北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于生态位模型的云南省松材线虫适生区对气候变化的响应

张国鑫 张王菲 张怀清 何霞红 徐钡昌

Response of suitable areas for *Bursaphelenchus xylophilus* to climate change based on niche models in Yunnan Province of southwestern China

Zhang Guoxin, Zhang Wangfei, Zhang Huaiqing, He Xiahong, Xu Beichang

引用本文:
张国鑫, 张王菲, 张怀清, 何霞红, 徐钡昌. 基于生态位模型的云南省松材线虫适生区对气候变化的响应[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(3):73–89. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250364
Zhang Guoxin, Zhang Wangfei, Zhang Huaiqing, He Xiahong, Xu Beichang. Response of suitable areas for *Bursaphelenchus xylophilus* to climate change based on niche models in Yunnan Province of southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(3):73–89. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250364

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250364

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

气候变化对我国油松人工林适生区分布的影响
Effects of climate change on distribution of suitable area of *Pinus tabuliformis* plantation in China
北京林业大学学报, 2024, 46(6): 82–92. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230072

气候变化下黄枝油杉与江南油杉的潜在适生区预测
Prediction of potential suitable areas of *Keteleeria calcarea* and *Keteleeria cyclolepis* under climate change
北京林业大学学报, 2025, 47(6): 30–42. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240094

基于MaxEnt模型的不同气候情景下假俭草中国适生区预测
Prediction of suitable areas of *Eremochloa ophiuroides* in China under different climate scenarios based on MaxEnt model
北京林业大学学报, 2024, 46(3): 91–102. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230022

未来气候情景下2种新疆特有树种潜在适生区预测
Prediction of the potential distribution of two endemic tree species in Xinjiang of western China under future climate scenarios
北京林业大学学报, 2022, 44(6): 10–22. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210301

基于GIS空间技术和MaxEnt模型预测川西松材线虫病入侵风险
Prediction of invasion risk of pine wilt disease based on GIS spatial technology and MaxEnt model in western Sichuan Province of southwestern China
北京林业大学学报, 2023, 45(9): 104–115. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220527

黄土高原地区4种常见树种适宜区对气候变化响应
Response of four common tree species suitable areas to climate change in the Loess Plateau region of northern China
北京林业大学学报, 2023, 45(3): 21–33. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220138

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250364

基于生态位模型的云南省松材线虫适生区对气候变化的响应

张国鑫[1,2] 张王菲[1] 张怀清[3] 何霞红[1] 徐钡昌[2]
（1. 西南林业大学林学院，云南 昆明 650224；2. 昆明市海口林场，云南 昆明 650114；3. 中国林业科学研究院资源信息研究所，北京 100091）

摘要:【目的】明确松材线虫在云南省当前的潜在适生区及预测未来气候情景下潜在适生区的分布，为云南省相关部门制定该病害的早期监测、预警及防控提供理论依据。**【方法】**基于云南省松材线虫 56 个地理分布点和 23 个环境变量，采用 ENMeval R 包优化的 MaxEnt 模型和 ArcGIS Pro 软件，预测其在当前及未来气候情景下的潜在适生区分布。**【结果】**最优参数组合为线性 + 二次型特征组合，正则化乘数达 1.5，训练集与测试集的平均受试者工作特征曲线下面积（AUC）分别为 0.891 和 0.861，表明模型的预测结果良好，可用于松材线虫潜在入侵风险预测；坡度、最干季度平均温度、土壤类型和最干季度降水量是影响松材线虫分布的主导环境变量；历史气候情景下，高适生区集中于昆明市、曲靖市、玉溪市、昭通市、文山州大部分地区，以及红河州的北部和楚雄州的中部，面积 7 169 km^2(占全省 1.82%)，次适生区覆盖昆明、曲靖等 10 州市，面积 23 634 km^2(占全省 6.00%)；在未来高温室气体排放情景下，松材线虫适生区呈现向西南方向扩张的趋势，在未来低温室气体排放情景下，松材线虫适生区呈现向西北部和南部区域收缩的趋势，次适生区面积在两种情景下均呈现减少趋势。**【结论】**优化后的 MaxEnt 模型能够较准确地预测松材线虫在云南省的潜在适生区；研究表明，温度、降水和地形等是影响松材线虫分布的主要环境因子；未来气候情景下，松材线虫的潜在适生区面积波动不大，在高温室气体排放情景下，松材线虫适生区呈现向西南方向扩张的趋势，在低温室气体排放情景下，松材线虫适生区西北部和南部区域收缩较为明显，次适生区面积在两种情景下均呈现减少趋势。低温室气体排放情景下，总体扩张强度远低于高温室气体排放情景，表明采取积极的减排措施以维持低温室气体排放情景能够有效抑制松材线虫适生区的显著扩张，对于控制其未来的危害范围具有重要意义。

关键词：松材线虫；MaxEnt 模型；云南省；气候变化；适生区
中图分类号：S763 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)03−0073−17
引文格式：张国鑫，张王菲，张怀清，等. 基于生态位模型的云南省松材线虫适生区对气候变化的响应［J］. 北京林业大学学报，2026，48(3)：73−89. Zhang Guoxin, Zhang Wangfei, Zhang Huaiqing, et al. Response of suitable areas for *Bursaphelenchus xylophilus* to climate change based on niche models in Yunnan Province of southwestern China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(3): 73−89.

Response of suitable areas for *Bursaphelenchus xylophilus* to climate change based on niche models in Yunnan Province of southwestern China

Zhang Guoxin[1,2] Zhang Wangfei[1] Zhang Huaiqing[3] He Xiahong[1] Xu Beichang[2]
(1. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China;
2. Haikou Forest Farm, Kunming 650114, Yunnan, China;
3. Institute of Forest Resources Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

收稿日期: 2025−09−20 **修回日期:** 2026−01−12
基金项目: 国家自然科学基金项目（32371869、32260720），国家现代农业产业技术体系（CARS-21）。

第一作者: 张国鑫。主要研究方向：智慧林业、林业有害生物综合防治。Email: 525563051@qq.com 地址：650114 云南省昆明市西山区海口街道海口林场。
责任作者: 张王菲，教授，博士生导师。主要研究方向：农林业遥感机理及应用研究。Email: mewhff@163.com 地址：650224 云南省昆明市盘龙区青云街道白龙寺 300 号西南林业大学。

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

Abstract: [**Objective**] This study aimed to clarify the current potential suitable areas of *Bursaphelenchus xylophilus* and to predict its future potential suitable areas in Yunnan Province of southwestern China under future climate scenarios, providing a theoretical basis for provincial authorities to establish early monitoring, warning and prevention and control measures for this disease. [**Method**] Based on 56 geographic distribution points and 23 environmental variables of *Bursaphelenchus xylophilus* in Yunnan Province, the MaxEnt model optimized by ENMeval R package and ArcGIS Pro software were employed to predict its potential suitable area distribution under current and future climate scenarios. [**Result**] The optimal parameter combination was linear + quadratic feature combination, with regularization multiplier RM reaching 1.5. The average area under the receiver operating characteristic curve (AUC)values for training and testing datasets were 0.891 and 0.861, respectively, indicating good model prediction performance suitable for assessing potential *Bursaphelenchus xylophilus* invasion risks. Slope, mean temperature of the driest quarter, soil type, and precipitation of driest quarter were dominant environmental variables influencing *Bursaphelenchus xylophilus* distribution. Under historical climate conditions, high-suitability areas were concentrated in Kunming, Qujing, Yuxi, Zhaotong, most of Wenshan, northern Honghe, and central Chuxiong, covering 7 169 km^2 (1.82% of Yunnan Province). Moderately suitable areas span 10 prefectures including Kunming and Qujing, covering 23 634 km^2 (6.00% of Yunnan Province). Under high greenhouse gas emission scenario, the suitable areas of *Bursaphelenchus xylophilus* showed a trend of expansion toward the southwest. Under the low greenhouse gas emission scenario, the suitable areas showed a trend of contraction toward the northwest and southern regions. The area of moderately suitable areas decreased under both scenarios. [**Conclusion**] The optimized MaxEnt model accurately predicts the potential suitable areas of *Bursaphelenchus xylophilus* in Yunnan Province. The study indicates that temperature, precipitation and topography are the primary environmental factors influencing its distribution. Under future climate scenarios, the area of potential suitable areas of *Bursaphelenchus xylophilus* showed little fluctuation. Under a high greenhouse gas emission scenario, the suitable areas of *Bursaphelenchus xylophilus* exhibite a trend of expansion toward the southwest. Under a low greenhouse gas emission scenario, the suitable areas of *Bursaphelenchus xylophilus* show a more pronounced contraction in the northwest and southern regions, while the area of moderately suitable areas shows a decreasing trend under both scenarios. The overall expansion intensity under low greenhouse gas emission scenario is significantly lower than that under the high greenhouse gas emission scenario. This indicates that implementing proactive emission reduction measures to maintain the low greenhouse gas emission scenario can effectively suppress the significant expansion of the suitable areas of *Bursaphelenchus xylophilus*. This is of great significance for controlling its future damage range.

Key words: *Bursaphelenchus xylophilus*; MaxEnt model; Yunnan Province; climate change; suitable areas

松材线虫病作为全球公认的林业重大危险性病害，素有“松树癌症”之称，是一种由松材线虫（*Bursaphelenchus xylophilus*）引起的松树毁灭性病害[1]。自 1982 年传入我国后持续扩散，截至 2025 年，已蔓延至全国 18 个省市的 620 个县级行政区，对我国松林资源与生态安全构成严重威胁[2]。松材线虫病的流行是松材线虫、媒介昆虫、寄主松树、气候、植被、地形及人类活动等互作的复杂过程。研究表明[3]，其传播主要受气温与降水格局驱动，气候变暖与极端干旱等变化预计将加剧其威胁，但其在区域或局域尺度上的具体驱动机制尚不明确，地形通过塑造水热和土壤条件间接作用于寄主松树与媒介昆虫，植被类型与群落组成直接影响病害发生概率，而居民点分布、道路邻近度及人为利用枯死木等活动则是关键的传播驱动因素。

云南地理位置特殊，地处中国西南生态屏障关键地带[4]，截至 2024 年，云南现有松林面积达 933.33 万 hm^2，约占全省森林面积的 44%，占全国松林面积的 16%，位列全国第一[5]，然而，松材线虫病正对云南的森林生态系统构成严峻威胁。自 2004 年首次在畹町经济开发区和瑞丽市发现疫情以来，病害已先后扩散至昭通市盐津县、水富市、昆明市西山区及文山州麻栗坡县[6–8]。尽管经系统防治，2024 年已实现省级疫情解除，但由于云南松林集中连片且

树种高度易感，疫情复燃与跨区域传播风险依然居高不下，潜在生态灾害风险不容忽视[9]。因此，精准预测松材线虫病在云南的潜在适生区已成为该地区实施前瞻性预警、制定精准化防控策略、从而保障西南生态屏障安全的迫切需求。

当前，对松材线虫适宜生境的风险评估是阻断其扩散的有效前瞻性策略[9]。值得注意的是，尽管国内外对松材线虫的病理机制、防控技术和潜在分布区域的预测建模已有系统性研究[10−13]，但相关研究均未将松材线虫在云南的实际分布点考虑进去，导致其针对云南这一特殊且关键区域的预测结果存在不确定性，相关研究成果亟待丰富与本地化[14−15]。在生态预测领域，最大熵模型（MaxEnt）因其对稀疏数据的适应性，尤其在动态评估气候条件变化对生物分布格局的影响方面的优势，成为当前应用广泛且备受认可的生态位模型[16−17]。

然而，MaxEnt 模型预测的准确性强烈依赖于模型参数的优化。MaxEnt 模型的默认设置虽适用于一般情况，但面对不同数据量与变量组合时，默认参数极易导致过拟合或欠拟合[18]。为了提高模型预测的可转移性和准确性，需要根据具体的生态和生物地理数据来调整模型的参数设置。以往研究[17-18]表明，正则化乘数（RM）和特征组合（FC）是影响模型性能和输出的关键超参数。因此，要获得适用于云南省的高精度、高可信度的松材线虫病适生区分布图，关键在于采用一套能够针对本地数据特征进行模型优化的科学方法。

鉴于此，本研究旨在通过整合云南省松材线虫病的实际分布记录与多源环境数据，运用 MaxEnt 生态位模型与 GIS 技术开展松材线虫病潜在适生区分析，系统性地调用 ENMeval R 数据包以筛选最优的 RM 与 FC 参数组合。研究目标是构建一个经过优化的、适用于云南省本地情况的预测模型，以期准确揭示松材线虫病在省内的空间分布规律及其核心环境驱动因子，最终为构建科学的区域监测预警与防控体系提供坚实的理论依据。

1　研究区概况、数据获取与预处理

1.1　研究区概况

云南省地处中国西南（21°08′32″ ~ 29°15′08″N，97°31′39″ ~ 106°11′47″E），总面积 39.41 万 km^2。境内地势自西北向东南阶梯状下降，地貌复杂，海拔高低悬殊，气候差异显著。作为东亚与喜马拉雅植物区系的交汇地带，其森林类型之多、资源之丰富、生态区位之重要、生态功能之突出，使其成为世界罕见的植物区系聚集地和物种遗传基因库。云南林地面积 25 万 km^2，活立木总蓄积 17.68 亿 m^3，均居全国第二，森林覆盖率 55.7%，较全国平均水平高出近 30%，其中松林面积达 9.33 万 km^2，占全国松林面积近 16%，位列全国第一[19]。

1.2　数据获取

1.2.1　分布数据

本研究收集了云南省有记录以来的所有松材线虫发生点数据，从西山区森防部门获取云南省昆明市西山区松材线虫发生点数据，其他分布地点数据通过网站（https://www.ovital.com/）获取。具体流程：首先定位至疫情报告的行政地名，随后，为提升点位在生态学上的准确性，将坐标进一步校正至该行政区域内或周边最邻近的、适合松林生长的林地位置，以此作为该次疫情事件的近似发生位点，共提取 56 个发生地点坐标（表 1）。为了降低采样偏差可能造成的模型过拟合情况，在 ArcGIS Pro 3.3.2 中，以

表 1　云南省松材线虫分布记录点

Tab. 1　*Bursaphelenchus xylophilus* distribution record sites in Yunnan Province

序号	地名	经纬度	采集方式	采集时间	是否通过筛选
1	乐亩社区老黄全	25°12′36″N，102°23′14″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
2	西山林场武家箐林区	25°07′44″N，102°22′38″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
3	下冲社区白泥塘	25°08′34″N，102°33′22″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
4	龙潭社区水厂路边	25°03′04″N，102°30′35″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
5	西山林场马街林区	25°02′36″N，102°37′07″E	西山区森防部门提供	2021年7月	否
6	西山林场马街林区	25°02′36″N，102°37′12″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
7	西山林场马街林区	25°02′35″N，102°36′55″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
8	大兴社区大风垭口	25°00′04″N，102°31′40″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
9	大兴社区大风垭口	25°00′02″N，102°31′32″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
10	大兴社区大风垭口	25°00′03″N，102°31′21″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
11	海口林场羊洞山	24°51′19″N，102°37′25″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
12	海口林场羊洞山	24°51′16″N，102°37′33″E	西山区森防部门提供	2021年7月	否

表 1(续)

Tab.1 (continued)

序号	地名	经纬度	采集方式	采集时间	是否通过筛选
13	西华社区羊洞山	24°51′14″N，102°37′37″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
14	老冷地	24°49′47″N，102°36′01″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
15	海口里仁社区雨脚山	24°49′42″N，102°35′37″E	西山区森防部门提供	2021年7月	否
16	里仁社区烈士坟	24°49′41″N，102°35′35″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
17	观音山社区红皮坡	24°49′32″N，102°38′58″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
18	观音山社区红皮坡	24°49′32″N，102°38′58″E	西山区森防部门提供	2021年7月	否
19	观音山社区上马台	24°49′31″N，102°39′12″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
20	海口林场野鸭塘	24°48′53″N，102°36′49″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
21	里仁社区丁耙山	24°48′47″N，102°35′57″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
22	里仁社区丁耙山	24°48′48″N，102°35′53″E	西山区森防部门提供	2021年7月	否
23	里仁社区丁耙山	24°48′48″N，102°35′52″E	西山区森防部门提供	2021年7月	否
24	海口林场瞭望台步道	24°48′38″N，102°36′29″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
25	海口林场二坝	24°48′28″N，102°36′21″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
26	海口林场二坝	24°48′28″N，102°36′26″E	西山区森防部门提供	2021年7月	否
27	里仁社区杨家箐	24°48′19″N，102°36′04″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
28	海门社区公鸡山	24°47′46″N，102°36′23″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
29	海门社区公鸡山	24°47′38″N，102°36′40″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
30	海门社区公鸡山	24°47′37″N，102°36′34″E	西山区森防部门提供	2021年7月	否
31	海门社区公鸡山	24°47′40″N，102°36′32″E	西山区森防部门提供	2021年7月	否
32	海门社区蒋凹大山	24°47′12″N，102°37′34″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
33	海门社区蒋凹大山	24°47′15″N，102°37′40″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
34	海门社区蒋凹大山	24°47′19″N，102°37′51″E	西山区森防部门提供	2021年7月	否
35	海门社区蒋凹大山	24°47′19″N，102°37′51″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
36	青鱼社区老高箐	24°51′16″N，102°31′47″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
37	青鱼社区青鱼塘观占山	24°50′57″N，102°31′12″E	西山区森防部门提供	2021年7月	否
38	青鱼社区青鱼塘观占山	24°50′56″N，102°31′12″E	西山区森防部门提供	2021年7月	否
39	青鱼社区青鱼塘观占山	24°50′56″N，102°31′12″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
40	海口林场松球山	24°50′37″N，102°31′36″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
41	海口林场松球山	24°50′39″N，102°31′34″E	西山区森防部门提供	2021年7月	否
42	里仁社区大刺塘	24°48′36″N，102°33′54″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
43	中宝排土场下	24°46′41″N，102°31′10″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
44	海口林场尾石山	24°46′04″N，102°32′12″E	西山区森防部门提供	2021年7月	否
45	海口林场尾石山	24°46′03″N，102°32′12″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
46	海口林场大雪箐	24°45′40″N，102°33′40″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
47	海丰社区石钢坡	24°46′00″N，102°35′12″E	西山区森防部门提供	2021年7月	是
48	水富市两碗镇	28°27′46″N，104°13′42″E	互联网	2018年5月	是
49	水富市向家坝镇	28°34′16″N，104°18′32″E	互联网	2018年5月	是
50	水富市云富街道办事处	28°37′01″N，104°21′08″E	互联网	2018年5月	是
51	盐津县兴隆乡	28°14′50″N，104°22′56″E	互联网	2013年3月	是
52	盐津县滩头乡	28°18′41″N，104°15′25″E	互联网	2013年3月	是
53	麻栗坡县大坪镇	23°06′15″N，104°35′26″E	互联网	2021年10月	是
54	麻栗坡大高线	23°03′57″N，104°33′32″E	互联网	2021年10月	是
55	瑞丽市	24°01′55″N，97°52′19″E	互联网	2004年11月	是
56	畹町经济开发区	24°06′27″N，98°02′54″E	互联网	2004年4月	是

500 m 为半径生成所有分布点的缓冲区，对于缓冲区相互重叠的分布点，随机保留其中 1 个点，确保在每 1 000 m 空间范围内仅保留 1 个分布点，最终保留松材线虫在云南省的 42 个分布点数据，用于模型运行和验证，保留的松材线虫地理分布见表 1。

1.2.2　环境变量

本研究共涉及 23 个环境变量，其中历史气候条件下（1970—2000 年）的 19 个生物气候学变量为 WorldClim 2.1 版（分辨率为 1 km）（表 2），来源于 Worldclim 网站（www.worldclim.org）。未来气候数据涵盖 2021—2040 年、2041—2060 年及 2061—2080 年 3 个时期。数据基于中国国家气候中心的气候系统模式（BCC-CSM2-MR）模拟生成，并选取了 SSP126（低碳排放）和 SSP585（高碳排放）2 种共享社会经济路径情景，以表征不同的温室气体排放与未来社会经济发展水平。DEM 数据及土壤类型空间分布数据来源于资源环境科学与数据平台，其数据根据全国土壤普查办公室 1995 年编制并出版的《1∶100 万中华人民共和国土壤图》数字化生成（https://www.resdc.cn/）（分辨率为 1 km）。

在本研究中，当使用物种分布模型预测未来潜在分布时，一个基本假设是：所有非气候环境变量（包括海拔、坡度、坡向等地形因子，以及土壤类型）在未来情景下均保持与历史时期一致。这一处理基于以下理由：首先，在模型所涉及的未来时间尺度内，宏观地形与自然状态下土壤类型的演变速率远慢于气候变化，可被视为静态因子；其次，目前缺乏可靠的未来地形或土壤演变数据集。因此，本模型所预测的未来分布变化将主要由气候变化所驱动。

1.3　数据预处理

以云南省界图层为模板，在 ArcGIS Pro 3.3.2 软件中，利用掩膜工具从全球数据中提取研究区所在区域内的环境变量图层；利用 DEM 数据提取海拔、坡向和坡度图层；然后利用投影工具对环境变量和

表 2　23 个环境因子的含义及筛选结果

Tab. 2　Meaning and screening results of 23 environmental factors

环境因子	含义	贡献率/%	是否通过筛选	最终模型贡献率/%
bio1	年均温度	0	否	
bio2	昼夜温差月均值	13.4	是	2.3
bio3	等温性	2.6	否	
bio4	温度季节性变化	5.1	是	1.1
bio5	最暖月最高温度	0.7	否	
bio6	最冷月最低温度	1.6	否	
bio7	温度全年波动范围	2.4	是	0.7
bio8	最湿季度平均温度	0.7	否	
bio9	最干季度平均温度	10.8	是	26.3
bio10	最暖季度平均温度	0.2	否	
bio11	最冷季度平均温度	0	否	
bio12	年降水量	0.2	否	
bio13	最湿月降水量	12.6	是	0.2
bio14	最干月降水量	0.7	否	
bio15	降水量变异系数	0.3	是	1.9
bio16	最湿季度降水量	2.9	否	
bio17	最干季度降水量	8.9	是	6.6
bio18	最暖季度降水量	0.2	否	
bio19	最冷季度降水量	4.1	否	
aspect	坡向	4.8	是	1.4
slope	坡度	16.5	是	42.6
EL	海拔	2.2	否	
soil	土壤类型	9.0	是	16.8

提取的海拔、坡向和坡度图层进行坐标系变换，统一为 WGS_1984_UTM_Zone_48N；最后利用重采样工具将环境变量图层栅格大小统一为 1 000 m × 1 000 m；利用栅格转 ASC II 工具将处理后的环境变量图层转化为“*.ASC”格式文件储存。

2 研究方法

2.1 模型构建与评估

本研究使用 MaxEnt 模型进行云南省松材线虫适生区的预测。该模型通过在已知环境约束下最大化熵，从而得出一个在现有信息下最客观、偏差风险最小的概率分布[16]。为提升模型可靠性，本研究通过预实验评估了模型的时空外推能力：使用 2004—2018 年云南的 7 个早期分布点训练模型，以 2021 年的 35 个分布点进行测试。结果显示，模型虽在训练集上表现良好（训练 AUC 为 0.955 1），但在测试集上预测失效（测试 AUC 为 0.470 1），依据“最小训练存在”阈值，模型会遗漏 88.6% 的新发疫点。这表明，仅基于少量早期数据构建的模型难以捕捉新区暴发的真实驱动机制，预测不确定性高，可能受生态位变化、人为传播等因素影响。因此，为建立更稳健的基准模型，本研究整合了全部可获得的 42 个有效分布点用于后续分析，以提高对全省适生格局的整体刻画能力。本研究采用 1970—2000 年的历史气候数据作为基准期。虽然物种分布记录采集于 2004—2021 年，但由于物种分布主要受长期气候条件控制，而非短期波动，故使用该标准化基准期能更可靠地揭示根本性的气候驱动因子，并确保模型结果与国内外研究具有可比性。

本文采用 MaxEnt 3.4.4 软件进行预测。为解决 MaxEnt 模型默认设置参数运行结果易过拟合、模型转移能力较差等问题[18]，对模型的正则化乘数（RM）和特征组合（FC）进行优化，它们分别从参数约束和特征扩展 2 个维度影响模型性能。正则化乘数主要用于控制模型复杂度，防止过拟合；而特征组合则旨在通过扩展特征维度，增强模型的表达能力[19]。为确保模型具备更强的泛化能力和生态学合理性，本研究采用 ENMeval R 包对多个组合进行搜索，以确定最优模型参数。其中，MaxEnt 模型的特征类型有线性（L）、二次型（Q）、片段化（H）、乘积型（P）和阈值（T）。设置 L、LQ、H、LQH、LQHP、LQHPT 这 6 种特征组合，RM 设置范围为 0.5 到 6.0，间隔为 0.5。使用赤池信息量准则的最小增量（Delta AICc），评估模型的拟合优良性，最终选择 Delta AICc 为 0 时的组合作为最优参数组合。这一流程遵循了物种分布模型参数优化的最佳实践[20]。其他参数设置如下：随机选择 25% 的分布点为测试集，选择自助法作为重复运行类型重复 10 次，最大迭代次数为 5 000。采用最大的环境背景点为 10 000，勾选“add samples to background”选项，将物种出现点也纳入环境背景的构建中以优化模型评估；为处理预测范围可能超出模型训练范围的情况，同时采用了 MaxEnt 软件提供的“Extrapolate”（外推）和“Do clamping”（钳制）功能组合。具体而言，启用外推允许模型预测至训练数据未覆盖的环境空间，同时，启用钳制功能确保当预测点的某个环境变量值超出其训练范围时，该变量值会被限制在训练数据的极值内再进行计算。这一策略旨在允许模型进行合理扩展的同时，通过对极端环境条件的约束来增强预测的稳定性，并减少可能出现的疯狂外推[21],其他值为默认值。以 Logistic 格式输出结果，一方面通过生成环境变量的响应曲线来分析其生态响应，另一方面则借助刀切法来评估各环境变量对预测松材线虫分布模型的重要性排序。

采用 ROC 曲线和 AUC 值及测试样本的遗漏率与预测遗漏率吻合度来评估模型的正确性。ROC 曲线以假（真）阳性率值为横轴坐标，曲线下形成的面积即为 AUC 值，AUC 值越高，表明环境因子与物种的地理分布预测的相关性越强，从而证明模型的有效性越高。一般认为，当 0.5≤AUC 值 < 0.6 时，模型预测失败；当 0.6≤AUC 值 < 0.7 时，模型预测结果较差；当 0.7≤AUC 值 < 0.8 时，模型预测结果一般；当 0.8≤AUC 值 < 0.9 时，模型预测结果良好；当 0.9≤AUC 值 < 1.0 时，模型预测结果优秀[21]。测试样本的遗漏率是基于实际观测数据计算出的遗漏比例，预测遗漏率是模型理论上预期的遗漏率。测试样本的遗漏率与预测遗漏率吻合度是 MaxEnt 模型特有的、用于评估模型预测拟合优度的重要指标，吻合度越高,表明模型预测越精准[22−23]。

2.2 适生等级划分

利用 ArcGIS Pro 软件对预测结果进行适生等级划分及可视化处理。MaxEnt 软件预测出的松材线虫适生区以一个结果值范围在 0 ~ 1 之间的栅格呈现，值越高,表明其适生程度越高。为实现三级分类并保证不同时期预测结果的可比性，本研究采用 2 个固定的阈值对连续的生境适宜性概率进行重分类,高级别阈值：采用历史时期“最大训练敏感性和特异性值（MTSS）”作为高适生区和次适生区的阈值，即遍历所有阈值，找到使敏感性 + 特异性最大的值，此阈值旨在识别出环境条件最为优越的核心生境[24]。低级别阈值：采用历史时期“平衡训练遗漏率、预测面积及阈值（BTPT）”作为次适生区和不适生区的阈值，

即排序训练出现点的预测值，取第 10 百分位的值，此阈值提供了一个物种对环境耐受性边界的保守估计[25]。将适生区从低到高分为不适生区（0～0.114 7）、次适生区（0.114 7～0.438 3）和高适生区（0.438 3～1.000 0）。这 2 个固定阈值均从历史时期模型得出，并统一应用于所有未来气候情景，以确保观测到的适生区变化纯粹由气候变化驱动，而非由阈值标准的变动引起[26]。

本研究的最终适生区划分主要包括环境裁剪与寄主分布约束 2 个关键环节。首先，结合来自资源环境科学与数据中心（https://www.resdc.cn）的土地利用现状遥感监测数据，对明显不适宜松材线虫定殖的水域、沙地、高寒荒漠、苔原和冰川等非生物基质的区域进行裁剪，得到初步的环境适宜性分布。随后，为进一步提升预测结果的现实指向性并精准评估对松林资源的实际风险，本研究增加了核心的寄主分布约束步骤。利用 Zenodo 数据平台（https://zenodo.org/records/16208012）的我国 1 km 森林覆盖及森林植被类型栅格数据提供的针叶林及针阔混交林分布数据，生成寄主分布掩膜，将上述初步适生区严格限定于有现实松林分布的区域，从而彻底去除非寄主植被对预测结果的干扰。最终得到的适生区图能够更直接、更可靠地反映松材线虫在历史及未来气候条件下对云南省潜在受害松林的实际威胁范围与空间格局。

2.3　环境变量的相关性分析及筛选

为避免环境变量间的多重共线性对模型稳定性和解释性造成影响，采用结合 Pearson 相关性分析与变量贡献率的两步筛选法，首先，计算所有 23 个初始环境变量的 Pearson 相关系数矩阵（图 1）。其次，将所有 23 个变量纳入 MaxEnt 模型进行初步运行，并获取其贡献率（表 2）。最后，结合贡献率结果与相关系数对变量进行筛选，当 2 个环境变量的 Pearson 相关系数绝对值$|r|\geq 0.8$（该阈值遵循生态建模领域的普遍实践，能有效缓解多重共线性问题，同时确保有充分的环境信息被纳入模型[27]）时，保留贡献率大的环境变量用于 MaxEnt 模型构建，以确保最终入选的变量之间不存在严重的多重共线性。

	bio1	bio2	bio3	bio4	bio5	bio6	bio7	bio8	bio9	bio10	bio11	bio12	bio13	bio14	bio15	bio16	bio17	bio18	bio19	soil	aspect	slope	EL
bio1	1.00	0.21	0.50	-0.63	0.97	0.98	-0.46	0.98	0.97	0.98	0.98	0.99	0.63	0.31	0.53	0.66	0.24	0.61	0.13	0.49	0.05	-0.21	-0.92
bio2	0.21	1.00	0.77	-0.52	0.19	0.07	0.23	0.09	0.32	0.10	0.10	0.29	-0.08	-0.19	0.05	-0.07	-0.23	-0.12	-0.16	0.01	0.06	-0.07	0.05
bio3	0.50	0.77	1.00	-0.93	0.36	0.47	-0.44	0.32	0.63	0.32	0.32	0.62	0.33	0.10	0.24	0.34	0.13	0.30	0.10	0.19	0.02	-0.12	-0.22
bio4	-0.63	-0.52	-0.93	1.00	-0.47	-0.65	0.68	-0.45	-0.76	-0.46	-0.46	-0.74	-0.56	-0.25	-0.34	-0.57	-0.29	-0.52	-0.23	-0.28	0.00	0.12	0.39
bio5	0.97	0.19	0.36	-0.47	1.00	0.93	-0.27	0.99	0.92	0.99	0.99	0.93	0.54	0.24	0.50	0.57	0.14	0.51	0.06	0.47	0.06	-0.21	-0.93
bio6	0.98	0.07	0.47	-0.65	0.93	1.00	-0.59	0.95	0.96	0.95	0.95	0.97	0.67	0.35	0.53	0.70	0.30	0.65	0.18	0.49	0.04	-0.21	-0.92
bio7	-0.46	0.23	-0.44	0.68	-0.27	-0.59	1.00	-0.34	-0.51	-0.34	-0.34	-0.52	-0.59	-0.39	-0.29	-0.61	-0.51	-0.60	-0.36	-0.26	0.05	0.09	0.39
bio8	0.98	0.09	0.32	-0.45	0.99	0.95	-0.34	1.00	0.91	1.00	1.00	0.93	0.56	0.29	0.51	0.60	0.20	0.56	0.09	0.48	0.06	-0.20	-0.95
bio9	0.97	0.32	0.63	-0.76	0.92	0.96	-0.51	0.91	1.00	0.91	0.91	0.99	0.66	0.32	0.49	0.69	0.27	0.62	0.20	0.46	0.04	-0.18	-0.84
bio10	0.98	0.10	0.32	-0.46	0.99	0.95	-0.34	1.00	0.91	1.00	1.00	0.93	0.57	0.29	0.51	0.60	0.20	0.56	0.10	0.48	0.06	-0.20	-0.95
bio11	0.98	0.10	0.32	-0.46	0.99	0.95	-0.34	1.00	0.91	1.00	1.00	0.93	0.57	0.29	0.51	0.60	0.20	0.56	0.10	0.48	0.06	-0.20	-0.95
bio12	0.99	0.29	0.62	-0.74	0.93	0.97	-0.52	0.93	0.99	0.93	0.93	1.00	0.65	0.31	0.52	0.68	0.26	0.62	0.16	0.47	0.04	-0.20	-0.87
bio13	0.63	-0.08	0.33	-0.56	0.54	0.67	-0.59	0.56	0.66	0.57	0.57	0.65	1.00	0.32	0.58	0.99	0.38	0.97	0.29	0.38	0.02	-0.12	-0.63
bio14	0.31	-0.19	0.10	-0.25	0.24	0.35	-0.39	0.29	0.32	0.29	0.29	0.31	0.32	1.00	-0.21	0.35	0.81	0.35	0.72	0.18	-0.05	-0.04	-0.33
bio15	0.53	0.05	0.24	-0.34	0.50	0.53	-0.29	0.51	0.49	0.51	0.51	0.52	0.58	-0.21	1.00	0.59	-0.38	0.59	-0.53	0.38	0.04	-0.25	-0.54
bio16	0.66	-0.07	0.34	-0.57	0.57	0.70	-0.61	0.60	0.69	0.60	0.60	0.68	0.99	0.35	0.59	1.00	0.39	0.98	0.29	0.41	0.02	-0.14	-0.66
bio17	0.24	-0.23	0.13	-0.29	0.14	0.30	-0.51	0.20	0.27	0.20	0.20	0.26	0.38	0.81	-0.38	0.39	1.00	0.37	0.91	0.09	-0.04	0.06	-0.23
bio18	0.61	-0.12	0.30	-0.52	0.51	0.65	-0.60	0.56	0.62	0.56	0.56	0.62	0.97	0.35	0.59	0.98	0.37	1.00	0.27	0.39	0.01	-0.13	-0.62
bio19	0.13	-0.16	0.10	-0.23	0.06	0.18	-0.36	0.09	0.20	0.10	0.10	0.16	0.29	0.72	-0.53	0.29	0.91	0.27	1.00	-0.02	-0.03	0.16	-0.11
soil	0.49	0.01	0.19	-0.28	0.47	0.49	-0.26	0.48	0.46	0.48	0.48	0.47	0.38	0.18	0.38	0.41	0.09	0.39	-0.02	1.00	0.01	-0.22	-0.51
aspect	0.05	0.06	0.02	0.00	0.06	0.04	0.05	0.06	0.04	0.06	0.06	0.04	0.02	-0.05	0.04	0.02	-0.04	0.01	-0.03	0.01	1.00	0.00	-0.01
slope	-0.21	-0.07	-0.12	0.12	-0.21	-0.21	0.09	-0.20	-0.18	-0.20	-0.20	-0.20	-0.12	-0.04	-0.25	-0.14	0.06	-0.13	0.16	-0.22	0.00	1.00	0.23
EL	-0.92	0.05	-0.22	0.39	-0.93	-0.92	0.39	-0.95	-0.84	-0.95	-0.95	-0.87	-0.63	-0.33	-0.54	-0.66	-0.23	-0.62	-0.11	-0.51	-0.01	0.23	1.00

图 1　用于预测松材线虫适生区的 23 个环境因子相关性

Fig. 1　Correlation of 23 environmental factors used to predict suitable areas for *Bursaphelenchus xylophilus*

3 结果与分析

3.1 环境变量的相关性分析及筛选

本研究对环境变量间多重共线性的评估是基于整个研究区域内所有栅格像元的环境变量值进行的，以确保全面、准确地反映变量间的独立关系。23 个环境因子 Pearson 相关系数取值范围 [−1，1]，红色表示正相关，蓝色表示负相关，颜色越深代表相关程度越高(图 1)。Pearson 相关系数绝对值$|r|\geqslant 0.8$ 的环境因子有 29 对。所有环境因子纳入 MaxEnt 模型得到对应的贡献率(表 2)，贡献率 > 0 的环境因子有 19 对。最终保留 10 个环境因子用于建模，包括昼夜温差月均值(bio2)、温度季节性变化标准差(bio4)、年温变化范围(bio7)、最干季度平均温度(bio9)、最湿月降水量(bio13)、降水量季节性变异系数(bio15)、最干季度降水量(bio17)、土壤类型(soil)、坡度(slope)和坡向(aspect)。

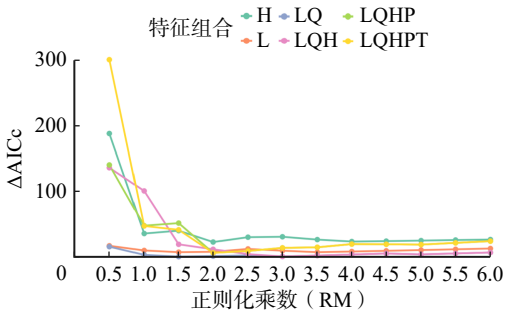
3.2 模型优化结果及预测精度评估

应用 ENMeval R 包建立的不同参数设置下松材线虫 MaxEnt 模型的 ΔAICc 如图 2 所示，当特征组合 FC = LQ 且正则化乘数 RM = 1.5 时，模型为最优模型，作为最终设置参数。MaxEnt 模型运行 10 次，松材线虫预测模型的表现如图 3 所示，模型在训练集上的平均 AUC 为 0.891，在测试集上的平均 AUC 为 0.861，显著高于随机模型的 AUC 值(0.5)，表明该模型具有良好的判别能力，其预测结果并非随机产生，可靠性高。测试集上的性能被用作模型泛化能力的最终评估标准，训练集与测试集性能之间较小的差距表明模型的过拟合程度在可接受的范围内。如图 4 所示，测试样本的遗漏率与预测遗漏率曲线基本一致，证明模型性能稳定，未出现严重过拟合，具有良好的泛化能力。综合 AUC 值和遗漏率评价，表明模型预测结果具有较高的精确度和可信度。

3.3 关键变量及响应曲线

MaxEnt 最终模型的贡献率显示(表 2)，影响松材线虫分布的主要环境因子有 4 个，对模型的贡献率均达到了 5% 以上，累积贡献率 92.3%，其中坡度贡献性最高，其次是 bio9、土壤类型和 bio17；而变量重要性的刀切法检验(图 5)显示，当仅单独使用坡向、bio7 和 bio13 时，几乎没有任何增益，表明其对预测松材线虫适生区贡献很小；单独建模时，正则化训练增益较高的 3 个环境变量是坡度、bio9 和 bio17，当模型剔除坡度时，正则化增益减少最多，因此坡度具有其他变量中不存在的信息。

影响松材线虫适生区分布的主要环境因子响应曲线如图 6 所示。当生态因子值对应的存在概率大于 0.5 时，表明松材线虫适宜在该环境中生存[28]。从地理与空间分布看，松材线虫适生区主要集中在坡度 0° ~ 5°，土壤类型为石灰(岩)土、石质土和红壤的区域，当最干季度平均温度(bio9)为 0 ~ 11 ℃，最干季度降水量(bio17)介于 10 ~ 55 mm 时，松材线虫的潜在发生风险最高。



H. 片段化；L. 线性特征；LQ. 线性特征 + 二次型特征；LQH. 线性特征 + 二次型特征 + 片段化特征；LQHP. 线性特征 + 二次型特征 + 片段化特征 + 乘积型特征；LQHPT. 线性特征 + 二次型特征 + 片段化特征 + 乘积型特征 + 阈值性特征；ΔAICc.赤池信息量准则的最小增量。

图 2 不同参数下松材线虫 MaxEnt 模型的 ΔAICc

Fig. 2 ΔAICc of MaxEnt model of *Bursaphelenchus xylophilus* with different parameters

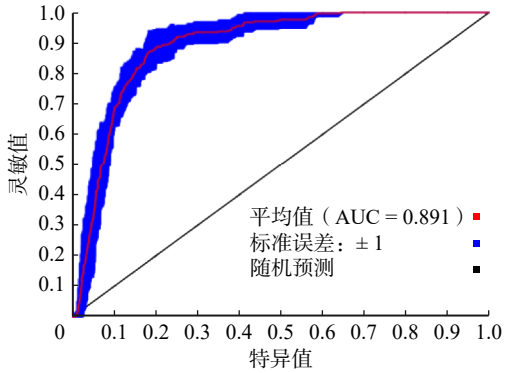


图 3 松材线虫 MaxEnt 模型预测结果 ROC 曲线

Fig. 3 ROC curve of MaxEnt model prediction result for *Bursaphelenchus xylophilus*

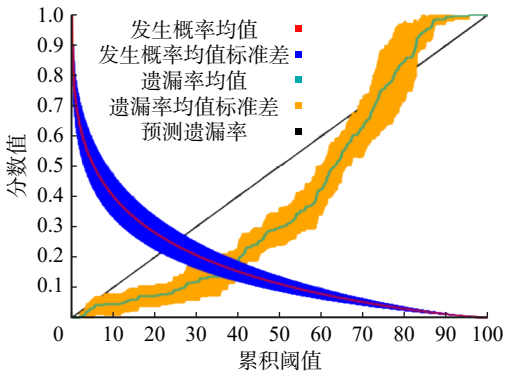


图 4 松材线虫 MaxEnt 模型预测平均遗漏率与预测面积

Fig. 4 Predicting average omission rates and area using MaxEnt model for *Bursaphelenchus xylophilus*

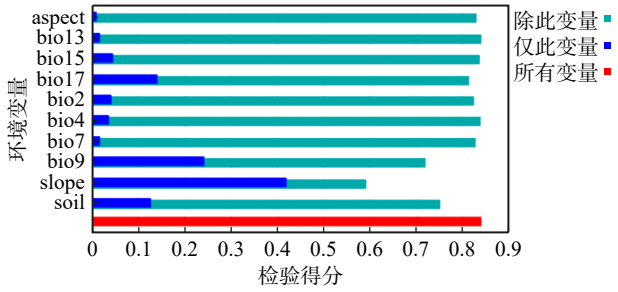


图 5　环境因子刀切法检验结果

Fig. 5　Test results of knife-cut method for environmental factors

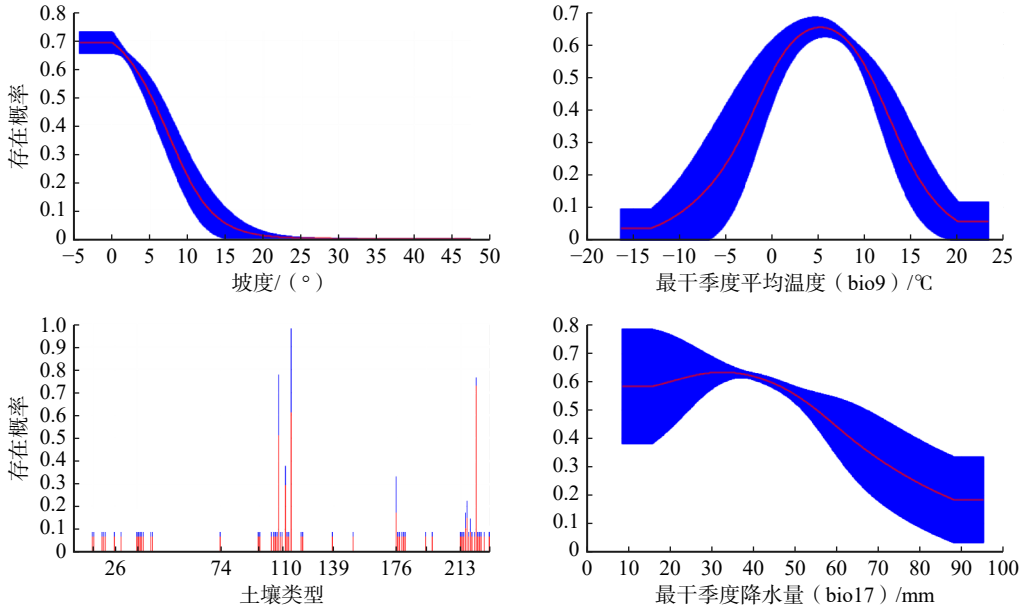
3.4　历史气候条件下松材线虫云南省适生区预测

利用 MaxEnt 模型模拟预测历史气候条件下（1970—2000 年）松材线虫在云南省的适生区分布如图 7 和表 3 所示。本研究结果显示，历史气候条件下该病虫在云南省的适宜栖息地呈现点状或局部聚集分布特征，主要集中在滇中、滇东北及滇西南的部分区域。高适生区与次适生区合计覆盖全省 7.82% 的面积。其中，高适生区面积为 7 169 km^2，占全省总面积的 1.82%，主要分布于昆明市、曲靖市、玉溪市、昭通市和文山州的大部，以及红河州北部和楚雄州中部。次适生区面积为 23 634 km^2，占 6.00%，主要环绕高适生区分布，并见于普洱市、临沧市、保山市、丽江市、大理州、德宏州的部分地区，以及红河州南部和迪庆州东部等地。不适生区面积为 35 846 km^2，占 9.10%，主要分布于云南省西北部与西南部。

该空间分布格局与关键环境变量的空间分异密切相关。高适生区主要分布于滇中、滇东北及滇东南部分地区，这些区域通常具备适宜的年均温、季节性降水分布以及中等海拔范围，共同为松材线虫的生存与传播提供了有利条件。次适生区多位于适生区外围或环境因子出现一定限制的区域，例如降水季节性增强、温度略偏离最适范围，或海拔变化导致的积温不足。不适生区主要分布在滇西北高海拔寒冷地区与滇西南边缘低海拔高温高湿区域，这些地区受极端低温或高温、湿度过大等环境因子的制约，难以支持松材线虫定殖。

3.5　未来气候条件下松材线虫云南省适生区分布及变化

利用 MaxEnt 模型模拟预测未来气候情景下松材线虫在云南省的适生区面积变化的情况如图 8 和表 3 所示，总体而言，气候变化将对松材线虫的适生区产生持续影响，且这种影响因温室气体排放情景和未来时期的不同而呈现显著差异。具体而言：在低温室气体排放情景（SSP126）下，2021—2040 年松材线虫的高适生区面积占比为 0.97%，相比历史时期（1.82%）显著降低 0.85%，表明短期内气候条件对该虫的高适宜区域产生较明显的限制作用。次适生区面积占比从历史的 6.00% 大幅下降至 1.93%，可能由于气温升高、干旱加剧或降水格局变化，导致原有适生区适宜性下降，尤其是西部和东南部地区。不适生区面积占比从 9.10% 上升至 14.02%，增幅明显，说明在近期气候情景下，云南省部分原来处于适宜或临界适宜的区域向不适宜转化，分布适宜范围整体呈现收缩趋势。2041—2060 年松材线虫的高适生区面积占比为 1.54%，相对历史水平（1.82%）降低



红线表示 MaxEnt 模型中松材线虫发生概率随各因子的变化趋势，蓝色部分为 95%置信区间；土壤类型代码：26. 燥红土；74. 灰钙土；110. 火山灰土；139. 山地草甸土；176. 水稻土；213. 寒冻土。

图 6　影响松材线虫分布的主要环境因子响应曲线

Fig. 6　Response curves of major environmental factors affecting the distribution of *Bursaphelenchus xylophilus*

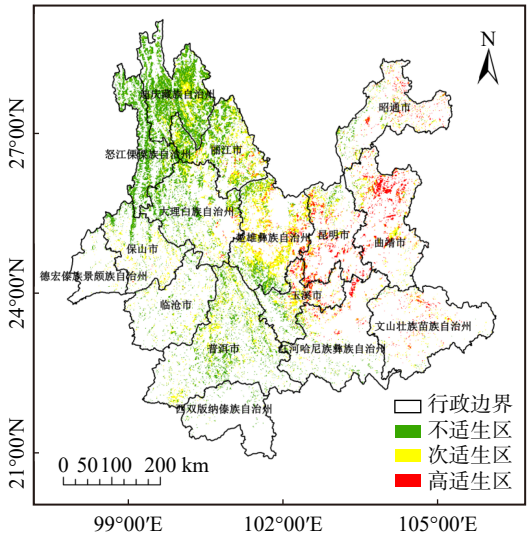


图 7 历史气候条件下松材线虫云南省适生区预测

Fig. 7 Predicting suitable areas for *Bursaphelenchus xylophilus* in Yunnan Province under historical climate conditions

0.28%，分布区基本维持现状，表明该情景下适生环境受影响较小。次适生区面积占比由历史的 6.00% 降至 4.88%，可能与部分地区温度升高超出最适范围或降水模式改变有关，导致西北部和南部区域适宜性降低。不适生区面积占比由历史的 9.10% 增至 10.49%，反映出部分边缘适生区因气候条件恶化而转为不适宜。到 2061—2080 年，该情景下高适生区面积占比小幅回升至 1.67%，尤其在文山州中部有所扩张，可能与该区域未来气温和降水条件更接近松材线虫生存最适区间相关。次适生区面积占比恢复至 5.98%，但不适生区占比（9.26%）仍略高于历史水平，表明部分原次适生区环境条件持续退化。

在高温室气体排放情景（SSP585）下，2021—2040 年高适生区面积占比进一步降低至 0.93%，次适生区占比降至 1.83%，二者均低于 SSP126 情景，反映更强的增温可能加剧了适宜生境的缩减。不适生区面积占比上升至 14.15%，达到近期最高，说明高温室气体排放情景下，气候因子的变化在短期内对松材线虫的生存与扩散带来更大压力，原有适生区特别是边缘地带的环境适宜性进一步丧失。2041—2060 年，高适生区面积占比增至 1.96%，高温室气体排放导致的气候变暖可能使历史适生区周边区域温度条件进入适宜范围。次适生区面积占比上升至 5.68%。不适生区面积占比降至 9.27%，反映出气候变暖使部分高海拔寒冷区域温度升高，转为临界适宜。到 2061—2080 年，该情景下高适生区面积占比进一步增至 1.87%，但空间格局呈现局部调整，显示出不同区域对持续增温与降水变化的响应差异。次适生区面积占比增至 6.39%，西双版纳州西部扩张可能受益于暖湿条件，而保山市北部、大理州西部缩减或与干旱加剧有关。不适生区比例降至 8.66%，为所有情景中最低，进一步印证气候变暖整体上扩大了松材线虫的潜在适生范围。

综上所述，本研究揭示了 2 条关键规律：其一，气候变暖在总体上为松材线虫的定殖与扩散创造了更有利的条件，尤其在高温室气体排放情景下；其二，不同区域对气候变化的响应存在异质性，导致适生区空间格局发生重组。这一结果预示着未来松材线虫的防控策略需更具前瞻性，并针对不同气候情景下的风险区域制定差异化的管理方案。

3.6 不同情境下松材线虫空间格局变化

本研究以云南省松材线虫历史时期的适生区总面积（即高适生区与次适生区之和）30 803 km^2 为基准，计算了各时期的扩张率、缩减率与稳定率（表 4），直观地展示了适生区地理分布格局的动态演变过程（图 9）。

总体来看，松材线虫适生区的稳定性随时间呈现显著变化。在近期（2021—2040 年），2 种气候情景下的稳定率均较低（SSP126：33.06%；SSP585：31.28%），表明历史适生区格局面临剧烈调整。从中期（2041—2060 年）开始，稳定率大幅提升并持续保持在较高水平（75.67%~89.22%），这意味着经过初期调整后，适生区的核心分布范围将变得高度稳定。

具体而言，在 2021—2040 年，2 种情景下适生

表 3 松材线虫在云南省的适生区及其面积占比

Tab. 3 Suitable areas for *Bursaphelenchus xylophilus* in Yunnan Province and their area proportions

MaxEnt模型	不适生区面积/km^2	不适生区占比/%	次适生区面积/km^2	次适生区占比/%	高适生区面积/km^2	高适生区占比/%
历史	35 846	9.10	23 634	6.00	7 169	1.82
2021—2040年（SSP126）	55 242	14.02	7 587	1.93	3 820	0.97
2021—2040年（SSP585）	55 758	14.15	7 214	1.83	3 677	0.93
2041—2060年（SSP126）	41 340	10.49	19 228	4.88	6 081	1.54
2041—2060年（SSP585）	36 535	9.27	22 392	5.68	7 721	1.96
2061—2080年（SSP126）	36 500	9.26	23 561	5.98	6 588	1.67
2061—2080年（SSP585）	34 113	8.66	25 162	6.39	7 374	1.87

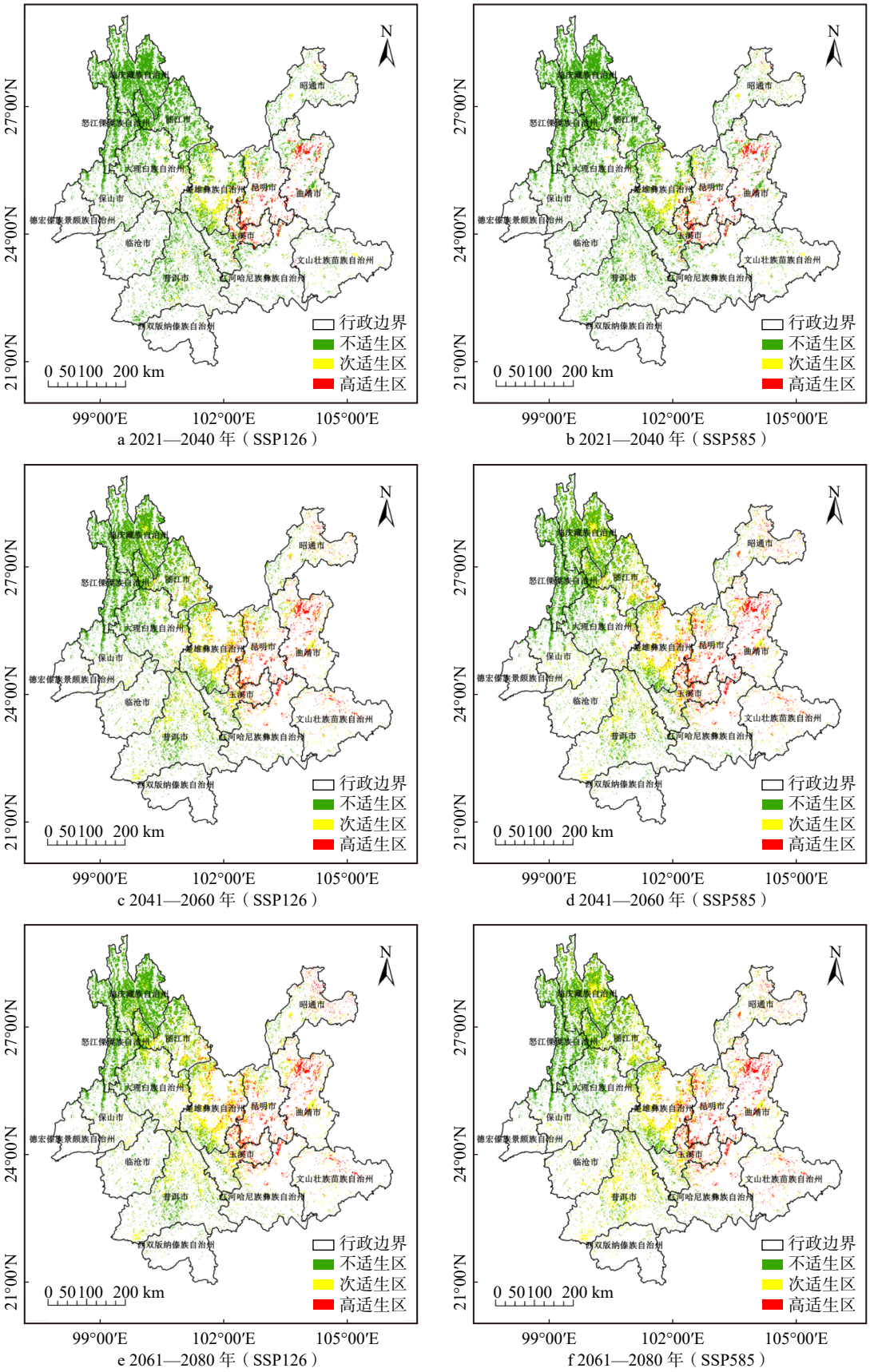


图 8　松材线虫在云南省的未来潜在适生区分布

Fig. 8　Future potential distribution of suitable areas for *Bursaphelenchus xylophilus* in Yunnan Province

区变化均呈现“剧烈缩减”的特征，缩减率极高（SSP126：63.75%；SSP585：65.52%），而扩张率很低（SSP126：3.02%；SSP585：2.73%），导致适生区净面积大幅减少。这表明气候条件可能导致大量历史适

表 4 不同时期松材线虫总适生区空间变化

Tab. 4 Spatial changes in total suitable areas of *Bursaphelenchus xylophilus* across different periods

时期(气候情景)	扩张面积/km²	缩减面积/km²	稳定面积/km²	扩张率/%	缩减率/%	稳定率/%
2021—2040年(SSP126)	931	19 635	10 182	3.02	63.75	33.06
2021—2040年(SSP585)	840	20 181	9 636	2.73	65.52	31.28
2041—2060年(SSP126)	904	6 501	23 309	2.93	21.11	75.67
2041—2060年(SSP585)	1 927	2 350	27 199	6.26	7.63	88.31
2061—2080年(SSP126)	3 093	3 641	25 912	10.04	11.82	84.12
2061—2080年(SSP585)	4 593	2 814	27 481	14.91	9.14	89.22

生区丧失其适宜性，分布格局面临全面收缩与重塑。

在低温室气体排放情景(SSP126)下，2041—2060 年适生区变化表现为“高缩减、低扩张”。缩减率(21.11%)远高于扩张率(2.93%)，稳定率为 75.67%。到 2061—2080 年，扩张率上升至 10.04%，缩减率降至 11.82%，稳定率为 84.12%。与中期相比，呈现出“扩张增强，缩减减弱”的趋势。

在高温室气体排放情景(SSP585)下，2041—2060 年适生区变化表现为“低缩减、中扩张”。缩减率(7.63%)与扩张率(6.26%)相对接近，稳定率达 88.31%，显示适生区在调整后更为稳定。到 2061—2080 年，该情景下适生区的扩张率达到所有时期与情景中的峰值(14.91%)，缩减率为 9.14%，稳定率为 89.22%。这预示着到 21 世纪末期，在高温室气体浓度路径下，松材线虫的适生区将在高度稳定的基础上经历最大规模的扩张。

通过比较不同时期与情景的空间变化率可以发现，气候变化对松材线虫未来空间格局的影响具有阶段性。近期(2021—2040 年)是适生区剧烈调整的收缩期；从中期开始，格局趋于稳定。在 SSP585 情景下，中、末期适生区均表现出更高的稳定性与更强的扩张潜力，尤其是在末期出现了最显著的扩张。这表明持续的气候变暖可能在长期为松材线虫创造更有利的生境，导致其适生区范围在巩固的基础上显著扩大。

相比之下，SSP126 情景下的扩张强度始终远低于 SSP585 情景，尤其在末期差异最为明显。这说明采取积极的减排措施维持低温室气体排放路径，能有效抑制松材线虫适生区在未来的显著扩张，对于控制其长期危害范围具有重要的管理意义。

4 讨 论

本研究通过系统优化 MaxEnt 模型参数并筛选环境变量，显著提升了松材线虫在云南省潜在适生区的预测精度。首先，基于相关性分析，将初始的 23 个候选环境变量从最初的 23 个筛选到 10 个，然后采用 R 语言中的 ENMeval 数据包优化模型，筛选出 FC = linear + quadratic(线性特征 + 二次型特征)且调控倍频 RM = 1.5 为最优特征组合，并保障模型复杂度与拟合优度达到最佳平衡，进而模拟出气候变化条件下松材线虫在云南的潜在适生区分布。研究结果印证了松材线虫病的发生受到气候、地形与土壤因子的共同制约。在当前历史气候条件下，松材线虫在云南省的高适生区与次适生区呈现跨区域分布特征，主要集中在滇中、滇东北及滇西南局部区域，覆盖全省 7.82% 的面积。

本研究的结果与已有研究存在广泛共识，例如，本研究预测的松材线虫在云南区域的分布格局与韩阳阳等[29]对松材线虫在中国的适生区预测分析结果基本一致。另外，巨云为等[30]采用回归树模型、基于规则的遗传算法、最大熵法和逻辑斯蒂回归 4 种生态位模型建立的江苏省松材线虫生境预测结果同样指出气候、地形和土壤类型为重要影响因子，但本研究进一步识别出“最干季度温度与降水”这一关键气候组合，反映出干旱期水热条件在云南高原地带对松材线虫生存的突出作用。在气候因子层面，Xiao 等[31]在预测松材线虫全球潜在分布研究中强调影响其地理分布的关键环境因素也包括温度和降水，他们指出适宜的温度和降水范围有利于其生存和繁殖，与本文结果基本一致。本研究发现最干季度平均温度(bio9)和最干季度降水量(bio17)是关键限制因子，其作用机制可从寄主抗性与媒介昆虫种群动态两方面阐释。云南省发生松材线虫病的树种主要是喜阳的马尾松(*Pinus massoniana*)和云南松(*Pinus yunnanensis*)等，过多的降水和过低的温度都会使其长势衰弱，抵抗力下降，加之松墨天牛 (*Monochamus alternatus*) 成虫有选择在衰弱木上产卵的习性，松墨天牛虫口基数成倍增加[32]。戴立霞等[33]报道我国南方冰雪灾害后松墨天牛种群暴发现象，间接支持了环境胁迫通过削弱寄主抗性而促进病害扩散的机制。孔维娜等[34]研究也发现，湿度越高，松墨天牛的羽化率越大，这解释了为何最干季降水成为关键因子——

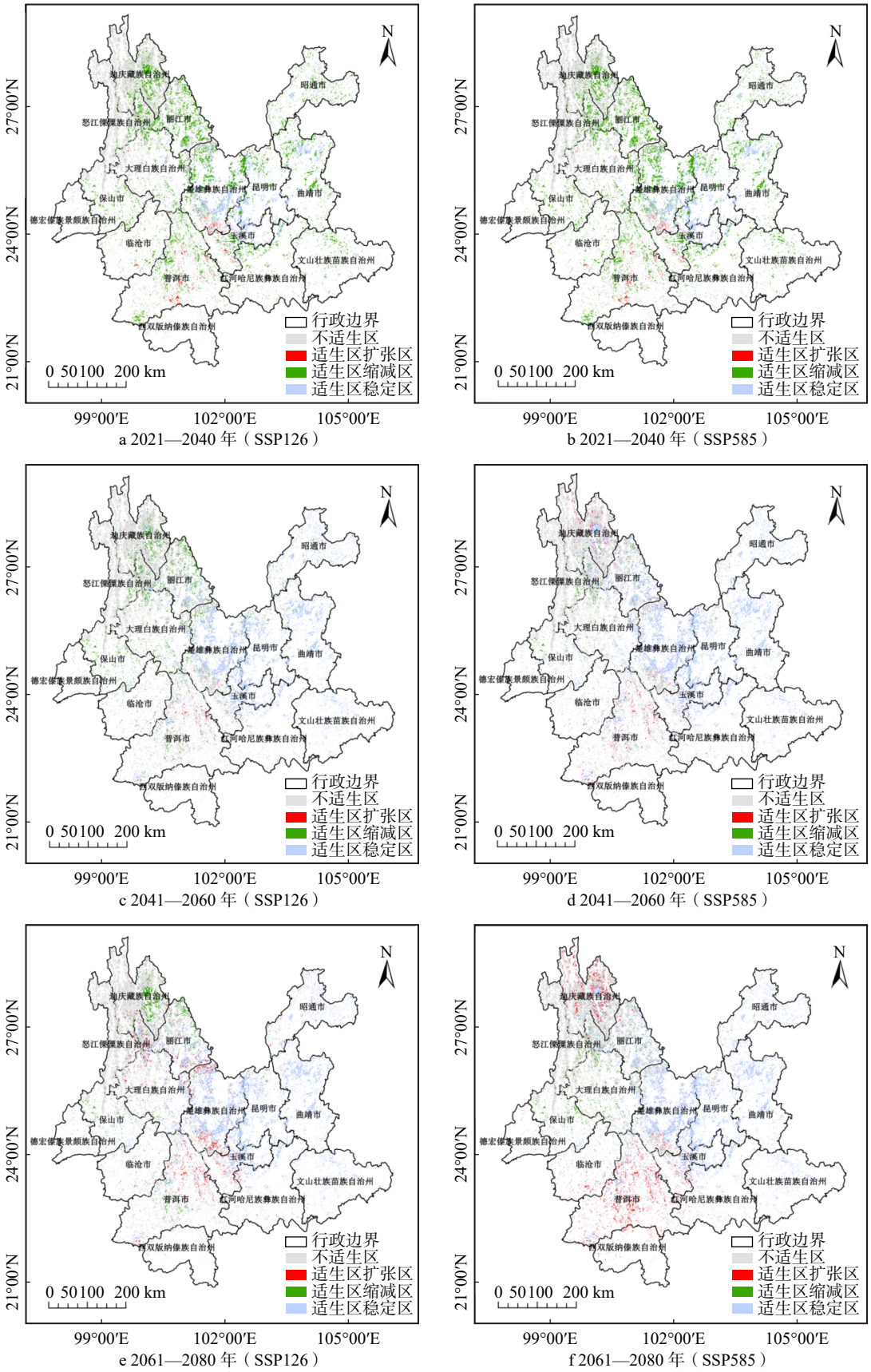


图 9　不同情景下松材线虫在云南省的总适生区的增减区域

Fig. 9　Expansion and contraction areas in total suitable areas of *Bursaphelenchus xylophilus* in Yunnan Province under different scenarios

干旱期的湿度条件直接制约着天牛种群的成功羽化与扩散。

在地形因子层面，Zhang 等[35]采用集成模型和基于优化参数的地理探测器方法系统评估了松材线

虫在当前时期的栖息地适宜性和关键驱动因素，发现坡度和人口密度的协同作用显著增强了松材线虫栖息地的适宜性，其基于单因素探测器分析的结果显示，坡度和坡向是影响松材线虫栖息地适宜性的最重要因素，本文虽未引入人为因子，但同样支持坡度作为独立地形因子对适生区格局的显著影响，说明在地形复杂的区域，坡度本身即构成重要生境筛选条件。本研究发现平缓坡度是适生区的重要地形特征，其作用机制可从微气候调节、寄主分布与人为活动三方面理解。首先，平缓坡度的水汽扩散速度适中，局部湿度不会因坡度陡峭导致快速干旱，也不会因低洼积水造成湿度过高，更接近松墨天牛羽化、繁殖的适宜湿度范围。其次，平缓地形的温度分布也更均匀，为松墨天牛卵的发育提供稳定环境，有利于虫口基数积累，间接提升松材线虫的自然传播概率。第三，平缓地形更有利于人类活动，可能通过生产活动携带了松材线虫，进而促进其扩散，加速松材线虫病的人为传播，这也是适生区集中在该坡度范围的重要辅助因素[36]。这一发现与近期实地监测结果不谋而合——在人类活动密集区域，松材线虫的入侵现象发生频繁。

土壤类型的间接调控作用。土壤类型虽未直接作用于线虫本身，但通过影响寄主松树的根系发育、水分养分获取能力及对干旱胁迫的耐受性，间接调控着松材线虫病的发生风险。特定土壤类型上生长的松林若处于胁迫状态，将更易成为松墨天牛的产卵对象，从而提升病害发生概率。

本研究的未来气候情景预测结果显示，不同排放路径下适生区演变存在显著差异。在 SSP126 低排放情景下，不适生区面积总体呈增加趋势，表明较低的气候变化压力可能使环境条件趋于不利于松材线虫生存；而在 SSP585 高排放情景下，不适生区面积总体呈减少趋势，反映出高温室气体排放所导致的气候变暖可能整体提升其生存适宜性。此外，两种情景下次适生区面积均呈先降后升趋势，次适生区面积总体呈减少趋势，而高适生区面积在 SSP126 情景下先减少后增加，在 SSP585 情景下先增加后减少。体现出气候路径对适生区演变的复杂影响。Zhang 等[36]的研究同样指出，未来气候情景下松材线虫在中国的适生区面积变化存在不确定性，但总体趋于增加。本研究进一步揭示，温度升高在一定范围内有利于松材线虫扩散，但超出适宜阈值则产生抑制作用。高天裕[37]关于松材线虫发育温度界限的研究表明其发育低温限为 10 ℃，高温抑制阈值为 28 ℃，最适温度为 25 ℃，进一步支持了温度驱动适生区变化的生理基础。SSP126 情景下总体扩张强度远低于 SSP585 情景，表明采取积极的减排措施以维持低温室气体排放情景，能够有效抑制松材线虫适生区的显著扩张，对于控制其未来的危害范围具有重要管理意义。在全球气候变暖背景下，当前的部分不适生区或低适生区未来可能逐步转化为适宜生境，加剧松材线虫的扩散风险。

本研究仍存在若干局限与不确定性。首先，松材线虫病的发生是多重因素互作的结果，除本研究已纳入分析的气候参数、地形特征及土壤类型等因子外，树种组成、林分结构及人类活动等潜在影响因子亦需引起重视[38]，但本研究未将其纳入考量。第二，本研究的一项关键局限性在于建模所依赖的早期历史发生记录极为有限。时空转移预实验表明，仅基于少数早期数据构建的模型完全无法预测新区域爆发，这尖锐地揭示了入侵初期数据基础薄弱对预警可靠性的根本制约。第三，本研究用于建模的物种分布点数量为 42 个，环境变量为 10 个。尽管我们已通过上述相关性分析来降低模型的复杂性和过拟合风险，但根据严格的标准，理想的变量数量应更少[18]。第四，在模型构建过程中，我们同时启用了“外推”与“钳制”功能，以期在探索物种潜在分布广度与维持预测稳健性之间取得平衡。然而，必须认识到任何模型预测，尤其是在严格外推区域，都存在固有的不确定性。

针对上述局限，未来研究可从以下方向深入：其一，未来研究可建立系统监测体系，积累更长时间序列、更广空间覆盖的松材线虫发生数据，夯实预警模型的数据基础，以提升模型的预测能力。其二，未来需要进一步考虑其他影响因子的影响，发展能够融合多源数据、兼容生态位动态的新型模型框架，以构建更具实践指导意义的入侵预警系统。其三，我们注意到，对于样本量有限的物种，小模型集成（ESM）是一种非常有前景的替代方法[39]。该方法通过构建和平均大量仅包含少数变量的简单模型，能显著提高模型的稳健性和可转移性。未来的研究在面临类似数据限制时，可采用 ESM 框架来进一步优化模型性能。其四，未来的研究可通过纳入物种的生理耐受性实验数据或更精确的校准区域界定，来进一步约束模型的外推行为，从而获得更接近物种真实生态位的预测结果。

5 结　　论

本研究基于 42 条松材线虫有效分布点数据，采用 ENMevalR 包对 MaxEnt 模型进行参数优化。通过网格搜索法系统测试不同正则化乘数与特征组合，最终确定最优参数为 RM = 1.5、FC = LQ，并基于此

构建模型，用于预测与分析松材线虫在云南省的潜在适生区分布。优化的 MaxEnt 模型预测结果表明，影响松材线虫分布的主导环境变量为坡度、最干季度平均温度、土壤类型和最干季度降水量。历史气候情景下，松材线虫在云南省的高适生区与次适生区面积之和为 30 803 km^2，约占云南省总面积的 7.82%；未来气候情景下，松材线虫的潜在适生区面积波动不大，在高温室气体排放情景下，松材线虫适生区呈现向西南方向扩张的趋势，在低温室气体排放情景下，松材线虫适生区西北部和南部区域收缩较为明显，次适生区面积在两种情景下均呈现减少趋势。低温室气体排放情景下总体扩张强度远低于高温室气体排放情景，表明采取积极的减排措施以维持低温室气体排放情景，能够有效抑制松材线虫适生区的显著扩张，对于控制其未来的危害范围具有重要意义。

本研究揭示了多种环境因素影响松材线虫潜在适宜分布的机制，并识别出驱动其空间分布模式的关键环境变量。这些生态发现不仅深化了对松材线虫生态位特征的理解，更为制定科学高效的森林害虫管理政策提供了理论依据。根据预测结果，可将高适宜区域划定为重点监管区，优先布局监测网络，强化木材运输流通的检疫监管，并结合遥感技术开展森林健康监测，从而提升疫情早期发现与干预能力。同时，应将识别出的关键环境变量纳入林业生态监测指标体系，构建动态风险评估与预警模型，为潜在疫区提供精准的早期预警。针对预测中适生区将持续扩张的趋势，以及云南被接壤的四川、贵州、广西三省区的 71 个疫区包围的严峻形势[2]，针对高风险区域，可实施林分结构的优化调整，并通过结合无人机巡查、人工地面调查和生物防治手段，构建“空—天—地”一体化监测体系。

总之，将本研究构建的适配性预测模型融入松材线虫的防控管理体系，将有助于提升云南在病虫害防治和应急响应领域的科学决策水平与智能化管理能力。

参　考　文　献

[1] 叶建仁. 松材线虫病在中国的流行现状、防治技术与对策分析 [J]. 林业科学, 2019, 55(9): 1−10.
Ye J R. Epidemic status of pine wilt disease in China and its prevention and control techniques and counter measures [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(9): 1−10.

[2] 国家林业和草原局. 国家林业和草原局公告 (2025 年第 4 号)(2025 年松材线虫病疫区)[EB/OL]. (2025−03−03)[2025−11−06]. https://www.forestry.gov.cn/search/612541.
National Forestry and Grassland Administration. Announcement of the National Forestry and Grassland Administration (No. 4 of 2025)(2025 pine wilt disease epidemic areas)[EB/OL]. (2025−03−03)[2025−11−06]. https://www.forestry.gov.cn/search/612541.

[3] 许格希, 余荣兵, 杨昌旭, 等. 基于 GIS 空间技术和 MaxEnt 模型预测川西松材线虫病入侵风险 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(9): 104−115.
Xu G X, Yu R B, Yang C X, et al. Prediction of invasion risk of pine wilt disease based on GIS spatial technology and MaxEnt model in western Sichuan [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(9): 104−115.

[4] 刘冬梅, 施济普, 李俊生, 等. 西南生态安全屏障战略视阈下云南生物多样性保护对策 [J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(6): 26−29.
Liu D M, Shi J P, Li J S, et al. Biodiversity conservation measures under the “Ecological Security Barrier” strategy in Yunnan Province [J]. Environment and Sustainable Development, 2017, 42(6): 26−29.

[5] 云南省林业和草原局. 云南成为全国唯一解除松材线虫病疫情的省份 [EB/OL]. (2024−10−30)[2025−07−31]. https://lcj.yn.gov.cn/html/2024/zuixindongtai_1030/72463.html.
Yunnan Provincial Forestry and Grassland Bureau. Yunnan becomes the only province in China to lift the pine wilt disease epidemic status[EB/OL]. (2024−10−30)[2025−07−31]. https://lcj.yn.gov.cn/html/2024/zuixindongtai_1030/72463.html.

[6] 周平阳, 李祖钦, 刘宏屏, 等. 云南省松材线虫病的发现与快速根除 [J]. 植物检疫, 2008, 22(4): 236−239.
Zhou P Y, Li Z Q, Liu H P, et al. Detection and rapid eradication of pine wilt disease in Yunnan Province [J]. Plant Protection, 2008, 22(4): 236−239.

[7] 中国日报网. 云南水富松树“癌症”疫情防控工作取得阶段性成效 [EB/OL]. (2019−04−20)[2025−11−06]. https://ex.chinadaily.com.cn/exchange/partners/82/rss/channel/cn/columns/j3u3t6/stories/WS5cbaa0f4a310e7f8b1577d56.html.
China Daily. Yunnan’s Shuifu County achieves milestone in controlling pine tree “cancer” epidemic[EB/OL]. (2019−04−20)[2025−11−06]. https://ex.chinadaily.com.cn/exchange/partners/82/rss/channel/cn/columns/j3u3t6/stories/WS5cbaa0f4a310e7f8b1577d56.html.

[8] 国家林业和草原局. 国家林业和草原局公告 (2022 年第 6 号)(2022 年松材线虫病疫区)[EB/OL]. (2022−03−18)[2025−11−06]. https://www.forestry.gov.cn/c/www/gkgjlyjgb/63794.jhtml.
National Forestry and Grassland Administration. Announcement of the National Forestry and Grassland Administration (No. 6 of 2022)(2022 pine wilt disease epidemic areas)[EB/OL]. (2022−03−18)[2025−11−06]. https://www.forestry.gov.cn/c/www/gkgjlyjgb/63794.jhtml.

[9] 季梅, 泽桑梓, 杨斌, 等. 云南省国家级林业检疫性有害生物 [J]. 林业调查规划, 2013, 38(6): 57−59.
Ji M, Ze S Z, Yang B, et al. National level forestry quarantine pests in Yunnan Province [J]. Forest Inventory and Planning, 2013, 38(6): 57−59.

[10] 徐福元, 郑华英, 刘云鹏, 等. 马尾松种源对松褐天牛成虫取食、松材线虫病的抗性分析 [J]. 林业科学, 2011, 47(1): 101−106.

Xu F Y, Zheng H Y, Liu Y P, et al. Resistance analysis of *Pinus massoniana* provenances to maturation feedings by the adult of *Monochamus alternatus* and *Bursaphelenchus xylophilus* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(1): 101−106.

[11] Wu B, Li Y, Sun Z H, et al. A pH-responsive chitosan-based nanopesticide for controlled matrine delivery and visualization of pine wood nematode [J]. Pest Management Science, 2025, 82(2): 1239−1250.

[12] Gao R, Liu L, Fan S, et al. Occurrence and potential diffusion of pine wilt disease mediated by insect vectors in China under climate change [J]. Pest Management Science, 2024, 80(12): 6068−6081.

[13] Mechergui K, Jiang M, Qi Z, et al. The effects of climate change on distributions of four endemic and medicinal species in the North Africa using MaxEnt modeling and GIS tools [J]. Industrial Crops & Products, 2025, 235: 121766.

[14] 胥勇, 周平阳, 王扬, 等. 应用 BIOCLIM 生态位模型对松材线虫传入云南的风险评估 [J]. 云南农业大学学报, 2008, 23(6): 746−753.
Xu Y, Zhou P Y, Wang Y, et al. Assessment of risk of introduction pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* in Yunnan Province using BIOCLIM ecological niche model [J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2008, 23(6): 746−753.

[15] 周汝良, 石雷, 尹立红. 云南省松材线虫适生区的精细化评估 [J]. 林业科学研究, 2008, 21(5): 702−706.
Zhou R L, Shi L, Yin L H. Refined evaluation of the suitable areas of *Bursaphelenchus xylophilus* in Yunnan Province [J]. Forestry Research, 2008, 21(5): 702−706.

[16] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation [J]. Ecography, 2008, 31(2): 161−175.

[17] Mu L K, Ran F, Feng Q Y, et al. Integrated evaluation of habitat suitability and spatial prediction of medicinal quality for *Bletilla striata* using species distribution models and machine learning approaches [J]. Industrial Crops & Products, 2025, 236: 121937.

[18] Neftalí S, Salvador A, Urtzi E, et al. Want to model a species niche? A step-by-step guideline on correlative ecological niche modelling [J]. Ecological Modelling, 2021, 456: 109671.

[19] 泽桑梓. 云南林业有害生物防控与长江经济带生态安全 [J]. 云南林业, 2016, 37(4): 54−57.
Ze S Z. Prevention and control of forest pests and diseases in Yunnan and ecological security of the Yangtze River Economic Belt [J]. Yunnan Forestry, 2016, 37(4): 54−57.

[20] Kass J M, Muscarella R, Galante P J, et al. ENMeval 2.0: redesigned for customizable and reproducible modeling of species´ niches and distributions [J]. Methods in Ecology and Evolution, 2021, 12(9): 1602−1608.

[21] Owens L H, Campbell P L, Dornak L L, et al. Constraints on interpretation of ecological niche models by limited environmental ranges on calibration areas [J]. Ecological Modelling, 2013, 263: 10−18.

[22] Gebremedhn H, Gebrewahid Y, Hadgu G, et al. Projecting the impacts of climate change on habitat distribution of *Varroa destructor* in Ethiopia using MaxEnt ecological modeling [J]. The Science of the Total Environment, 2025, 968: 178904.

[23] 何学高, 刘欢, 张婧, 等. 基于优化的 MaxEnt 模型预测青海省祁连圆柏潜在分布区 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(12): 19−31.
He X G, Liu H, Zhang J, et al. Predicting potential suitable distribution areas for *Juniperus przewalskii* in Qinghai Province of northwestern China based on the optimized MaxEnt model [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(12): 19−31.

[24] 张雷, 王琳琳, 刘世荣, 等. 生境概率预测值转换为二元值过程中 4 个阈值选择方法的比较评估——以珙桐和杉木生境预估为例 [J]. 植物生态学报, 2017, 41(4): 387−395.
Zhang L, Wang L L, Liu S R, et al. An evaluation of four threshold selection methods in species occurrence modelling with random forest: case studies with *Davidia involucrata* and *Cunninghamia lanceolata*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 41(4): 387−395.

[25] Clark J, Wang Y, August P V. Assessing current and projected suitable habitats for tree-of-heaven along the Appalachian trail [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 2014, 369(1643): 20130192.

[26] 李林汝, 员学锋, 张瑞娜, 等. 基于最大熵模型的生态系统文化服务空间分异及其对环境要素的响应分析——以陕北榆林市为例 [J]. 生态学报, 2024, 44(21): 9582−9595.
Li L R, Yuan X F, Zhang R N, et al. Spatial differentiation in cultural ecosystem services and their responses features based on MaxEnt model: case study of Yulin City in Northern Shaanxi [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(21): 9582−9595.

[27] Dormann F C, Elith J, Bacher S, et al. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance [J]. Ecography, 2013, 36(1): 27−46.

[28] Jane E, Phillips S J, Hastie T, et al. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists [J]. Diversity and Distributions, 2011, 17: 43−57.

[29] 韩阳阳, 王焱, 项杨, 等. 基于 Maxent 生态位模型的松材线虫在中国的适生区预测分析 [J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2015, 39(1): 6−10.
Han Y Y, Wang Y, Xiang Y, et al. Prediction of distribution of *Bursaphelenchus xylophilus* in China based on MaxEnt ecological niche model [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2015, 39(1): 6−10.

[30] 巨云为, 李明阳, 吴文浩. 江苏省松材线虫发生的预测方法 [J]. 林业科学, 2010, 46(12): 91−96.
Ju Y W, Li M Y, Wu W H. Predictive methods of pine wilt disease in Jiangsu Province [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(12): 91−96.

[31] Xiao Y, Guo Q Q, Xie N, et al. Predicting the global potential distribution of *Bursaphelenchus xylophilus* using an ecological niche model: expansion trend and the main driving factors [J]. BMC Ecology and Evolution, 2024, 24(1): 48.

[32] 罗圣洁, 张洋铭, 陈润恺, 等. 马尾松枝段对松墨天牛产卵选择

行为的影响 [J]. 中国森林病虫, 2025, 44(5): 18−22.
Luo S J, Zhang Y M, Chen R K, et al. Effects of different *Pinus massoniana* blocks on oviposition selection of *Monochamus alternatus*[J]. Forest Pests and Diseases. 2025, 44(5): 18−22.

［33］戴立霞, 刘跃进, 张祺. 冰雪灾害对松墨天牛种群数量的影响及防治对策 [J]. 中国森林病害, 2010, 29(5): 32−34.
Dai L X, Liu Y J, Zhang Q. Influence of ice and snow disasters on the population of *Monochamus alternatus* and its countermeasures [J]. Chinese Forest Diseases, 2010, 29(5): 32−34.

［34］孔维娜, 王慧, 李捷, 等. 温湿度对松墨天牛越冬幼虫寿命的影响 [J]. 山西农业大学学报 (自然科学版), 2006, 26(3): 294−295.
Kong W N, Wang H, Li J, et al. The effects of temperature and humidity on the longevity of *Monochamus Aalternatus* hope (Coleoptera: Cerambycidae) [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2006, 26(3): 294−295.

［35］Zhang L, Li J, Yang C K, et al. Identifying drivers affecting the spatial distribution of suitable habitat for the pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) in China: insights from ensemble model and geographical detector [J]. Ecology and Evolution, 2025, 15(5): e71433.

［36］Zhang L, Wang P, Xie G L, et al. Evaluating the impact of climate change and human activities on the potential distribution of pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) in China [J]. Forests, 2024, 15(7): 1253.

［37］高天裕. 松材线虫在我国的适生性分析 [J]. 植物检疫, 1987, 1(3): 215−219.
Gao T Y. Analysis on the adaptability of *Bursaphelenchus xylophilus* in China [J]. Plant Quarantine, 1987, 1(3): 215−219.

［38］理永霞, 张星耀. 松材线虫入侵扩张趋势分析 [J]. 中国森林病虫, 2018, 37(5): 1−4.
Li Y X, Zhang X Y. Analysis on the trend of invasion and expansion of *Bursaphelenchus xylophilus* [J]. Forest Pests and Diseases, 2018, 37(5): 1−4.

［39］Breiner T F, Guisan A, Bergamini A, et al. Overcoming limitations of modelling rare species by using ensembles of small models [J]. Methods in Ecology and Evolution, 2015, 6(10): 1210−1218.

（责任编辑　范　娟　李　契
责任编委　黄华国）