



基于 MaxEnt 的暗褐断眼天牛在我国的适生区分布研究

孙雅姝¹, 刘晓艳¹, 王满囤¹, 古剑², 周爱明^{1*}

(1. 华中农业大学植物科学技术学院, 武汉 430070; 2. 宜昌市森林病虫害防治检疫站, 湖北宜昌 443001)

摘要: 暗褐断眼天牛 *Tetropium fuscum* 是林业重大害虫之一, 已多次被我国海关截获, 入侵风险极高。明确暗褐断眼天牛在我国的适生区范围及主要影响因子, 对其早期预警和检疫意义重大。本研究根据现有的 448 个暗褐断眼天牛分布数据, 结合气候数据, 利用 MaxEnt 模型和 ArcGIS 软件对暗褐断眼天牛在我国的适生区进行了预测。结果表明: 当前气候背景下, 暗褐断眼天牛适生面积占全国陆地面积的 7.04%, 主要分布在我国西北、西南、华东和华南的部分地区。未来不同气候背景下, 暗褐断眼天牛在我国适生区变化趋势各不相同。影响暗褐断眼天牛分布的最主要环境变量为最冷季节平均温度、最热季节平均温度、降水量变异系数以及最干燥月份降水量。研究结果可为今后对暗褐断眼天牛的预防与检疫提供理论依据。

关键词: 暗褐断眼天牛; MaxEnt 模型; 气候变化; 适生区

中图分类号: Q968.1

文献标识码: A

The distribution of *Tetropium fuscum* in China based on MaxEnt

SUN Ya-Shu¹, LIU Xiao-Yan¹, WANG Man-Qun¹, GU Jian², ZHOU Ai-Ming^{1*} (1. College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Yichang Forest Disease, Pest Control and Quarantine Station, Yichang 443001, Hubei Province, China)

Abstract: *Tetropium fuscum* is an important forest pest, causing a potential threat to the ecological security of forests in China. Characterizing the suitable habitat range of *T. fuscum* in China and the primary influencing factors has considerable significance for its early warning and proposing prevention measures. Based on the existing 448 distribution data of *T. fuscum*, this study predicts

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC2604900)

作者简介: 孙雅姝, 女, 硕士研究生, 研究方向为有害生物风险分析, E-mail: s18435930927@163.com

*通讯作者 Author for correspondence: 周爱明, 博士, 副教授, 主要研究方向为入侵生物学及昆虫化学生态学, E-mail: zhouam@mail.hzau.edu.cn

收稿日期 Received: 2024-10-11; 修回日期 Revision received: 2024-12-11; 接受日期 Accepted: 2024-12-12

the suitable habitat area in China using the MaxEnt model and ArcGIS. The results indicated that under the current climatic backdrop, the suitable area for *T. fuscum* accounted for 7.04% of the total land area of China, mainly in regions of northwest, southwest, east, and south China. The trend of the suitable habitat area of *T. fuscum* in China varies under different future climate scenarios. The most crucial environmental variables that influence *T. fuscum* distribution were the average temperature of the coldest season and the hottest season, the coefficient of variation of precipitation, and the precipitation in the driest month. These results provide a theoretical basis for the prevention and quarantine of *T. fuscum* in the future.

Key word: *Tetropium fuscum*; MaxEnt model; climate change; suitable area

生物入侵是 21 世纪全球性的重要环境问题之一（鞠瑞亭等，2012）。随着全球经济一体化进程的加剧，我国运输行业的快速发展，生物入侵发生越来越频繁。目前，我国已成为世界上生物入侵最严重的国家之一。入侵生物的成功定殖往往伴随着巨大的生态破坏和经济损失，在入侵生物定殖初期，科学有效的预防措施更为关键（Kolar *et al.*, 2001）。因此，防止外来有害物种造成危害的最有效的方法和途径是构建科学的监测与早期预警体系。

随着国际贸易的发展，植物检疫经常被认为是贸易的技术障碍，或者被一些国家利用作为贸易保护的手段（陈洪俊等，2002）。因此，科学的预测模型对入侵物种的潜在分布区域预测和贸易发展都具有重要意义。生态位模型是基于生态位理论所构建的数学预测模型，又被称为物种分布模型（Species Distribution Models, SDMs）（朱耿平等，2013），是评估外来物种是否存在检疫必要性的重要工具。MaxEnt（Maximum Entropy Model）模型是 Phillips 等基于 Java 平台构建的生态位模型，其组成的理论基础是基于最大熵理论，从有限的信息中获得未知概率分布推断的一种数学方法（Phillips *et al.*, 2004）。MaxEnt 具有运算结果稳定、运算时间短、预测能力精确、需要已知分布点少等优点，该模型是目前被运用得最为广泛的生态位模型（Matyukhina *et al.*, 2014）。有研究利用 MaxEnt 对多种重大入侵害虫的适生区进行了预测。例如，草地贪夜蛾（林伟等，2019）、果树入侵害虫苹红缢管蚜 *Rhopalosiphum oxyacanthae*（贾栋等，2020）、重要森林病原松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus*、传播媒介松墨天牛 *Monochamus galloprovincialis*（孙冬瑞等，2023）。

暗褐断眼天牛 *Tetropium fuscum* 属鞘翅目 Coleoptera 天牛科 Cerambycidae，是一种钻木类害虫，主要寄主于欧洲云杉 *Picea abies* (L.) H. Karst.、冷杉 *Abies fabri* (Mast.) Craib、落叶松 *Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.、欧洲赤松 *Pinus sylvestris* L.等针叶树木，以幼虫在韧皮部钻蛀取食，喜为害衰弱木和伐倒木，爆发时也可有害健康植株。暗褐断眼天牛危害性极大，1999

年加拿大哈利法克斯暴发暗褐断眼天牛危害，上万株云杉被侵害，造成 400 多株云杉死亡，对当地的经济与生态平衡造成巨大损失，被认为是森林重大害虫之一 (Jacobs *et al.*, 2003)。暗褐断眼天牛 1 年发生 1~2 代，幼虫和蛹生活在树皮下和木质部，夏季成虫羽化离开寄主树木进行交配并产卵于树皮下 (王益愚, 2007; Flaherty *et al.*, 2013)。暗褐断眼天牛繁殖能力强、扩散速度较快，其成虫飞行能力强，可随风飞出 100~200 km 完成自然传播；幼虫和蛹长期生活在木质部，可通过原木、木质包装等运输途径实现远距离传播 (张生芳等, 2001)。

暗褐断眼天牛原产于欧洲，1990 年左右传入加拿大并定殖，目前主要分布于加拿大和欧洲各国。2000 年首都机场对产于加拿大由美国空运至北京的 1 批货物的针叶木质托盘和法国的 2 批货物针叶木质托盘实施检疫时均截获了暗褐断眼天牛 (马卫东等, 2000)。近年来随着国际贸易的快速发展，我国各口岸频繁截获暗褐断眼天牛，截止 2018 年，我国海关共截获暗褐断眼天牛 300 余头，分别来自俄罗斯、加拿大、意大利、法国和德国等国家，对我国的潜在入侵风险较大 (未发表数据)。该虫一旦在我国定殖，将对我国欧洲云杉、冷杉、落叶松、欧洲赤松等针叶树木构成严重威胁，对我国生态、经济以及社会的稳定发展具有严重威胁。目前，我国尚未存在暗褐断眼天牛的分布，因此分析该虫适生区对防止该虫在我国定殖与为害具有重要意义。

入侵物种的地理分布受气候、土壤、地形、迁移能力、种间的相互作用等因素的共同影响，其中气候是影响种群定殖的关键因素，也是决定物种分布范围的基础因素 (Connor *et al.*, 2020)。分析入侵物种在气候变化背景下的适生区变化，阐释不同的变化规律和模式，是开展长期主动防控的内在需求。本研究利用 MaxEnt 模型对暗褐断眼天牛潜在分布区域进行了预测，以为该虫的预警和防控工作提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 暗褐断眼天牛分布数据获取与处理

暗褐断眼天牛全球地理分布数据主要来自全球生物多样性信息服务平台 (<https://www.gbif.org/>) 和已发表文献，选取 1970-2024 年现存的所有记录，共获得 3 049 条记录，去除错误坐标、重复坐标以及模糊坐标后得到 1 189 个有效坐标点 (图 1)。为去除坐标点的取样偏差和数据冗余对预测结果的影响，使用 ArcGIS 10.8 对坐标点进行筛选，使每 10×10 km 只保留一个坐标点，最终得到 448 个坐标点用于后续建模，包括瑞典 (217)、法国 (59)、瑞士 (42)、挪威 (41)、德国 (20)、芬兰 (18)、俄罗斯 (15)、奥地利 (7)、比利时 (6)、拉脱维亚 (3)、爱沙尼亚 (3)、立宛陶 (3)、捷克 (3)、罗马尼亚 (2)、波兰

(2)、匈牙利 (1)、乌克兰 (1)、丹麦 (1)、英国 (1)、荷兰 (1)。将数据按 MaxEnt 要求保存为 CSV 格式备用。

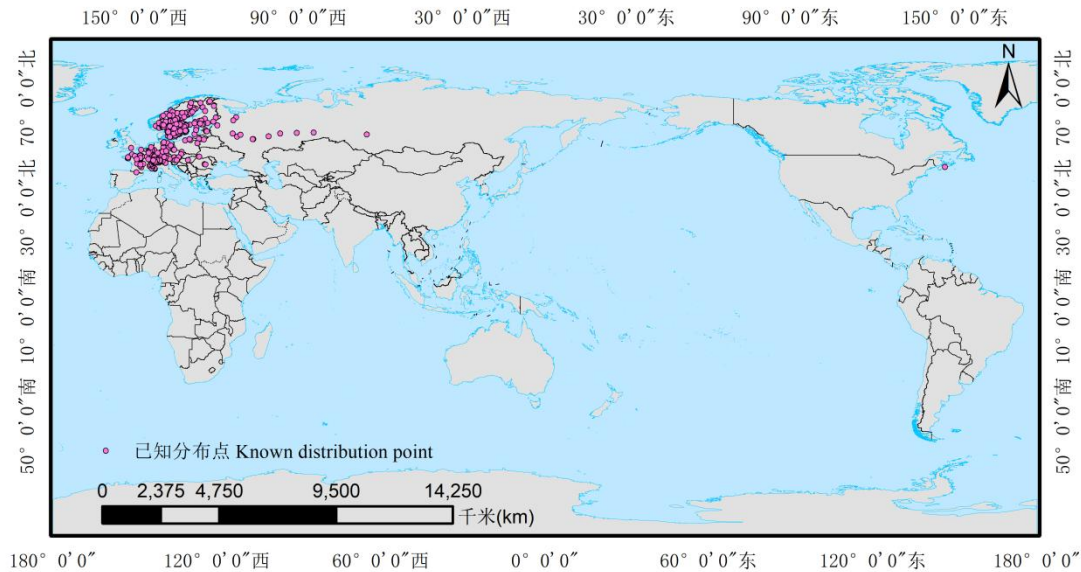


图 1 当前暗褐断眼天牛全球分布情况

Fig. 1 Current global distribution of *Tetropium fuscum*

注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1666 号的标准地图制作，底图无修改。Note: This map was based on the standard map with the review number GS (2016) 1666 downloaded from the Standard Map Service website of the National Bureau of Surveying and Mapping Geographic Information. The base map had not been modified.

1.2 气候数据的获取与处理

本研究所使用的环境数据均通过世界气候 WorldClim 2.1 数据库 (<http://www.worldclim.org>) 下载获得，包含 19 个生物气候环境变量数据与全球海拔数据，空间分辨率均为 2.5 min，选取历史气候数据与第 6 次国际耦合模式比较计划 (coupled model intercomparison project phase 6, CMIP6) 中北京气候中心气候系统模型 (Beijing climate center climate system model 2 medium resolution, BCC-CSM2-MR) 发布的 4 种不同气候情景 SSP1-2.6 (低强迫情景)、SSP2-4.5 (中强迫情景)、SSP3-7.0 (中高强迫情景) 以及 SSP5-8.5 (高强迫情景) 下的 2021-2040 年、2041-2060 年、2061-2080 年、2081-2100 年四个时期，共 17 组数据用于暗褐断眼天牛适生区模拟与预测。

环境数据之间的空间相关性会影响建模结果，为提高模型准确性需对环境数据进行筛选 (Wen *et al.*, 2022)。将 19 个气候变量与地理分布数据带入 MaxEnt 3.4.1 软件中运算，根据贡献度排序，使用 ArcGIS 10.8 中提取各坐标点的环境数据并使用 IBM SPSS Statistics 26 对其进行 Pearson 相关性分析，保留相关系数绝对值小于 0.75 的环境变量，当环境变量间相关

系数绝对值大于等于 0.75 时，保留贡献度更高的环境变量用于构建模型（刘超等，2018）。

1.3 MaxEnt 模型构建

将 1.1 筛选得到的暗褐断眼天牛地理分布数据与环境变量导入 MaxEnt 3.4.1 软件，随机选择 25%坐标数据为测试集，75%坐标数据为训练集建立模型，并设置“10 percentile training presence”作为训练集的阈值规则，选择生成 ROC 曲线，程序重复运行 10 次，预测结果模型输出采用 Logistic 形式和 ASC 文件，并选用刀切法评估环境变量对模型的贡献程度，其余参数选择默认。

1.4 暗褐断眼天牛适生等级划分

将 MaxEnt 3.4.1 建模结果导入 ArcGIS 10.8 利用自然间断法将暗褐断眼天牛适生区分为非适生区(0~0.061)、低适生区(0.061~0.214)、中适生区(0.214~0.416)、高适生区(0.416~1.000) 4 个等级（林伟等，2019），得到暗褐断眼天牛在中国的适生区分布范围。

1.5 模型精度检验

根据 MaxEnt 3.4.1 软件生成的 ROC 曲线(receiver operating characteristic, ROC)的 AUC 值(area under curve, AUC)对模型的精度进行评估，AUC 值的范围在[0, 1]之间，AUC 值越大则模型精度越高，当 $AUC < 0.5$ 认为模型预测失败， $0.5 \leq AUC < 0.7$ 认为模型预测结果可被接受， $0.7 \leq AUC < 0.9$ 认为模型预测结果良好， $AUC \geq 0.9$ 认为模型预测结果非常好（王运生等，2007）。

1.6 适生区变化与质心转移

通过 ArcGIS10.8 中 SDM__Toolbox__v2.6 工具箱中的“Distribution Change Between Binary SDMs”工具，计算出不同时期暗褐断眼天牛适生区的变化，SDM__Toolbox__v2.6 工具箱中的“mean center”实现对暗褐断眼天牛当前和未来的质心确定，并将同一情景下暗褐断眼天牛质心合并计算其质心位移情况。

2 结果与分析

2.1 影响暗褐断眼天牛适生区分布的主要环境变量

通过贡献度以及相关性的分析，共筛选得到 8 个环境变量（表 1），包括昼夜温差月均值（Bio2）、等温性（Bio3）、温度年变化范围（Bio7）、最湿季度平均温（Bio8）、最热季节平均温（Bio10）、最冷季节平均温（Bio11）、最干燥月份降水量（Bio14）和降水量变异系数（Bio15），结合全球海拔数据进行暗褐断眼天牛的适生性分析。通过迭代算法在 MaxEnt 模型计算得到 9 种环境变量的贡献值，其中最干燥月份降水量（Bio14）、最冷季节平均温

(Bio11) 对模型贡献比例最高 (表 1)。

表 1 用于暗褐断眼天牛适生区预测建模环境变量的贡献率

Table 1 The contribution rate of environmental variables used to predict the suitable area of *Tetropium fuscum*

环境变量	描述	贡献率 (%)
Environmental variable	Description	Percent contribution
Bio14	最干燥月份降水量 Precipitation of Driest Month	55.1
Bio11	最冷季节平均温 Mean Temperature of Coldest Quarter	17.1
Bio7	温度年变化范围 Temperature Annual Range	9.5
Bio10	最热季节平均温 Mean Temperature of Warmest Quarter	7.3
Bio2	昼夜温差月均值 Mean Diurnal Range	5.7
Bio3	等温性 Isothermality	3.7
Bio8	最湿季度平均温 Mean Temperature of Wettest Quarter	0.8
Bio15	降水季节性 Precipitation Seasonality	0.5
Elev	海拔 Altitude	0.2

由 MaxEnt 模型中的刀切法检验结果, 仅考虑使用单个环境变量时, 对暗褐断眼天牛存在概率影响最大的 4 个环境变量为: 最冷季节平均温 (Bio11)、最干燥月份降水量 (Bio14)、降水量变异系数 (Bio15) 和最热季节平均温 (Bio10) (图 2), 训练得分超过 1.2, 说明这 4 个变量是影响暗褐断眼天牛适生区分布的主要因素, 对模型的预测结果有重要影响。

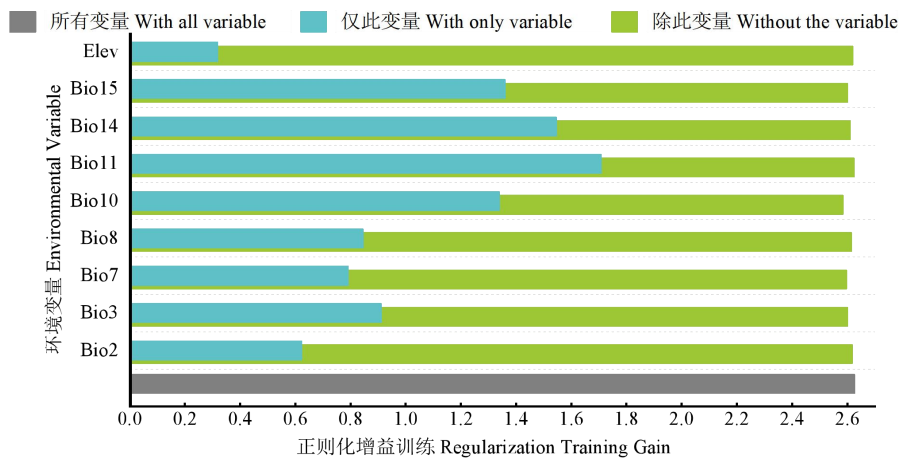


图 2 刀切法分析影响暗褐断眼天牛分布的环境变量

Fig. 2 Analysis of environmental variables affecting the suitability of *Tetropium fuscum* by Jackkni

本研究选取贡献率大于 10% 或正规划训练增益得分超过 1.2 的环境变量作为主要影响暗褐断眼天牛分布的环境变量绘制响应曲线 (图 3), 分别为最冷季节平均温 (Bio11)、最热

季节平均温 (Bio10)、降水量变异系数 (Bio15) 和最干燥月份降水量 (Bio14)。当暗褐断眼天牛存在概率大于 0.416 时, 适生区等级为高适生区时: 最冷季节平均温 (Bio11) 范围在 $-7.00\sim 2.28^{\circ}\text{C}$, 当最冷季节平均温为 -2.36°C 时, 暗褐断眼天牛存在概率达到最大值 (图 3-A); 最热季节平均温 (Bio10) 范围在 $12.81\sim 17.71^{\circ}\text{C}$, 当最热季节平均温为 15.45°C 时, 暗褐断眼天牛存在概率达到最大值 (图 3-B); 降水量变异系数 (Bio15) 范围在 $3.45\sim 32.07\text{ mm}$, 当降水量变异系数为 8.36 mm 时, 暗褐断眼天牛存在概率达到最大值 (图 3-C); 最干燥月份降水量 (Bio14) 范围在 $26.47\sim 98.94\text{ mm}$, 当最干燥月份降水量为 33.89 mm 时暗褐断眼天牛存在概率达到最大值 (图 3-D)。

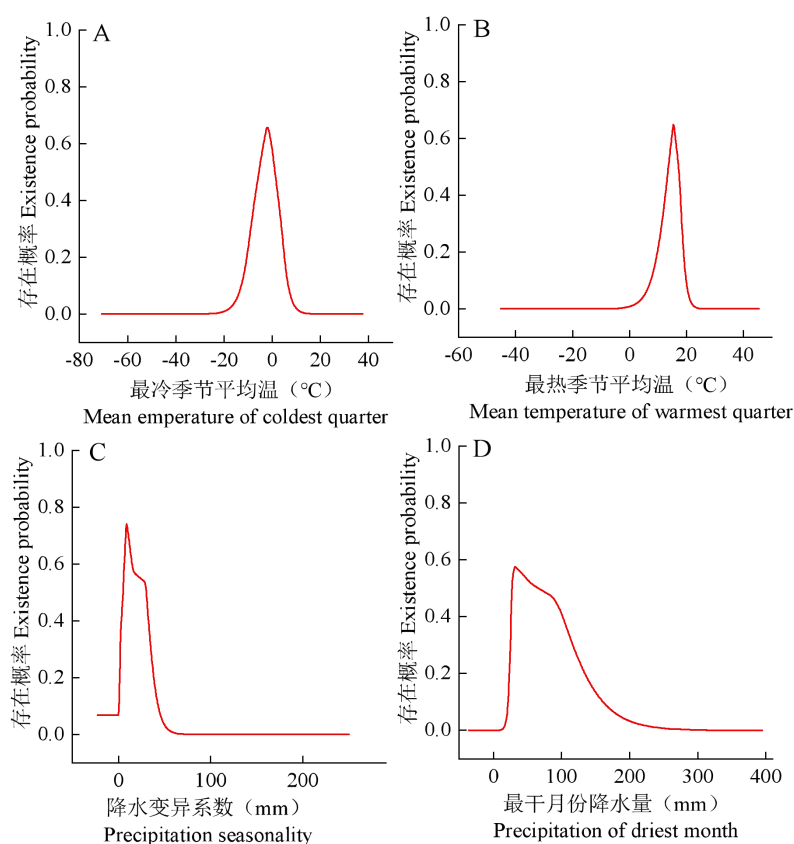


图 3 暗褐断眼天牛对主要环境变量的响应曲线

Fig. 3 Response curves of *Tetropium fuscum* to important environmental variables

2.2 MaxEnt 模型精度评价

根据 MaxEnt 建模预测结果, 其生成的 ROC 曲线的 AUC 平均值为 0.977, 标准差为 0.001 (图 4), 表明此次建模预测结果良好, 准确性较高, 可用于暗褐断眼天牛的适生区分析。

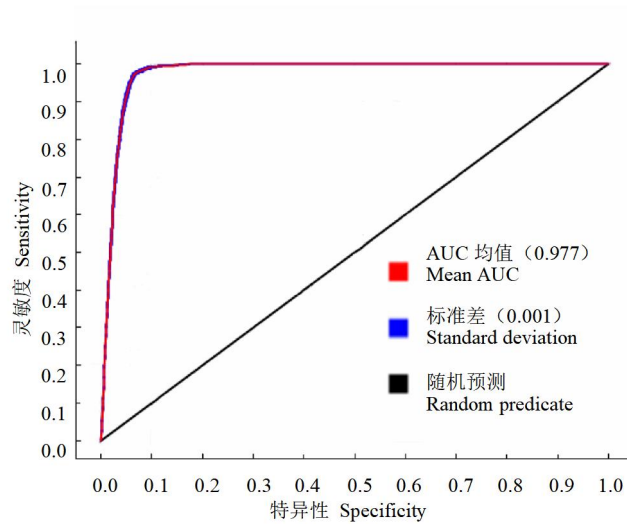


图 4 暗褐断眼天牛 MaxEnt 模型预测结果的 ROC 曲线及 AUC 值

Fig. 4 ROC curves and AUC values Based on MaxEnt model prediction of *Tetropium fuscum*

2.3 当前气候条件下暗褐断眼天牛在我国的潜在地理分布

预测结果表明，暗褐断眼天牛在我国适生区较狭小（图 5），我国共 18 个省、市、自治区存在暗褐断眼天牛适生区，其适生区主要分布在甘肃和陕西南部、湖北西部、重庆、四川中部、贵州、湖南西部和南部、浙江、福建、云南西北部、西藏东南部、台湾、广西与贵州和湖南交界处以及广东北部部分地区，此外新疆、河南也有零星分布。其高适生区在我国也十分狭小，只在陕西与重庆交界处、湖北西部、云南东北部、四川南部、贵州东部、湖南南部、浙江南部和福建南部和台湾中北部有零星分布，中适生区在陕西南部、四川中部、云南东北与西北部、贵州、浙江南部、福建、台湾与湖南和西藏部分地区。其总适生面积为 $67.60 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占我国土地面积的 7.04%，其中高适生区面积为 $1.35 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全国总面积的 0.14%；中适生区面积为 $9.90 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全国总面积的 1.03%；低适生区面积为 $56.35 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全国总面积的 5.87%。

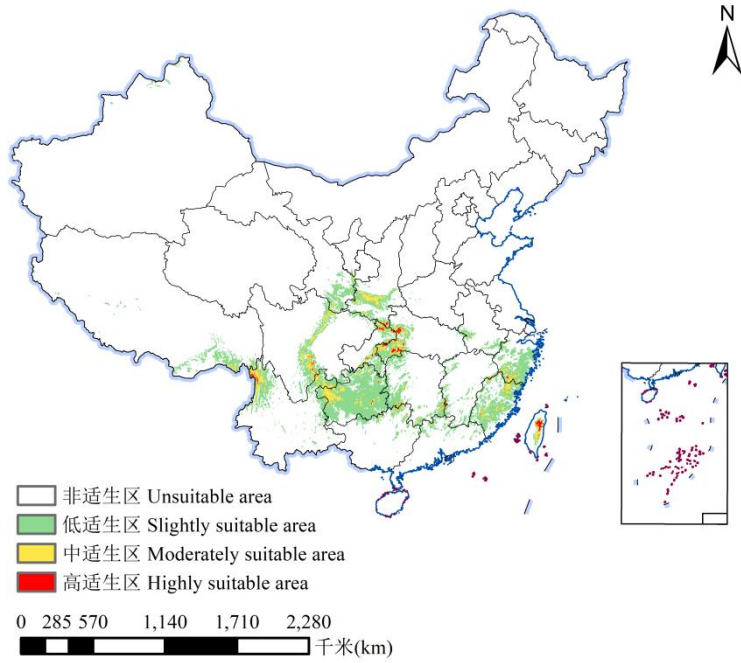


图 5 当前气候条件下暗褐断眼天牛在我国的潜在地理分布

Fig. 5 Potential geographic distribution of *Tetropium fuscum* in China under current climate conditions

注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2767 号的标准地图制作，底图无修改。Note: This map was based on the standard map with the review number GS(2023)2767 downloaded from the Standard Map Service website of the National Bureau of Surveying and Mapping Geographic Information. The base map had not been modified.

2.4 未来气候条件下暗褐断眼天牛在我国的潜在地理分布

未来不同气候情境下暗褐断眼天牛在我国的适生区分布变化不大，仍然集中分布在华东、华南、西南地区，黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、北京、天津、河北、山西、山东和海南是其稳定的非适生区，不同气候情景之间的变化趋势存在差异（图 6）。

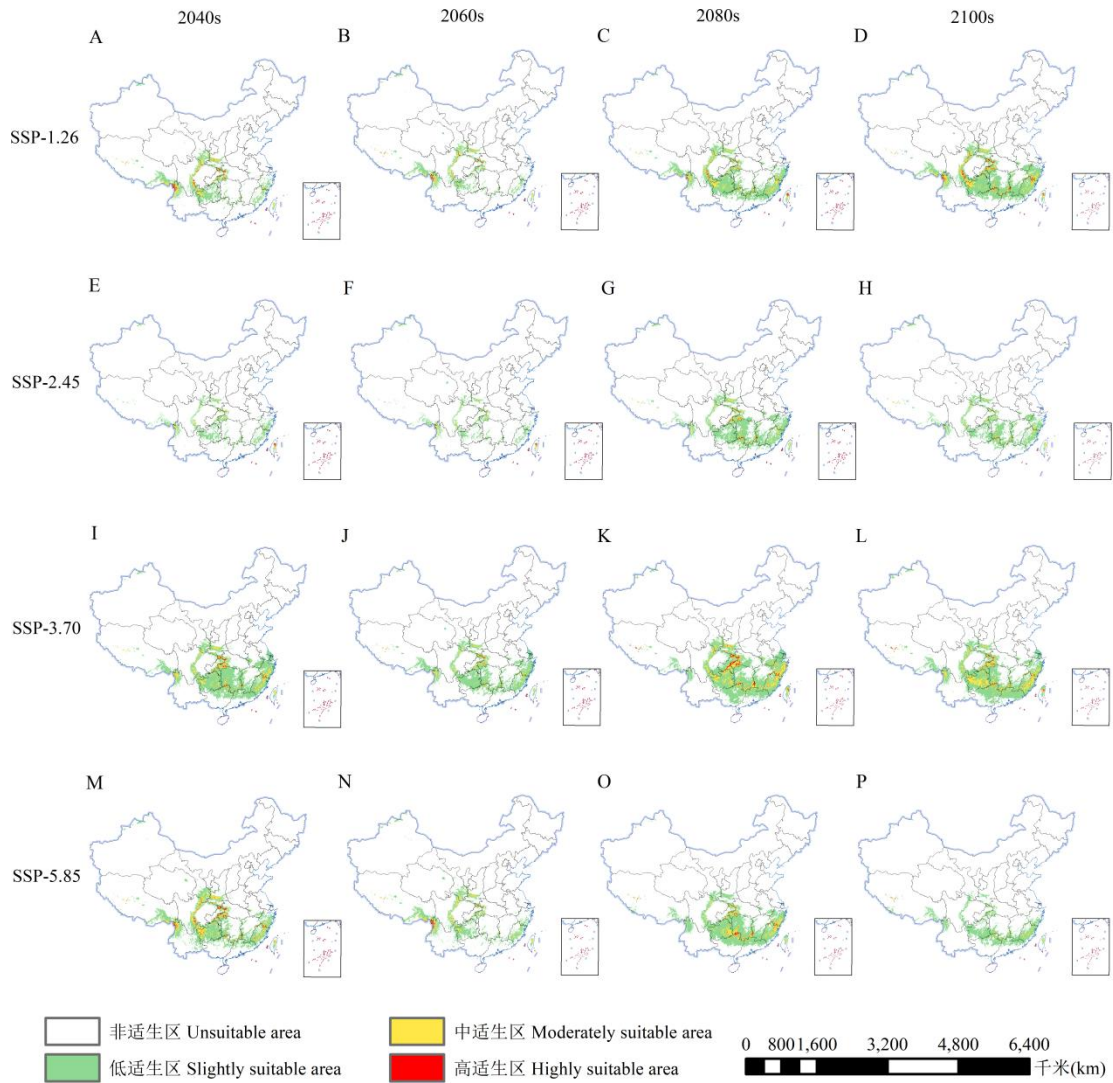


图6 未来气候 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP-5.58 情景下不同时期暗褐断眼天牛在我国潜在适生区

Fig. 6 Potential suitable area of *Tetropium fuscum* in China under future climate and different climatic scenarios, including SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 and SSP-5.58.

注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2767 号的标准地图制作，底图无修改。Note: This map was based on the standard map with the review number GS(2023)2767 downloaded from the Standard Map Service website of the National Bureau of Surveying and Mapping Geographic Information. The base map had not been modified.

在 SSP1-2.6 情境下，暗褐断眼天牛潜在适生范围呈现先收缩后扩张的趋势，2040 年较当前缩小了 14.29%，2060 年较当前缩小了 38.64%，2080 年较当前扩张了 29.75%，2100 年较当前扩张了 63.42%。在 SSP2-4.5 情境下除 2080 年暗褐断眼天牛潜在适生范围较当前有扩张，其余 3 个时期潜在适生范围较当前都有所收缩，2040 年较当前缩小了 47.19%，2060 年较当前缩小了 58.37%，2080 年较当前扩张了 20.43%，2100 年较当前缩小了 7.80%。

SSP3-7.0 情境下暗褐断眼天牛各时期潜在适生范围较当前都呈扩张趋势，2040 年较当前扩张了 19.44%，2060 年较当前扩张了 18.51%，2080 年较当前扩张了 95.67%，2100 年较当前扩张了 77.93%。SSP5-8.5 情境下，在 2040 年和 2080 年暗褐断眼天牛潜在适生分布呈扩张趋势，较当前分别扩张了 52.54%和 49.70%；2060 年和 2100 年暗褐断眼天牛在我国潜在适生分布呈收缩趋势，较当前分别收缩了 14.36%和 17.32%（图 6，表 2）。

表 2 未来气候下暗褐断眼天牛潜在适生区面积 ($\times 10^4 \text{ km}^2$)

Table 2 Potential suitable area of *Tetropium fuscum* in future climate

时期	低适生区	中适生区	高适生区	总面积
Stage	Slightly suitable area	Moderately suitable area	Highly suitable area	Total suitable area
SSP1-2.6-2040s	45.89	10.44	1.61	57.94
SSP1-2.6-2060s	34.00	6.66	0.82	41.48
SSP1-2.6-2080s	73.24	13.24	1.23	87.71
SSP1-2.6-2100s	89.82	18.10	2.55	110.47
SSP2-4.5-2040s	32.01	3.37	0.32	35.70
SSP2-4.5-2060s	25.07	2.82	0.25	28.14
SSP2-4.5-2080s	72.81	7.89	0.71	81.41
SSP2-4.5-2100s	56.46	5.59	0.28	62.33
SSP3-7.0-2040s	98.07	15.86	1.47	115.4
SSP3-7.0-2060s	71.75	7.87	0.49	80.11
SSP3-7.0-2080s	104.55	24.71	3.01	132.27
SSP3-7.0-2100s	96.81	21.94	1.53	120.28
SSP5-8.5-2040s	80.86	19.53	2.73	103.12
SSP5-8.5-2060s	48.29	8.61	0.99	57.89
SSP5-8.5-2080s	85.16	14.72	1.32	101.2
SSP5-8.5-2100s	52.32	3.43	0.14	55.89

2.5 暗褐断眼天牛适生区变化及质心转移

本研究分析了暗褐断眼天牛适生区在未来 4 个不同时期的 4 个不同气候情景的变化情况，未来不同情景下暗褐断眼天牛适生区均有较大的变化（图 7）。

对比当前气候背景下暗褐断眼天牛在我国的适生区面积有 1.06%~102.19%的增加，其中

SSP3-7.0 情境下 2080 年暗褐断眼天牛适生区扩张最多，较当前扩大了 $69.08 \times 104 \text{ km}^2$ ，湖南与江西南部，广西、广东有大面积非适生区转变为适生区；对比当前气候背景下暗褐断眼天牛在我国的适生区面积有 0.78%~61.20%的缩小，其中 SSP2-4.5 情境下 2060 年暗褐断眼天牛适生区收缩最多，较当前缩小了 $41.40 \times 104 \text{ km}^2$ ，贵州适生区大幅度收缩。未来 16 个气候情景下，暗褐断眼天牛在我国云南和贵州的西北部仍存在稳定的适生区（表 3，图 7）。

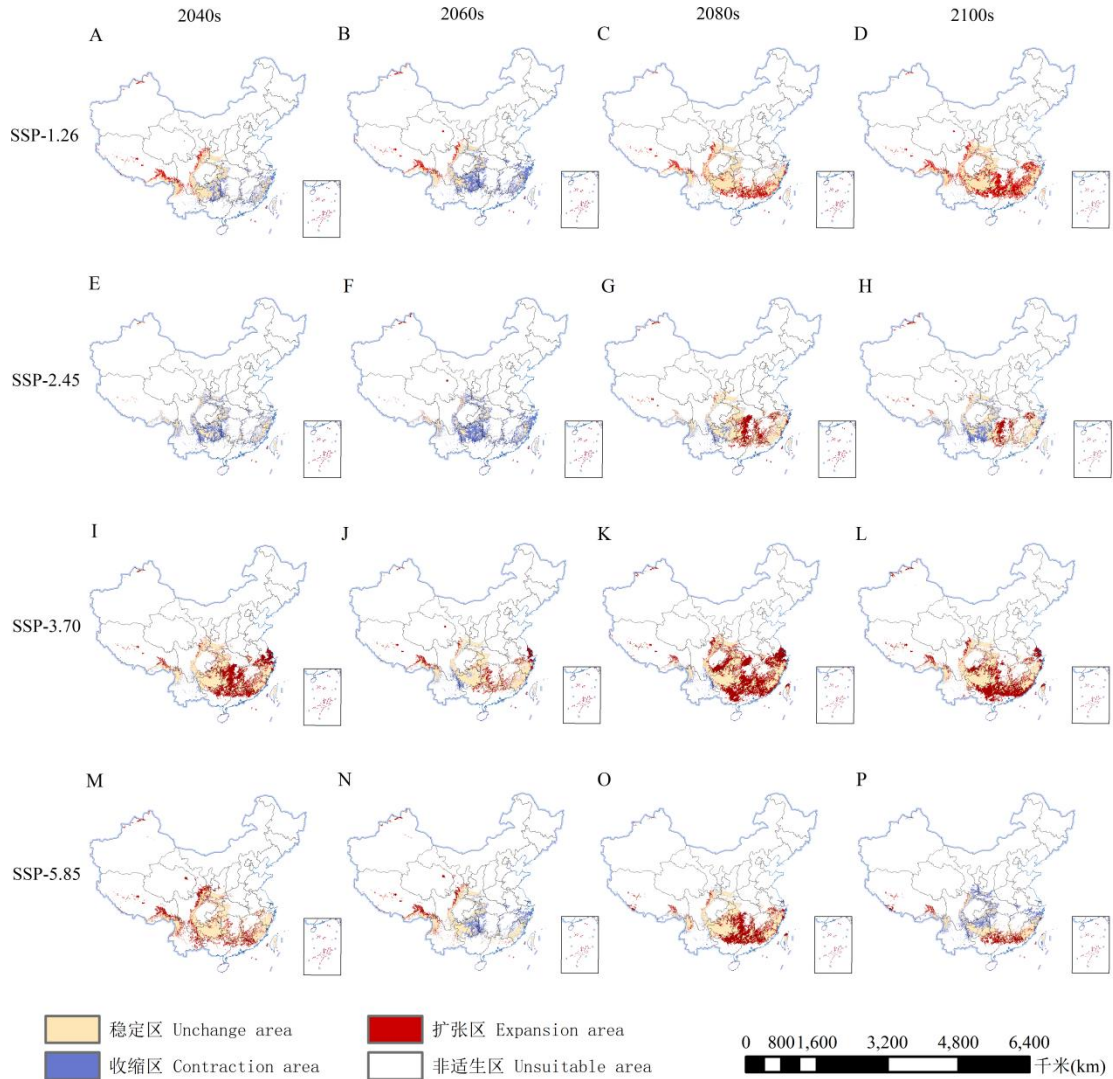


图 7 与当前相比未来气候条件下暗褐断眼天牛潜在适生区的变化

Fig. 7 Changes of potential suitable areas of *Tetropium fuscum* from current to future climatic conditions

注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2767 号的标准地图制作，底图无修改。Note: This map was based on the standard map with the review number GS(2023)2767 downloaded from the Standard Map Service website of the National Bureau of Surveying and Mapping Geographic Information. The base map had not been modified.

表 3 未来气候下暗褐断眼天牛在我国适生区空间变化情况

Table 3 Spatial changes of *Tetropium fuscum* in China under future climate

时期 Stage	面积 Area ($\times 10^4 \text{ km}^2$)			变化 (%) Change		
	扩张区	稳定区	收缩区	扩张率	稳定率	收缩率
	Expansion area	Stable area	Contraction area	Expansion rate	Stable rate	Contraction rate
SSP1-2.6-2040s	10.18	47.73	19.86	15.06	70.61	29.38
SSP1-2.6-2060s	8.20	33.26	34.33	12.13	49.20	50.78
SSP1-2.6-2080s	23.86	63.77	3.82	35.30	94.33	5.65
SSP1-2.6-2100s	43.56	66.86	0.73	64.44	98.91	1.08
SSP2-4.5-2040s	0.72	34.98	32.66	1.06	51.71	48.28
SSP2-4.5-2060s	1.90	26.24	41.40	2.81	38.79	61.20
SSP2-4.5-2080s	24.37	57.04	10.60	36.02	84.32	15.67
SSP2-4.5-2100s	20.65	47.01	15.33	30.52	69.49	22.66
SSP3-7.0-2040s	49.72	65.44	2.15	73.55	96.80	3.18
SSP3-7.0-2060s	19.88	60.01	7.58	29.41	88.77	11.21
SSP3-7.0-2080s	69.08	62.89	4.70	102.19	93.03	6.95
SSP3-7.0-2100s	54.09	65.91	1.69	80.01	97.50	2.50
SSP5-8.5-2040s	36.01	67.12	0.53	53.23	99.22	0.78
SSP5-8.5-2060s	11.70	46.19	21.45	17.29	68.28	31.71
SSP5-8.5-2080s	39.10	62.09	5.55	57.80	91.78	8.20
SSP5-8.5-2100s	14.83	41.06	26.59	21.92	60.69	39.31

暗褐断眼天牛当前气候条件下的适生区质心位于重庆市酉阳土家族苗族自治县,地理坐标为 $28^{\circ}30'46.08''\text{N}$, $108^{\circ}39'35.28''\text{E}$, 未来气候情境下暗褐断眼天牛适生区质心较当前有不同趋势的迁移 (图 8)。

在 SSP1-2.6 情境下, 2040 年暗褐断眼天牛新适生区主要出现在甘肃东南部、四川中部、云南西北部新疆北部以及西藏部分地区, 在贵州东部、湖南西部、湖北西部、江西、安徽南部、浙江、福建和台湾地区暗褐断眼天牛适生区呈碎片状流失, 2040 年暗褐断眼天牛适生区质心位于重庆市荣昌区, 较当前气候情境向西移动约 3.26° 向北移动约 0.94° ; 2060 年暗褐断眼天牛新适生区主要出现在甘肃东南部、青海东部部分地区、四川中部、云南西北部新疆

北部以及西藏部分地区，在贵州东部、湖南西部、湖北西部、江西、安徽南部、浙江、福建和台湾地区暗褐断眼天牛适生区呈碎片状流失，2060年暗褐断眼天牛适生区质心位于四川省眉山市东坡区，较当前气候情境向西移动约 4.86° 向北移动约 1.43° ；2080年暗褐断眼天牛新适生区在甘肃东南部、四川中部、贵州、云南西北部、湖南、广西北部、广东北部、江西南部、福建、浙江新疆北部以及西藏部分地区有破碎状分布，在陕西南部、湖北西部、安徽南部和浙江暗褐断眼天牛适生区有少部分流失，2080年暗褐断眼天牛适生区质心位于贵州省铜仁市印江土家族苗族自治县，较当前气候情境向西移动约 0.11° 向南移动约 0.40° ；2100年暗褐断眼天牛适生区在甘肃东南部、四川中部、贵州、云南西北部、湖南、广西北部、广东北部、江西南部、福建、浙江、安徽南部、新疆北部以及西藏部分地区有破碎状分布，在云南和台湾暗褐断眼天牛适生区有零星流失，2100年暗褐断眼天牛适生区质心位于重庆市秀山土家族苗族自治县，较当前气候情境向东移动约 0.34° 向南移动约 0.25° （图7-A~D，图8，表4）。

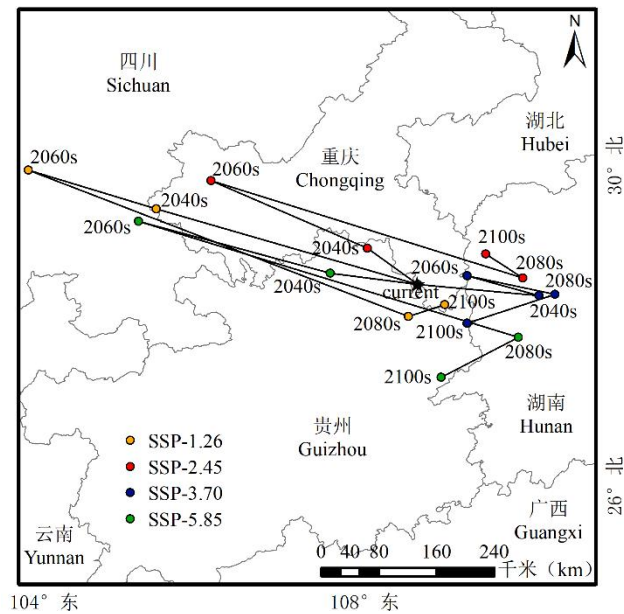


图8 当前与未来暗褐断眼天牛在我国潜在适生区的质心分布

Fig. 8 Current and future centroid distribution of *Tetropium fuscum* in potential suitable areas in China

表 4 未来气候情境下暗褐断眼天牛适生区质心与迁移距离

Table 4 Center and migration distance of the suitable area of *Tetropium fuscum* in the future climate situation

时期 Stage	经度 Longitude	纬度 Latitude	迁移距离 (km) Migration distance
SSP1-2.6-2040s	105.3976	29.4564	339.59
SSP1-2.6-2060s	103.8004	29.9407	506.48
SSP1-2.6-2080s	108.5454	28.1108	41.79
SSP1-2.6-2100s	108.9952	28.2596	42.03
SSP2-4.5-2040s	108.0334	28.9647	77.24
SSP2-4.5-2060s	106.0798	29.8082	288.70
SSP2-4.5-2080s	109.9744	28.5909	131.70
SSP2-4.5-2100s	109.5105	28.8916	93.13
SSP3-7.0-2040s	110.1720	28.3705	151.89
SSP3-7.0-2060s	109.2768	28.6189	62.61
SSP3-7.0-2080s	110.3739	28.3890	171.86
SSP3-7.0-2100s	109.2758	28.0290	95.91
SSP5-8.5-2040s	107.5689	28.6515	109.97
SSP5-8.5-2060s	105.1753	29.3013	357.26
SSP5-8.5-2080s	109.9177	27.8513	142.12
SSP5-8.5-2100s	108.9540	27.3505	119.89

在 SSP2-4.5 情境下，2040 年暗褐断眼天牛只在新疆北部、西藏和四川中部有零星新适生区，在甘肃南部、四川中部、陕西南部、湖北西部、重庆、贵州、湖南西部和南部、江西、安徽南部、镇江、福建和云南西北部暗褐断眼天牛适生区呈碎片状流失，2040 年暗褐断眼天牛适生区质心位于贵州省遵义市务川仡佬族苗族自治县，较当前气候情境向西移动约 0.63°向北移动约 0.45°；2060 年暗褐断眼天牛只在新疆北部、西藏、青海西北部和四川中部有少量零星新适生区，在甘肃南部、四川中部、陕西南部、湖北西部、重庆、贵州、湖南西部和南部、江西、安徽南部、福建和云南西北部暗褐断眼天牛适生区呈碎片状流失，2060 年暗褐断眼天牛适生区质心位于重庆市铜梁区，较当前气候情境向西移动约 2.58°向北移动约 1.29°；2080 年暗褐断眼天牛新适生区主要在湖南、江西、广西北部、广东北部、安徽南部，此外在浙江、福建甘肃南部、新疆北部和西藏部分地区也有零星分布，在陕西南部、湖

北西部、贵州、四川南部、云南和西藏南部暗褐断眼天牛适生区有少部分流失，2080年暗褐断眼天牛适生区质心位于湖南省湘西土家族苗族自治州古丈县，较当前气候情境向东移动约 1.31° 向北移动约 0.08° ；2100年暗褐断眼天牛新适生区主要在湖南、江西、广西北部、广东北部、安徽南部，此外在浙江、福建甘肃南部、青海东北部、新疆北部和西藏部分地区也有零星分布，在陕西南部、湖北西部、贵州、四川南部、云南和西藏南部暗褐断眼天牛适生区有少部分流失，2100年暗褐断眼天牛适生区质心位于湖南省湘西土家族苗族自治州龙山县，较当前气候情境向东移动约 0.85° 向北移动约 0.38° （图7-E~H，图8，表4）。

在SSP3-7.0情境下，2040年暗褐断眼天牛新适生区主要在湖南、江西、广西北部、广东北部、安徽南部，江苏南部、上海、浙江北部，此外在福建、甘肃南部、陕西南部、湖北、四川中部、新疆北部和西藏部分地区也有零星分布，在四川南部、云南、西藏南部暗褐断眼天牛适生区有少量零星流失，2040年暗褐断眼天牛适生区质心位于湖南省湘西土家族苗族自治州泸溪县，较当前气候情境向东移动约 1.51° 向南移动约 0.14° ；2060年暗褐断眼天牛新适生区主要在湖南、江西、广西北部、广东北部、安徽南部，江苏南部、上海、浙江北部、福建、甘肃南部、四川北部、新疆北部和西藏部分地区也有零星分布，在甘肃南部、四川南部、陕西南部、贵州、云南和台湾部分地区暗褐断眼天牛适生区有少部分流失，2060年暗褐断眼天牛适生区质心位于湖南省湘西土家族苗族自治州保靖县，较当前气候情境向东移动约 0.62° 向北移动约 0.11° ；2080年暗褐断眼天牛新适生区主要在重庆、湖南、江西、广西、广东、安徽南部、湖北中部、四川中部和南部、江苏南部、上海、浙江、福建、台湾北部，此外在甘肃南部、陕西南部和新疆北部也有零星分布，在甘肃南部、四川南部、陕西南部、贵州、云南和台湾部分地区暗褐断眼天牛适生区有少部分流失，2080年暗褐断眼天牛适生区质心位于湖南省怀化市沅陵县，较当前气候情境向西移动约 1.71° 向北移动约 0.12° ；2100年暗褐断眼天牛新适生区主要在重庆、湖南、江西、广西、广东、安徽南部、湖北中部、四川中部和南部、江苏南部、上海、浙江、福建、台湾北部，此外在甘肃南部、陕西南部、新疆北部和西藏部分地区也有零星分布，在甘肃南部、陕西南部、四川南部、云南和西藏南部暗褐断眼天牛适生区有少部分流失，2100年暗褐断眼天牛适生区质心位于贵州省铜仁市松桃苗族自治县，较当前气候情境向西移动约 0.62° 向南移动约 0.48° （图7-I~L，图8，表4）。

在SSP5-8.5情境下，2040年暗褐断眼天牛新适生区主要在甘肃南部、陕西南部、湖北西部、四川中部、湖南、江西、广西北部、广东北部、安徽南部、浙江、福建、新疆北部、青海东北地区和西藏部分地区也有零星分布，暗褐断眼天牛适生区只在安徽西部和浙江有少量零星流失，2040年暗褐断眼天牛适生区质心位于贵州省遵义市道真仡佬族苗族自治县，

较当前气候情境向西移动约 1.09°向北移动约 0.14°;2060 年暗褐断眼天牛新适生区在甘肃中部和南部、宁夏南部、四川中部、青海东北部、西藏、云南和新疆北部有零星分布,在陕西南部、四川南部、湖北西部、湖南西部、贵州、江西和安徽南部、浙江、福建、台湾暗褐断眼天牛适生区有部分碎片状流失,2060 年暗褐断眼天牛适生区质心位于四川省内江市隆昌市,较当前气候情境向西移动约 3.48°向北移动约 0.79°;2080 年暗褐断眼天牛新适生区主要在湖南、江西、广西北部、广东北部、浙江、福建、台湾北部,此外在安徽南部、甘肃南部、湖北南部、四川中北、新疆北部、西藏和云南西北部也有零星分布,在甘肃南部、四川南部、陕西南部、云南和台湾南部和西藏南部暗褐断眼天牛适生区有少部分零星流失,2080 年暗褐断眼天牛适生区质心位于湖南省怀化市麻阳苗族自治县,较当前气候情境向东移动约 1.26°向南移动约 0.66°;2100 年暗褐断眼天牛新适生区主要在广西北部、广东北部,此外在福建、四川中北部、西藏也有零星分布,在甘肃南部、陕西南部、湖北西部、重庆、四川南部、云南、西藏南部安徽南部、浙江和台湾暗褐断眼天牛适生区有呈碎片状流失,2100 年暗褐断眼天牛适生区质心位于贵州省铜仁市玉屏侗族自治县,较当前气候情境向东移动约 0.29°向南移动约 1.16°(图 7-M~P,图 8,表 4)。

3 结论与讨论

本研究首次利用 MaxEnt 模型预测了当前和未来气候情景下暗褐断眼天牛在我国的潜在适生区。MaxEnt 模型预测显示最冷季节平均温、最热季节平均温、降水量变异系数和最干月份降水量是影响暗褐断眼天牛分布最主要的因素。目前,全球范围内对暗褐断眼天牛的生物学研究较少,但根据预测结果绘制的响应曲线与暗褐断眼天牛原产地的气候特征基本吻合,预测得到的潜在适生区主要分布在甘肃和陕西南部、湖北西部、重庆、四川中部、贵州、湖南西部和南部、浙江、福建、云南西北部、西藏东南部、台湾等地与其原产地气候特征类似。

SSP1-2.6 和 SSP2-4.5 情境下暗褐断眼天牛在我国适生区都呈现先收缩后扩张的趋势,这说明减缓二氧化碳排放可在一定程度上抑制暗褐断眼天牛的生长,但随着二氧化碳排放的积累引起的气温上升和降雨量增加有利于该虫的生长。SSP3-7.0 情境下,暗褐断眼天牛潜在适生区较当前气候背景下有不同程度的扩张。SSP5-8.5 情境下,暗褐断眼天牛在我国适生区呈现先增加后降低,又增加又降低的趋势,这可能是由于二氧化碳排放量过大导致环剧烈境变化,从而使该虫在我国潜在适生区变化剧烈。

暗褐断眼天牛成虫飞行能力很强,可依靠自身飞行能力进行传播,也可通过原木和木质包装等实现远距离传播。但自 1990 年左右暗褐断眼天牛进入加拿大至 2022 年仅传播了 150

km, 原因可能是由于另一种北美本地森林害虫红棕断眼天牛 *Tetropium cinnamopterum* 与暗褐断眼天牛释放的信息素成分相同, 影响了暗褐断眼天牛的交配行为, 从而抑制了暗褐断眼天牛种群的繁衍与传播 (Rhains *et al.*, 2011; Anderson *et al.*, 2022)。红棕断眼天牛当前只分布在北美洲, 这也意味着暗褐断眼天牛一旦传入我国可能会造成更大的生态破坏与经济损失。我国幅员辽阔, 森林面积达 2.31 亿 ha, 从平原到高山几乎所有的林区都可见到针叶树的广泛存在, 可为暗褐断眼天牛提供丰富的寄主资源。根据预测结果, 我国贵州、福建、四川中南部以及云南西北部是暗褐断眼天牛的稳定适生区, 加强对上述地区暗褐断眼天牛的监测预警对我国森林生态安全意义重大。

MaxEnt 模型兼具准确性和便捷性两大特点 (杨淞杰等, 2024), 现已成为使用最为广泛的生态位模型。MaxEnt 模型模拟结果为基础生态位, 只反应物种和环境因子之间的单一关系, 而基础生态位通常比实际生态位大 (蔡静芸等, 2014)。本研究使用 MaxEnt 模型预测暗褐断眼天牛潜在适生区时, 将气候数据与海拔作为主要考虑因素, 还有一些对暗褐断眼天牛定殖扩散的变量尚未包括在模型内, 如种间作用、人为干扰、寄主分布等 (Boulangeat *et al.*, 2013), 在后续研究中应加入其他影响因素对其进行综合预测分析。暗褐断眼天牛虽然还未在我国发生, 但我国拥有丰富的森林资源, 一旦进入将对我国生态、经济甚至社会的稳定造成严重影响。本研究结果对暗褐断眼天牛的预警体系的构建和检疫措施的制定具有重要意义。

参考文献 (References)

- Anderson JL, Heard SB, Sweeney J, *et al.* Mate choice errors may contribute to slow spread of an invasive Eurasian longhorn beetle in North America [J]. *NeoBiota*, 2022, 71: 71-89.
- Boulangeat I, Grabel D, Thuiller W. Accounting for dispersal and biotic interaction to disentangle the drivers of species distributions and their abundances [J]. *Ecology Letters*, 2012, 15 (6): 584-593.
- Cai JY, Zhang MM, Su HJ, *et al.* Application of ecological niche models for selection of species habitat [J]. *Journal of Economic Animal*, 2014, 18 (1): 47-52, 58. [蔡静芸, 张明明, 粟海军, 等. 生态位模型在物种生境选择中的应用研究 [J]. *经济动物学报*, 2014, 18 (1): 47-52, 58]
- Liu C, Huo HL, Tian LM, *et al.* Potential geographical distribution of *Pyrus calleryana* under different climate change scenarios based on the MaxEnt model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29 (11): 3696-3704. [刘超, 霍宏亮, 田路明, 等. 基于 MaxEnt 模型不同气候变化情景下的豆梨潜在地理分布 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29 (11): 3696-3704]
- Flaherty L, Quiring D, Pureswaran D, *et al.* Evaluating seasonal variation in bottom-up and top-down forces and their impact on an exotic wood borer, *Tetropium fuscum* (Coleoptera: Cerambycidae) [J]. *Environmental Entomology*, 2013, 42 (5): 957-966.
- Jacobs K, Seifert KA, Harrison KJ, *et al.* Identity and phylogenetic relationships of ophiostomatoid fungi associated with invasive and

- native *Tetropium* species (Coleoptera: Cerambycidae) in Atlantic Canada [J]. *Canadian Journal of Botany*, 2003, 81 (4): 316-329.
- Jia D, Xu CQ, Liu YH, *et al.* Potential distribution prediction of *Rhopalosiphum oxyacanthae* in China based on MaxEnt model [J]. *Journal of Plant Protection*, 2020, 3, 528-536. [贾栋, 徐朝茜, 刘艳红, 等. 基于 MaxEnt 模型预测苹红缢管蚜在中国的适生区 [J]. 植物保护学报, 2020, 3: 528-536]
- Ju RT, Li H, Shi ZR, *et al.* Progress of biological invasions research in China over the last decade [J]. *Biodiversity Science*, 2012, 20 (5): 581-611. [鞠瑞亭, 李慧, 石正人, 等. 近十年中国生物入侵研究进展 [J]. 生物多样性, 2012, 20 (5): 581-611]
- Hong J, Fan XH, Li WM. History and current situation of pest risk analysis (PRA) in China [J]. *Plant Quarantine*, 2002, 16 (1): 28-32. [洪俊, 范晓虹, 李尉民. 我国有害生物风险分析 (PRA) 的历史与现状 [J]. 植物检疫, 2002, 16 (1): 28-32]
- Lin W, Xu MF, Quan YB, *et al.* Potential geographic distribution of *Spodoptera frugiperda* in China based on MaxEnt model [J]. *Plant Quarantine*, 2019, 33 (4): 69-73. [林伟, 徐淼锋, 权永兵, 等. 基于 MaxEnt 模型的草地贪夜蛾适生性分析 [J]. 植物检疫, 2019, 33 (4): 69-73]
- Ma WD, Xu C, He DM. The Beijing capital international airport authority intercepted *Tetropium velutinum* and *Tetropium fuscum* for the first time [J]. *Plant Quarantine*, 2000, 4: 195. [马卫东, 徐春, 何德敏. 首都机场局首次截获铁杉断眼天牛和暗褐断眼天牛 [J]. 植物检疫, 2000, 4: 195]
- Matyukhina DS, Miquelle DG, Murzin AA, *et al.* Assessing the influence of environmental parameters on Amur tiger distribution in the Russian Far East using a MaxEnt modeling approach [J]. *Achievements in the Life Sciences*, 2014, 8 (2): 95-100.
- O'Connor B, Bojinski S, Rösli C, *et al.* Monitoring global changes in biodiversity and climate essential as ecological crisis intensifies [J]. *Ecological Informatics*, 2020, 55: 101033.
- Phillips SJ, Dudík M, Schapire RE. A Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling [C]. New York: Proceedings of the Twenty-first International Conference on Machine Learning, 2004: 83.
- Rhainds M, Mackinnon WE, Porter KB, *et al.* Evidence for limited spatial spread in an exotic longhorn beetle, *Tetropium fuscum* (Coleoptera: Cerambycidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2011, 104 (6): 1928-1933.
- Sun DR, Wu ZJ, Ding J, *et al.* Prediction of suitable areas and assessment of the introduction risk of *Monochamus galloprovincialis* [J]. *Journal of Plant Protection*, 2023, 50 (6): 1472-1479. [孙冬瑞, 吴卓瑾, 丁俊, 等. 樟子松墨天牛在中国的适生区预测及传入风险评估 [J]. 植物保护学报, 2023, 50 (6): 1472-1479]
- Wang YY. Report of Pest Risk Analysis of Wood Packaging Material Associated with Consignment Imported into China [D]. Beijing: Beijing Forestry University Master Thesis, 2007. [王益愚. 中国进口货物木质包装传带有害生物风险分析报告 [D]. 北京: 北京林业大学硕士论文, 2007]
- Wang Y, Xie B, Wan F, *et al.* "Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species" potential distribution models [J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15 (4): 365-372. [王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型

中的应用 [J]. 生物多样性, 2007, 15 (4): 365-372]

Yang SJ, Liu G, Feng CH, *et al.* Prediction of the potential geographical distribution of *Diaphania pyloalis* [J]. *Plant Protection*, 2024, 50

(4): 69-79, 107. [杨淞杰, 刘刚, 封传红, 等. 气候变化情景下桑螟在中国的潜在适生区分布预测 [J]. 植物保护, 2024, 50 (4): 69-79, 107]

Zhang SF, Ma WD, Xu C, *et al.* *Tetropium castaneum* (L.) and *Tetropium fuscum* [J]. *Plant Quarantine*, 2001, 2: 94-97. [张生芳, 马卫东,

徐春, 等. 光胸断眼天牛与暗褐断眼天牛 [J]. 植物检疫, 2001, 2: 94-97]

Zhu GP, Liu GQ, Bu WJ, *et al.* Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation [J]. *Biodiversity Science*, 2013,

21 (1): 90-98. [朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 等. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用 [J]. 生物多样性, 2013, 21 (1): 90-98]