

气候变化背景下橡胶树白根病在全球的适生区预测

白 蓥^{1,2}, 李 宁^{3*}, 刘少军², 佟金鹤², 陈小敏¹, 邹海平¹

(1. 海南省气候中心, 海口 570203; 2. 海南省气象科学研究所, 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口 570203; 3. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 海口 571101)

摘要 为明确橡胶树白根病在全球的适生区潜在分布,探究未来气候变化背景下该病适生区的时空变化趋势。本研究利用基准时段(1970年—2000年)和未来(2041年—2080年)的全球生物气候数据和该病地理分布信息,基于最大熵模型预测未来该病适生区分布。结果表明:模型训练集和测试集受试者工作特征曲线下方面积值分别为96.5%、94.2%,模拟精度较高。贡献率排名前三的主导环境因子是年均气温变化范围、最湿月降水量、昼夜温差月均值。基准时段橡胶树白根病的全球中、高适生区主要集中在亚洲南部、太平洋岛国、非洲中西部、南美洲东北部等地区。从基准时段到未来,亚洲、大洋洲、非洲和南美洲的中、高适生区分别有向西北、东北、中间和东南方向移动的趋势,全球适生区质心位置有向西北方向移动的趋势,中、高适生区面积占比呈现增加趋势。该研究可为全球各地区橡胶树白根病的检疫防治提供一定的参考依据。

关键词 橡胶树白根病; 最大熵模型; 气候变化; 主导环境因子; 适生区

中图分类号: S 763.7 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2020151

Prediction of global suitable area for white root disease of rubber tree under climate change

BAI Rui^{1,2}, LI Ning^{3*}, LIU Shaojun², TONG Jinhe², CHEN Xiaomin¹, ZOU Haiping¹

- (1. Hainan Climate Center, Haikou 570203, China; 2. Hainan Institute of Meteorological Science, Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203, China; 3. Environmental and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China)

Abstract In order to determine the potential distribution of suitable area for white root disease of rubber tree in the world and explore the spatiotemporal variation trend of suitable area of the disease under future climate change, distribution of suitable area of this disease was predicted based on the maximum entropy model, the global bioclimatic variables for the baseline (1970–2000) and future (2041–2080) and the geographic distribution information of the disease. The results showed that the average area values under the receiver operating characteristic curve of the model training and test data were 96.5% and 94.2%, respectively, with a higher simulation accuracy. The top three major environmental factors of the contribution percent were temperature annual range, precipitation of wettest month, and monthly mean diurnal range. During the baseline, the middle and high suitable areas of the disease were mainly concentrated in south Asia, Pacific island countries, central and western Africa and northeast South America. From the baseline to the future, the middle and high suitable areas in Asia, Oceania, Africa and South America moved toward the northwest, northeast, middle and southeast. The centroid position of the suitable areas of this disease moved to the northwest in the world, and the area proportion of the middle and high suitable areas of this disease were increasing. These data can provide some references for the quarantine prevention and treatment of this disease in various regions of the world.

Key words rubber tree white root disease; maximum entropy model; climate change; major environmental factor; suitable area

收稿日期: 2020-03-24 修订日期: 2020-07-03

基金项目: 海南省自然科学基金青年基金(420QN371);海南省南海气象防灾减灾重点实验室开放基金(SCSF202011);海南省气象局技术提升项目(HNQXJS202007)

* 通信作者 E-mail: n.li@catas.cn

近年来,国际上天然橡胶种植面积和产量持续上升,但仍面临着供应不足的问题^[1]。由白根病菌 *Rigidoporus lignosus* (KL.) Imaz. 引起的橡胶树白根病是一种世界性病害,是影响天然橡胶产量的重要病害之一^[2]。该病于 1904 年在新加坡首次发现,之后马来西亚、印度尼西亚、泰国、尼日利亚、科特迪瓦等地均有发生,东南亚和西非橡胶园因该病造成过重大损失^[3-4]。在中国于 1983 年在海南岛东太农场橡胶林中首次发现该病,发病面积达到 26 hm²,之后在云南、广西等植胶区均报道有该病菌,被列为中国进境检疫性病害^[5]。橡胶树白根病病菌在土壤中可长时间存活,菌丝附着在根皮表面,由于橡胶树根茎可以延伸几米长,可导致周围健康的橡胶树被感染^[6]。该菌甚至可以侵染其他林木、果树,如柑橘、茶、椰子、胡椒、咖啡、槟榔、菠萝蜜、油棕、木薯等^[7]。因此,预测橡胶树白根病未来适生区分布情况,进行病害早期监测预警,及时采取正确检疫防治策略,对保障橡胶树安全生产具有重要意义。

橡胶树白根病的发生与气温、降水等生物气候变量密切相关。魏铭丽等^[8]指出橡胶树白根病的传播与降水等气象环境有关。贺春萍等^[9]和 Oghenekaro 等^[10]的研究表明,橡胶白根病菌菌丝在 10~35℃ 均能生长,最适温度 28~30℃,温度 <5℃ 或 >40℃ 病原菌菌丝停止生长。

未来气候变化数据是预测物种地理分布的关键^[11]。典型浓度路径(RCPs)情景数据能够科学地预估不同温室气体排放下的未来气候变化情况^[12]。耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)全球气候模式是当前预估未来气候变化的主要工具,CMIP5 提供了内容丰富的气候模拟和预估数据集^[13]。通过研究气候变化对病虫害适生区进行预测的模型有动态模拟模型(CLIMEX)^[14]、基于遗传算法的规则组合预测模型(GARP)^[15]、生物气候分析系统模型(BIOCLIM)^[16]、生态位因子分析模型(ENFA)^[17]以及最大熵模型(MaxEnt)^[18]等。其中 MaxEnt 模型不受样本数量和偏差影响,对比其他预测模型该模型预测结果较好^[19-20]。国内外学者利用未来气候数据基于该模型已对马铃薯块茎蛾 *Phthorimaea operculella* (Zeller)^[21]、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee^[22]、地中海实蝇 *Ceratitis capitata* (Weidemann)^[23]、松针红斑病菌 *Dothistroma pini*^[24]、埃及吹绵蚧 *Icerya aegyptiaca* (Douglas)^[25]等病虫害的潜在适生区进行了预测。

气候变暖增加农业热量资源,提高作物复种指数,促使病虫害发生、分布范围及危害程度发生显著变化。因此,预测气候变化对病虫害适生区分布的影响,及时掌握病虫害的分布范围,完善病虫害防控机制应是我们重视的问题。目前关于全球橡胶树白根病的适生区预测方面的研究几乎没有。因此本研究根据全球橡胶树白根病地理分布数据和影响其发生的生物气候数据,利用 MaxEnt 模型确定影响其分布的主导环境因子,结合在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 排放情景下 CMIP5 提供的 5 个常用且气候情景齐全的大气环流模式(GCMs)的未来气候预估数据,预测该病在未来(2050s 和 2070s)的潜在适生区分布,评估气候变化对该病适生区分布的影响,以期为进一步做好全球橡胶树白根病的早期预测和防治准备工作提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 资料收集和整理

本研究从博物馆或标本馆中的标本记录、国内外公开发表的相关论文论著 2 种途径获取全球橡胶树白根病地理分布资料,经过筛选去除相同和极为相近的地点后保留 193 个分布点。橡胶树白根病目前广泛分布在亚洲和非洲植胶国家,包括中国(海南、云南、广西)、马来西亚、印度尼西亚、泰国、印度、斯里兰卡、柬埔寨、缅甸、菲律宾、科特迪瓦、安哥拉、尼日利亚、喀麦隆、乌干达、塞拉利昂、埃塞俄比亚、刚果、加蓬等地。

影响橡胶树白根病发生的环境因子的选择来自 WORLDCLIM(<http://www.Worldclim.org/>)提供的生物气候变量,共 19 个,包括年平均温度、昼夜温差月均值、等温性、温度季节性变化标准差、最暖月最高温度、最冷月最低温度、年均气温变化范围、最湿季度平均温度、最干季度平均温度、最暖季度平均温度、最冷季度平均温度、年降水量、最湿月降水量、最干月降水量、降水量季节性变化变异系数、最湿季度降水量、最干季度降水量、最暖季度降水量、最冷季度降水量,数据空间分辨率为 2.5'。基准时段生物气候变量为 1970 年—2000 年间的实测数据。未来生物气候变量由 CMIP5 提供的 BCC-CSM1-1、CCSM4、HadGEM2-ES、MRI-CGCM3、NorESM1-M 这 5 个 GCMs 模式在 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 情景下 2050s(2041 年—2060 年)和 2070s(2061 年—2080 年)采用等权重集合平均方法处理后获取

数据。

地图数据:采用世界地图(<http://www.Gadm.org/>)作为底图。

1.2 MaxEnt 模型模拟及精度验证

将橡胶树白根病地理分布资料和影响该病发生的环境因子数据导入 MaxEnt 模型。随机选取 75% 该病分布点资料用于模型模拟,25% 该病分布点资料用于模型验证。为避免由影响该病发生的环境因子之间相关性引起的过拟合,对该模型进行两次模拟,首次模拟采用刀切法检验影响该病发生的环境因子与该病分布的相关性,剔除贡献率和排列重要性均为 0 的因子,确定对该病分布有重要影响的环境因子;第二次采用有重要影响的环境因子进行模拟,最终得到橡胶树白根病适生区分布概率。

根据以假阳性率为横坐标和真阳性率为纵坐标绘制成受试者工作特征(ROC)曲线下的面积(AUC)值判断模型预测精度,其标准为:AUC 值在(0,50%]说明预测结果不准确;(50%,70%]说明预测结果差;(70%,90%]说明预测结果一般;(90%,100%]说明预测结果准确^[26]。

1.3 橡胶树白根病适生性分析

在 ArcGIS 软件中运行模型模拟最终结果,利用软件空间分析中的重分类工具,将模拟的橡胶树白根病分布概率划分为 4 个等级:(0,0.1]为非适生区;(0.1,0.3]为低适生区;(0.3,0.5]为中适生区;(0.5,1]为高适生区^[27]。进而得到橡胶树白根病在全球的不同程度适生区分布图。

利用 ArcGIS 软件统计出橡胶树白根病不同时期不同气候情景下各适生区面积、质心(指将橡胶树白根病的分布范围缩小为单个中心点)位置。

2 结果与分析

2.1 MaxEnt 模型精度评价

对 MaxEnt 模型预测的橡胶树白根病适生区分布进行精度验证的结果显示,该模型训练集的 AUC 值为 96.5%,模型测试集的 AUC 值为 94.2%,均明显高于随机预测分布模型的 AUC 值(50%)。表明 MaxEnt 模型预测出的橡胶树白根病潜在分布区域是非随机存在的、有规律的,即模型对该病在全球的适生区预测结果可信度较高。

2.2 影响橡胶树白根病发生的主导环境因子

刀切法分析显示,影响橡胶树白根病发生的主导环境因子是年均气温变化范围、最湿月降水量、昼夜温差月均值、最冷季度平均温度、温度季节性变化标准差、最冷月最低温度、最湿季度降水量、年降水量、降水量季节性变化变异系数、年平均温度、最暖季度降水量、等温性、最暖季度平均温度。其中,贡献率排名前三的主导环境因子是年均气温变化范围、最湿月降水量、昼夜温差月均值,贡献率分别为 26.7%、17.4%、10.2%;排列重要性排名前三的主导环境因子分别是最冷季度平均温度、昼夜温差月均值、最湿月降水量,排列重要性分别为 33.3、15.8、7.2(表 1)。

本研究以橡胶树白根病低、中适生区的分界值为阈值,确定影响该病发生的主导环境因子适生范围(表 1)。其中,年均气温变化范围的适生值为<21℃,最湿月降水量的适生值为>200 mm,昼夜温差月均值的适生值为 6~14℃,最冷季度平均温度的适生值为>15℃。

表 1 主导环境因子的贡献率、排列重要性和适生值范围

Table 1 Contribution percent, permutation importance and suitable value range of major environmental factors

主导环境因子 Major environmental factors	贡献率/% Contribution percent	排列重要性 Permutation importance	适生值范围 Suitable value range
年平均温度 Annual mean temperature	1.8	5.2	>17℃
昼夜温差月均值 Monthly mean diurnal range	10.2	15.8	6~14℃
等温性 Isothermality	1.3	3.2	>0.35
温度季节性变化标准差 Temperature seasonality (standard deviation×100)	9.8	6.3	<4.8
最冷月最低温度 Minimum temperature of coldest month	8.3	6.6	>10℃
年均气温变化范围 Temperature annual range	26.7	4.7	<21℃
最暖季度平均温度 Mean temperature of warmest quarter	1.1	4.3	21~31℃
最冷季度平均温度 Mean temperature of coldest quarter	10.1	33.3	>15℃
年降水量 Annual precipitation	3.6	5.9	>1 000 mm
最湿月降水量 Precipitation of wettest month	17.4	7.2	>200 mm
降水量季节性变化变异系数 Precipitation seasonality (coefficient of variation)	3.6	1.9	<110%
最湿季度降水量 Precipitation of wettest quarter	4.7	0.8	>500 mm
最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter	1.4	4.6	>280 mm

2.3 基准时段橡胶树白根病在全球的适生区分布

图 1 为基于 MaxEnt 模型预测基准时段生物气候条件适宜全球橡胶树白根病菌存活区域与程度, 适生性越高代表生物气候条件越适宜橡胶树白根病菌存活, 中度以上适生区都是橡胶树白根病发生与防控的重点区域。

在亚洲, 橡胶树白根病中、高适生区主要集中在中国南部地区、越南、老挝、柬埔寨、泰国、马来西亚、缅甸、文莱、菲律宾、东帝汶、新加坡、印度尼西亚、斯里兰卡、孟加拉国、印度南部沿海地区。在大洋洲, 橡胶树白根病中、高适生区主要集中在所罗门群岛、斐济、巴布亚新几内亚等太平洋岛国; 低适生区分布在澳大利亚北部沿海局部地区、

新西兰北部及沿海地区。在欧洲, 大部分地区生物气候条件不适宜橡胶树白根病发生, 低适生区主要集中在意大利、希腊、西班牙等国沿海地中海部分地区以及葡萄牙西部沿海地区。在非洲, 橡胶树白根病中、高适生区主要集中在 12°N 至 15°S 之间的加纳、几内亚、塞拉利昂、尼日利亚、利比里亚、多哥、安哥拉、科特迪瓦、加蓬、贝宁、刚果、喀麦隆等中西部沿海地区和坦桑尼亚、乌干达等东南部地区。在南美洲, 橡胶树白根病中、高适生区主要集中在秘鲁、巴西、哥伦比亚、圭亚那、玻利维亚、厄瓜多尔、委内瑞拉等东北部地区; 在北美洲, 橡胶树白根病中、高适生区主要集中在墨西哥南部、危地马拉、古巴等地区。

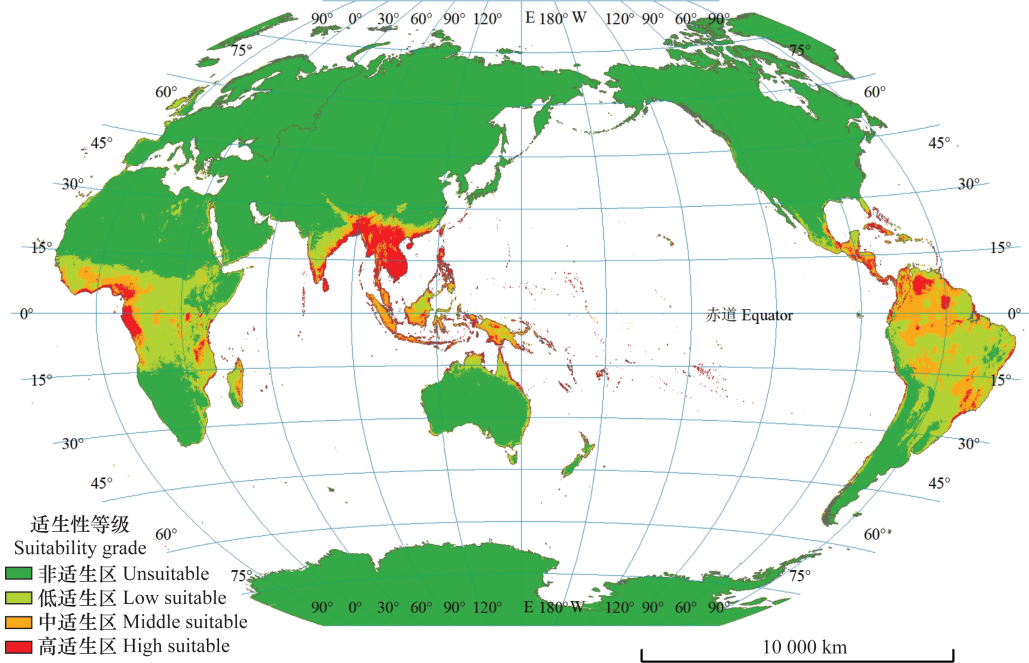


图 1 基准时段下橡胶树白根病在全球的适生区分布

Fig. 1 Worldwide distribution of suitable area for rubber tree white root disease in the baseline

2.4 未来气候情景下橡胶树白根病在全球适生区预测

2050s(2041 年—2060 年)和 2070s(2061 年—2080 年)不同气候情景(RCP2.6、RCP 4.5、RCP 8.5)下全球橡胶树白根病的潜在适生区分布如图 2 所示, 与基准时段的适生区分布情况(图 1)相比, 在 RCP2.6 情景下, 非洲中西部沿海地区和东南部沿海地区橡胶树白根病适生等级呈现上升趋势, 如科特迪瓦中南部由低适生区变成高适生区, 坦桑尼亚中南部由中适生区变成高适生区; 北美洲东南部地区橡胶树白根病适生等级呈现下降趋势, 如古巴由高适生区或中适生区变成中适生区或低适生区。在 RCP4.5 情景下, 中国云南省和广东省、马来西亚南

部、新加坡西部和印度尼西亚苏门答腊岛西北部地区橡胶树白根病适生等级均呈现下降趋势, 如马来西亚南部由中适生区变成低适生区, 中国云南省西南部部分地区由高适生区变成中适生区。在 RCP8.5 情景下, 亚洲南部大多数国家地区橡胶树白根病适生等级呈现上升趋势, 如文莱由低适生区变成高适生区, 中国台湾省中西部地区由中适生区变成高适生区; 大洋洲的太平洋岛国橡胶树白根病适生等级呈现上升趋势, 如巴布亚新几内亚北部由低适生区变成高适生区; 南美洲北部地区橡胶树白根病适生等级呈现下降趋势, 如委内瑞拉中西部由高适生区变成中适生区或低适生区, 巴西北部由中

适生区变成低适生区。从基准时段至 2050s 至 2070s,亚洲、大洋洲、非洲、南美洲橡胶树白根病中、高适生区分别有向西北、东北、中间和东南方向移动的趋势。

为了更准确地分析全球橡胶树白根病适生区在 2050s 和 2070s 不同气候情景下的变化趋势,选用适生区质心变化(图 3)表示。结果显示,在基准时段和 未来气候情景下橡胶树白根病适生区质心均位于亚洲,基准时段的质心位于印度尼西亚马鲁古省(8.3°S, 130.8°E);在 RCP2.6 情景下 2050s 和 2070s 的质

心分别位于越南东部沿海地区的河静省(18.3°N, 105.8°E)和乂安省(18.6°N,105.7°E);在 RCP4.5 情景下 2050s 和 2070s 的质心分别位于印度西部沿海地区的喀拉拉邦的(9.9°N,76.6°E)和(11.9°N, 75.7°E);在 RCP8.5 情景下 2050s 和 2070s 的质心分别位于中国海南岛东北部沿海地区文昌市的(19.6°N,111°E)和(19.8°N,110.9°E)。基准时段到未来(2050s 和 2070s)不同气候情景下该病适生区质心位置有向西北方向移动的趋势,质心移动距离为 3 422.6~5 870.9 km。

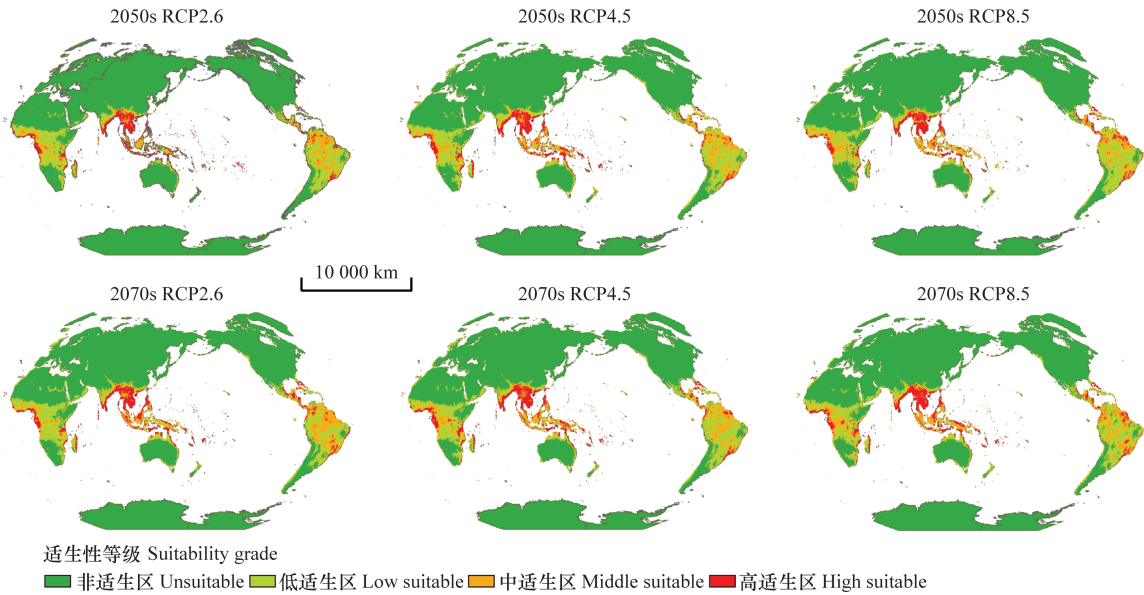


图 2 未来不同气候情景下全球橡胶树白根病的潜在适生区分布

Fig. 2 Potential worldwide distribution of the suitable areas of rubber tree white root disease under different future climate scenarios

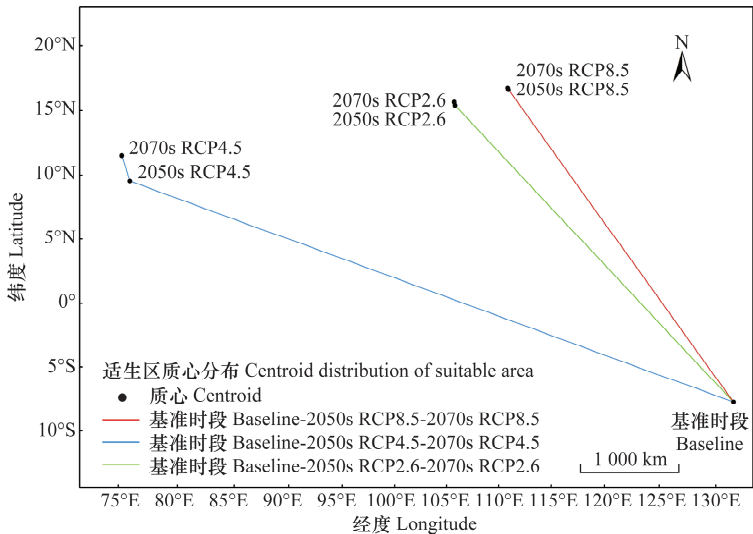


图 3 未来气候情景下全球橡胶树白根病适生区质心分布情况

Fig. 3 Centroid distribution of the suitable areas of rubber tree white root disease in the world under the future climate scenarios

从全球橡胶树白根病非、低、中、高适生区相对面积比预测结果(表 2)可知,从基准时段至 2050s 至 2070s,相同的气候情景下,中、高适生区面积占比呈现增加趋势。对比基准时段全球橡胶树白根病各适

生区占比情况,2050s 和 2070s 在同一气候情景下,低、中、高适生区面积占比均呈现增加趋势,非适生区面积占比呈现减少趋势。

表 2 全球橡胶树白根病各等级适生区相对面积比

Table 2 Relative rates of different suitable areas for rubber tree white root disease in the world

适生区类型 Suitable area type	适生区相对面积比/% Relative rate of suitable area						
	1970 年— 2000 年	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
		2050s	2070s	2050s	2070s	2050s	2070s
高适生区 High suitable area	2.2	2.2	2.4	2.3	2.4	2.2	2.4
中适生区 Middle suitable area	4.5	5.0	5.0	4.9	5.0	4.7	5.0
低适生区 Low suitable area	8.3	8.3	8.4	8.7	8.4	8.5	8.4
非适生区 Unsuitable area	85.0	84.5	84.2	84.1	84.2	84.6	84.2

3 讨论

本研究使用 MaxEnt 模型预测全球橡胶树白根病的适生区分布情况,通过 AUC 参数评估,预测准确性较高。说明该模型对于橡胶树白根病适生区预测是可行的。贡献率和排列重要性排名前三的主导环境因子是年均气温变化范围、最湿月降水量、昼夜温差月均值、最冷季度平均温度。与前人研究结论有相似之处,如贺春萍等^[9]和 Oghenekaro 等^[10]研究表明橡胶树白根病的发生发展受温度的影响,魏铭丽等^[8]指出橡胶树白根病的发展与降水关系密切。

本研究表明基准时段全球橡胶树白根病的适生区主要集中在亚洲南部、太平洋岛国、非洲中西部、南美洲东北部等地区。这与魏铭丽等^[8]指出的橡胶树白根病病原菌危害分布一致,也与刘少军等^[28]预测的全球天然橡胶种植的潜在气候适宜地区大体一致,可能是因为橡胶树白根病在全球大部分植胶区都有可能发生^[3],故存在橡胶树白根病适生区与橡胶树种植适宜区有相似的可能。

本研究表明未来气候变化下橡胶树白根病适生区质心位置从南半球的印度尼西亚移动到北半球的中国海南、越南、印度。这可能是由于未来气候变化下北半球增温速度比南半球快^[12],气候变暖导致农业气候带移动,寄主迁移到新的地区,可能会产生新的病菌或导致某些病菌消失;病菌跟随迁移的寄主可能会感染以前未接触过的作物,进而扩大寄生范围^[29-30]。在边缘性气候条件下种植的橡胶树易受气候变化的影响,气候变化可能使其种植适宜区扩大,也可能导致病虫害暴发^[31]。刘少军等^[32]和李宁等^[33]从不同角度阐述了中国橡胶树种植区有向北移动的可能,橡胶树白根病也可能随着寄主橡胶树

移动并扩大侵染区域。

本研究表明随着全球气候变化,橡胶树白根病发生范围在全球的中、高适生区有继续扩大的可能,但是部分基准时段为高适生区的地方随着气候变化成为中适生区或低适生区,如中国云南省西南部部分地区由高适生区变成中适生区。这与刘少军等^[34]研究发现中国橡胶树种植中、高适宜区面积随着未来气候变化均有增加趋势,其中云南省的景洪、勐腊等地将由现在的高适宜区转变为中适宜区的结论有相似之处。因此,橡胶树白根病在基准时段和未来都有可能发生的关键区域,应采取合理的措施灭除病菌,阻止其向其他地区扩散;对于基准时段尚未发生的、未来可能发生的敏感区域,要做好病原菌的检测预防工作,早发现、早消除。

本研究采用多个大气环流模式集合平均的方法对未来气候情景数据进行处理,不仅可以降低或消除单一大气环流模式的不确定性,还可以提高气候变化信息的可信度^[35-36]。对比以往研究气候变化对病虫害的适生性分析选用单一气候模式的气候情景数据,该方法更好地反映整个研究区域的变化,对未来生物气候变量数据处理的效果更佳。但是没有考虑橡胶林土壤、管理措施等其他环境因子对该病分布的影响。另外,结合使用多种适生区模型可能得到更好的模拟结果。因此,综合使用多种适生区模型考虑多个因子的影响更全面的模拟评价是后续的研究方向。

参考文献

[1] PRIYADARSHAN P M. Biology of *Hevea* rubber [M]. Second edition. Cham, Switzerland: Springer International, 2017: 1-9.
[2] SIRI-UDOM S, SUWANNARACH N, LUMYONG S. Applications of volatile compounds acquired from *Muscodor heveae* a-

- gainst white root rot disease in rubber trees (*Hevea brasiliensis*, Müll. Arg.) and relevant allelopathy effects [J]. Fungal Biology, 2017, 121(6/7): 573–581.
- [3] KAEWCHAI S, SOYTHONG K. Application of biofungicides against *Rigidoporus microporus* causing white root disease of rubber trees [J]. Journal of Agricultural Technology, 2010, 6(2): 349–363.
- [4] OGBEBOR N O, ADEKUNLE A T, EGHAFONA O N, et al. Incidence of *Rigidoporus lignosus* (Klotzsch) Imaz. of para rubber in Nigeria [J]. Researcher, 2013, 5(12): 181–184.
- [5] 黄贵修, 许灿光. 中国天然橡胶病虫草害识别与防治[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012: 54–64.
- [6] NAKAEW N, RANGJAROEN C, SUNGTHONG R. Utilization of rhizospheric *Streptomyces* for biological control of *Rigidoporus* sp. causing white root disease in rubber tree [J]. European Journal of Plant Pathology, 2015, 142(1): 93–105.
- [7] 张开明. 橡胶树白根病[J]. 热带农业科技, 2006, 29(4): 33–34.
- [8] 魏铭丽, 崔昌华, 郑肖兰, 等. 橡胶树白根病研究概述[J]. 广西热带农业, 2008(4): 17–19.
- [9] 贺春萍, 吴海理, 李锐, 等. 橡胶树白根病菌生物学研究[J]. 热带作物学报, 2010, 31(11): 1981–1985.
- [10] OGHENEKARO A O, DANIEL G, ASIEGBU F O. The saprotrophic wood-degrading abilities of *Rigidoporus microporus* [J]. Silva Fennica, 2015, 49(4): 1–10.
- [11] ELITH J, GRAHAM C H, ANDERSON P R, et al. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data [J]. Ecography, 2006, 29(2): 129–151.
- [12] IPCC. Climate change 2014: synthesis report [R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.
- [13] TAYLOR K E, STOUFFER R J, MEEHL G A. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(4): 485–498.
- [14] SUTHERST R W, MAYWALD G F. A computerised system for matching climates in ecology [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 1985, 13(3/4): 281–299.
- [15] FARASHI A, NADERI M. Predicting invasion risk of raccoon *Procyon lotor* in Iran using environmental niche models [J]. Landscape and Ecological Engineering, 2016, 13(2): 229–236.
- [16] FISCHER J, LINDENMAYER D B, NIX H A, et al. Climate and animal distribution: A climatic analysis of the Australian marsupial *Trichosurus caninus* [J]. Journal of Biogeography, 2001, 28(3): 293–304.
- [17] HIRZEL A H, HAUSSEER J, CHESSEL D, et al. Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data? [J]. Ecology, 2002, 83(7): 2027–2036.
- [18] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231–259.
- [19] PEARSON R G, RAXWORTHY C J, NAKAMURA M, et al. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar [J]. Journal of Biogeography, 2007, 34(1): 102–117.
- [20] GIOVANELLI J G R, HADDAD C F B, ALEXANDRINO J. Predicting the potential distribution of the alien invasive American bullfrog (*Lithobates catesbeianus*) in Brazil [J]. Biological Invasions, 2008, 10(5): 585–590.
- [21] KROSCHER J, SPORLEDER M, TONNANG H E Z, et al. Predicting climate-change-caused changes in global temperature on potato tuber moth *Phthorimaea operculella* (Zeller) distribution and abundance using phenology modeling and GIS mapping [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 170(6): 228–241.
- [22] 姜淦, 王茹琳, 王同利, 等. 基于气候变化的稻纵卷叶螟在我国的风险区预测与分析[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(3): 21–27.
- [23] 孙佩珊, 姜帆, 张祥林, 等. 地中海实蝇入侵中国的风险评估[J]. 植物保护学报, 2017, 44(3): 436–444.
- [24] 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[J]. 林业科学, 2019, 55(4): 160–170.
- [25] 刘洋, 石娟. 气候变化背景下埃及吹绵蚧在中国的适生区预测[J]. 植物保护, 2020, 46(1): 108–117.
- [26] ROSHMI R S, MADHUSHREE M, ARAVIND N A, et al. Effect of climate change on invasion risk of giant African snail (*Achatina fulica* Férussac, 1821: Achatinidae) in India [J/OL]. PLoS ONE, 2015, 10(11): e0143724. DOI:10.1371/journal.pone.0143724.
- [27] 白蕤, 李宁, 张京红, 等. 未来气候变化背景下橡胶树南美叶疫病入侵中国的风险预测[J]. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3500–3508.
- [28] 刘少军, 王斌, 李伟光, 等. 全球天然橡胶种植的潜在气候适宜区预测[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(4): 654–656.
- [29] JAIME S Y, ROJAS J, CILAS C, et al. Suitable climate for rubber trees affected by the South American Leaf Blight (SALB): Example for identification of escape zones in the Colombian middle Magdalena [J]. Crop Protection, 2016, 81: 99–114.
- [30] COAKLEY S M, SCHERM H, CHAKRABORTY S. Climate change and plant disease management [J]. Annual Review of Phytopathology, 1999, 37(1): 399–426.
- [31] 许吟隆, 郑大玮, 李阔, 等. 边缘适应: 一个适应气候变化新概念的提出[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(5): 376–378.
- [32] 刘少军, 周广胜, 房世波. 中国橡胶种植北界[J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1272–1280.
- [33] 李宁, 白蕤, 李玮, 等. 未来气候变化背景下我国橡胶树寒害事件的变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(4): 402–410.
- [34] 刘少军, 周广胜, 房世波, 等. 未来气候变化对中国天然橡胶种植气候适宜区的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 2083–2090.
- [35] WEIGEL A P, BOWLER N E. Comment on 'Can multi-model combination really enhance the prediction skill of probabilistic ensemble forecasts?' [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2009, 135(639): 535–539.
- [36] CHEN Liang, FRAUENFELD O W. Surface air temperature changes over the twentieth and twenty-first centuries in China simulated by 20 CMIP5 models [J]. Journal of Climate, 2014, 27(11): 3920–3937.