doi:10. 3969/j. issn. 1671-3168. 2023. 03. 016

基于 MaxEnt 模型预测日本松干蚧在贵州省的潜在分布

周 宇[1],陈 波[2],周菁婧[2],陈春旭[1]
(1. 遵义市林业科学研究所,贵州 遵义 563000; 2. 遵义市林业综合服务中心,贵州 遵义 563000)

摘要:日本松干蚧(*Matsucoccus matsumurae*)是我国危险性林业有害生物之一,其种群严重危害松林安全。为探究日本松干蚧分布和扩散规律,通过实地调查日本松干蚧分布和虫口密度,并基于最大熵(MaxEnt)模型预测了日本松干蚧在贵州的潜在分布。结果显示,模型预测结果较好地反映日本松干蚧在贵州省的分布情况,日本松干蚧主要分布在遵义市中南部区域,其中汇川区、新蒲新区、绥阳县是日本松干蚧的高分布区,红花岗区为中分布区,播州区、桐梓县、正安县为低分布区;年温度变化范围和年均降水量是影响日本松干蚧分布的重要环境变量;虫口密度调查统计显示,日本松干蚧在遵义市的平均虫口密度为 25 头/10 cm^2;日本松干蚧将继续扩大分布范围,具有向四周辐射扩散的趋势,未来可能在遵义形成全面分布格局,须加强对分布区日本松干蚧的防治。

关键词:MaxEnt 模型;日本松干蚧;潜在分布;贵州省;环境变量

中图分类号:S763. 15;S792. 11 **文献标识码**:A **文章编号**:1671-3168(2023)03-0092-05

引文格式:周宇,陈波,周菁婧,等. 基于 Maxent 模型预测日本松干蚧在贵州省的潜在分布[J]. 林业调查规划,2023,48(3):92-96. doi:10. 3969/j. issn. 1671-3168. 2023. 03. 016

ZHOU Yu, CHEN Bo, ZHOU Jingjing, et al. Potential Distribution of *Matsucoccus matsumurae* in Guizhou Based on MaxEnt Model [J]. Forest Inventory and Planning,2023,48(3):92-96. doi:10. 3969/j. issn. 1671-3168. 2023. 03. 016

Potential Distribution of *Matsucoccus matsumurae* in Guizhou Based on MaxEnt Model

ZHOU Yu[1], CHEN Bo[2], ZHOU Jingjing[2], CHEN Chunxu[1]
(1. Zunyi Academy of Forestry, Zunyi, Guizhou 563000, China;
2. Zunyi Forestry Comprehensive Service Center, Zunyi, Guizhou 563000, China)

Abstract: *Matsucoccus matsumurae* was one of the national dangerous forestry pests, seriously endangering the safety of pine forests. To explore the distribution and diffusion patterns of *Matsucoccus matsumuraes*, the distribution and population density of *Matsucoccus matsumurae* were investigated on site, and the potential distribution of *Matsucoccus matsumurae* in Guizhou was predicted based on the Maximum Entropy (MaxEnt) model. The results showed that the model well reflected the distribution of *Matsucoccus matsumurae* in Guizhou, which were mainly distributed in the south-central area of Zunyi, Huichuan, Xinpu, and Suiyang had become the high distribution areas with serious damages, Honghuagang was the medium distribution areas, and Bozhou, Tongzi and Zheng′an were lowly-distributed areas; the influence of temperature annual range and annual precipitation were most critical; the insect density statistics showed that the average insect density was 25 heads/10 cm^2 in Zunyi; *Matsucoccus matsumurae* would continue to

收稿日期:2021-12-24.
基金项目:贵州省林业局林业优秀青年人才培养专项资金项目(黔林科合 J 字〔2021〕11 号).
第一作者:周宇(1994-),男,贵州毕节人,硕士研究生. 主要从事森林保护研究. Email:1151556864@ qq. com

expand and spread around to form a comprehensive distribution pattern in Zunyi in the future. So prevention and control of *Matsucoccus matsumurae* in distribution areas should be strengthened.

Key words: MaxEnt model; *Matsucoccus matsumurae*; potential distribution; Guizhou Province; environmental variables

日本松干蚧 *Matsucoccus matsumurae* (Kuwana.),属节肢动物门(Arthropoda)、昆虫纲(Insecta)、半翅目(Hemiptera)、松干蚧科(Matsucoccidae)、松干蚧属(*Matsucoccus*),1903 年于日本东京首次发现,后传入中国,并在我国辽宁、吉林、山东、江苏、上海、浙江、安徽等省市虫害成灾,2013 年被列入全国危险性林业有害生物名单[1]。日本松干蚧主要以若虫刺吸松树枝、干部,造成松树生长不良,针叶枯黄,芽梢枯萎,树皮卷曲翘裂,枝条软化向下垂弯,严重时导致松林干枯和次生性虫害发生,林木成片死亡[2]。日本松干蚧自 2014 年入侵贵州以来,种群快速扩散,导致大片松林枯死,给贵州省林业经济、森林生态系统造成严重损失。

随着生物入侵现象愈加严重,生态位模型预测在生物多样性保护的多个领域得到开拓和应用[3],其中外来有害生物的分布预测逐渐成为当代入侵生物学研究的重要领域。目前常用预测外来物种潜在分布的生态位模型主要有遗传算法(GARP)模型、最大熵(MaxEnt)模型、领域(DOMAIN)模型、生态位因子分析(ENFA)模型和基于生物气候的 BIOCLIM 模型等,但每种生态位模型的实用性均不同[4]。Elith 等[5]基于 16 种生态位模型对 226 个物种的适生区预测效果进行比较研究,认为模型类型选择与物种属性具有相关性。其后有学者发现,MAXENT 模型无论从预测效果还是应用方便性等方面,均较 GARP 模型优异[6]。张海涛等[7]应用 4 个生态位模型对入侵物种福寿螺进行预测,同样指出 MaxEnt 模型相对于其他模型预测效果最好。除此以外,MaxEnt 模型还应用于松材线虫[8]、小蔗螟[9]、舞毒蛾[10]等物种的预测,均取得较好效果。

目前,对于日本松干蚧潜在分布预测研究,仅有 2005 年李红梅等[11]使用 GARP 生态位模型预测了日本松干蚧在我国的地理分布,结果表明日本松干蚧的潜在分布区非常广,主要分布在黑龙江、内蒙古、山西、陕西、河北、北京、天津、河南、四川、重庆、西藏、湖北、湖南、江西、广东、福建、广西、海南、台湾、新疆等 20 个省、市、自治区,虽然预测范围为全国大区域,但由于分布数据较少,可能对模型预测结果的可靠性有所影响。为了摸清日本松干蚧的潜在分布范围和扩散规律,基于 MaxEnt 模型预测日本松干蚧在贵州的潜在分布区域,分析其在贵州的扩散趋势,为日本松干蚧的风险预警和科学防控提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 虫口密度统计

在贵州省已知分布区[12]内设置样地(30 m×30 m)调查虫口密度,采用双对角线取样法在样地随机选取 10 株标准株进行调查。主干调查面积为 5 cm×2 cm,同时在每株样树上剪取树冠从上到下第 3 盘(即 3 年生)不同方向枝条各一段,枝条长度为 10 cm 以上,现场检查活虫数,记录统计数和发生地经纬度。也可将树皮剥下,连同枝条放入袋内,做好标签,带回室内镜检。同一类型可重复 3~5 个。平均虫口密度(ρ,头/10 cm^2)计算公式为:

$$\rho = N/S \quad (1)$$

式中:N 表示调查面积内活虫总数;S 表示调查面积。

1.2 日本松干蚧分布点数据

分布数据来源于实地调查日本松干蚧虫口密度的发生地经纬度,将获得的分布点数据用 Google Earth 核实地理坐标信息,删除重复和定位不准确的分布数据,获得 169 条分布点数据。为减少空间自相关[13],在 ArcGIS 10.2 中利用 Data management 生成 0.1°×0.1°的网格,并只选取网格内离中心最近的 1 条分布点数据为有效分布数据,最后获得有效分布数据 87 条,数据转换为 MaxEnt 模型要求的 csv 格式。

1.3 环境图层数据

从世界气候数据库 Wordclim(http://www.worldclim.org/)下载 1950—2000 年世界气候的环境变量图层(分辨率为 30″,包括 19 个生物气候变量图层和 1 个海拔变量图层)。本研究选取贵州省行政辖区为调查范围,利用 Arcgis 10.2 软件中的 Extract 工具提取贵州省行政辖区的环境变量图层数据用于后续分析。

1.4 模型分析

将全部的环境变量图层数据(ASCII 格式)和日本松干蚧分布点数据(csv 格式)导入 MaxEnt 软件,

构建 MaxEnt 模型。MaxEnt 模型参数设置:最大迭代次数为 2 000,Bootstrap 重复运算 10 次,开启 Random seed,勾选绘制响应曲线与刀切法(Jackknife)功能以分析影响日本松干蚧分布的环境变量。将 80%的日本松干蚧分布点数据用于模型的构建和预测(训练数据),其余 20%的数据用于模型检验(测试数据)。MaxEnt 模型软件将自动绘制 ROC 曲线(receiver operating characteristic curve)并计算曲线下面积 AUC(areas under the receiver operating characteristic curves)以对模型的拟合效果进行评价。AUC 的取值范围为 0~1,AUC<0.5 表明模型预测效果很差,AUC 值为 0.6~0.9 表明模型预测效果中等,AUC>0.9 则表明模型预测效果很好。

1.5 分布等级划分

MaxEnt 模型的预测结果采用分布概率值(0~1)来表示物种在预测分布区中分布的适宜性,其中 0 表示不适宜,1 表示非常适宜。依据 MaxEnt 模型预测的日本松干蚧分布的适宜程度,选用 ArcGIS 软件中的 Reclass 工具,选择自然分割法(natural breaks)划分日本松干蚧 4 个分布等级(无分布区、低分布区、中分布区、高分布区)。为了更加直观体现日本松干蚧分布结果,通过运用 Arcgis 10.2 软件将结果栅格化处理后映射到贵州省行政区底图上。

2 结果与分析

2.1 模型精确度评估检验

利用 Arcgis 10.2 软件对分布点进行空间自相关分析,避免了因样本分布点高度重合影响模型预测准确性。根据受试者工作特征曲线(图 1)可知,AUC 平均值为 0.995,标准差为 0.001,显著高于随机分布模型预测值(0.5),表明 MaxEnt 模型预测结果可靠,较好地预测了适宜日本松干蚧潜在分布区域。

2.2 影响日本松干蚧分布的主要环境变量

对环境变量贡献率进行分析,结果见表 1。

从表 1 可知,年温度变化范围(34.6%)、年均降水量(22.7%)、最干月降水量(9.3%)、降水量季节性变异系数(8.1%)、海拔(6.9%)、最湿月降水量(6.2%)、温度季节变化(5%)、最湿季降水量(4.9%)、昼夜温差月均值(1.4%)、昼夜温差与年温差比值(0.4%)、最暖季降水量(0.3%)、最冷季降水量(0.1%)是日本松干蚧分布模型的主要环境变量,其中年温度变化范围和年均降水量对日本松干蚧的分布具有显著影响(图 2)。年温度变化范围在 22.2~31.2℃时适宜日本松干蚧分布,年均降水量在 700~1 150 mm 时适宜日本松干蚧分布。

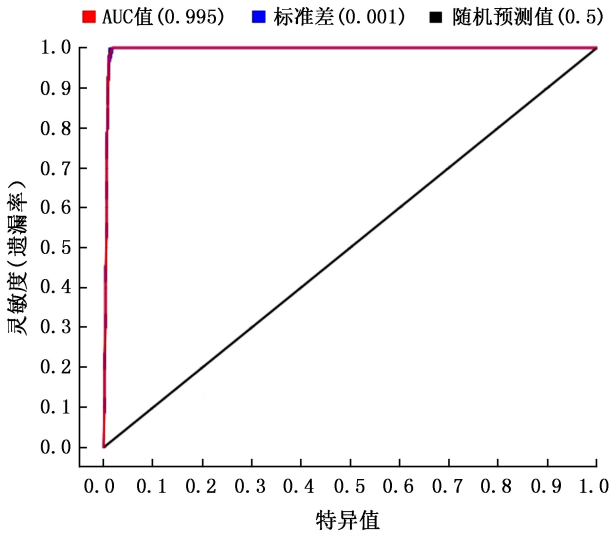


图 1 受试者工作特征曲线(ROC)

Fig. 1 Receiver operating characteristic curve (ROC)

表 1 环境变量

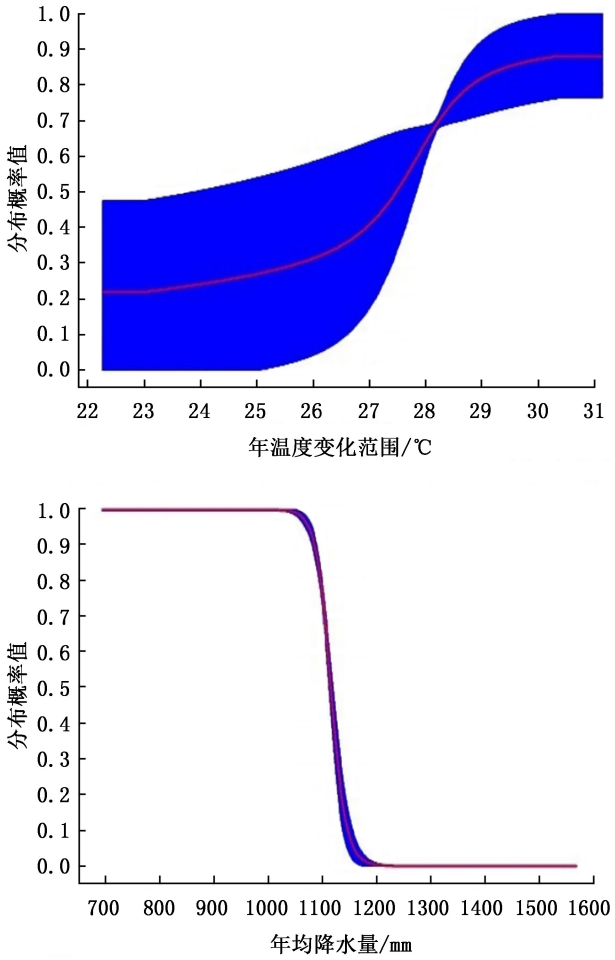
Tab. 1 Environmental variables

序号	环境变量	贡献率/%	序号	环境变量	贡献率/%
1	年均温	0	10	最暖季均温	0
2	昼夜温差月均值	1.4	11	最冷季均温	0
3	昼夜温差与年温差比值(Bio2/Bio7)	0.4	12	年均降水量	22.7
			13	最湿月降水量	6.2
			14	最干月降水量	9.3
4	温度季节变化	5.0	15	降水量季节性变异系数	8.1
5	最热月份最高温	0			
6	最冷月份最低温	0	16	最湿季降水量	4.9
7	年温度变化范围(Bio5~Bio6)	34.6	17	最干季降水量	0
			18	最暖季降水量	0.3
8	最湿季均温	0	19	最冷季降水量	0.1
9	最干季均温	0	20	海拔	6.9

2.3 日本松干蚧的潜在分布预测

日本松干蚧在贵州的潜在分布区域如图 3 所示。

从图 3 可以看出,日本松干蚧在贵州省的潜在分布区主要集中在贵州北部暨遵义市辖区的中南部区域。汇川区几乎全区、新蒲新区西北区域、绥阳县南部区域处于高中分布区,其中汇川区发生面积最大,危害十分严重;绥阳县次之,新蒲新区发生面积最小。红花岗区北部和中部、绥阳县南部区域处于中分布区,播州区北部、桐梓县东南部、绥阳县与正安县交界区域处于低分布区。



注:红色代表平均值,蓝色代表标准差。

图 2　分布概率与环境变量的响应曲线

Fig. 2　Response curves of presence probability and environmental variables

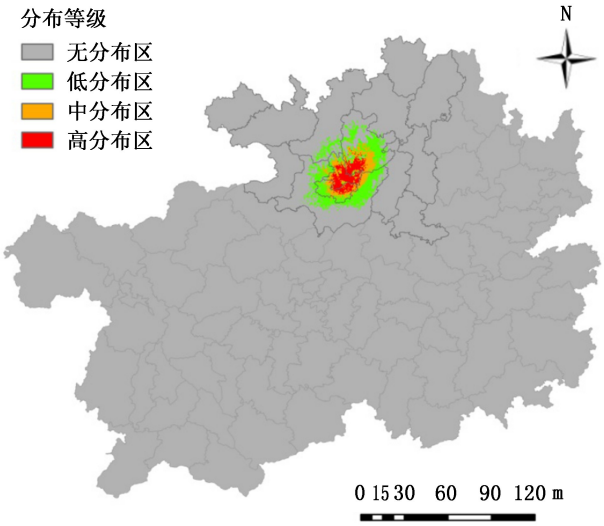


图 3　日本松干蚧在贵州的潜在分布区域

Fig. 3　Potential distribution of *Matsucoccus matsumurae* in Guizhou

为了进一步验证日本松干蚧分布预测模型的准确性,通过实地野外调查发现,日本松干蚧实际分布在遵义市新蒲新区、汇川区、绥阳县等 3 县(区),见表 2。

日本松干蚧在遵义市发生面积达 3 941.2 hm^2,占遵义市林地面积的 0.2%,其中轻度危害 875.2 hm^2,中度危害 224.3 hm^2,重度危害 2 841.7 hm^2。根据样地虫口密度调查统计发现,日本松干蚧平均虫口密度达 25 头/10 cm^2,汇川区和绥阳县部分松林危害严重,而这三县(区)交界处是日本松干蚧集中分布区,与预测结果中的高分布区高度重合。

表 2　样地虫口密度调查统计

Tab. 2　Statistics of insect population density in sample plots

序号	地点	经度	纬度	优势树种	平均虫口密度/(头·10^{-1}·cm^{-2})	灾害程度
1	汇川区泗渡镇金田村	106°59′16″	27°55′11″	马尾松	35	重度
2	汇川区高坪街道排军村	106°58′29″	27°50′22″	马尾松	32	重度
3	汇川区高坪街道仁江村	106°58′50″	27°52′13″	马尾松	21	中度
4	汇川区董公寺街道金星社区	106°57′37″	27°47′48″	马尾松	30	重度
5	绥阳县蒲场镇板仓坝	107°5′30″	27°51′27″	马尾松	37	重度
6	绥阳县风华镇高原村	107°7′29″	27°52′48″	马尾松	33	重度
7	绥阳县风华镇龙光村	107°8′22″	27°53′53″	马尾松	24	中度
8	绥阳县风华镇龙牙村	107°7′50″	27°54′07″	马尾松	21	中度
9	新蒲新区新浦街道新浦村	107°6′19″	27°44′17″	马尾松	11	轻度
10	新蒲新区新浦街道三坝村	107°1′29″	27°43′12″	马尾松	6	轻度

3 结论与讨论

日本松干蚧作为我国林业危险性有害生物,其主要寄主为马尾松,生态需求较为稳定,迁移能力较强,生态位较为保守,符合物种生态位模型预测条件[14],因此可利用生态位模型预测日本松干蚧的潜在分布。MaxEnt 模型的优点是在物种分布点较少的情况下仍有较高的预测准确率,所以目前被广泛用于入侵物种及检疫性害虫的潜在分布研究[15]。

本研究基于 MaxEnt 模型预测的 AUC 值为 0.995,显著高于随机预测值(0.5),说明模型预测准确度高,预测结果可靠。为进一步验证模型预测的准确性,随机选取 10 个样地进行实地考察,在调查中发现 10 个样地均有日本松干蚧分布,日本松干蚧的实际分布与模型预测结果高度重合,表明 MaxEnt 模型预测对于日本松干蚧的防治具有较高的参考价值。

日本松干蚧自 2014 年入侵贵州以来,一直未被明确诊断,直至 2019 年大片松林被严重危害才引起相关部门重视,田茂娟等[12]首次报道了在贵州省发现日本松干蚧,并认为日本松干蚧能够在西南地区建立种群并迅速传播蔓延。本研究结果表明日本松干蚧虽只分布在遵义市汇川区、新蒲新区以及绥阳县 3 个县(区),但其平均虫口密度已达 25 头/10 cm^2,虫害较为严重。因此,随着全球气候变暖,贵州省气候条件有利于日本松干蚧种群扩张,其分布范围很可能向红花岗区、播州区、桐梓县、正安县等低分布区扩散蔓延,从而在遵义市形成全面入侵的分布格局。

为避免贵州省林业经济和森林生态系统遭受严重破坏,必须重视日本松干蚧虫害的防治,严格监测日本松干蚧的入侵趋势。对已发生虫害的地区采取有效的防止措施,以及对日本松干蚧尚未入侵但具有较高入侵风险的地区进行早期预警监测,从而控制日本松干蚧进一步扩散。

参考文献:

[1] 国家林业和草原局. 国家林业局 2013 年第 4 号公告[EB/OL]. (2013-01-19). http.//www.forestry.gov.cn/.

[2] 田茂娟,喻三鹏,张念念,等. 日本松干蚧在贵州的风险分析报告[J]. 贵州林业科技,2021,49(3):34-38.

[3] 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.

[4] 周宇,袁雪颖,杨子轩,等. 福寿螺入侵中国的扩散动态及潜在分布[J]. 湖泊科学,2018,30(5):1379-1387.

[5] ELITH J,GRAHAM C H,ANDERSON R P, et al. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data[J]. Ecography,2006,29(2):129-151.

[6] 王运生. 生态位模型在外来入侵物种风险评估中的应用研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2007.

[7] 张海涛,罗渡,牟希东,等. 应用多个生态位模型预测福寿螺在中国的潜在适生区[J]. 应用生态学报,2016,27(4):1277-1284.

[8] 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.

[9] 赵清,高新悦,蔡波,等. 基于 Maxent 模型的检疫性害虫小蔗螟在中国的潜在分布预测[J]. 植物检疫,2022(1):77-82.

[10] 王艳君,高泰,石娟. 基于 Maxent 模型对舞毒蛾全球适生区的预测及分析[J]. 北京林业大学学报,2021,43(9):59-69.

[11] 李红梅,韩红香,薛大勇. 利用 GARP 生态位模型预测日本松干蚧在中国的地理分布[J]. 昆虫学报,2005,48(1):95-100.

[12] 田茂娟,喻三鹏,张念念,等. 贵州首次发现的日本松干蚧生物学特性研究[J]. 环境昆虫学报,2021(6):1435-1445.

[13] WALTARI E,HIJMANS R J,PETERSON A T, et al. Locating pleistocene refugia:Comparing phylogeographic and ecological niche model predictions[J]. Plos One,2007,2(7):e563.

[14] WIENS J J,GRAHAM C H. Niche conservatism:Integrating evolution,ecology, and conservation biology[J]. Annual Review of Ecology Evolution and Systematics, 2005, 36(1):519-539.

[15] 刘博,覃伟权,阎伟. 基于 Maxent 模型的小巢粉虱在中国的潜在地理分布[J]. 环境昆虫学报,2019,41(6):1276-1286.

责任编辑:陈旭