

基于MaxEnt和ArcGIS的黑腹尼虎天牛 潜在地理分布预测

王 坤 石 娟 梁 特*

(北京林业大学林学院, 林木有害生物防治北京市重点实验室, 中法欧亚森林入侵生物联合实验室, 北京 100083)

摘要: 为明确我国检疫性有害生物黑腹尼虎天牛 *Neoclytus acuminatus* 的潜在地理分布范围, 基于MaxEnt模型、ArcGIS软件及全球分布数据预测当前气候和未来气候(2个情景)条件下黑腹尼虎天牛在全球和中国的潜在分布区域, 并分析影响黑腹尼虎天牛分布的关键环境变量。结果显示, MaxEnt模型的曲线下面积(area under curve, AUC)为0.962, 表明模型预测结果可靠; 影响黑腹尼虎天牛潜在地理分布的5个关键环境变量分别是5月平均降雨量、11月平均最高温度、温度变化方差、7月平均降雨量和最湿季度平均气温, 贡献率分别为40.5%、33.2%、23.9%、2.2%和0.1%。在当前气候条件下, 黑腹尼虎天牛在全球的适生区较广泛, 总面积约为 $3\ 928.63 \times 10^4$ km², 且在湖北、安徽及浙江等省存在高适生区和中适生区; 在未来气候条件下, 黑腹尼虎天牛在全球范围内的适生区总面积会进一步增加, 并且在我国的高适生区面积也会进一步扩大。

关键词: 黑腹尼虎天牛; MaxEnt生态位模型; 适生性分析; 潜在地理分布

Prediction of the potential geographical distribution of red-headed ash borer *Neoclytus acuminatus* based on MaxEnt and ArcGIS

Wang Kun Shi Juan Liang Te*

(Sino-France Joint Laboratory for Invasive Forest Pests in Eurasia, Beijing Key Laboratory for Forest Pest Control, College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To investigate the potential distribution of red-headed ash borer *Neoclytus acuminatus*, a quarantine pest in China, the MaxEnt model, ArcGIS software and global distribution data were utilized to predict the potential habitat of *N. acuminatus* under current climate and two future scenarios. Meanwhile, the factors affecting its distribution were analyzed. The MaxEnt model demonstrated high reliability with an area under curve (AUC) value of 0.962. The climatic factors influencing the potential geographical distribution of *N. acuminatus* included precipitation in May, maximum temperature in November, temperature seasonality, precipitation in July, and mean temperature of the wettest quarter. Their respective percent contributions were 40.5%, 33.2%, 23.9%, 2.2% and 0.1%. Under the current climate, *N. acuminatus* exhibited an extensive potential geographical distribution, covering a total area of $3\ 928.63 \times 10^4$ km². In addition, Hubei, Anhui, Zhejiang and other provinces in China contained highly and moderately suitable areas. Under future climate scenarios, the suitable areas for *N. acuminatus* were projected to expand globally, with a concurrent expansion in highly suitable area in China.

Key words: *Neoclytus acuminatus*; MaxEnt ecological niche models; habitat suitability analysis; potential geographical distribution

黑腹尼虎天牛 *Neoclytus acuminatus* 隶属天牛科尼虎天牛属 *Neoclytus*, 是一种钻木类害虫 (Csóka & Kovács, 1999), 我国已将其列入《中华人民共和国进境植物检疫性有害生物名录》。黑腹尼虎天牛起源于北美洲, 广泛分布于北美洲东半部地区, 现已传入欧洲部分国家, 如意大利和法国等 (陈乃中, 2009)。该天牛的寄主植物种类丰富, 包括栲属 *Fraxinus*、槭属 *Acer*、李属 *Prunus*、栎属 *Quercus* 和榆属 *Ulmus* 等植物 (Brelh et al., 2010)。黑腹尼虎天牛主要以幼虫在树干钻蛀取食 (Solomon et al., 1993), 喜为害濒死木、衰弱木和新伐木 (Waters & Hyché, 1984), 尤其是几近枯死的阔叶树, 例如栎属树木、山核桃 *Carya cathayensis* 以及未经干燥的白蜡树 *Fraxinus chinensis* 原木, 但也侵害新栽树 (Jurc et al., 2016)。

黑腹尼虎天牛 1 年发生 1~2 代, 成虫期一般在 5—8 月, 主要活动期为 5 月初到 6 月底 (Linsley, 1964; Sama, 2002); 成虫飞行能力较强, 可实现短距离扩散 (Rassati et al., 2016)。黑腹尼虎天牛幼虫和蛹可长期生活在树皮上和木质部, 并且各虫态均可在其为害的原木或木质材料中存活, 因此可通过原木、木质包装等运输途径实现远距离传播。黑腹尼虎天牛繁殖能力强、扩散速度较快且扩散途径多样, 对森林和果园构成重大威胁。目前, 对该虫的主要控制方法包括通过栽培措施提高树木活力、在黑腹尼虎天牛出现之前清除受感染的木材以及在其产卵时对树干喷洒保护性杀虫剂 (Brockerhoff et al., 2006) 等。2005 年 9 月苏州出入境检验检疫局和 2013 年 5 月浙江嘉兴检验检疫局在对来自美国的木质包装进行现场检疫时均截获了黑腹尼虎天牛 (高渊等, 2008; 林晓佳和季宏铁, 2013)。从 2018 年至今, 我国海关共截获黑腹尼虎天牛 600 余头, 分别来自美国、加拿大、塞尔维亚、巴拿马和意大利等国家, 对我国的潜在入侵风险较大。该虫一旦进入我国定殖, 会对白蜡树、山核桃以及槭属和栎属等原木构成严重威胁。目前, 尚未见黑腹尼虎天牛在我国的适生区预测报道。

Phillips et al. (2004) 基于最大熵 (maximum entropy, MaxEnt) 原理, 使用 Java 语言编写了 MaxEnt 软件, 可结合物种的已知分布点和气候数据预测物种的地理分布。MaxEnt 模型的突出优势是在分布点较少的情况下依然可以进行精准预测和评估, 这使其成为物种适生区预测的热点工具之一 (Phillips et al., 2006)。目前, 国内许多科研机构已使用 MaxEnt 模型对各类物种的适生区进行了预测, 如濒危

植物冷杉 *Abies ziyuanensis* (李莎等, 2023)、珍贵用材树种赤皮青冈 *Cyclobalanopsis gilva* (欧阳泽怡等, 2023)、传统名贵中药材冬虫夏草 *Ophiocordyceps sinensis* (喻洁等, 2023)、入侵杂草宽叶酢浆草 *Oxalis latifolia* (黄昱萌等, 2022) 以及玉米矮花叶病毒 (maize dwarf mosaic virus, MDMV) (刘静远等, 2022) 等。本研究拟利用 MaxEnt 模型、ArcGIS 软件及黑腹尼虎天牛全球分布数据对其潜在分布区域进行预测, 以期为黑腹尼虎天牛的预警以及控制提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

地理分布数据: 黑腹尼虎天牛的分布数据来自国内外公开发表文献和全球生物多样性信息网络数据库 (global biodiversity information facility, GBIF) (<https://www.gbif.org/>), 共得到 1 072 个分布点, 整理和筛选得到 249 个有效分布点, 将分布点的经纬度数据在 Excel 表格中进行整理, 以 csv 格式保存。

环境数据: 历史 (1970—2000 年) 气候条件下的 19 个生物气候学变量分别为年平均气温 bio1、月平均昼夜温差 bio2、昼夜温差与年温差比值 bio3、温度变化方差 bio4、最热月最高温度 bio5、最冷月最低温度 bio6、年气温变化范围 bio7、最湿季节平均气温 bio8、最干季节平均气温 bio9、最热季节平均气温 bio10、最冷季节平均气温 bio11、年降水量 bio12、最湿月降水量 bio13、最干月降水量 bio14、降水量变化方差 bio15、最湿季节降水量 bio16、最干季节降水量 bio17、最暖季节降水量 bio18 和最冷季节降水量 bio19, 并下载 1—12 月的月平均最高温度、月平均最低温度和月平均降雨量。未来气候 (2041—2060 年, 平均年段为 2050 年) 条件下的环境数据来源于第 6 次国际耦合模式比较计划 (coupled model intercomparison project phase 6, CMIP6) 中的北京气候中心气候系统模型中 2 种不同情景 SSP126 (低强迫情景) 及 SSP585 (高强迫情景), 均自 Worldclim (<https://www.worldclim.org/data/index.html>) 下载, 所有环境数据的图层空间分辨率均为 2.5 arc min。

地图数据: 从自然资源部标准地图服务系统 (<http://www.mnr.gov.cn/>) 下载中国标准地图 (1:1 000 万) 和世界标准地图作为底图。

供试软件: MaxEnt 3.4.3 软件自网站 https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/ 下载; ArcGIS 10.8 软件由北京林业大学林学院购置。

1.2 方法

1.2.1 关键环境变量的筛选

环境变量的原始数据格式为tif,首先在ArcGIS 10.8软件中将其转换为asc格式。此外,由于环境变量的多重共线性可能会影响预测精度,所以需要对其进行筛选(Wen et al., 2022)。在ArcGIS 10.8软件中,利用最终筛选获得的黑腹尼虎天牛分布点数据和环境变量进行采样,提取分布点的环境变量信息,将其导入SPSS 26软件中进行主成分分析和相关性分析,通过主成分分析得到环境变量的贡献率,选择Pearson相关系数进行多重共线性检验,若变量间的相关系数绝对值大于0.8,说明2个变量可互相替代,从中选择1个主成分分析中贡献率较高的变量用于模型构建。

本研究利用MaxEnt软件随机选取25%的黑腹尼虎天牛分布点数据作为测试集,验证模型的准确性,剩余75%作为训练集建立模型,重复运行10次,在重复运行规则中选择子样本,最后结果取10次重复的平均值,最多迭代次数为5000,高级选项中选择编写图数据,模型输出采用cloglog形式,应用阈值规则中选择“10 percentile training presence”,生成并分析关键环境变量的响应曲线,并采用刀切法评估关键环境变量对黑腹尼虎天牛分布的重要性,输出其他参数保持默认,最后文件以asc格式输出。

1.2.2 MaxEnt模型准确性检验

MaxEnt模型的预测准确性检验一般是通过受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线下面积(area under curve, AUC)来判断。ROC曲线是以阳性率(即1-特异度)为横坐标、以真阳性率(即灵敏度)为纵坐标绘制而成,模型准确度评价指标则为AUC值。一般情况下,AUC值越大,表明模型准确性越好,当 $AUC \geq 0.9$ 时,模型预测结果优秀,当 $0.7 \leq AUC < 0.9$ 时,模型预测结果良好,当 $0.5 \leq AUC < 0.7$ 时,模型预测结果可接受,当 $AUC < 0.5$ 时,模型预测失败(Swets, 1988)。

1.2.3 黑腹尼虎天牛适生区的预测和划分

基于当前气候条件和未来气候条件(2041—2060年)下的SSP126及SSP585情景,利用1.2.2优化后的MaxEnt模型进行黑腹尼虎天牛适生区的预测。将输出结果导入ArcGIS 10.8软件中,对图层进行重分类,重分类之后的物种存在概率范围为[0, 1],使用最低存在阈值(the lowest presence threshold, LPT)来定义适宜和不适宜的栖息地(Pearson et al., 2007)。基于自然间断点法和MaxEnt模型预测结

果,将黑腹尼虎天牛的潜在适生区划分为4级:非适生区(适生值 $<LPT$)、低适生区($LPT \leq \text{适生值} < 0.4$)、中适生区($0.4 \leq \text{适生值} < 0.6$)、高适生区($0.6 \leq \text{适生值} < 1.0$)。最后,统计黑腹尼虎天牛不同级别适生区的面积。

2 结果与分析

2.1 影响黑腹尼虎天牛分布的关键环境变量

在当前气候条件下,基于MaxEnt模型和SPSS 26软件共筛选出5个影响黑腹尼虎天牛潜在地理分布的关键环境变量,分别是5月平均降雨量、11月平均最高温度、温度变化方差、7月平均降雨量和最湿季度平均气温,其对模型的贡献率分别为40.5%、33.2%、23.9%、2.2%和0.1%。刀切法重要度分析结果显示,蓝色条带越长,正规化训练增益越高,表明该变量对物种分布的影响越大,在“仅此变量”中,对黑腹尼虎天牛分布影响最大的3个变量为11月平均最高温度、5月平均降雨量和7月平均降雨量(图1),表明降水量和温度是影响黑腹尼虎天牛分布的主要因素。

结合已知黑腹尼虎天牛严重为害地区的气候特征,选取并绘制11月平均最高温度、5月平均降雨量、7月平均降雨量与黑腹尼虎天牛存在概率之间的响应曲线,结果显示,11月平均最高温度的最适宜范围为 $0.1 \sim 33.9$ °C,最适宜温度为 20.8 °C,在 $0.1 \sim 20.8$ °C范围内,随着温度上升黑腹尼虎天牛的存在概率增大,在 $20.8 \sim 33.9$ °C范围内,随着温度上升黑腹尼虎天牛的存在概率降低(图2-A);随着降雨量增加,黑腹尼虎天牛的存在概率迅速升高,达到最适宜降雨量后迅速降低并趋于平衡,其中,5月平均降雨量的最适宜值为 99 mm,7月平均降雨量的最适宜值为 73 mm(图2-B~C)。

2.2 MaxEnt模型的准确性

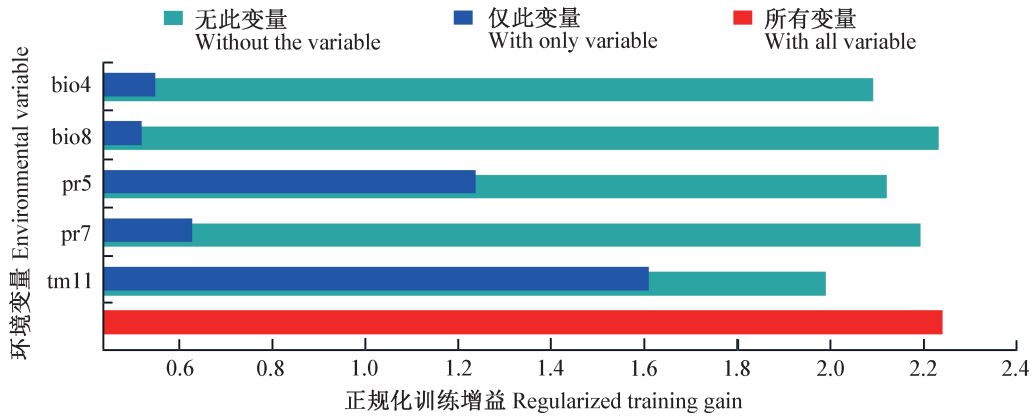
MaxEnt模型对黑腹尼虎天牛的潜在地理分布预测10次的平均AUC值为0.962,表明构建的模型预测结果良好(图3),可用于预测黑腹尼虎天牛的潜在地理分布。

2.3 当前气候条件下黑腹尼虎天牛的全球适生区分布

根据当前的环境变量和发生记录预测黑腹尼虎天牛在全球的分布情况,结果显示其潜在适生区较广,主要分布在 $120^{\circ}W \sim 133^{\circ}E$ 和 $30^{\circ}N \sim 45^{\circ}N$ 之间;其中,高适生区主要集中在美国东部、欧洲的匈牙利等沿海国家以及中国的华中和华东地区;中适生区主要分布在欧洲东南部国家和中国的华中地区;低

适生区的分布相对比较广泛,各大洲均有分布,主要包括北美洲东部、南美洲南部、欧洲大部分国家、亚

洲南部的哈萨克斯坦、中国及日本等国家和非洲南部的南非以及澳大利亚的南部(图4)。



bio4: 温度变化方差; bio8: 最湿季度平均气温; pr5: 5月平均降雨量; pr7: 7月平均降雨量; tm11: 11月平均最高温度。 bio4: Temperature seasonality; bio8: mean temperature of the wettest quarter; pr5: precipitation in May; pr7: precipitation in July; tm11: mean maximum temperature in November.

图1 采用刀切法分析影响黑腹尼虎天牛分布的环境变量

Fig. 1 Analysis of environmental variables affecting the suitability of *Neoclytus acuminatus* by Jackknife

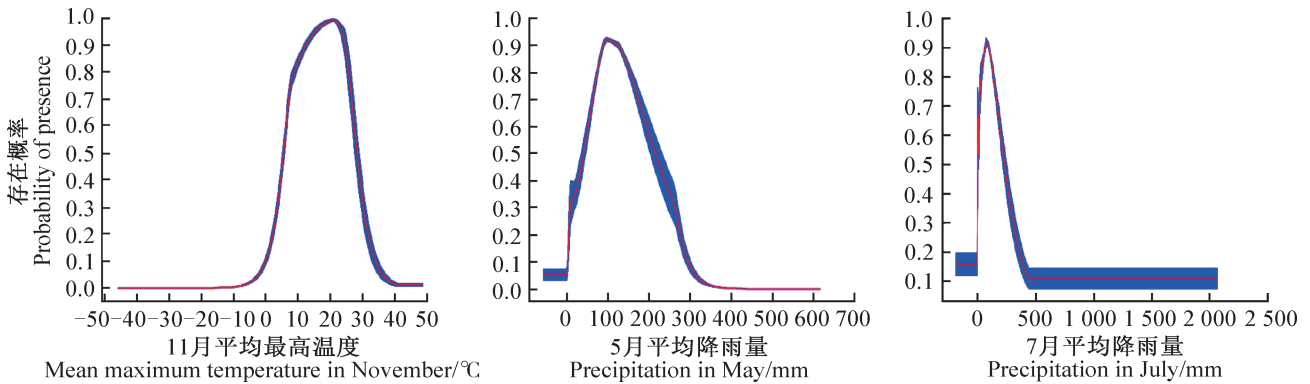


图2 3个关键环境变量对黑腹尼虎天牛潜在分布的影响

Fig. 2 Effects of three key environmental variables on potential geographical distribution of *Neoclytus acuminatus*

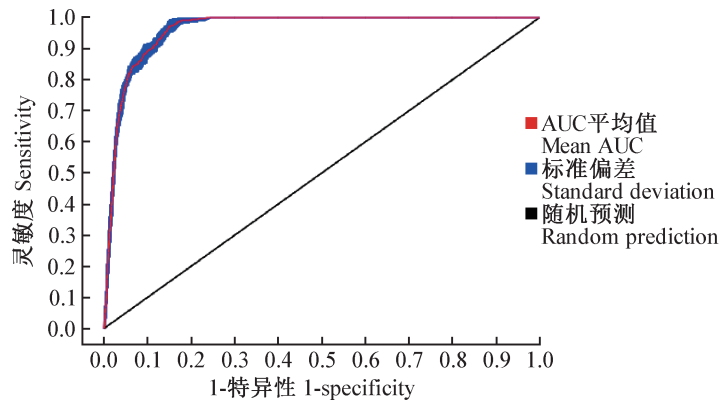


图3 基于MaxEnt模型对黑腹尼虎天牛适生区预测的精度分析

Fig. 3 Prediction accuracy analysis for *Neoclytus acuminatus* based on MaxEnt model

黑腹尼虎天牛在全球的潜在适生区总面积约为 3 928.63×10⁴ km²,占除南极洲外全球陆地总面积的 28.64%,其中高适生区面积约为 446.22×10⁴ km²,中

适生区面积约为 312.24×10⁴ km²,低适生区面积约为 3 170.17×10⁴ km²(表1)。

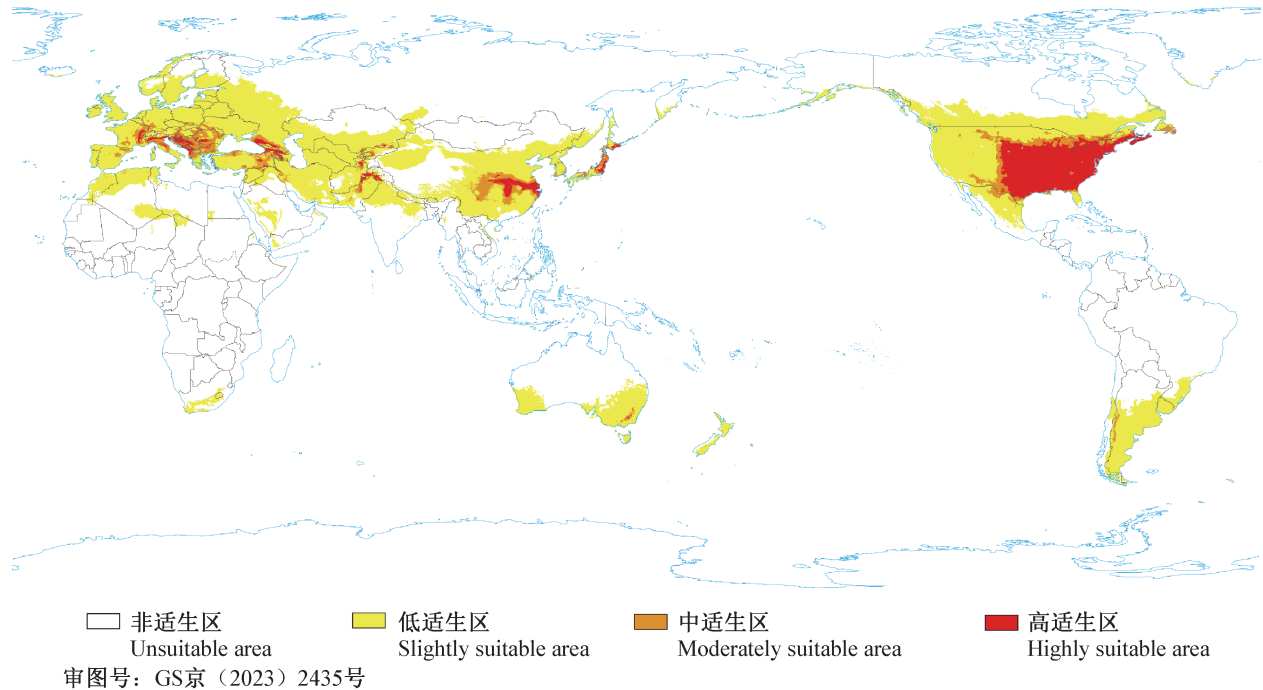


图4 当前气候条件下黑腹尼虎天牛在全球的潜在地理分布

Fig. 4 Potential global geographic distribution of *Neoclytus acuminatus* under current climate conditions

表1 不同气候条件下黑腹尼虎天牛的潜在适生区面积

Table 1 Potential suitable areas of *Neoclytus acuminatus* under different climatic conditions

地区 Area	适生区等级 Grade of suitable area	分布面积 Distribution area / ($\times 10^4 \text{ km}^2$)		
		当前 Current	2050年 SSP126 情境 SSP126-2050	2050年 SSP585 情境 SSP585-2050
全球 Global	非适生区 Unsuitable area	9 788.04	9 731.80	9 558.16
	低适生区 Slightly suitable area	3 170.17	3 263.45	3 379.37
	中适生区 Moderately suitable area	312.24	290.68	320.19
	高适生区 Highly suitable area	446.22	430.74	458.95
	适生区总面积 Total suitable area	3 928.63	3 984.87	4 158.51
中国 China	非适生区 Unsuitable area	370.72	376.63	334.23
	低适生区 Slightly suitable area	495.96	489.20	519.34
	中适生区 Moderately suitable area	61.59	59.72	69.19
	高适生区 Highly suitable area	31.73	34.45	37.24
	适生区总面积 Total suitable area	589.28	583.37	625.77

2.4 未来气候条件下黑腹尼虎天牛的全球适生区分布

在 SSP126 气候情境下,黑腹尼虎天牛的适生区总面积约为 $3\,984.87 \times 10^4 \text{ km}^2$, 相较于当前气候条件下增加了 $56.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ (表 1), 其中, 中适生区和高适生区的面积减少, 低适生区的面积增大, 主要体现在美国东部和阿富汗等国家的高适生区和中适生区面积明显减少, 转变为低适生区。除此之外, 中适生区和高适生区呈现向高纬度移动的趋势, 欧洲南部沿海国家如意大利、法国、塞尔维亚等国家的中适生区和高适生区向北蔓延, 罗马尼亚和乌克兰等国家出现高适生区 (图 5-A)。

在 SSP585 气候情境下, 黑腹尼虎天牛在全球的低适生区、中适生区和高适生区面积均有所增大, 适生区总面积相较于当前气候条件下增加了 5.85%, 主要体现在沙特阿拉伯等国家从非适生区转变为低适生区, 意大利等欧洲部分沿海国家从中适生区转变为高适生区 (图 5-B)。在不同气候条件下, 黑腹尼虎天牛在全球的适生区总面积排序为 SSP585 情景 ($4\,158.51 \times 10^4 \text{ km}^2$) > SSP126 情景 ($3\,984.87 \times 10^4 \text{ km}^2$) > 当前气候条件 ($3\,928.63 \times 10^4 \text{ km}^2$) (表 1), 高适生区仍然集中在美国东部、欧洲南部国家和日本。

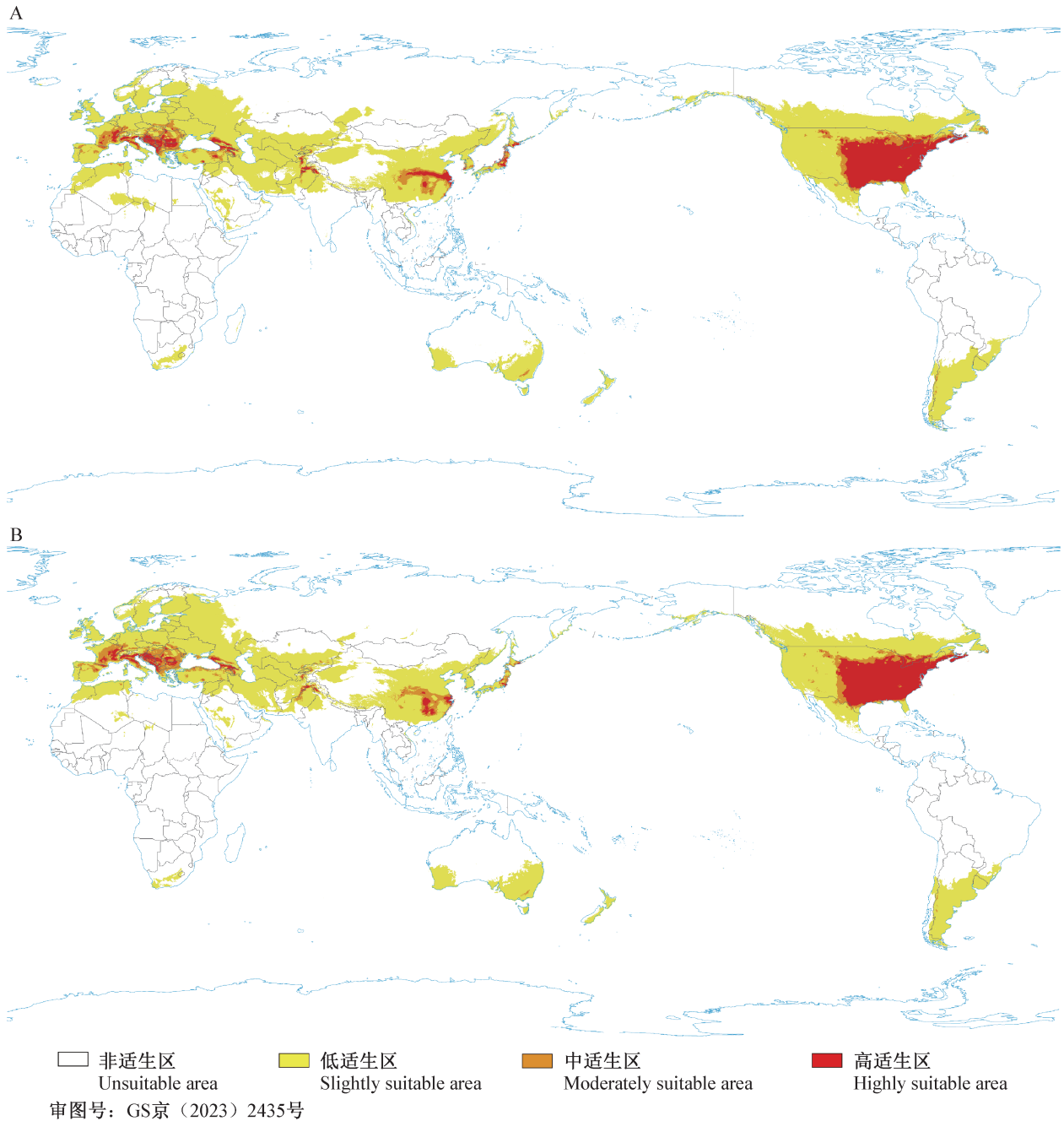


图5 未来气候SSP126(A)和SSP58(B)情景下黑腹尼虎天牛在全球的潜在分布

Fig. 5 Potential global geographic distribution of *Neoclytus acuminatus* under future climatic scenarios SSP126 (A) and SSP585 (B)

2.5 当前气候条件下黑腹尼虎天牛的中国适生区分布

黑腹尼虎天牛在中国的适生区分布较广,高适生区和中适生区主要聚集在秦岭淮河一带,主要分布于陕西、河南、湖北、湖南、安徽、浙江和江苏7个省,中适生区主要分布于四川、重庆、湖北、湖南、安徽、河南、陕西和甘肃8个省市,低适生区几乎遍布全国,西部的新疆维吾尔自治区和西藏自治区以及北部的内蒙古自治区和东北地区也是黑腹尼虎天牛的潜在分布区域(图6)。该虫在中国的适生区总面积达 $589.28 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占中国陆地总面积的

61.38%,其中高适生区、中适生区和低适生区的面积分别为 31.73×10^4 、 61.59×10^4 和 $495.96 \times 10^4 \text{ km}^2$ (表1),分别约占中国陆地总面积的3.31%、6.42%和51.66%。

2.6 未来气候条件下黑腹尼虎天牛的中国适生区分布

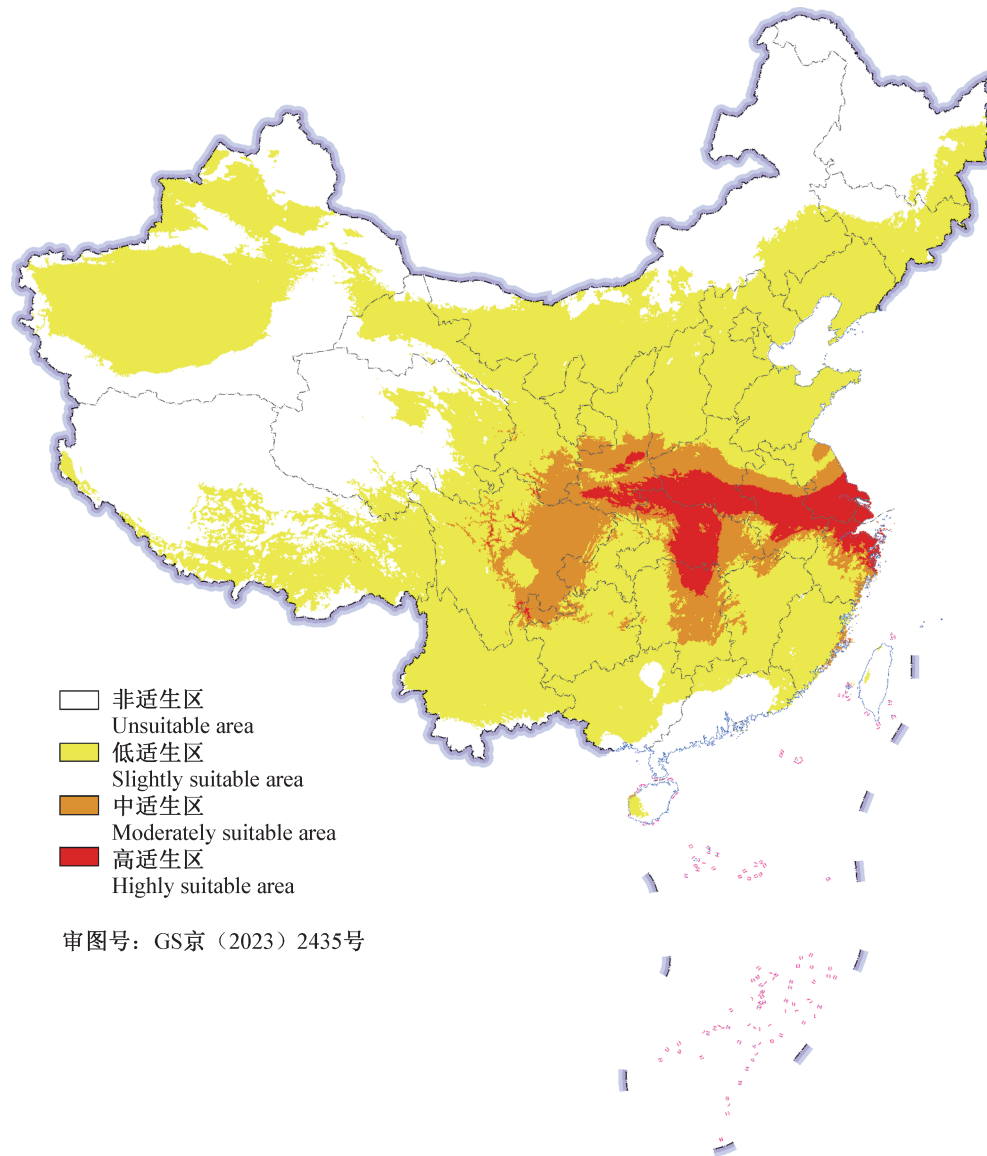
在SSP126气候情境下,与当前气候条件下相比,黑腹尼虎天牛在中国的低适生区、中适生区和高适生区面积均有小幅度变化,其中,湖北省的适生程度明显减轻,高适生区转为中适生区和低适生区,而陕西省、四川省和江苏省的适生程度加重,低适生区

转变为中适生区和高适生区(图7-A)。

在SSP585气候情境下,与当前气候条件下相比,黑腹尼虎天牛在我国的低适生区、中适生区和高适生区面积均有小幅度增加。在分布格局上,黑腹尼虎天牛的高适生区边界明显向南移动,主要体现在江苏、安徽、河南和陕西等省的高适生区转变为中适生区;而在湖南省和江西省的适生程度却加重,表现为

湖南省的高适生区面积增大,江西省的低适生区转变为高适生区;此外,四川省的中适生区减少,转变为低适生区,但江西省的中适生区有所增加(图7-B)。

在SSP126和SSP585情景下,黑腹尼虎天牛在中国的适生区总面积分别为 $583.37 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $625.77 \times 10^4 \text{ km}^2$ (表1),分别约占中国陆地总面积的60.77%和65.18%。



审图号: GS京(2023)2435号

图6 当前气候条件下黑腹尼虎天牛在中国的潜在地理分布

Fig. 6 Potential geographical distribution of *Neochlytus acuminatus* under current climate conditions in China

3 讨论

本研究采用刀切法对影响黑腹尼虎天牛分布的环境因素的重要性进行了分析,发现气温和降水量对黑腹尼虎天牛的分布影响最大,其中11月平均最高温度和5月平均降雨量为主要影响因素。黑腹尼

虎天牛的主要寄主为榕属白蜡树,原产于中国,在吉林、辽宁、甘肃、河北、山东、陕西、云南、广东和宁夏等省区广泛分布(中国科学院中国植物志编辑委员会,1992),根据黑腹尼虎天牛适宜潮湿温暖气候的生物学特性,推测其在我国南方几个省更容易定殖,这与本研究的预测结果基本吻合。

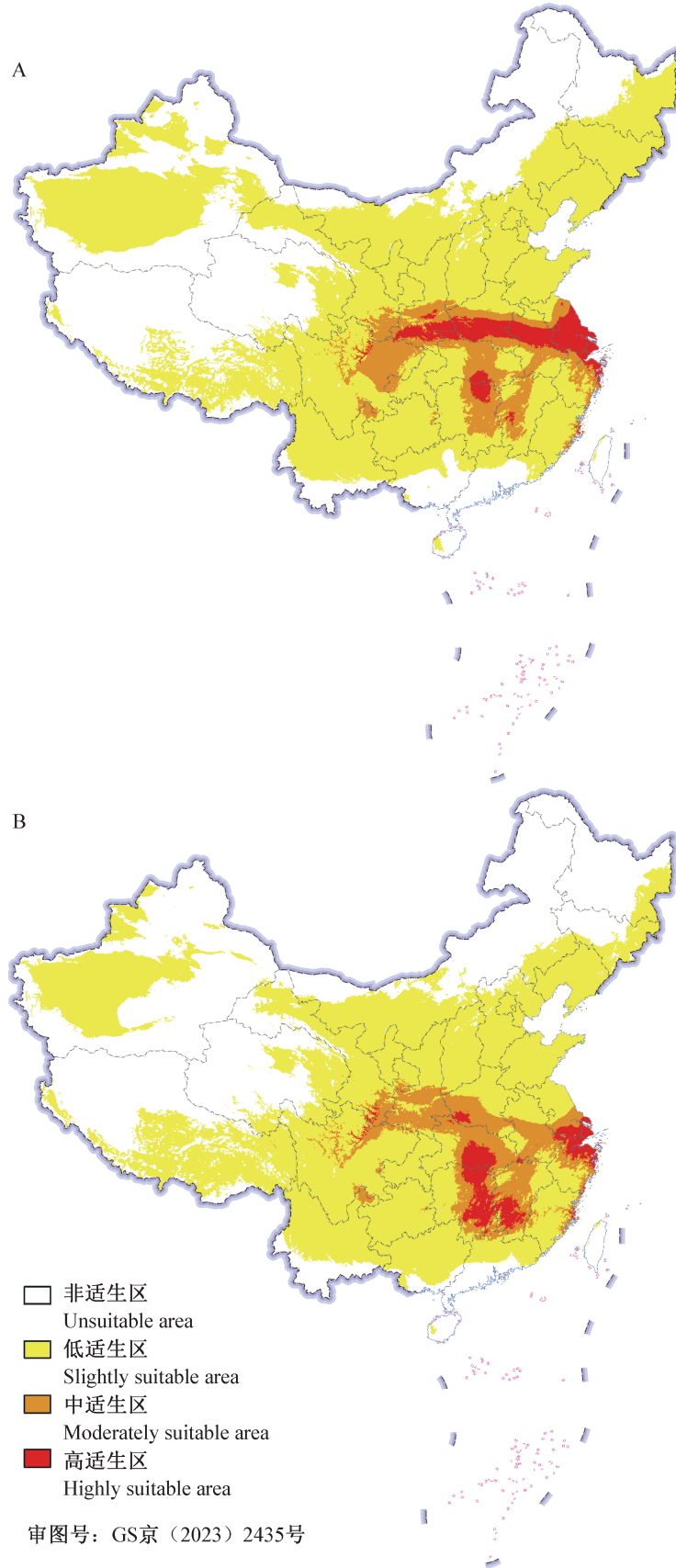


图7 未来气候 SSP126(A)和 SSP585(B)情景下黑腹尼虎天牛在中国的潜在分布
Fig. 7 Potential geographical distribution of *Neoclytus acuminatus* under future climatic scenarios SSP126 (A) and SSP585 (B) in China

本研究基于黑腹尼虎天牛的分布点数据,利用MaxEnt软件预测了黑腹尼虎天牛在全球和中国的潜在适生区,并基于未来气候数据预测了其在2050年的潜在适生区,结果显示黑腹尼虎天牛在全球的潜在适生区面积较大,达到 $3\,928.63 \times 10^4 \text{ km}^2$,占除南极洲外全球陆地总面积的28.64%,并且在未来气候条件下其适生区总面积会进一步增大,而高适生区面积较小,主要集中在北美洲东半部和欧洲的一部分国家,例如意大利、法国和克罗地亚等国家。另外,在SSP585气候情景下黑腹尼虎天牛在我国的适生区面积相较于当前气候条件下的变化幅度大于SSP126气候情景,说明环境变化越剧烈,对黑腹尼虎天牛的影响越大,适生区面积的增幅可能就越大。气候发生变化,一些外来入侵物种的适生区面积可能会随之相应增加或者减少(Bradley et al., 2010; Wei et al., 2019)。另外通过分析黑腹尼虎天牛的全球分布点可以发现,该害虫从其起源地北美洲东部成功入侵了欧洲的希腊、乌克兰、塞尔维亚和亚洲的印度尼西亚等国家,这可能与具有广泛的寄主植物、较强的环境适应性和较广的食性有关。

本研究主要利用已知的黑腹尼虎天牛分布点和气候数据来建模,存在一定的局限性。该虫寄主植物为栲属和栎属等植物,本研究未将寄主植物分布范围与预测的适生区范围结果进行叠加分析。除生物气候学变量以及每月的平均最高温度、平均最低温度和平均降雨量外,地形因素、寄主和人为等因素对黑腹尼虎天牛的入侵及扩散也有重要影响,下一步研究应考虑更多的变量使预测结果更准确。黑腹尼虎天牛虽然还未在我国发生,但有大量的海关截获记录,其主要寄主栲属和栎属等植物在我国广泛分布,本研究证明黑腹尼虎天牛在我国具有广泛的潜在适生区,一旦该虫侵入定殖,可能会造成严重的入侵后果,因此应继续做好严格的检验检疫工作,以防止该虫入侵。

参 考 文 献 (References)

- Bradley BA, Blumenthal DM, Wilcove DS, Ziska LH. 2010. Predicting plant invasions in an era of global change. *Trends in Ecology & Evolution*, 25(5): 310–318
- Brelth S, Kajzer A, Pirnat A. 2010. Material for the beetle fauna (Coleoptera) of Slovenia 4th contribution: *Polyphaga*: Scarabaeoidea (=Lamellicornia). *Scopolia*, 70: 1–386
- Brockerhoff EG, Liebhold AM, Jactel H. 2006. The ecology of forest insect invasions and advances in their management. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(2): 263–268
- Chen NZ. 2009. Phytosanitary pests imported from China: insect volume. Beijing: China Agriculture Press (in Chinese) [陈乃中. 2009. 中国进境植物检疫性有害生物: 昆虫卷. 北京: 中国农业出版社]
- Csóka G, Kovács T. 1999. Xylophagous insects. Budapest: Hungarian Forest Research Institute, pp. 144
- Editorial Committee of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. 1992. Flora of China: vol. 61. Beijing: Science Press (in Chinese) [中国科学院中国植物志编辑委员会. 1992. 中国植物志: 第61卷. 北京: 科学出版社]
- Gao Y, Chen YF, Zhan GH, Fan XH, Xu M. 2008. Black-bellied *Anoplophora nigromaculata* intercepted on imported wooden packaging. *Plant Quarantine*, 22(6): 379–380 (in Chinese) [高渊, 陈云芳, 詹国辉, 樊新华, 徐梅. 2008. 进境木质包装上截获的黑腹尼虎天牛. *植物检疫*, 22(6): 379–380]
- Huang YM, Qin YJ, Zhang Y, Fu WD, Zhang GL, Li ZH, Zhao ZH. 2022. Analysis of the potential geographical distribution of weed *Oxalis latifolia* based on MaxEnt and ArcGIS. *Journal of Plant Protection*, 49(5): 1424–1433 (in Chinese) [黄豆萌, 秦誉嘉, 张岳, 付卫东, 张国良, 李志红, 赵紫华. 2022. 基于MaxEnt和ArcGIS的宽叶酢浆草潜在地理分布分析. *植物保护学报*, 49(5): 1424–1433]
- Jurc M, Csóka G, Hrašovec B. 2016. Potentially important insect pests of *Celtis australis* in Slovenia, Croatia and Hungary. *Šumarski List*, 140(11/12): 588
- Li S, Mo SH, Hu XH, Deng T. 2023. Prediction of potential suitable areas of endangered plant *Abies ziyuanensis* based on MaxEnt and ArcGIS. *Chinese Journal of Ecology*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230311.1445.004.html> (in Chinese) [李莎, 莫舜华, 胡兴华, 邓涛. 2023. 基于MaxEnt和ArcGIS预测濒危植物资源冷杉潜在适生区分析. *生态学杂志*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230311.1445.004.html>]
- Lin XJ, Ji HT. 2013. Zhejiang Bureau intercepted quarantine pest *Anoplophora nigromaculata* for the first time. *Plant Quarantine*, 27(5): 100 (in Chinese) [林晓佳, 季宏轶. 2013. 浙江局首次截获检疫性有害生物黑腹尼虎天牛. *植物检疫*, 27(5): 100]
- Linsley EG. 1964. The Cerambycidae of North America, part V: taxonomy and classification of the subfamily Cerambycinae, tribes Callichromini through Ancylocerini. University of California Publications in Entomology, volume 22. Berkeley and Los Angeles: University of California Press, pp. 1–197
- Liu JY, Yu C, Huang YM, Tian YM, Qin YJ, Zhu YJ, Teng K, Cui JL, Wang YP, Lin S. 2022. Potential geographical distribution prediction of maize dwarf mosaic virus based on MaxEnt model. *Journal of Plant Protection*, 49(5): 1383–1391 (in Chinese) [刘静远, 于翠, 黄豆萌, 田沂民, 秦誉嘉, 朱雅君, 滕凯, 崔金路, 王寅鹏, 林松. 2022. 基于MaxEnt模型预测玉米矮花叶病毒的潜在适生区. *植物保护学报*, 49(5): 1383–1391]
- Morales NS, Fernández IC, Baca-González V. 2017. MaxEnt's parameter configuration and small samples: are we paying attention to

- recommendations: a systematic review. *PeerJ*, 5: e3093
- Ouyang ZY, Li ZH, Ouyang SL, Cheng Y, Zhou ZC, Wu JY. 2023. Prediction of the potential distribution of *Cyclobalanopsis gilva* in China based on the MaxEnt and ArcGIS model. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 43(2): 19–26 (in Chinese) [欧阳泽怡, 李志辉, 欧阳硕龙, 程勇, 周志春, 吴际友. 2023. 基于 MaxEnt 和 ArcGIS 的赤皮青冈在中国的潜在适生区预测. *中南林业科技大学学报*, 43(2): 19–26]
- Pearson RG, Raxworthy C, Nakamura M, Peterson AT. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 34: 102–117
- Phillips SJ, Dudík M, Schapire RE. 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling.//*Proceedings of the Twenty-first International Conference on Machine Learning*. New York: ACM, pp. 89–90
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3/4): 231–259
- Rassati D, Lieutier F, Faccoli M. 2016. Alien wood-boring beetles in Mediterranean regions.//Paine T, Lieutier F. *Insects and diseases of Mediterranean forest systems*. Cham: Springer, pp. 293–327
- Sama G. 2002. Atlas of the Cerambycidae of Europe and Mediterranean area, volume 1: northern, western, central and eastern Europe, British Isles & Continental Europe from France (Excl. Corsica) to Scandinavia & Urals. Philadelphia: Coronet Books Inc., pp. 1–173
- Solomon JD, Leininger TD, Wilson AD, Anderson RL, Thompson, LC, McCracken FI. 1993. Ash pests: a guide to major insects, diseases, air pollution injury and chemical injury. New Orleans, LA: Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, pp. 1–52
- Swets JA. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240(4857): 1285–1293
- Waters DJ, Hyche LL. 1984. Notes on Cerambycidae (Coleoptera) collected on dead or stressed deciduous trees in East Central Alabama. *The Coleopterists Bulletin*, 38(3): 283–287
- Wei JF, Li XZ, Lu YY, Zhao L, Zhang HF, Zhao Q. 2019. Modeling the potential global distribution of *Phenacoccus madeirensis* Green under various climate change scenarios. *Forests*, 10(9): 773
- Wen XY, Zhao GH, Cheng XT, Chang GB, Dong XB, Lin X. 2022. Prediction of the potential distribution pattern of the great gerbil (*Rhombomys opimus*) under climate change based on ensemble modelling. *Pest Management Science*, 78(7): 3128–3134
- Yu J, Cao GC, Rong ZL, Li HF. 2023. Prediction of potential distribution of *Ophiocordyceps sinensis* in China based on MaxEnt model. *Ecological Science*, 42(2): 202–210 (in Chinese) [喻洁, 曹广超, 戎战磊, 李华非. 2023. 基于 MaxEnt 模型的冬虫夏草中国潜在适生区预测. *生态科学*, 42(2): 202–210]

(责任编辑:李美娟)