) 和黑色枝小蠹 *Xylosandrus compactus* (Eichhoff) 共 14 种 (表 1)。在地理分布数据来源方面,许多学者选择使用全球生物多样性信息网络 (global biodiversity information facility, GBIF)、国际应用生物科学中心 (centre agriculture bioscience international, CABI) 等数据库,并结合文献和实地调查数据进行所需物种分布数据收集;对导入 MaxEnt 模型的林业小蠹类昆虫分布点数量进行统计,在已说明使用点数的预测中,有 2 次预测使用的分布点数量小于 50, 有 10 次预测使用的分布点数量在 50~200 之间,有 6 次预测使用的分布点数量在 200 以上;已对华山松大小蠹、红脂大小蠹、双钩异翅长蠹、克里角梢小蠹和黑色枝小蠹 5 种林业小蠹类昆虫开展了未来气候情景下在我国的适生区预测;有 17 次预测对建模因子进行了筛选;有 18 次预测进行了输入变量对预测害虫存在概率的相对重要性的评估;有 18 次预测对适生性等级划分标准进行了说明。

表1 MaxEnt模型输入和结果评估

Table 1 Evaluations of input and output for MaxEnt model

物种 Species	使用分布点 数量 Number of distribution points used	输入变量 评估 Evaluation of input variable	适生性等级划分标准 Grading standards of suitability	文献来源 Source of literature
枫香刺小蠹 <i>Acanthotomicus suncei</i>	11	有 Yes	自然间断点分级法 Natural breaks (Jenks)	Li et al., 2021a
华山松大小蠹 <i>Dendroctonus armandi</i>	未说明 Unstated	有 Yes	风险指数: 非适生区[0, 10], 低度适生区(10, 30], 中度适生区(30, 60], 高度适生区(60, 100] Risk index: unsuitable area [0, 10], slightly suitable area (10, 30], moderately suitable area (30, 60], highly suitable area (60, 100]	王茹琳等, 2015 Wang et al., 2015
华山松大小蠹 <i>D. armandi</i>	未说明 Unstated	有 Yes	风险指数: 非适生区[0, 10], 低适生区(10, 30], 中适生区(30, 60], 高适生区(60, 100] Risk index: unsuitable area [0, 10], slightly suitable area (10, 30], moderately suitable area (30, 60], highly suitable area (60, 100]	王茹琳等, 2016 Wang et al., 2016
华山松大小蠹 <i>D. armandi</i>	119	有 Yes	物种存在概率: 非适生区(0, 0.10), 低适生区(0.11, 0.30), 中适生区(0.31, 0.60), 高适生区(0.61, 1.00) Probability of species existence: unsuitable area (0, 0.10), slightly suitable area (0.11, 0.30), moderately suitable area (0.31, 0.60), highly suitable area (0.61, 1.00)	Ning et al., 2019; 宁航, 2021 Ning et al., 2019; Ning, 2021
华山松大小蠹 <i>D. armandi</i>	132	有 Yes	物种存在概率: 非适生区(0, 0.10), 低适生区(0.11, 0.30), 中适生区(0.31, 0.60), 高适生区(0.61, 1.00) Probability of species existence: unsuitable (0, 0.10), slightly suitable area (0.11, 0.30), moderately suitable area (0.31, 0.60), highly suitable area (0.61, 1.00)	Ning et al., 2021; 宁航, 2021 Ning et al., 2021; Ning, 2021
云杉大小蠹 <i>D. micans</i>	65	有 Yes	未说明 Unstated	肖义发等, 2020 Xiao et al., 2020
中对长小蠹 <i>Euplatypus parallelus</i>	155	有 Yes	未说明 Unstated	范靖宇等, 2019 Fan et al., 2019
红脂大小蠹 <i>D. valens</i>	未说明 Unstated	有 Yes	适宜指数: 非适生区 0, 低适生区(0.001, 0.01), 中适生区(0.01, 0.1), 高适生区(0.1, 1.0) Suitability index: unsuitable area 0, slightly suitable area (0.001, 0.01), moderately suitable area (0.01, 0.1), highly suitable area (0.1, 1.0)	樊婷婷, 2018 Fan, 2018
红脂大小蠹 <i>D. valens</i>	未说明 Unstated	有 Yes	未说明 Unstated	崔晓芑, 2018 Cui, 2018
红脂大小蠹 <i>D. valens</i>	未说明 Unstated	无 No	存在概率: 非适生区<0.05, 低适生区[0.05, 0.33], 中适生区[0.33, 0.55], 高适生区≥0.55 Existence probability: unsuitable area<0.05, slightly suitable area [0.05, 0.33], moderately suitable area [0.33, 0.55], highly suitable area ≥0.55	崔晓芑等, 2019 Cui et al., 2019
红脂大小蠹 <i>D. valens</i>	62	有 Yes	分布值: 非适生区<0.05, 低适生区[0.05, 0.33], 适宜适生区≥0.33 Distribution value: unsuitable area<0.05, slightly suitable area [0.05, 0.33], suitable area ≥0.33	韩培士等, 2020 Han et al., 2020
双钩异翅长蠹 <i>Heterobostrychus aequalis</i>	115	无 No	适生值: 非适生区<0.01, 低适生区(0.01, 0.1), 中适生区(0.1, 0.35), 高适生区>0.35 Adaptive value: unsuitable area<0.01, slightly suitable area (0.01, 0.1), moderately suitable area (0.1, 0.35), highly suitable area>0.35	刘洪霞和冯益明, 2009 Liu & Feng, 2009
双钩异翅长蠹 <i>H. aequalis</i>	未说明 Unstated	有 Yes	适宜指数: 非适生区 0, 低适生区(0.001, 0.01), 中适生区(0.01, 0.1), 高适生区(0.1, 1.0) Suitability index: unsuitable area 0, slightly suitable area (0.001, 0.01), moderately suitable area (0.01, 0.1), highly suitable area (0.1, 1.0)	樊婷婷, 2018 Fan, 2018

续表1 Continued

物种 Species	使用分布点 数量 Number of distribution points used	输入变量 评估 Evaluation of input variable	适生性等级划分标准 Grading standards of suitability	文献来源 Source of literature
长林小蠹 <i>Hylurgus ligniperda</i>	223	有 Yes	适生值: 非适生区 $\leq 0.02$ , 低适生区(0.02, 0.08], 中适生区(0.08, 0.26], 高 $>0.26$ Adaptive value: unsuitable area $\leq 0.02$ , slightly suitable area(0.02, 0.08], moderately suitable area(0.08, 0.26], highly suitable area $>0.26$	宋光远等, 2018 Song et al., 2018
长林小蠹 <i>H. ligniperda</i>	235	无 No	未说明 Unstated	Yu et al., 2019
长林小蠹 <i>H. ligniperda</i>	392	有 Yes	自然间断点分级法: 非适生区 $\leq 0.08$ , 低适生区(0.08, 0.27), 中适生区(0.27, 0.55), 高适生区 $>0.55$ Natural breaks (Jenks): unsuitable area $\leq 0.08$ , slightly suitable area(0.08, 0.27), moderately suitable area(0.27, 0.55), highly suitable area $>0.55$	周玉婷等, 2022 Zhou et al., 2022
美雕齿小蠹 <i>Ips calligraphus</i>	106	无 No	适宜值: 非适生区(0, 6.4%], 低适生区(6.4%, 17.8%], 中适生区(17.8%, 30.7%], 高适生区(30.7%, 100%] Appropriate value: unsuitable area(0, 6.4%], slightly suitable area(6.4%, 17.8%], moderately suitable area(17.8%, 30.7%], highly suitable area(30.7%, 100%]	周奕景等, 2019a Zhou et al., 2019a
美雕齿小蠹 <i>I. calligraphus</i>	251	有 Yes	自然间断点分级法 Natural breaks (Jenks)	Li et al., 2021b
南部松齿小蠹 <i>I. calligraphus</i>	597	有 Yes	自然间断点分级法 Natural breaks (Jenks)	Li et al., 2021b
欧洲榆小蠹 <i>Scolytus multistriatus</i>	166	无 No	未说明 Unstated	Yu et al., 2019
日本双棘长蠹 <i>Sinoxylon japonicum</i>	33	无 No	未说明 Unstated	朱耿平等, 2014 Zhu et al., 2014
克里角梢小蠹 <i>Trypophloeus klimeschi</i>	89	有 Yes	物种存在概率: 非适生区(0, 0.10), 低适生区[0.11, 0.30), 中适生区[0.31, 0.60), 高适生区[0.61, 1.00) Probability of species existence: unsuitable area(0, 0.10), slightly suitable area[0.11, 0.30), moderately suitable area[0.31, 0.60), highly suitable area[0.61, 1.00)	宁航, 2021 Ning, 2021
对粒材小蠹 <i>Xyleborus perforans</i>	未说明 Unstated	有 Yes	自然间断点分级法: 非适生区 $<0.07$ , 低适生区[0.07, 0.22), 中适生区[0.22, 0.42), 高适生区[0.42, 0.66), 最佳适生区 $\geq 0.66$ Natural breaks (Jenks): unsuitable area $<0.07$ , slightly suitable area[0.07, 0.22), moderately suitable area[0.22, 0.42), highly suitable area[0.42, 0.66), the best suitable area $\geq 0.66$	卢辉等, 2013 Lu et al., 2013
黑色枝小蠹 <i>Xylosandrus compactus</i>	205	无 No	未说明 Unstated	Urvois et al., 2021
黑色枝小蠹 <i>Xylosandrus compactus</i>	170	有 Yes	自然间断点分级法 Natural breaks (Jenks)	孙雪婷, 2023 Sun, 2023

### 1.2.2 BIOCLIM 模型

BIOCLIM 模型是通过已有的物种分布数据及环境数据生成生物气候包络, 将所研究地区与当前分布地区的生物气候包络的变量进行比较, 从而判断该区域是否适合物种生存的一种框架生态位模型(邵慧等, 2009)。统计结果显示, 共有 17 次预测利用 BIOCLIM 模型对林业小蠹类昆虫进行中国境内

潜在地理分布预测, 包括华山松大小蠹、中欧山松大小蠹 *Dendroctonus ponderosae* Hopkins、缝锤小蠹 *Gnathotrichus materiarius* (Fitch)、长林小蠹、美雕齿小蠹、粗点六齿小蠹 *Ips concinnus* Mannerheim、南部松齿小蠹、美松齿小蠹、云杉八齿小蠹、短毛切梢小蠹 *Tomicus brevipilosus* (Eggers)、横坑切梢小蠹 *Tomicus minor* (Hartig)、云南切梢小蠹 *Tomicus*

*yunnanensis* Kirkendall et Faccoli、赤材小蠹 13 种和切梢小蠹属 1 个属(表 2)。在地理分布数据来源方面,许多学者选择使用 GBIF、CABI 等数据库,并结合文献和实地调查数据进行所需物种分布数据收集;对导入 BIOCLIM 模型的林业小蠹类昆虫分布点数量进行统计,有 5 次预测对此进行了说明,其中,

有 1 次预测使用分布点数量在 50~100 之间,有 4 次预测使用分布点数量在 101~200 之间;有 13 次预测对建模因子进行了筛选,大部分文献使用的筛选方法是主成分分析结合物种的生物学特性;共有 12 次预测对适生性等级划分标准进行了说明。

表 2 BIOCLIM、ENFA、GARP、ArcView 模型输入和结果评估

Table 2 Evaluations of input and output for BIOCLIM, ENFA, GARP and ArcView models

物种 Species	物种分布模型 Species distribution model	使用分布点数量 Number of distribution points used	输入变量评估 Evaluation of input variable	适生性等级划分标准 Grading standards of suitability	文献来源 Source of literature
华山松大小蠹 <i>Dendroctonus armandi</i>	BIOCLIM	119	无 No	发生概率:非适生区 0,低适生区(0,2.5%],中适生区(2.5%,7%],高适生区(7%,100%] Occurrence probability: unsuitable area 0, slightly suitable area (0, 2.5%), moderately suitable area (2.5%, 7%), highly suitable area (7%, 100%)	Ning et al., 2019; 宁航,2021 Ning et al., 2019; 2021
华山松大小蠹 <i>D. armandi</i>	ENFA	119	有 Yes	适生性指数:非适生区(0,10),低适生区(11,30),中适生区(31,60),高适生区(61,100) Habitat suitability index: unsuitable area (0,10), slightly suitable area (11, 30), moderately suitable area (31, 60), highly suitable area (61, 100)	Ning et al., 2019; 宁航,2021 Ning et al., 2019; 2021
中欧山松大小蠹 <i>D. ponderosae</i>	BIOCLIM	未说明 Unstated	无 No	未说明 Unstated	杜宇等,2011 Du et al., 2011
红脂大小蠹 <i>D. valens</i>	ArcView 3.2	未说明 Unstated	无 No	无 No	王鸿斌,2005;王鸿斌等,2007 Wang, 2005; Wang et al., 2007
缝锤小蠹 <i>Gnathotrichus materiarius</i>	BIOCLIM	148	无 No	发生概率:非适生区 0,低适生区(0,2.5%],中适生区(2.5%,5%],高适生区(5%,100%] Occurrence probability: unsuitable area 0, slightly suitable area (0, 2.5%), moderately suitable area (2.5%, 5%), highly suitable area (5%, 100%)	周奕景等,2018 Zhou et al., 2018
长林小蠹 <i>Hylurgus ligniperda</i>	BIOCLIM	未说明 Unstated	无 No	适宜发生概率:非适生区 0,低适生区(0,5%],中适生区(5%,10%],高适生区(10%,100%] Appropriate probability of occurrence: unsuitable area 0, slightly suitable area (0, 5%), moderately suitable area (5%, 10%), highly suitable area (10%, 100%)	赵光明,2018 Zhao, 2018
美雕齿小蠹 <i>Ips calligraphus</i>	BIOCLIM	未说明 Unstated	无 No	发生概率:非适生区 0,低适生区(0,5%],中适生区(5%,10%],高适生区(10%,100%] Occurrence probability: unsuitable area 0, slightly suitable area (0, 5%), moderately suitable area (5%, 10%), highly suitable area (10%, 100%)	吕飞,2017 Lü, 2017
美雕齿小蠹 <i>I. calligraphus</i>	BIOCLIM	106	无 No	适宜值:非适生区 0,低适生区(0,2.5%],中适生区(2.5%,5%],高适生区(5%,100%] Appropriate value: unsuitable area 0, slightly suitable area (0, 2.5%), moderately suitable area (2.5%, 5%), highly suitable area (5%, 100%)	周奕景等,2019a Zhou et al., 2019a

续表2 Continued

物种 Species	物种分布模型 Species distribution model	使用分布点数量 Number of distribution points used	输入变量评估 Evaluation of input variable	适生性等级划分标准 Grading standards of suitability	文献来源 Source of literature
粗点六齿小蠹 <i>I. concinnus</i>	BIOCLIM	未说明 Unstated	无 No	发生概率:非适生区0,低适生区(0,5%],中适生区(5%,10%],高适生区(10%,100%] Occurrence probability: unsuitable area 0, slightly suitable area (0, 5%], moderately suitable area (5%, 10%], highly suitable area (10%, 100%]	吕飞, 2017 Lü, 2017
南部松齿小蠹 <i>I. grandicollis</i>	BIOCLIM	未说明 Unstated	无 No	发生概率:非适生区0,低适生区(0,5%],中适生区(5%,10%],高适生区(10%,100%] Occurrence probability: unsuitable area 0, slightly suitable area (0, 5%], moderately suitable area (5%, 10%], highly suitable area (10%, 100%]	吕飞等,2017 Lü et al., 2017
南部松齿小蠹 <i>I. grandicollis</i>	BIOCLIM	未说明 Unstated	无 No	发生概率:非适生区0,低适生区(0,5%],中适生区(5%,10%],高适生区(10%,100%] Occurrence probability: unsuitable area 0, slightly suitable area (0, 5%], moderately suitable area (5%, 10%], highly suitable area (10%, 100%]	吕飞, 2017 Lü, 2017
美松齿小蠹 <i>I. pini</i>	BIOCLIM	88	无 No	发生概率:非适生区0,低适生区(0,2.5%],中适生区(2.5%,7%],高适生区(7%,100%] Occurrence probability: unsuitable area 0, slightly suitable area (0, 2.5%], moderately suitable area (2.5%, 7%], highly suitable area (7%, 100%]	周奕景等,2016 Zhou et al., 2016
美松齿小蠹 <i>I. pini</i>	BIOCLIM	未说明 Unstated	无 No	发生概率:非适生区0,低适生区(0,5%],中适生区(5%,10%],高适生区(10%,100%] Occurrence probability: unsuitable area 0, slightly suitable area (0, 5%], moderately suitable area (5%, 10%], highly suitable area (10%,100%]	吕飞,2017 Lü, 2017
云杉八齿小蠹 <i>I. typographus</i>	BIOCLIM	未说明 Unstated	无 No	发生概率:非适生区0,低适生区(0,5%],中适生区(5%,10%],高适生区(10%,100%] Occurrence probability: unsuitable area 0, slightly suitable area (0, 5%], moderately suitable area (5%, 10%], highly suitable area (10%, 100%]	吕飞,2017 Lü, 2017
日本双棘长蠹 <i>Sinoxylon japonicum</i>	GARP	33	无 No	未说明 Unstated	朱耿平等,2014 Zhu et al., 2014
切梢小蠹属 <i>Tomicus</i> sp.	BIOCLIM	未说明 Unstated	无 No	未说明 Unstated	王鸿斌等,2009 Wang et al., 2009
短毛切梢小蠹 <i>T. brevipilosus</i>	BIOCLIM	未说明 Unstated	无 No	未说明 Unstated	王鸿斌等,2009 Wang et al., 2009
横坑切梢小蠹 <i>T. minor</i>	BIOCLIM	未说明 Unstated	无 No	未说明 Unstated	王鸿斌等,2009 Wang et al., 2009
云南切梢小蠹 <i>T. yunnanensis</i>	BIOCLIM	未说明 Unstated	无 No	未说明 Unstated	王鸿斌等,2009 Wang et al., 2009
赤材小蠹 <i>Xyleborus ferrugineus</i>	BIOCLIM	158	无 No	发生概率:非适生区0,低适生区(0,2.5%],中适生区(2.5%,5%],高适生区(5%,100%] Occurrence probability: unsuitable 0, slightly suitable area (0, 2.5%], moderately suitable area (2.5%, 5%], highly suitable area (5%, 100%]	周奕景等, 2019b Zhou et al., 2019b

表3 CLIMEX模型输入和结果评估

Table 3 Input and result evaluations of CLIMEX model

物种 Species	生物学参数值的来源 Sources of biological parameter values	适生性等级划分标准 Grading standard of suitability	文献来源 Source of literature
南部松大小蠹 <i>Dendroctonus frontalis</i>	利用生物学相关数据并结合实际分布地区进行调整 Used biological data and adjusted the data based on actual distribution regions	生态气候参数(ecoclimatic index, EI): 非适生区 $EI=0$ , 低适生区(0, 10], 中适生区(10, 20], 高适生区(20, 100] Ecoclimatic index (EI) value: unsuitable area $EI=0$ , slightly suitable area (0, 10], moderately suitable area (10, 20], highly suitable area (20, 100]	姚剑等, 2011 Yao et al., 2011
红脂大小蠹 <i>Dendroctonus valens</i>	利用生物学相关数据并结合实际分布地区进行调整 Used biological data and adjusted the data based on actual distribution regions	EI值 EI value	刘海军, 2003 Liu, 2003
红脂大小蠹 <i>D. valens</i>	利用生物学相关数据并结合实际分布地区进行调整 Used biological data and adjusted the data based on actual distribution regions	EI值: 非适生区[0, 1), 低适生区[1, 9), 中适生区[9, 30), 高适生区[30, 100] EI value: unsuitable area [0, 1), slightly suitable area [1, 9), moderately suitable area [9, 30), highly suitable area [30, 100]	He et al., 2015
红脂大小蠹 <i>D. valens</i>	引用其他学者的参数 Quoted parameters from other scholars	EI值: 非适生区[0, 1), 低适生区[1, 9), 中适生区[9, 30), 高适生区[30, 100] EI value: unsuitable area [0, 1), slightly suitable area [1, 9), moderately suitable area [9, 30), highly suitable area [30, 100]	王涛等, 2018 Wang et al., 2018
中欧山松大小蠹 <i>D. ponderosae</i>	利用生物学相关数据并结合实际分布地区进行调整 Used biological data and adjusted the data based on actual distribution regions	EI值: 非适生区 $EI=0$ , 低适生区(0, 10], 中适生区(10, 20], 高适生区[20, 100] EI value: unsuitable area $EI=0$ , slightly suitable area (0, 10], moderately suitable area (10, 20], highly suitable area [20, 100]	Zhou et al., 2019
落叶松大小蠹 <i>D. simplex</i>	无 No	气候相似系数和寄主分布点值的乘积: 非适生区(0, 7), 低适生区(7, 20), 中适生区(20, 40), 高适生区(40, 100) The product of climate similarity coefficient and host distribution point values: unsuitable area (0, 7), slightly suitable area (7, 20), moderately suitable area (20, 40), highly suitable area (40, 100)	王齐等, 2010 Wang et al., 2010
黑脂大小蠹 <i>D. terebrans</i>	无 No	气候总相似性系数: 非适生区 $<0.3$ , 低适生区(0.3, 0.6), 中适生区(0.6, 0.8), 高适生区 $>0.8$ Total similarity coefficient of climate: unsuitable area $<0.3$ , slightly suitable area (0.3, 0.6), moderately suitable area (0.6, 0.8), highly suitable area $>0.8$	向红等, 2012 Xiang et al., 2012
印度小圆胸小蠹 <i>Euwallacea fornicatus</i>	利用生物学相关数据并结合实际分布地区进行调整 Used biological data and adjusted the data based on actual distribution regions	EI值: 非适生区 $EI=0$ , 低适生区(0, 10], 中适生区(10, 20], 高适生区(20, 100] EI value: unsuitable area $EI=0$ , slightly suitable area (0, 10], moderately suitable area (10, 20], highly suitable area (20, 100]	Ge et al., 2017
天山重齿小蠹 <i>Ips hauseri</i>	利用生物学相关数据并结合实际分布地区进行调整 Used biological data and adjusted the data based on actual distribution regions	EI值 EI value	Vanhanen et al., 2008
落叶松八齿小蠹 <i>I. subelongatus</i>	利用生物学相关数据并结合实际分布地区进行调整 Used biological data and adjusted the data based on actual distribution regions	EI值 EI value	Vanhanen et al., 2008
落叶松小蠹 <i>Scolytus morawitzi</i>	利用生物学相关数据并结合实际分布地区进行调整 Used biological data and adjusted the data based on actual distribution regions	EI值 EI value	Vanhanen et al., 2008

续表3 Continued

物种 Species	生物学参数值的来源 Sources of biological parameter values	适生性等级划分标准 Grading standard of suitability	文献来源 Source of literature
家条木小蠹 <i>Trypodendron domesticum</i>	利用生物学相关数据并结合实际分布地区进行调整 Used biological data and adjusted the data based on actual distribution regions	EI值:非适生区 EI=0,低适生区(0,6),中适生区[6,16),高适生区[16,100] EI value: unsuitable area EI=0, slightly suitable area (0, 6), moderately suitable area [6, 16), highly suitable area [16, 100]	林晓佳等, 2012 Lin et al., 2012
家条木小蠹 <i>T. domesticum</i>	参考其他学者模型参数并进行调整 Refer to other scholars' model parameters and make adjustments	EI值:非适生区[0,5),低适生区[5,10),中适生区[10,30),高适生区[30,100] EI value: unsuitable area [0, 5), slightly suitable area [5, 10), moderately suitable area [10, 30), highly suitable area [30, 100]	林雯等, 2017 Lin et al., 2017

### 1.2.3 CLIMEX 模型

CLIMEX 模型是利用物种在已知地理分布区域的气候条件或生物学相关数据,预测物种潜在地理分布的一个动态模拟模型(Sutherst et al., 2007)。统计结果显示,共有 13 次预测利用 CLIMEX 模型对林业小蠹类昆虫进行中国境内潜在地理分布预测,包括南部松大小蠹 *Dendroctonus frontalis* Zimmerman、红脂大小蠹、中欧山松大小蠹、落叶松大小蠹 *Dendroctonus simplex* LeConte、黑脂大小蠹 *Dendroctonus terebrans* (Olivier)、印度小圆胸小蠹 *Eucallipterus fornicatus* (Eichhoff)、天山重齿小蠹 *Ips hauseri* Reitter、落叶松八齿小蠹、落叶松小蠹 *Scolytus morawitzi* Semenov 和家条木小蠹 *Trypodendron domesticum* (Linnaeus) 共 10 种,且均为小蠹科昆虫(表 3)。在气候数据来源方面,有 12 次预测对此进行了说明;对模型内使用生物学参数值的来源进行统计,王齐等(2010)和向红等(2012)由于目标昆虫的生物学特性研究资料较少,故利用 CLIMEX 模型的气候相似系数法进行预测,有 9 次预测利用目标昆虫的生物学相关数据进行参数设定,并结合该虫实际分布地区进行参数调整,1 次预测引用其他学者的参数,1 次预测参考其他学者的参数并进行调整;13 次预测均对适生性等级划分标准进行了说明,其中 11 次预测运行结果根据生态气候参数划分适生性等级。

### 1.2.4 其他模型

ENFA 模型是利用物种分布数据和生态地理变量,将物种的生态位和生态幅度与整个研究区域的环境因子平均状态和标准差相比较,进而计算物种的适生性(沈鹏和李功权, 2021)。在本次统计中,有 1 次预测利用了 ENFA 模型对华山松大小蠹在中国的潜在分布进行了研究(表 2)。

GARP 模型基于规则遗传算法,自动检索与物种分布有关的环境因子并映射到目标区域,分析物种已

知分布地区的环境特征与目标区域环境的非随机关系(孙颖等, 2015)。仅见朱耿平等(2014)利用 GARP 模型预测了日本双棘长蠹在中国的潜在地理分布(表 2)。

王鸿斌(2005)和王鸿斌等(2007)根据历史气候资料分析了红脂大小蠹发生区内相关站点的气候相似性的主要作用因子的取值范围,使用 ArcView 3.2 软件制作各个因子相似条件的分布图,最后将不同因子叠加得到红脂大小蠹的气候适生区(表 2)。

## 2 适生性分析工作现存问题

物种分布模型的效果依赖于输入数据的数量和质量。用于建立预测模型使用的物种分布数据样本数量极大地影响着模型模拟结果的准确度(Stockwell & Peterson, 2002)。一般情况下,随着样本数量的增加,模型预测效果不断改善,在达到某一阈值后预测效果改变幅度逐渐减小或消失(Wisz et al., 2008; Chen & Lei, 2012; 杨会枫, 2016)。不同的预测软件或同一软件对不同物种的预测,其样本数量的最优阈值也不相同,例如对 BIOCLIM 模型来说, Hernandez et al. (2006) 和邵慧等(2009)研究发现使用 75~100 个样本数量的模拟结果准确度趋于最大,而 Kadmon et al. (2003) 研究发现,在样本数量为 50~75 时,模拟结果准确度足以达到最大值。而使用较大样本数量对预测模型的影响尚不能确定,使用过大的样本数量可能不会提高模型的准确性,甚至可能对模型性能产生负面影响(Stockwell & Peterson, 2002; VanDerWal et al., 2009; Boria & Blois, 2018)。所以今后需要学者继续研究不同预测模型的样本数量需求规律,有助于科研工作者在今后的适生性分析中可以合理筛选物种分布数据控制输入模型的样本数量,从而尽可能达到准确度更高的潜在地理分布预测效果。在收集物种分布点过程中,尤其是利用具有多个来源的大型数据库收集分布点时,容易



遇到分布点不准确的情况,例如物种识别错误、地点记录错误等,且记录数据也易集中在容易采样的地点,如靠近道路的地区和城市地区(Hui, 2023),这就要求学者必须进行数据矫正以及适当的抽样工作,以免影响预测的结果。在物种分布点的选择方面,有些学者认为,应该使用物种原生范围的记录来预测物种潜在分布的范围(Guisan et al., 2014; Hui, 2023)。

模型的评估和验证对于模型的使用非常重要。在评估MaxEnt、BIOCLIM等模型的预测精度时,常用的方法有受试者工作特征(receiver operator characteristic, ROC)曲线下面积(area under the curve, AUC)和真实技巧统计(true skill statistic, TSS)法,有学者提倡建模者将多个评估指标结合分析(Lake et al., 2020)。Urvois et al.(2021)在建立模型预测暗翅足距小蠹 *Xylosandrus crassiusculus* Motschulsky 的潜在地理分布时,使用ROC的AUC值和TSS法来评估MaxEnt模型的预测精度,作者在第一步测试环境数据集的训练模型阶段,建模结果均没有符合AUC<0.8或TSS<0.6的评估标准,故没有进行接下来的生态位建模工作。当前,物种分布模型“生态位-环境均衡”的前提与“非均衡的入侵动力学”依旧存在着一定冲突,这需要学者深入了解入侵物种的生物学和生态学知识,构建出一个“动态”版本的物种分布模型(Hui, 2023),在评估此类模型时,可以对预测范围是否合适进行评价,即在动态观测时能否成功验证预测结果,也可以通过类似本文的汇总来评估,进而验证生态位保守性假说是否合理。

对同一物种的不同适生性预测结果应该加强比较研究。通过对同一种小蠹类昆虫,不同学者对其进行的适生区预测结果对比来看,发现存在些许差异,这可能是由于:(1)不同文献使用的昆虫地理分布数据差异;(2)不同文献输入的环境变量不同或使用的气候数据集不同;(3)预测模型自身的局限性,在构建过程中不同预测模型所基于的生态学理论和前提假设不同;(4)同一种预测模型在使用过程中参数设置不同。以上造成同一物种预测结果不同的原因也是学者今后在进行适生性分析时需要谨慎对待的地方。模型的运行需要大量的基础数据,一些学者在使用CLIMEX模型进行地理分布预测研究时,遇到了昆虫生物学参数缺失的情况,这在一定程度上影响了预测结果的可靠性,这就需要昆虫原产国尽早开展相关的生物学试验,我国在口岸截获时也开展相关工作以填补信息空白,有助于进一步进行风险评估工作。

### 3 展望

值得学者关注的重要经济小蠹类昆虫还有很多,不仅仅是口岸经常截获的检疫性种类,定殖扩散风险较高的非检疫性类群也值得进一步研究(Yu et al., 2019),目前开展了适生性分析的小蠹类昆虫还只是一部分。为了防止变量之间的多重共线性影响预测结果(Graham, 2003),建议学者在今后的适生性分析工作中进行相关性分析筛选环境变量,并补充与完善前期没有开展变量相关性分析的小蠹类昆虫适生性分析工作。未来应加强集合模型及机器学习算法在适生性分析领域的应用,例如利用基于R软件的biomod2平台,以多种生态位模型为基础构建集合模型,以期通过集合模型来提高预测的准确性(Hao et al., 2019),也可尝试不断推出的新的算法模型(Carlson, 2020),并根据物种的实际发生区对预测进行验证,以期找到更优质的方法预测小蠹类昆虫在我国的适生区域。

### 参考文献 (References)

- Boria RA, Blois JL. 2018. The effect of large sample sizes on ecological niche models: analysis using a North American rodent, *Peromyscus maniculatus*. *Ecological Modelling*, 386: 83–88
- Carlson CJ. 2020. Embarcadero: species distribution modelling with Bayesian additive regression trees in R. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(7): 850–858
- Chen XM, Lei YC. 2012. Effects of sample size on accuracy and stability of species distribution models: a comparison of GARP and Maxent.//Qian Z, Cao L, Su W, Wang T, Yang H. Recent advances in computer science and information engineering. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 601–609
- Cui XP. 2018. Potential geographical distribution and genetic diversity of *Dendroctonus valens* in China. Master thesis. Beijing: Beijing Forestry University (in Chinese) [崔晓芃. 2018. 中国地区红脂大小蠹适生区及遗传多样性研究. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学]
- Cui XP, Shi J, Wang HX, Liu YH, Yu H. 2019. Predicting potential geographical distribution of red turpentine beetle *Dendroctonus valens* in China based on MaxEnt model. *Journal of Plant Protection*, 46(4): 925–926 (in Chinese) [崔晓芃, 石娟, 王海香, 刘永华, 余昊. 2019. 基于MaxEnt模型的红脂大小蠹在中国适生区的预测. 植物保护学报, 46(4): 925–926]
- Du Y, Yao J, Li SG, Ma P, Jiang XL. 2011. A suitability analysis of *Dendroctonus ponderosae* in China. *Plant Protection*, 37(1): 96–98, 109 (in Chinese) [杜宇, 姚剑, 李生贵, 马平, 蒋小龙. 2011. 中欧山松大小蠹在中国的适生性分析. 植物保护, 37(1): 96–98, 109]
- Fan JY, Wu G, Zhu GP, Cai B. 2019. Potential geographic distributions of the quarantine pest *Platypus parallelus* (Coleoptera: Platypodiidae) in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 55(6): 81–85 (in Chinese) [范靖宇, 吴翥, 朱耿平, 蔡波. 2019. 检疫性害虫中对长小蠹在中国的

- 适生区. 林业科学, 55(6): 81–85]
- Fan TT. 2018. Prediction of the potential suitable geographic distribution of seven Chinese forestry quarantine pests. Master thesis. Tai'an: Shandong Agricultural University (in Chinese) [樊婷婷. 2018. 7种中国林业检疫性害虫的适生区预测. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学]
- Ge XZ, Jiang C, Chen LH, Qiu S, Zhao YX, Wang T, Zong SX. 2017. Predicting the potential distribution in China of *Euwallacea fornicates* (Eichhoff) under current and future climate conditions. Scientific Reports, 7(1): 906
- Gomez DF, Rabaglia RJ, Fairbanks KEO, Hulcr J. 2018. North American Xyleborini north of Mexico: a review and key to genera and species (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae). ZooKeys, 768: 19–68
- Graham MH. 2003. Confronting multicollinearity in ecological multiple regression. Ecology, 84(11): 2809–2815
- Guisan A, Petitpierre B, Broennimann O, Daehler C, Kueffer C. 2014. Unifying niche shift studies: insights from biological invasions. Trends in Ecology & Evolution, 29(5): 260–269
- Han PS, Niu CH, Yuan XQ, Li YX, Liu XL. 2020. Potential distribution of *Dendroctonus valens* in northern Shaanxi based on maximum entropy model. Guizhou Agricultural Sciences, 48(6): 50–53 (in Chinese) [韩培士, 牛常会, 袁晓青, 李宇轩, 刘晓莉. 2020. 基于最大熵模型的红脂大小蠹在陕西北部地区的潜在分布. 贵州农业科学, 48(6): 50–53]
- Hao TX, Elith J, Guillera-Arroita G, Lahoz-Monfort JJ. 2019. A review of evidence about use and performance of species distribution modelling ensembles like BIOMOD. Diversity and Distributions, 25(5): 839–852
- He JY, Chen K, Pan XB, Yan J, Li WM. 2019. Analysis of plant pest interception at China's ports of entry during 2016–2017. Plant Quarantine, 33(6): 34–37 (in Chinese) [何佳遥, 陈克, 潘绪斌, 严进, 李尉民. 2019. 2016—2017年中国进境植物疫情截获情况分析. 植物检疫, 33(6): 34–37]
- He SY, Ge XZ, Wang T, Wen JB, Zong SX. 2015. Areas of potential suitability and survival of *Dendroctonus valens* in China under extreme climate warming scenario. Bulletin of Entomological Research, 105(4): 477–484
- Hernandez PA, Graham CH, Master LL, Albert DL. 2006. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. Ecography, 29(5): 773–785
- Hui C. 2023. The dos and don'ts for predicting invasion dynamics with species distribution models. Biological Invasions, 25(4): 947–953
- Jia D, Xu CQ, Liu YH, Hu J, Li N, Ma RY. 2020. Potential distribution prediction of apple-grass aphid *Rhopalosiphum oxyacanthae* in China based on MaxEnt model. Journal of Plant Protection, 47(3): 528–536 (in Chinese) [贾栋, 徐朝茜, 刘艳红, 胡军, 李娜, 马瑞燕. 2020. 基于MaxEnt模型预测苹果红缢管蚜在中国的适生区. 植物保护学报, 47(3): 528–536]
- Kadmon R, Farber O, Danin A. 2003. A systematic analysis of factors affecting the performance of climatic envelope models. Ecological Applications, 13(3): 853–867
- Lake TA, Runquist RDB, Moeller DA. 2020. Predicting range expansion of invasive species: pitfalls and best practices for obtaining biologically realistic projections. Diversity and Distributions, 26(12): 1767–1779
- Li ML. 2010. General forest entomology. Beijing: China Forestry Publishing House (in Chinese) [李孟楼. 2010. 森林昆虫学通论. 北京: 中国林业出版社]
- Li Y, Johnson AJ, Gao L, Wu CX, Hulcr J. 2021b. Two new invasive Ips bark beetles (Coleoptera: Curculionidae) in mainland China and their potential distribution in Asia. Pest Management Science, 77(9): 4000–4008
- Li Y, Wan YX, Lin W, Ernstsons AS, Gao L. 2021a. Estimating potential distribution of sweetgum pest *Acanthotomicus suncei* and potential economic losses in nursery stock and urban areas in China. Insects, 12(2): 155
- Lin W, Zheng JC, Huang ZH, Jiang LL, Xu RM. 2017. Prediction and risk assessment of suitable growth area of *Tomicus piniperda* in Fujian Province. South China Agriculture, 11(2): 89, 93 (in Chinese) [林雯, 郑俊超, 黄智辉, 江鑫鑫, 徐汝梅. 2017. 家木小蠹在福建省的适生区预测及风险评估. 南方农业, 11(2): 89, 93]
- Lin XJ, Wu R, Wu Y, Chen WJ, Zhang MZ, Chen YW, Chen X. 2012. CLIMEX based prediction on potential distribution of *Trypodendron domesticum* in China and its risk analysis. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 32(6): 68–72 (in Chinese) [林晓佳, 吴蓉, 武扬, 陈吴健, 张明哲, 陈友吾, 陈曦. 2012. 家木小蠹在中国潜在适生区的CLIMEX预测及风险分析. 西南林业大学学报(自然科学), 32(6): 68–72]
- Liu GS, Wang JH, Han HJ, Wang JP. 2003. Occurrence and control of *Dendroctonus valens*. Plant Protection, 29(1): 58–59 (in Chinese) [刘光生, 王俊华, 韩惠娟, 王建平. 2003. 红脂大小蠹发生危害及其防治. 植物保护, 29(1): 58–59]
- Liu HJ. 2003. Pest risk analysis on serious non-indigenous pests to Beijing area. Master thesis. Beijing: Beijing Forestry University (in Chinese) [刘海军. 2003. 北京地区林木外来重大有害生物风险分析. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学]
- Liu HX, Feng YM. 2009. Potential suitability analysis of *Heterobostrychus aequalis* in China. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science), 26(1): 24–28 (in Chinese) [刘洪霞, 冯益明. 2009. 双钩异翅长蠹在我国潜在的适生性分析. 青岛农业大学学报(自然科学版), 26(1): 24–28]
- Liu WQ, Yuan SZ, Zhang JQ, Wang C, Shao S, Zhu SF, Pan XB. 2016. Analysis of the epidemic situation and suggestions on relevant work of imported logs in China during 2005–2015. Plant Quarantine, 30(5): 63–68 (in Chinese) [刘玮琦, 袁淑珍, 张静秋, 王聪, 邵思, 朱水芳, 潘绪斌. 2016. 2005—2015年我国进口原木截获疫情分析及工作建议. 植物检疫, 30(5): 63–68]
- Lü F. 2017. Research of complete mitochondrial genome of 3 *Ips* and risk analysis of invasive species of *Ips*. PhD thesis. Yangzhou: Yangzhou University (in Chinese) [吕飞. 2017. 三种齿小蠹线粒体全基因组及外来齿小蠹入侵我国风险分析. 博士学位论文. 扬州: 扬州大学]
- Lü F, Wang J, Zhou YJ, Yang WY, Li ZH, Xu Q, Du YZ. 2017. Predicted suitable habitat for the quarantine forest pest *Ips grandicollis* (Eichhoff). Chinese Journal of Applied Entomology, 54(6): 1023–1030 (in Chinese) [吕飞, 王洁, 周奕景, 杨文晏, 李志红, 许强, 杜

- 予州. 2017. 检疫性林木害虫南部松齿小蠹适生区分析. 应用昆虫学报, 54(6): 1023-1030]
- Lu H, Zhong YH, Xu XL, Lu FP, Xie GS, Chen Q. 2013. The potential geographic distribution of *Xyleborus perforans* based on the Max-Ent. Chinese Journal of Tropical Crops, 34(11): 2239-2245 (in Chinese) [卢辉, 钟义海, 徐雪莲, 卢芙蓉, 谢贵水, 陈青. 2013. 基于MaxEnt模型的对粒材小蠹的适生性分析. 热带作物学报, 34(11): 2239-2245]
- Marini L, Haack RA, Rabaglia RJ, Toffolo EP, Battisti A, Faccoli M. 2011. Exploring associations between international trade and environmental factors with establishment patterns of exotic Scolytinae. Biological Invasions, 13(10): 2275-2288
- Ning H. 2021. Impacts of climate change on the suitable distribution of *Dendroctonus armandi*, *Trypophloeus klimeschi* and their host in China. PhD thesis. Yangling: Northwest A&F University (in Chinese) [宁航. 2021. 气候变化对华山松大小蠹和克里角梢小蠹及寄主在中国适生分布的影响. 博士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学]
- Ning H, Dai LL, Fu DY, Liu B, Wang HL, Chen H. 2019. Factors influencing the geographical distribution of *Dendroctonus armandi* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytidae) in China. Forests, 10(5): 425
- Ning H, Tang M, Chen H. 2021. Impact of climate change on potential distribution of Chinese white pine beetle *Dendroctonus armandi* in China. Forests, 12(5): 544
- Pan XB. 2020. Pest risk analysis. Beijing: Science Press (in Chinese) [潘绪斌. 2020. 有害生物风险分析. 北京: 科学出版社]
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 190(3/4): 231-259
- Ren LL, Tao J, Wu HW, Zong SX, Wang CZ, Hua D, Shi J, Liu YZ, Luo YQ. 2021. The first discovery and infective characteristics of a major invasive pest *Hylurgus ligniperda* (Coleoptera: Scolytidae) in China. Scientia Silvae Sinicae, 57(5): 140-150 (in Chinese) [任利利, 陶静, 武海卫, 宗世祥, 王传珍, 华德, 石娟, 刘漪舟, 骆有庆. 2021. 重大害虫长林小蠹入侵我国的首次发现与侵染特征. 林业科学, 57(5): 140-150]
- Shao H, Tian JQ, Guo K, Sun JX. 2009. Effects of sample size and species traits on performance of bioclim in predicting geographical distribution of tree species: a case study with 12 deciduous *Quercus* species indigenous to China. Chinese Journal of Plant Ecology, 33(5): 870-877 (in Chinese) [邵慧, 田佳倩, 郭柯, 孙建新. 2009. 样本容量和物种特征对BIOLIM模型模拟物种分布准确度的影响: 以12个中国特有落叶栎树种为例. 植物生态学报, 33(5): 870-877]
- Shen P, Li GQ. 2021. Risk assessment of *Bursaphelenchus xylophilus* in Hubei Province based on ecological niche factor analysis model. Journal of Zhejiang A&F University, 38(3): 560-566 (in Chinese) [沈鹏, 李功权. 2021. 基于生态位因子模型的湖北省松材线虫病风险评估. 浙江农林大学学报, 38(3): 560-566]
- Soberon J, Peterson AT. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. Biodiversity Informatics, 2: 1-10
- Song GY, Zhang JH, Yang D, Chen NZ. 2018. Potential geographical distributions of *Hylurgus ligniperda* (Coleoptera: Scolytinae) in China. Plant Quarantine, 32(5): 66-70 (in Chinese) [宋光远, 张俊华, 杨定, 陈乃中. 2018. 长林小蠹在中国的适生区预测. 植物检疫, 32(5): 66-70]
- Song YD, Ding ZW, Wang C, Pan XB, Cao CW. 2022. List and analysis of forestry invasive alien insects in China. Plant Quarantine, 36(5): 1-12 (in Chinese) [宋昱东, 丁子玮, 王聪, 潘绪斌, 曹传旺. 2022. 中国林业外来入侵昆虫名录及分析. 植物检疫, 36(5): 1-12]
- Stockwell DRB, Peterson AT. 2002. Effects of sample size on accuracy of species distribution models. Ecological Modelling, 148(1): 1-13
- Su MK, Gao LW. 2022. Progress on big data acquisition and predictive analysis methods for invasive alien species. Plant Protection, 48(6): 214-220 (in Chinese) [苏梦可, 高灵旺. 2022. 外来入侵物种的大数据获取及预测分析方法研究进展. 植物保护, 48(6): 214-220]
- Sun XT. 2023. Prediction of global potential suitable area of the black twig borer, *Xylosandrus compactus* (Coleoptera: Scolytinae) under future climate change scenarios of CMIP6. Acta Entomologica Sinica, 66(3): 369-380 (in Chinese) [孙雪婷. 2023. CMIP6气候变化情景下黑色枝小蠹全球潜在适生区分布预测. 昆虫学报, 66(3): 369-380]
- Sun Y, Zhou GL, Jedryczka M, Chen Y, Yi JP. 2015. Assessment of potential establishment of fungus *Leptosphaeria maculans* in China. Journal of Plant Protection, 42(4): 523-530 (in Chinese) [孙颖, 周国梁, Jedryczka M, 陈艳, 易建平. 2015. 油菜茎基溃疡病菌在中国定殖的可能性评估. 植物保护学报, 42(4): 523-530]
- Sutherst RW, Maywald GF, Kriticos D. 2007. CLIMEX user's guide. Version 3. 0. Melbourne: Hearne Scientific Software Pty Ltd
- Urvois T, Auger-Rozenberg MA, Roques A, Rossi JP, Kerdelhue C. 2021. Climate change impact on the potential geographical distribution of two invading *Xylosandrus ambrosia* beetles. Scientific Reports, 11(1): 1339
- VanDerWal J, Shoo LP, Graham C, Williams SE. 2009. Selecting pseudo-absence data for presence-only distribution modeling: how far should you stray from what you know? Ecological Modelling, 220(4): 589-594
- Vanhnen H, Veteli T, Niemelä P. 2008. Potential distribution ranges in Europe for *Ips hauseri*, *Ips subelongatus* and *Scolytus morawitzi*, a CLIMEX analysis. EPPO Bulletin, 38(2): 249-258
- Wang HB. 2005. Study on attractants for *Dendroctonus valens* from *Pinus tabulaeformis* and potential distribution of the pest in China. PhD thesis. Beijing: China Agricultural University (in Chinese) [王鸿斌. 2005. 红脂大小蠹寄主植物引诱剂研究和适生区分析. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学]
- Wang HB, Zhang Z, Kong XB, Liu SC, Shen ZR. 2007. Preliminary deduction of potential distribution and alternative hosts of invasive pest, *Dendroctonus valens* (Coleoptera: Scolytidae). Scientia Silvae Sinicae, 43(10): 71-76 (in Chinese) [王鸿斌, 张真, 孔祥波, 刘随存, 沈佐锐. 2007. 入侵害虫红脂大小蠹的适生区和适生寄主分析. 林业科学, 43(10): 71-76]
- Wang HB, Zhang Z, Li X, Li GH, Wang ZX, Tong Q. 2009. The geography distribution of tomicus species in southwest China under Climate Change.//State Forestry Administration, the People's Government of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Chinese Society of Forestry. The Second Forestry Science Conference in China: S6 Proceedings of Forest Insects and Natural Regulation.

- Nanning, pp. 47–51] (in Chinese) [王鸿斌, 张真, 李霞, 李国宏, 王忠祥, 童清. 2009. 中国西南地区切梢小蠹属害虫气候地理分布. //国家林业局, 广西壮族自治区人民政府, 中国林学会. 第二届中国林业学术大会: S6 森林昆虫与自然调控论文集. 南宁, pp. 47–51]
- Wang Q, Wang ZM, Guo JB, Wei CY, Hong ZY. 2010. Analysis of suitability for *Dendroctonus simplex* Leconte in China. *Journal of Environmental Entomology*, 32(2): 287–290 (in Chinese) [王齐, 王志明, 郭建波, 魏春艳, 洪泽源. 2010. 落叶松大小蠹在中国适生性分析. *环境昆虫学报*, 32(2): 287–290]
- Wang RL, Jiang G, Wang YL, Lin S, Shen ZH. 2015. Prediction of the potential distribution of *Dendroctonus armandi* in China. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 36(1): 73–78 (in Chinese) [王茹琳, 姜淦, 王闫利, 林姗, 沈沾红. 2015. 气候变暖情境下华山松大小蠹在中国的潜在分布区预测. *四川林业科技*, 36(1): 73–78]
- Wang RL, Yu HB, Wang YL, Jiang G, Lin S, Shen ZH. 2016. Potential geographical distribution of *Dendroctonus armandi* in China based on the MaxEnt prediction. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 6(5): 36–40 (in Chinese) [王茹琳, 余华彬, 王闫利, 姜淦, 林姗, 沈沾红. 2016. 基于MaxEnt的华山松大小蠹在中国潜在分布区预测. *气象科技进展*, 6(5): 36–40]
- Wang T, Ge XZ, Zong SX. 2018. Predicting the potential distribution in China of *Dendroctonus valens* Leconte. *Journal of Environmental Entomology*, 40(4): 758–768 (in Chinese) [王涛, 葛雪贞, 宗世祥. 2018. 气候变化条件下红脂大小蠹在中国的潜在适生区预测. *环境昆虫学报*, 40(4): 758–768]
- Wisn MS, Hijmans RJ, Li J, Peterson AT, Graham CH, Guisan A. 2008. Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions*, 14(5): 763–773
- Xiang H, Ma P, Du Y, Yao J, Jiang XL. 2012. Prediction of potential distributions of *Dendroctonus terebrans* in China by CLIMEX and GIS. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 27(6): 794–797 (in Chinese) [向红, 马平, 杜宇, 姚剑, 蒋小龙. 2012. 基于CLIMEX和GIS的黑脂大小蠹在中国的适生区域预测. *云南农业大学学报(自然科学)*, 27(6): 794–797]
- Xiao YF, Wang MJ, Li XY, Chen F, Wang JS, Zhang HW, Cidan PC. 2020. Analysis on the potential distribution area of *Dendroctonus micans* in Tibet. *Forest Resources Management*, 49(2): 141–145, 172 (in Chinese) [肖义发, 王梦君, 李昕宇, 陈飞, 王继山, 张海武, 次旦普尺. 2020. 云杉大小蠹在西藏的适生区分析. *林业资源管理*, 49(2): 141–145, 172]
- Yang HF. 2016. Analysis on potential distribution area of Xinjiang typical poisonous plant based on MaxEnt and GARP ecological niche model: case of *Aconitum leucostomum* Vorosch. Master thesis. Urumqi: Xinjiang University (in Chinese) [杨会枫. 2016. 基于MaxEnt和GARP的新疆典型毒害草潜在布区分析: 以白喉乌头为例. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆大学]
- Yao J, Du Y, Ma P, Li SG, Jiang XL, Chen XJ, Zhang P, Li YF. 2011. Prediction on potential distributions of *Dendroctonus frontalis* Zimmermann in China using CLIMEX and GIS. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(4): 1017–1023 (in Chinese) [姚剑, 杜宇, 马平, 李生贵, 蒋小龙, 陈雪娇, 张萍, 李云飞. 2011. 基于CLIMEX和GIS的南松大小蠹在中国的适生性分析. *应用昆虫学报*, 48(4): 1017–1023]
- Yu YX, Chi ZH, Zhang JH, Sun PS, Wang C, Pan XB. 2019. Assessing the invasive risk of bark beetles (Curculionidae: Scolytinae and Platypodinae). *Annals of the Entomological Society of America*, 112(5): 451–457
- Zhang XL, Huang Y, Zhu SF, Yang Y, Pan XB. 2015. Mathematical methods related to potential distribution and population dynamic of invasive species. *Plant Quarantine*, 29(2): 7–14 (in Chinese) [张秀玲, 黄英, 朱水芳, 杨瑛, 潘绪斌. 2015. 入侵生物适生区与种群动态中的数学方法. *植物检疫*, 29(2): 7–14]
- Zhao GM. 2018. Analysis of intercepted pests in plant products imported from Lianyungang port and risk analysis of important pests. Master thesis. Yangzhou: Yangzhou University (in Chinese) [赵光明. 2018. 连云港口岸进口植物产品截获有害生物分析及重要有害生物风险分析. 硕士学位论文. 扬州: 扬州大学]
- Zhou YJ, Jian BL, Sun JJ, Lü F, Yang FY. 2019b. Potential geography distribution of *Xyleborus ferrugineus*, a quarantine forest pest of China. *Plant Quarantine*, 33(1): 65–68 (in Chinese) [周奕景, 简保磊, 孙佳佳, 吕飞, 杨凤英. 2019b. 检疫性林木害虫赤材小蠹在中国的适生分布预测. *植物检疫*, 33(1): 65–68]
- Zhou YJ, Lü F, Xu Q, Yang G, Zheng ZG, Sun JJ, Fang Y, Du YZ. 2016. A suitability analysis of *Ips pini* based on DIVA-GIS. *Plant Quarantine*, 30(4): 6–9 (in Chinese) [周奕景, 吕飞, 许强, 杨光, 郑志高, 孙佳佳, 方焱, 杜予州. 2016. 基于DIVA-GIS的美松齿小蠹适生性分析. *植物检疫*, 30(4): 6–9]
- Zhou YJ, Lü F, Yang FY, Sun JJ, Jian BL. 2019a. Comparative study of potential geographical distribution for *Ips calligraphus* based on DIVA-GIS and MaxEnt. *Plant Quarantine*, 33(4): 63–68 (in Chinese) [周奕景, 吕飞, 杨凤英, 孙佳佳, 简保磊. 2019a. 基于DIVA-GIS和MaxEnt的美雕齿小蠹适生区预测对比研究. *植物检疫*, 33(4): 63–68]
- Zhou YJ, Sun JJ, Lü F, Lu J, Yang FY, Jian BL. 2018. Risk assessment of *Gnathotrichus materiarius* as a foreign forest pest. *Plant Quarantine*, 32(5): 61–65 (in Chinese) [周奕景, 孙佳佳, 吕飞, 陆军, 杨凤英, 简保磊. 2018. 外来林木害虫缝锤小蠹的风险评估. *植物检疫*, 32(5): 61–65]
- Zhou YT, Ge XZ, Zou Y, Guo SW, Wang T, Tao J, Zong SX. 2022. Prediction of the potential geographical distribution of *Hylurgus ligniperda* at the global scale and in China using the MaxEnt model. *Journal of Beijing Forestry University*, 44(11): 90–99 (in Chinese) [周玉婷, 葛雪贞, 邹娅, 郭思维, 王涛, 陶静, 宗世祥. 2022. 基于MaxEnt模型的长林小蠹的全球及中国适生区预测. *北京林业大学学报*, 44(11): 90–99]
- Zhou YT, Ge XZ, Zou Y, Guo SW, Wang T, Zong SX. 2019. Climate change impacts on the potential distribution and range shift of *Dendroctonus ponderosae* (Coleoptera: Scolytidae). *Forests*, 10(10): 860
- Zhu GP, Liu C, Li M, Liu Q. 2014. Potential geographical distribution of *Sinoxylon japonicum* (Coleoptera: Bostrichidae) in China based on Maxent and GARP models. *Acta Entomologica Sinica*, 57(5): 581–586 (in Chinese) [朱耿平, 刘晨, 李敏, 刘强. 2014. 基于Maxent和GARP模型的日本双棘长蠹在中国的潜在地理分布分析. *昆虫学报*, 57(5): 581–586]