

DOI: 10.20103/j.stxb.202302200280

张秀芸, 伍文慧, 梁英梅. 落叶松枯梢病在中国的适生性. 生态学报, 2024, 44(7): 3027-3037.

Zhang X Y, Wu W H, Liang Y M. Prediction of potential suitable distribution of shoot blight of larch (*Neofusicoccum laricinum*) in China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 3027-3037.

# 落叶松枯梢病在中国的适生性

张秀芸<sup>1</sup>, 伍文慧<sup>1</sup>, 梁英梅<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083

<sup>2</sup> 北京林业大学博物馆, 北京 100083

**摘要:** 落叶松枯梢病 (*Neofusicoccum laricinum*) 是威胁落叶松人工林的检疫性林木病害。明确当前该病在中国的潜在适生区及其在未来对气候变化的响应, 揭示影响该病害发生流行的主导环境变量, 对落叶松枯梢病的早期预警及防治具有重要意义。基于落叶松枯梢病分布数据和环境数据, 利用 ENMTools、R 和刀切法 (Jack knife test) 筛选分布点数据和环境因子, 通过 MaxEnt、ArcGIS、SDMTTools 等技术预测当前和未来气候条件下落叶松枯梢病在中国的潜在适生区, 划分病害适生等级并计算各适生等级面积占比, 绘制质心转移轨迹。结果表明: (1) 建立的落叶松枯梢病在中国的潜在适生区预测模型具有高精度性和可信度 (不同年份和不同气候模式下的 AUC 值均大于 0.9); (2) 影响落叶松枯梢病分布的主要环境变量为年平均气温、最暖季度降水量、年降水量和最暖季度平均温度; (3) 当前气候模式下落叶松枯梢病在中国的潜在适生区面积占中国国土总面积的 18.02%, 中高适生区集中分布在中国辽宁东南部、吉林东部、黑龙江大部分地区、内蒙古东北部; (4) 在三种不同气候条件下 (ssp126、ssp245、ssp585), 未来落叶松枯梢病在中国的潜在适生区面积与现代气候条件相比均有所减少, 其质心由东北向华北、西南地区转移。落叶松枯梢病一旦发生将会造成不可逆的生态灾难和经济损失, 因此本研究对落叶松枯梢病在中国的潜在适生区进行预测和分析, 研究结果对合理区划落叶松枯梢病潜在入侵风险地、加强重点地区的检疫监测、及时制定有效的防治手段, 以及对于发生区的监测和防治与未发生区的早期预警和监管具有重要意义。

**关键词:** 落叶松枯梢病; 最大熵模型; 潜在适生区; 气候变化

## Prediction of potential suitable distribution of shoot blight of larch (*Neofusicoccum laricinum*) in China

ZHANG Xiuyun<sup>1</sup>, WU Wenhui<sup>1</sup>, LIANG Yingmei<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

<sup>2</sup> Museum of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

**Abstract:** Shoot blight of larch caused by *Neofusicoccum laricinum* (Sawada) Hattori & Nakash is a serious disease and exerts a significant impact on the production of larch plantation in China. It is of great significance to carry out the prediction of potentially suitable area and risk analysis of the disease, so as to take timely and effective control measures for the disease, and finally reduce the risk level and prevent the disease spreading. This study was conducted to investigate the environmental variables affecting the distribution of shoot blight of larch and the geographical distribution under current and future climate conditions. Based on 63 distribution points of shoot blight of larch and 10 environmental factors, the distribution of potentially suitable areas of shoot blight of larch in China in different spans of modern (1970—2000), the 2030s, 2050s, 2070s, and 2090s scenarios was predicted using a combination of the MaxEnt model, SDMTTools and ArcGIS

**基金项目:** 国家重点研发计划 (2021YFD1400300)

**收稿日期:** 2023-02-20; **网络出版日期:** 2024-01-12

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liangym@bjfu.edu.cn

# 本研究尚缺中国港澳台统计数据。

software. The area under the receiver operating characteristic curve (AUC) value was used to evaluate the accuracy of the prediction model. The results showed that: (1) the average AUC values in different years and climates of the predicted result of MaxEnt model were more than 0.9, indicating that the MaxEnt model is accurate and suitable for predicting the potential distribution of shoot blight of larch in China. (2) The major environmental variables affecting the distribution shoot blight of larch in China included: annual mean temperature, precipitation of warmest quarter, mean temperature of warmest quarter, and annual precipitation. The cumulative contribution of the main environmental factors was 59.1%. (3) Under the near climatic model, the total suitable area of potential was approximately 1.728 million km<sup>2</sup>, covering 18.02% of the total land area of China. The areas surrounding the southeastern Liaoning, eastern Jinlin, most of Heilongjiang and Northeastern the Inner Mongolia were moderately and highly suitable areas for shoot blight of larch. (4) The potentially suitable areas of shoot blight of larch under the three climatic scenarios (ssp126, ssp245, ssp585) of the 2030s, 2050s, 2070s, 2090s will shrink to varying degrees. The prediction results showed that centroid movement track of the suitable area of shoot blight of larch would be within the Inner Mongolia, and there would be a trend of moving to Southwest and North China. The results showed that the shoot blight of larch had the risk of invasion and spread in China, which will bring irreversible ecological disaster. Therefore, it is essential to reasonably delineate the potentially dangerous invasion sites for the disease, strengthen relevant detection and quarantine in key areas, and develop the effective control measures in a timely manner to eliminate the possibility of invasion at source.

**Key Words:** *Neofusicoccum laricinum*; suitable areas; MaxEnt model; climate change

落叶松喜光、耐寒、适应性强且生长迅速,自然分布于中国东北、华北、内蒙古及西南林区,是大面积人工造林的主要树种。由落叶松新壳梭孢菌(*Neofusicoccum laricinum* (Sawada) Hattori & Nakash)引致的落叶松枯梢病<sup>[1]</sup>主要为害落叶松幼林,引起新梢枯死,连年受害造成树冠秃顶,对中国落叶松人工林的营造构成严重的威胁。落叶松枯梢病于1938年在日本北海道发现,此后在朝鲜、菲律宾、英国、加拿大等国有不同程度的分布和危害<sup>[2]</sup>。在我国,该病1973年在吉林省首次被发现,其后相继在东北地区蔓延并造成巨大经济损失,现已在我国多个省市有所报道。该病是一种危险性传染病,一旦入侵落叶松林将给树木生长带来毁灭性的损失<sup>[3]</sup>。为此,该病被列入农村农业部等六部门发布的“重点管理外来入侵物种名录”中的五种植物病害之一。落叶松枯梢病的病原菌在林间主要通过气流传播,长距离跨区域传播主要靠苗木调运,而病害的发生与林地气候环境有密切关系。因此,基于中国落叶松林的分布特点,结合气候环境变化,分析该病害的扩散风险及其分布格局,对控制该病害的扩散蔓延具有指导意义。

全球气温在过去的100年里上升了大约0.6℃<sup>[4]</sup>,根据第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)到21世纪末全球气候变化还会不断加剧。气候变化主要在大尺度上决定物种分布并使得物种分布范围发生变化,如随着气候变暖许多陆生生物的分布范围向高海拔和高纬度转移<sup>[5-6]</sup>。气候变化也可以通过影响植物病原及其寄主植物从而改变病害的空间分布、发病率和严重程度。在过去30年里,有超过100篇的文献及综述关注到气候变化对植物病原和植物疾病风险的影响<sup>[7]</sup>。气候变化对不同植物病害的适生范围变化的影响存在差异,如引起植物病害适生范围缩小,增加或转移等<sup>[8]</sup>。而落叶松枯梢病如何响应未来气候变化尚不明确,因此,本研究通过构建生态位模型对其进行合理预测。

生态位模型(ENMs)被广泛应用于基于物种分布和环境变量的特定机器算法来评估物种的生态位<sup>[9]</sup>,从而确定物种潜在分布区。目前常用的生态位模型包括GARP、BIOCLIM、DOMAIN及MaxEnt<sup>[10]</sup>。其中最大熵模型(MaxEnt)<sup>[11]</sup>是基于最大熵理论的统计模型<sup>[12]</sup>,具有所需样本量要求不严苛、预测结果具有较高精度和可信度的优点,被广泛应用于入侵生物风险预测评估<sup>[13]</sup>、珍稀动植物生境适宜性评价<sup>[14-15]</sup>以及植物病虫害风险预测等方面。如通过预测柑橘黄龙病<sup>[16]</sup>(*Candidatus Liberibacter asiaticus* and *Candidatus Liberibacter africanus*)、柑橘轮斑病<sup>[17]</sup>(*Pseudofabrea citricarpa*)及苹果腐烂病<sup>[18]</sup>(*Valsa mali*)的潜在分布区,为柑橘和苹

果的生产提供重要保障。此外,通过 MaxEnt 分析松材线虫病<sup>[19]</sup> (*Bursaphelenchus xylophilus*) 和松针红斑病<sup>[20]</sup> (*Dothistroma pini*) 的发生风险,为及时预防和管理松树病害提供了指导。落叶松枯梢病作为国家重点管理的两种林木病害之一,对其在中国的流行及适生性分析还很缺乏,因此对落叶松枯梢病在中国的潜在适生区进行预测和分析显得尤为重要和迫切。在本研究中,基于落叶松枯梢病分布数据和环境数据,利用 ENMTTools、R、MaxEnt、ArcGIS、SDMTools 等技术,确定影响落叶松枯梢病分布的重要环境因子,明确当前气候下落叶松枯梢病在中国的潜在风险区、气候变化对落叶松枯梢病分布区的影响及其扩散风险,以期为落叶松枯梢病未分布区的检疫和早期预警提供理论依据,以及时阻止病害扩散蔓延。

## 1 材料和方法

### 1.1 分布点数据

落叶松枯梢病的地理分布数据来自课题组于 2021—2022 年间在黑龙江塔河县、内蒙古阿里河林场、河北省塞罕坝、辽宁省海城市、辽宁省抚顺县、吉林省敦化市、吉林省延吉市、宁夏六盘山、陕西安康县等地对落叶松枯梢病发生情况开展实地调查的基础上,结合相关文献和资料中记录的分布信息以及相关林业部门关于落叶松枯梢病的分布数据获得。为避免由于病害分布点聚集而导致的模型过度拟合,利用 ENMTTools<sup>[21]</sup> 依据气候图层分辨率筛选分布点数据<sup>[14]</sup>,得到用于模型模拟的落叶松枯梢病地理分布点 63 个。最后将数据在 Excel 中按照物种名称、经度、纬度整理,以 csv 格式保存备用。其中,东经和北纬为正,西经和南纬为负<sup>[22]</sup>。

### 1.2 环境变量数据

与落叶松枯梢病发生流行具有密切联系的环境因素主要是温度和降水,而 19 个生物气候变量在描述年度趋势和季节性的温度和降水时具有重要生物学意义。因此环境变量选择来自 WorldClim 数据库 (<https://www.worldclim.org/>) 中的 19 个气候因子。未来数据选择第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6) 中 BCC-CSM2-MR 模型的预测数据<sup>[14]</sup>,选用新排放情景共享社会经济路径 (SSPs) 中的 3 种情景,即绿色发展路径 (ssp126)、中等发展路径 (ssp245)、高速发展路径 (ssp585) 情景进行分析模拟<sup>[21]</sup>,探究在未来不同发展路径下落叶松枯梢病在中国的潜在地理分布。数据空间分辨率为 5arc-minutes。

将数据利用 ArcGIS 进行掩膜提取、格式转化 (ASCII) 和采样<sup>[23]</sup> 等处理,用于模型模拟和变量间相关性大小的计算。为避免环境数据间过度拟合,对 19 个环境变量进行筛选。首先利用 63 个落叶松枯梢病分布点和 19 个环境变量在 MaxEnt 模型中运行一次,利用刀切法得到 19 个环境变量的贡献率,然后用 R 计算各环境变量间的相关性大小。当变量间的相关系数绝对值大于 0.85 时,去除贡献率小的变量<sup>[24—25]</sup>,最终筛选出 10 个环境变量用于模型模拟。

### 1.3 最大熵模型构建及精度检验

将落叶松枯梢病分布点数据 (csv) 和环境变量 (asc) 加载到 MaxEnt 中分析落叶松枯梢病在中国的潜在适生区。模型参数设置如下:随机选取 75% 和 25% 的物种分布数据作为训练集 (Training data) 和测试集 (Testing data),输出格式 (Output format) 选择 Logistic,重复训练次数 (Replicates) 10 次,重复迭代方式 (Replicated run type) 选择 Subsample。用刀切法计算环境变量对预测模型的贡献率,运行创建响应曲线 (Create response curves)。此外,MaxEnt 模型的准确性和预测精度受调控倍频和特征组合两个参数的影响较大<sup>[26]</sup>,本研究通过 R 包 kuenm 优化参数避免模型过度拟合<sup>[27]</sup>。在此测试了 MaxEnt 模型中 40 个调控倍频 [0—4] 和 29 种特征组合 [L, Q, P, T, H, LQ, LP, LT, LH, QP, QT, QH, PT, PH, TH, LQP, LQT, LQH, LPT, LPH, QPT, QPH, QTH, PTH, LQPT, LQPH, LQTH, LPTH, LQPTH] 等 1160 种参数组合,最后选择 delta AICc (The minimum information criterion AICc value. delta. AICc) 最小值对应的参数组合建立 MaxEnt 模型<sup>[28—29]</sup>。

利用受试者工作特征曲线下面积 (AUC) 评价预测结果的精确度,当 AUC 值为 0.5—0.6 时,模型预测视为失败;AUC 值为 0.6—0.7 时,模型预测视为较差;AUC 值为 0.7—0.8 时,模型预测视为一般;AUC 值为 0.8—0.9 时,模型预测视为好;AUC 值大于 0.9 时,模型预测视为非常好<sup>[30]</sup>。

1.4 ArcGIS 处理

将 MaxEnt 模型运行的结果导入 ArcGIS 中,进行格式转换和重分类<sup>[24]</sup>。采用等间距分割法<sup>[31]</sup>将落叶松枯梢病的适生等级划分为四类,分别为非适生区(0—0.2)、低适生区(0.2—0.4)、中适生区(0.4—0.6)、高适生区(0.6—1)。继而对各气候模式下的结果图层利用适生区栅格属性表 Attribute Table 中的图形比例换算得到各适生等级的面积占比。使用 ArcGIS 插件 SDMTTools 中的质心变化(Centroid Change)功能来模拟未来适生区与当前适生区相比的迁移方向与路径<sup>[32]</sup>。

2 结果与分析

2.1 模型优化参数与精度评估

基于筛选出的 63 个落叶松枯梢病分布点和 10 个环境变量,运用 R 语言 kuenm 包筛选 MaxEnt 模型最优参数,结果如下(表 1)。落叶松枯梢病在中国的适生区预测模型的最优参数组合为:组合特征=LQ、调控倍数=0.8,在此参数组合下最小信息准则 AICc 最小为 0,低于默认值。

利用 AUC 值评估模型精度。对不同年份和不同气候情景下落叶松枯梢病的潜在分布区进行预测。结果表明训练集 AUC 值和测试集 AUC 值均大于 0.9,显著高于随机模型 AUC 值(0.5)(表 2)。说明该模型预测结果有较高的准确度和可信度,即落叶松枯梢病分布模拟结果与可能的实际分布范围存在高度一致性。

表 1 MaxEnt 模型 kuenm 优化评价指标

Table 1 Evaluation metrics of MaxEnt model generated by kuenm

| 类型<br>Type   | 组合特征<br>Feature combination | 调控倍数<br>Regulated magnification | 最小信息准则 AICc<br>The minimum information criterion AICc value |
|--------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 默认 Default   | LQPH                        | 1                               | 151.75                                                      |
| 优化 Optimized | LQ                          | 0.8                             | 0                                                           |

LQPH: 线性特征 (Linear features, L) + 二次型特征 (Quadratic features, Q) + 乘积型特征 (Product features, P) + 片段化特征 (Hinge features, H); LQ: 线性特征 (Linear features, L) + 二次型特征 (Quadratic features, Q)

表 2 MaxEnt 模型预测精度 AUC 值

Table 2 AUC of prediction accuracy of MaxEnt model

| 年代<br>Decade      | 气候情景<br>Climate scenario | 训练集 AUC 值<br>AUC value of training data | 测试集 AUC 值<br>AUC value of test data |
|-------------------|--------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|
| 1970—2000         |                          | 0.9397                                  | 0.9348                              |
| 2030s (2021—2040) | ssp126                   | 0.9378                                  | 0.9379                              |
|                   | ssp245                   | 0.9378                                  | 0.9379                              |
|                   | ssp585                   | 0.9378                                  | 0.9379                              |
| 2050s (2041—2060) | ssp126                   | 0.9378                                  | 0.9379                              |
|                   | ssp245                   | 0.9378                                  | 0.9379                              |
|                   | ssp585                   | 0.9378                                  | 0.9379                              |
| 2070s (2061—2080) | ssp126                   | 0.9378                                  | 0.9379                              |
|                   | ssp245                   | 0.9378                                  | 0.9379                              |
|                   | ssp585                   | 0.9378                                  | 0.9379                              |
| 2090s (2081—2100) | ssp126                   | 0.9378                                  | 0.9379                              |
|                   | ssp245                   | 0.9378                                  | 0.9379                              |
|                   | ssp585                   | 0.9378                                  | 0.9379                              |

AUC:受试者工作特征曲线下面积 Area under the receiver operating characteristic curve; SSP:共享社会经济路径 Shared Socioeconomic Pathways

2.2 影响落叶松枯梢病分布的主要环境变量

依据模型运行结果(表 3),对落叶松枯梢病分布贡献率较大的环境变量为年平均气温(bio1)、最暖季度降水量(bio18)、等温性(bio3)、温度季节性变化标准差(bio4)、最干季度平均温度(bio9),其累计贡献率为

94.4%;根据各环境因子的 AUC 值(图 1)表明最暖季度平均温度(bio10)、年降水量(bio12)、年平均气温(bio1)、最湿季度降水量(bio16)、等温性(bio3)对落叶松枯梢病在中国的潜在适生分布预测影响较大。综合以上分析表明年平均气温(bio1)、最暖季度降水量(bio18)、年降水量(bio12)、最暖季度平均温度(bio10)在预测落叶松枯梢病中国潜在地理分布中起着主导作用。

表 3 主要的的环境变量贡献率  
Table 3 Percent contribution of major environmental variables

| 环境变量<br>Environmental variable | 描述<br>Description                            | 贡献值/%<br>Percentage contribution |
|--------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------|
| Bio1                           | 年平均气温 Annual Mean Temperature                | 28.6                             |
| Bio18                          | 最暖季度降水量 Precipitation of Warmest Quarter     | 28.4                             |
| Bio3                           | 等温性 Isothermality (bio2/bio7) ×100           | 26.9                             |
| Bio4                           | 温度季节性变化标准差 Temperature Seasonality           | 6.1                              |
| Bio9                           | 最干季度平均温度 Mean Temperature of Driest Quarter  | 4.4                              |
| Bio19                          | 最冷季度降水量 Precipitation of Coldest Quarter     | 1.4                              |
| Bio8                           | 最湿季度平均温度 Mean Temperature of Wettest Quarter | 1.4                              |
| Bio10                          | 最暖季度平均温度 Mean Temperature of Warmest Quarter | 1.2                              |
| Bio12                          | 年降水量 Annual Precipitation                    | 0.9                              |
| Bio16                          | 最湿季度降水量 Precipitation of Wettest Quarter     | 0.7                              |

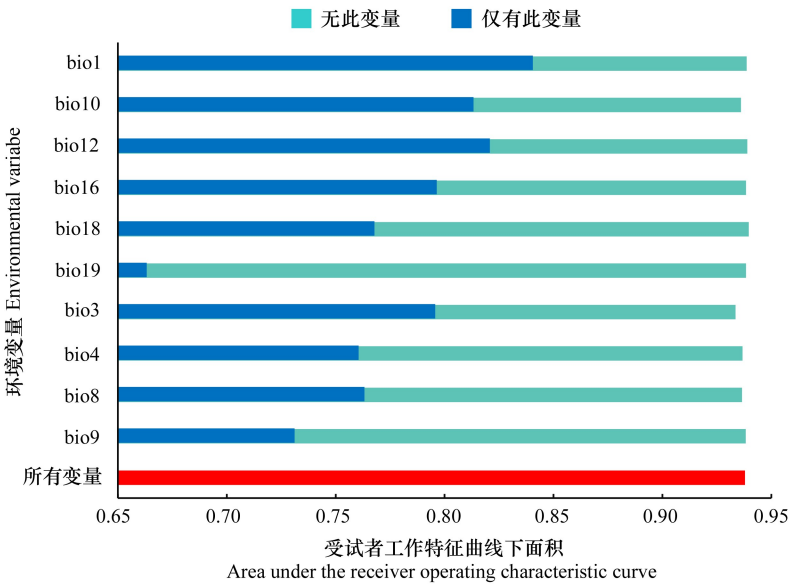


图 1 MaxEnt 模型预测环境变量因子的 AUC

Fig.1 AUC value of environmental variable factors predicted by MaxEnt model

AUC:受试者工作特征曲线下面积 Area under the receiver operating characteristic curve ;bio1:年平均气温 Annual Mean Temperature;bio10:最暖季度平均温度 Mean Temperature of Warmest Quarter;bio12:年降水量 Annual Precipitation;bio16:最湿季度降水量 Precipitation of the wettest quarter;bio18:最暖季度降水量 Precipitation of Warmest Quarter;bio19:最冷季度降水量 Precipitation of Coldest Quarter;bio3:等温性 Isothermality;bio4:温度季节性变化标准差 Temperature Seasonality; bio8:最湿季度平均温度 Mean Temperature of Wettest Quarter;bio9:最干季度平均温度 Mean Temperature of Driest Quarter

2.3 现代气候情境下落叶松枯梢病在中国的潜在适生分布区

利用 ArcGIS 将 MaxEnt 模型预测出的结果进行可视化处理并统计各适生等级面积占比(表 4;图 2)。结果表明在当前气候情境下落叶松枯梢病中国的潜在适生区面积占中国国土总面积的 18.02%,主要分布在中

国的辽宁、吉林、黑龙江的东部、内蒙古的东北部、陕西西部、甘肃南部。此外,在河北、北京、山西、湖北、甘肃、青海、陕西、宁夏、四川、贵州等地也有零星分布。其中高适生区占 3.1%,集中在吉林东部、辽宁东部、黑龙江东南部及中部局部地区;中适生区占 5.5%,主要位于辽宁、吉林的中部、黑龙江中东部、内蒙古东部的局部地区;低适生区占 9.4%,主要位于辽宁西部、吉林西部及黑龙江西部、内蒙古东北部、山东东部、河北北部、甘肃东南部。

表 4 未来气候情景下落叶松枯梢病在中国的潜在适生区面积所占比例/%

Table 4 Potential suitable area of shoot blight of larch in China under future scenarios

| 年代<br>Decade    | 气候情景<br>Climate scenario | 高适生区<br>Highly suitable area | 中适生区<br>Moderately suitable area | 低适生区<br>Low suitable area | 非适生区<br>Unsuitable area |
|-----------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 现代 Near current |                          | 3.10                         | 5.50                             | 9.41                      | 81.98                   |
| ssp126          | 2021—2040                | 1.20                         | 4.76                             | 8.80                      | 84.44                   |
|                 | 2041—2060                | 2.30                         | 5.37                             | 7.80                      | 84.53                   |
|                 | 2061—2080                | 2.50                         | 4.93                             | 9.16                      | 83.41                   |
|                 | 2081—2100                | 3.20                         | 5.95                             | 8.55                      | 82.30                   |
| ssp245          | 2021—2040                | 2.56                         | 5.23                             | 8.20                      | 83.99                   |
|                 | 2041—2060                | 1.81                         | 4.52                             | 8.38                      | 85.29                   |
|                 | 2061—2080                | 1.76                         | 5.38                             | 7.52                      | 85.34                   |
|                 | 2081—2100                | 0.98                         | 3.79                             | 9.02                      | 86.20                   |
| ssp585          | 2021—2040                | 2.26                         | 5.40                             | 7.45                      | 81.90                   |
|                 | 2041—2060                | 1.51                         | 4.66                             | 9.67                      | 84.88                   |
|                 | 2061—2080                | 0.65                         | 2.43                             | 8.57                      | 88.34                   |
|                 | 2081—2100                | 0.55                         | 2.67                             | 8.91                      | 89.13                   |

2.4 未来气候条件下落叶松枯梢病的潜在分布区变化

未来气候情境下落叶松枯梢病在中国的潜在适生区面积和当前气候相比呈减少趋势(表 4),其质心有由东北向华北、西南蔓延的趋势。

在绿色发展模式下(图 3),到 2021—2040 年、2041—2060 年、2061—2080 年、2081—2100 年落叶松枯梢病在中国的潜在适生区面积占比依次减少到 15.56%、15.47%、16.59%、17.70%。相较现代气候情景,未来落叶松枯梢病在中国吉林、辽宁东部的适生性下降,部分高适生区转为中适生区。在中等程度发展模式下(图 4),到 2021—2040 年、2041—2060 年、2061—2080 年、2081—2100 年落叶松枯梢病在中国的潜在适生区面积占比减少到 16.01%、14.71%、14.66%、13.80%。其中高适生区仍集中在中国东北地区,但其适生性整体下降。在吉林、辽宁西部、黑龙江西北部及内蒙古东部部分地区的适生性下降,部分地区由低适生区转为非适生区。在高化石燃料消耗的快速发展模式下(图 5),到 2021—2040 年、2041—2060 年、2061—2080 年、2081—2100 年落叶松枯梢病在中国的潜在适生区面积占比下降到 18.10%、15.12%、11.66%、10.87%。该模式下,落叶松枯梢病在中国东北地区的适生性较中等程度发展模式进一步下降,在中国西南、西北局部地区适生性增加,部分非适生区转为适生区。

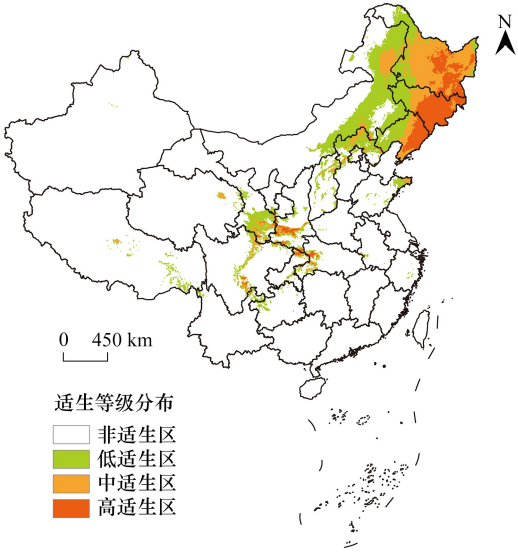


图 2 现代情境下落叶松枯梢病在中国的潜在适生分布区

Fig.2 Potential suitable area of shoot blight of larch in China under current climate

文中地图来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)

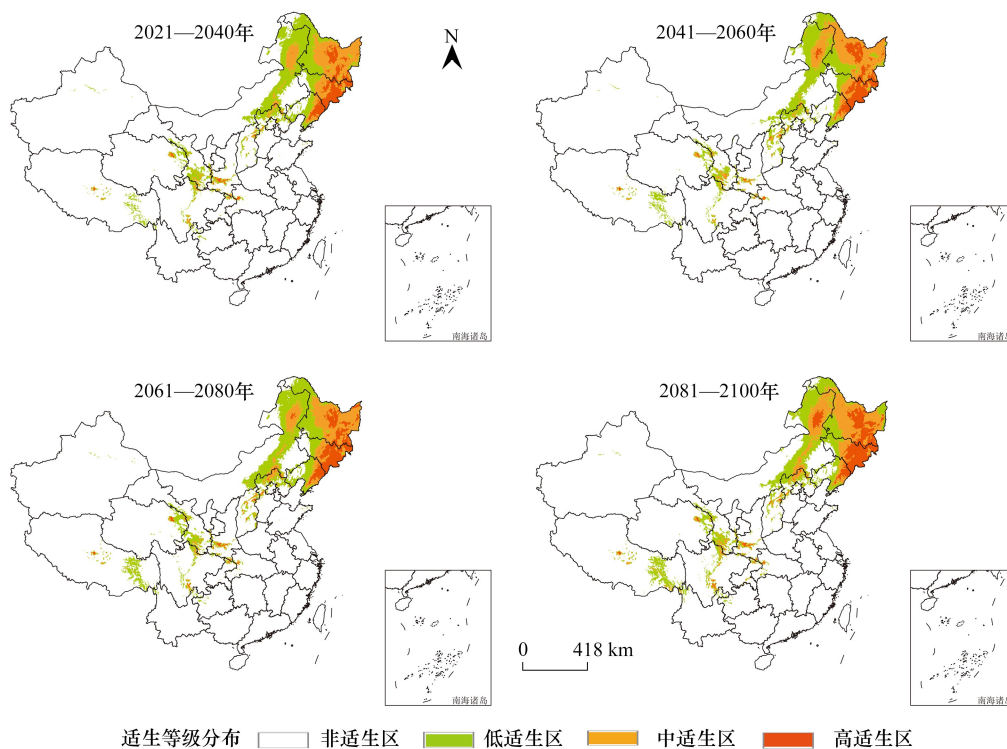


图 3 未来气候情景(ssp126)下落叶松枯梢病在中国的潜在适生分布区

Fig.3 Potential suitable area of shoot blight of larch in China under future scenario (ssp126)

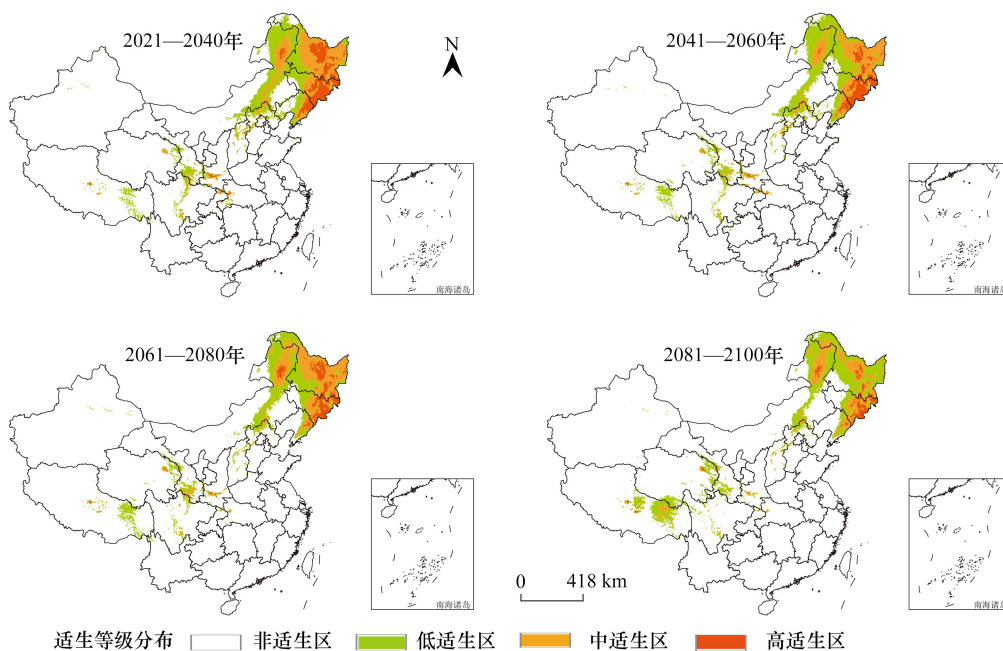


图 4 未来气候情景(ssp245)下落叶松枯梢病在中国的潜在适生分布区

Fig.4 Potential suitable area of shoot blight of larch in China under future scenario (ssp245)

综合几种不同的气候情景来看,到 21 世纪末落叶松枯梢病在中国的潜在分布区面积均会减少。但值得注意的是三种气候变化情境下其面积变化趋势不同,在绿色发展模式下,落叶松枯梢病的在中国的潜在适生

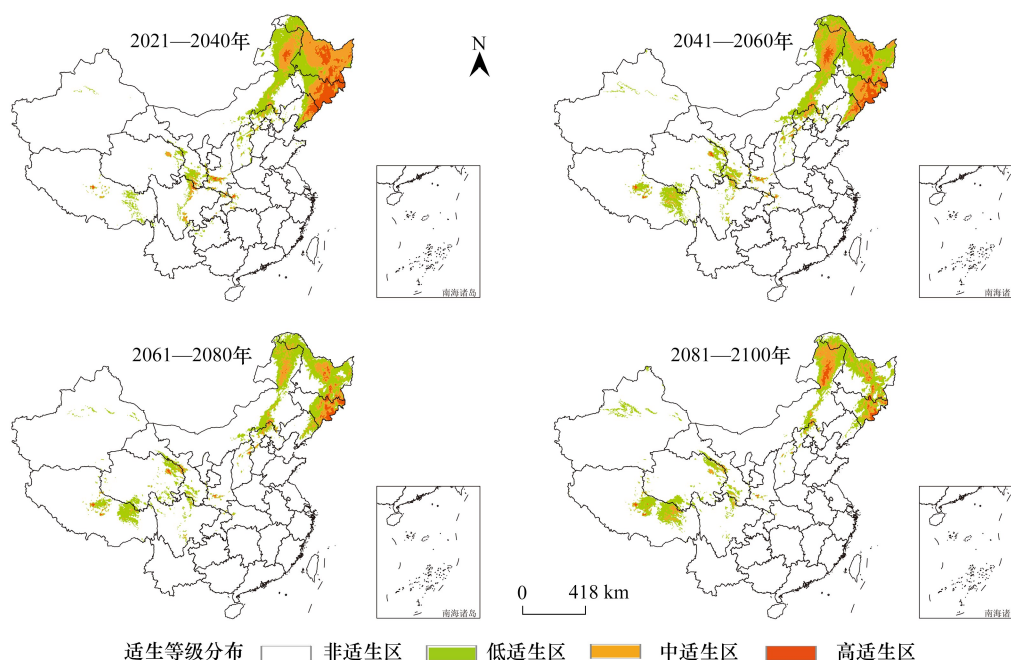


图5 未来气候情景(ssp585)下落叶松枯梢病在中国的潜在适生分布区

Fig.5 Potential suitable area of shoot blight of larch in China under future scenario (ssp585)

区相较当前先大幅度减少,后逐渐增加。此外,在该模式下落叶松枯梢病在中国的潜在适生区面积变幅最大,说明在全球气候变化的背景下,落叶松枯梢病对以绿色发展为主的浓度发展路径更为敏感。在中等程度发展模式和高化石燃料消耗的快速发展模式下,相较当前气候落叶松枯梢病在中国的潜在适生区面积一直呈减少态势。根据落叶松枯梢病在中国潜在适生区的质心变化发现(图6),在较长时间段内落叶松枯梢病的适生范围将由中国东北向华北、西南地区扩散蔓延。

### 3 讨论

#### 3.1 影响落叶松枯梢病分布的环境变量

在筛选出的对落叶松枯梢病分布影响较大的10个环境变量中,其中与温度相关的环境变量的贡献率达到67.6%,与降水相关的环境变量的贡献率为58.3%,最近的一项研究也表明温度相较降水对真菌病害的分布有更重要的影响<sup>[33]</sup>。本研究表明影响落叶松枯梢病在中国分布的主导环境变量包括年平均气温、最暖季度降水量、年降水量、最暖季度平均温度。由此可看出该病对最暖季度的温湿条件响应较为显著,而此时的落叶松新梢也由于木质化程度低更容易受病原菌侵染而导致病害发生,这与实际情况中落叶松枯梢病在中国的中高风险区的7、8月份为发病高峰相吻合。此外,本研究通过环境因子响应曲线发现适宜落叶松枯梢病发生的最适最暖季度平均温度范围为10.1—24.0℃,这接近先前研究适宜落叶松枯梢病菌孢子的最适萌发温度范围15—27℃<sup>[34]</sup>,说明环境变量的最佳取值范围与此前的研究结果基本一致。除温度外,降水在落叶松枯梢病传播扩散中发挥着重要的作用,落叶松枯梢病菌的子囊座和分生孢子器在降雨后吸水释放孢子,后经雨水淋洗、反溅而扩大病害侵染范围。因此建议在最暖季度尤其是大量降雨前喷洒药剂对该病害进行防治。

#### 3.2 气候变化下落叶松枯梢病在中国的潜在适生区变化

非生物、生物因素和物种迁移能力在长期进化过程中影响了物种分布,不同的历史时期物种分布范围不同,气候变化也会导致物种适宜区的位置发生变化。对于植物病害而言,气候变化会使植物病害向高纬度转移<sup>[35]</sup>,但在本研究中落叶松枯梢病的适生范围并没有表现出向高纬度转移的趋势。这可能是由于主要环境变量的值没有超过影响落叶松枯梢病适宜发生的阈值。

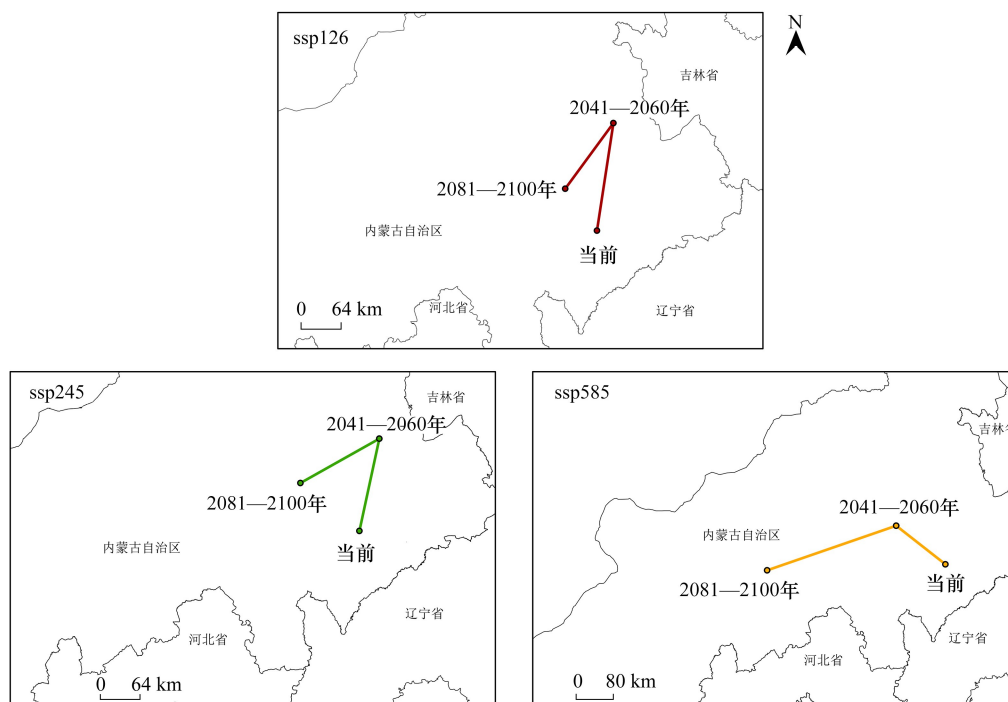


图 6 未来气候模式下落叶松枯梢病的适生区质心变化趋势

Fig.6 Centroid migration and change of shoot blight of larch suitable area under future scenarios

研究采用新的排放情景-共享社会经济路径(SSPs)中的3种情景预测未来落叶松枯梢病在中国的潜在分布及转移趋势,发现落叶松枯梢病在未来三种气候模式下的响应结果略有差异。就其适生区面积变化而言,在绿色发展模式下,落叶松枯梢病的潜在适生面积先大幅度减少后逐渐增加,到本世纪末其适生面积占中国国土总面积的17.70%;而在中度发展模式和高化石燃料消耗的快速发展模式下,其适生区面积均持续减少,到本世纪末其适生区面积减少到中国国土总面积的13.80%和10.78%。此外,相较绿色发展模式,在中度发展模式和高化石燃料消耗的快速发展模式下,落叶松枯梢病的高适生区呈明显的破碎化,表明病害有集中爆发的趋势。不同气候模式下适生区面积变化的差异可能是由于绿色发展模式下二氧化碳的排放量较少,使温度上升幅度较低造成的。比较未来三种气候模式下落叶松枯梢病的质心转移轨迹发现,质心均位于内蒙古自治区内,但绿色发展模式下其转移趋势偏向华北地区,而中度发展模式和高化石燃料消耗的快速发展模式下其轨迹更明显向西南地区转移。整体上质心转移轨迹是由东北地区转向华北、西南地区,这可能与不同地区温室气体的排放程度不同使年均温上升存在差异有关,其中在北方地区特别是东北地区,年均温上升幅度高于南方地区<sup>[36]</sup>。因此在向华北及西南地区调运落叶松苗木时,有关检疫部门应加强地区检疫预警工作。

### 3.3 研究的局限性

在满足病原和寄主同时存在的情况下,适宜的温、湿度是病害流行的必要条件。在前人研究的基础上,本研究基于落叶松枯梢病分布数据和气候数据,利用MaxEnt模型对落叶松枯梢病在中国的潜在适生区进行了预测。而在实际环境中,落叶松枯梢病的分布和适宜程度也会受到其他复杂因素的影响,如风力、人为干扰、海拔、树龄、寄主品种及物种间相互作用<sup>[37]</sup>等。落叶松枯梢病菌的孢子通过风力传播且落叶松苗木在运输过程中不确定的人为干扰会影响病害扩散传播。由于这些因素对病害的影响机制不明确或难以量化而影响模型模拟效果,因此该预测结果可作为判断落叶松枯梢病与环境变量之间关系的参考,但不能完全概括二者之间的关系。此外,研究结果旨在预测落叶松枯梢病潜在适生分布区并非其实际分布,故即使生态位模型预测该物种分布可能性很高,也不代表其在此区域有实际分布<sup>[38]</sup>。

寄主的存在是研究病害适生区的前提,该研究对落叶松枯梢病及其寄主在中国的分布情况进行调查,结

果显示落叶松枯梢病的分布与预测结果较吻合,且落叶松枯梢病的寄主分布涵盖了预测结果中落叶松枯梢病的中高适生分布区(图 7),说明了 MaxEnt 模型在林木病害预测方面的可行性。落叶松枯梢病主要为害的落叶松属植物种类在中国分布较为广泛,有利于病害在中国的传播扩散。而落叶松枯梢病长距离传播主要通过调运感病落叶松苗木,因此本研究为落叶松枯梢病的监测预警提供了参考依据。此外,落叶松枯梢病发展蔓延迅速,其林内扩散途径主要包括孢子借风力雨水扩大感染范围而加重病情、菌丝在病株体内扩散蔓延引起部分新梢和老枝发病,加之林木病害相较作物病害其寄主具多年生、受人为干扰小的特性,因此该病一旦发生便很难控制,这使得预测结果更具有现实意义。

#### 4 结论

本研究利用 MaxEnt 生态位模型预测了落叶松枯梢病在中国当前和未来气候下的潜在适生分布区并明确了影响落叶松枯梢病发生的主要环境变量。根据分析结果发现年平均气温、最暖季度降水量、年降水量、最暖季度平均温度与落叶松枯梢病的发生流行有密切的联系。当前气候情境下落叶松枯梢病的适生区主要位于中国东北地区、西南及西北局部地区。未来不同气候情境下落叶松枯梢病在中国的潜在适生面积出现不同程度的缩小,其适生范围有由东北向华北、西南地区扩散的趋势。落叶松枯梢病危害严重,其寄主落叶松在我国又分布广泛,因此本研究通过对落叶松枯梢病在中国的潜在适生区进行预测和分析,可为林业相关检疫部门对落叶松枯梢病的防控与检疫工作提供参考依据。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Hattori Y, Ando Y, Nakashima C. Taxonomical re-examination of the genus *Neofusicoccum* in Japan. *Mycoscience*, 2021, 62(4): 250-259.
- [ 2 ] 石春玲. 落叶松枯梢病综合防治技术推广[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2004.
- [ 3 ] 刘秀薇. 落叶松枯梢病的生物防治与分子检测初步研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
- [ 4 ] Root T L, Price J T, Hall K R, Schneider S H, Rosenzweig C, Pounds J A. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 2003, 421(6918): 57-60.
- [ 5 ] Chen I C, Hill J K, Ohlemüller R, Roy D B, Thomas C D. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 2011, 333(6045): 1024-1026.
- [ 6 ] Lenoir J, Gégout J C, Marquet P A, de Ruffray P, Brisse H. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 2008, 320(5884): 1768-1771.
- [ 7 ] Juroszek P, Racca P, Link S, Farhumand J, Kleinhenz B. Overview on the review articles published during the past 30 years relating to the potential climate change effects on plant pathogens and crop disease risks. *Plant Pathology*, 2020, 69(2): 179-193.
- [ 8 ] Bebber D P, Ramotowski M A T, Gurr S J. Crop pests and pathogens move poleward in a warming world. *Nature Climate Change*, 2013, 3(11): 985-988.
- [ 9 ] Raffini F, Bertorelle G, Biello R, D'Urso G, Russo D, Bosso L. From nucleotides to satellite imagery: approaches to identify and manage the invasive pathogen *Xylella fastidiosa* and its insect vectors in Europe. *Sustainability*, 2020, 12(11): 4508.
- [ 10 ] 张超, 陈磊, 田呈明, 李涛, 汪荣, 杨启青. 基于 GARP 和 MaxEnt 的云杉矮槲寄生分布区的预测. *北京林业大学学报*, 2016, 38(5): 23-32.
- [ 11 ] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.

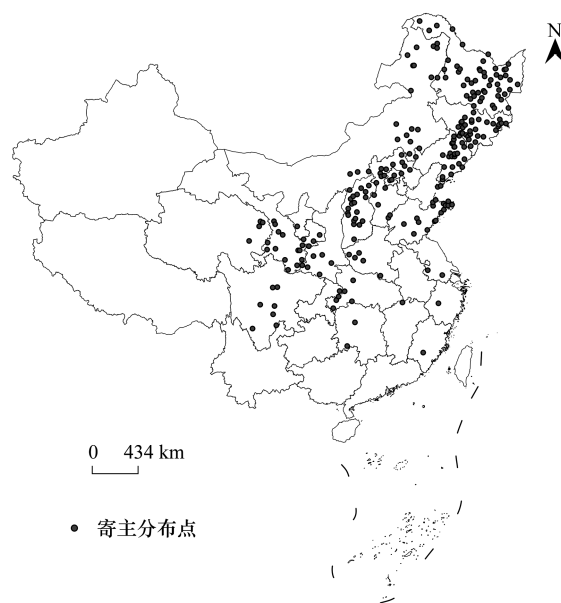


图 7 落叶松枯梢病寄主植物在中国的分布

Fig. 7 Distribution of the main hosts of shoot blight of larch in China

- [12] Elith J, Phillips S J, Hastie T, Dudík M, Chee Y E, Yates C J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 2015, 17(1): 43-57.
- [13] 徐文力, 李庆康, 杨潇, 王景升. 气候变化情景下西藏入侵植物印加孔雀草的潜在分布预测. *生态学报*, 2022, 42(17): 7266-7277.
- [14] 杨子文, 韩姝伊, 李壹, 王嘉敏, 何宏轩. 气候变化对雪豹全球潜在适生区分布的影响与评估. *生态学报*, 2023, 43(4): 1412-1425.
- [15] 陈舒豪, 程广有. 基于 MaxEnt 模型的东北红豆杉潜在适生区预测. *北华大学学报: 自然科学版*, 2022, 23(3): 302-310.
- [16] Ajene I J, Khamis F, van Asch B, Pietersen G, Rasowo B A, Ekesi S, Mohammed S. Habitat suitability and distribution potential of *Liberibacter* species (“*Candidatus Liberibacter asiaticus*” and “*Candidatus Liberibacter africanus*”) associated with citrus greening disease. *Diversity and Distributions*, 2020, 26(5): 575-588.
- [17] 徐永红, 陈力, 唐松, 丁德宽, 杨宇衡. 柑橘轮斑病的适生区预测及风险分析. *中国农业科学*, 2020, 53(21): 4430-4439.
- [18] Xu W, Sun H Y, Jin J W, Cheng J M. Predicting the potential distribution of apple canker pathogen (*Valsa mali*) in China under climate change. *Forests*, 2020, 11(11): 1126.
- [19] Tang X G, Yuan Y D, Li X M, Zhang J C. Maximum entropy modeling to predict the impact of climate change on pine wilt disease in China. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 652500.
- [20] 王晓玮, 任雪燕, 梁英梅. 基于 MaxEnt 模型的松针红斑病在中国的潜在分布区及适生性预测分析. *林业科学*, 2019, 55(4): 160-170.
- [21] Li D X, Li Z X, Liu Z W, Yang Y J, Khoso A G, Wang L, Liu D G. Climate change simulations revealed potentially drastic shifts in insect community structure and crop yields in China’s farmland. *Journal of Pest Science*, 2023, 96(1): 55-69.
- [22] 赵文娟, 陈林, 丁克坚, 段霞瑜, 周益林. 利用 MAXENT 预测玉米霜霉病在中国的适生区. *植物保护*, 2009, 35(2): 32-38.
- [23] 张宇凡, 党英侨, 王小艺. 基于气候和寄主因素的栗山天牛中国成灾和扩散风险评估. *林业科学*, 2022, 58(6): 95-109.
- [24] 姜明鑫, 钟文玉, 陈李林. 茶园重要捕食性天敌白斑猎蛛在中国的潜在适生区预测. *生态学报*, 2022, 42(10): 4225-4235.
- [25] 唐兴港, 袁颖丹, 张金池. 气候变化对杉木适生区和生态位的影响. *植物研究*, 2022, 42(1): 151-160.
- [26] Morales N S, Fernández I C, Baca-González V. MaxEnt’s parameter configuration and small samples: are we paying attention to recommendations? A systematic review. *PeerJ*, 2017, 5: e3093.
- [27] Cobos M, Peterson A, Barve N, Osorio-Olvera L. Kuenm: An R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 2019, 7: e6281.
- [28] 兰雪涵, 王金玲, 付聪, 李黎明, 袁梦琦, 檀婷婷, 杜凤国. 基于优化 MaxEnt 模型的天女木兰在中国适生区预测. *西北林学院学报*, 2022, 37(4): 100-106.
- [29] Zhuo Z H, Xu D P, Pu B, Wang R L, Ye M. Predicting distribution of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. in China. *BMC Ecology and Evolution*, 2020, 20(1): 1-10.
- [30] 刘超, 霍宏亮, 田路明, 董星光, 齐丹, 张莹, 徐家玉, 曹玉芬. 基于 MaxEnt 模型不同气候变化情景下的豆梨潜在地理分布. *应用生态学报*, 2018, 29(11): 3696-3704.
- [31] 江厚志, 曹春香, 陈伟, 党永峰, 王雪军, 王威. 基于 Maxent 模型的美国西海岸岸树流感暴发风险时空分析. *世界林业研究*, 2017, 30(4): 68-72.
- [32] 颜佳滢, 吴志峰, 申健, 张意岑, 俞方圆. 未来气候变化对粤港澳大湾区杜鹃花适生区的影响. *生态学报*, 2022, 42(13): 5481-5492.
- [33] Liu X, Ma Z Y, Cadotte M, Chen F, He J S, Zhou S R. Warming affects foliar fungal diseases more than precipitation in a Tibetan alpine meadow. *New Phytologist*, 2018, 221(3): 1574-1584.
- [34] 尹光文, 王自江. 落叶松枯梢病的研究初报. *吉林林业科技*, 1979, 8(4): 46-69.
- [35] Dudley J, Willing C E, Das A J, Latimer A M, Nesmith J C B, Battles J J. Author Correction: Nonlinear shifts in infectious rust disease due to climate change. *Nature Communications*, 2021, 12: 5326.
- [36] 唐继洪, 程云霞, 罗礼智, 张蕾, 江幸福. 基于 Maxent 模型的不同气候变化情景下我国草地螟越冬区预测. *生态学报*, 2017, 37(14): 4852-4863.
- [37] 汤思琦, 武扬, 梁定东, 郭恺. 未来气候变化下栎树猝死病菌在中国的适生性分析. *生态学报*, 2023, 43(1): 388-397.
- [38] 朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 高玉葆. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用. *生物多样性*, 2013, 21(1): 90-98.