

基于不同气候情景的美国白蛾适生区预测*

刘 枫^{1**} 公超群² 李 硕¹ 陈怡帆¹ 周宏威^{2***}

(1. 国家林业和草原局生物灾害防控中心, 沈阳 110034; 2. 东北林业大学, 机电工程学院 哈尔滨 150040)

摘 要 【目的】通过预测分析美国白蛾在我国的适生区域, 为美国白蛾的监测和防控提供理论依据。【方法】搜集并整理美国白蛾在我国县级发生点数据, 通过 2003-2020 年间月最高气温、月最低气温和月降水量等计算 19 个生物气候变量, 结合全国高程数据, 使用 VIF 和 Spearman 检验进行筛选保留 9 个最主要的环境变量, 基于 Biomod2 的组合模型对当前美国白蛾适生区进行了预测; 利用不同气候情景的未来气候数据, 对我国未来一段时期的美国白蛾适生区进行了预测分析。【结果】当前时期的美国白蛾适生区集中在辽宁、山东、河北、安徽等省市, 在不同气候情景的未来时期, 美国白蛾在我国的适生区将向我国东北和南部地区扩散, 适生区面积将进一步扩大。【结论】研究结果为监测预警美国白蛾的扩散动态, 也为科学防控并阻止其传播扩散提供理论支持。

关键词 美国白蛾; 适生区预测; 生态位模型

Predicted future range of the fall webworm in China based on different climate scenarios

LIU Feng^{1**} GONG Chao-Qun² LI Shuo¹ CHEN Yi-Fan¹ ZHOU Hong-Wei^{2***}

(1. Center for Biological Disaster Prevention and Control, National Forestry and Grassland Administration, Shenyang 110034, China;

2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract 【Objectives】To predict the future range of the Fall Webworm (*Hyphantria cunea*) in China in order to improve the prevention and control of this pest. 【Methods】Records of the Fall Webworm collected in China from 2003 to 2020 were obtained and organized, and 19 bioclimatic variables for that period were calculated based on the monthly maximum and minimum temperatures and monthly precipitation. DEM data were obtained and future climate variables under different climate scenarios were calculated. The nine most important environmental variables were identified by VIF and Spearman's rank correlation. Suitable current, and future, habitat for the Fall Webworm were then predicted based on an integrated Biomod2 model. 【Results】Suitable habitat for the Fall Webworm is currently concentrated in Liaoning, Shandong, Hebei, Anhui and other provinces. The range of the Fall Webworm is predicted to increase under different climate scenarios, with the overall trend being an expansion of the species' range into northeastern and southern China. 【Conclusion】The results provide early warning of areas likely to be colonized by the Fall Webworm, allowing appropriate control measures to be implemented beforehand to prevent its spread.

Key words *Hyphantria cunea*; prediction of suitable area; species distribution models

美国白蛾 *Hyphantria cunea*, 又名秋幕毛虫、网幕毛虫等, 属鳞翅目夜蛾总科灯蛾科白蛾属, 是一种原产于北美的世界性检疫害虫, 具有危害大、繁殖快、传播广等特点, 危害多种树木、果树和农作物(罗立平等, 2018)。美国白蛾自 1979 年首次传入我国以来, 截止至 2021 年底, 已在

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划“重大林草入侵生物扩张蔓延机制与高效防控技术研究”(2021YFD1400300); 中央财政林业科技推广示范项目“森林病虫害检测预警系统推广与示范”(黑[2022] TG21 号)

**第一作者 First author, E-mail: fzkxlf@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: easyid@163.com

收稿日期 Received: 2022-11-28; 接受日期 Accepted: 2023-01-04

我国 14 个省(自治区、直辖市), 611 个县级行政区有发生, 寄主植物多达 49 科 108 属 300 多种(贾红梅等, 2022), 主要以幼虫取食植物叶片, 影响植物的光合作用, 发生严重时导致整株叶片被吃光, 引起植物死亡。美国白蛾的扩散能力很强, 幼虫可以爬行近 500 m, 不同虫态均可随人为活动、物资流通、交通工具、苗木调运等途径进行远距离传播, 成虫在不借助外物的形势下, 一次可飞行 70 m(李志明, 2021), 一年可扩散 35-50 km。其入侵我国 40 多年来, 在我国频繁造成局部地区成灾和严重扰民现象, 近年来疫情总体呈显著向南持续扩散的趋势(赫传杰等, 2022)。

美国白蛾作为我国重点防控的外来入侵物种之一, 了解美国白蛾的空间分布及影响其传播扩散的环境因子, 分析美国白蛾在我国的适生区并进行风险评估, 对保护我国农林植物资源, 维护国土生态安全及指导美国白蛾的防控具有重要意义。近年来, 国内外学者从基因学和生物学角度出发, 研究了美国白蛾的生理习性, 揭示了部分生境因子对美国白蛾繁殖、传播的影响, 为探究美国白蛾适生区研究打下了坚实的基础。而物种分布模型作为一种用于计算生物潜在适宜分布区的方法, 通过已知生物分布点的位置信息, 结合研究区域的生境因子数据, 通过特定的模型模拟物种的潜在分布, 已被广泛应用于气候变化条件下物种潜在分布区的预测中。近十余年, 随着统计算法及生态位物种分布模型的发展, 诸多研究提出的预测模型有几十种, 如 Maxent、Bioclim、GARP、Domain 和 ENFA 等。如潘铭心等(2022)使用 Maxent 模型对加拿大一枝黄花 *Solidago decurrens* 在我国的适生区进行了预测, 黄芳等(2021)使用 Bioclim 模型对全球和我国的绿圆跳虫 *Sminthurus viridis* 进行了适生区预测。但 Thuiller 等(2003)学者研究认为单一模型的预测性能会随着输入数据的增多而逐渐降低, 因此在利用物种分布模型对生物分布区的预测中仅仅使用单一模型的做法并非稳定可靠。此外, 许多学者在使用研究物种适生区时使用的物种发生统计数据与环境因子数据在

时间尺度上不能进行匹配, 如叶江霞等(2021)使用空间矩阵模型对我国美国白蛾的扩散风险空间格局进行了分析, 使用的发生数据为 2011-2016 年 2 209 个美国白蛾全国乡镇检疫数, 其使用的环境因子数据为 1970-2000 年的生物气候变量数据; Lee 等(2022)使用 MaxEnt、RF 和 MLP 3 种模型对入侵红火蚁 *Solenopsis invicta* 和细足捷蚁 *Anoplolepis gracilipes* 在全球的适生区进行的预测研究同样存在这个问题。

目前有关美国白蛾适生区的研究多采用单一模型(陆霞等, 2016; 纪烨琳等, 2019; 叶江霞等, 2021), 为了解决单一模型在面对较多数据时预测性能的不稳定性, 本文使用基于免费开源 R 语言的 Biomod2 程序包, 使用了 9 种模型: 广义线性模型(Generalized linear model, GLM)、通用梯度回归模型(Generalized boosted regression models, GBM)、广义相加模型(Generalized additive model, GAM)、分类与回归树模型(Classification tree analysis, CTA)、人工神经网络模型(Artificial neural network, ANN)、柔性判别分析模型(Flexible discriminant analysis, FDA)、表面分布区分室模型(Surface range envelope, SRE)、多元自适应回归模型(Multivariate adaptive regression splines, MARS)以及随机森林模型(Random forest, RF)构建组合模型对美国白蛾在我国适生区进行了预测分析。本文旨在对我国美国白蛾在当前以及未来气候条件下的适生区进行预测, 探究分析美国白蛾在我国的适生格局, 为其防控工作提供一定理论支撑。

1 材料与方法

1.1 美国白蛾分布数据的获取与整理

本文使用的 2003-2020 年美国白蛾发生区的经纬度数据由国家林业和草原局生物灾害防控中心提供。经过整理和筛选排除掉非自然记录及冗余数据后, 共有 499 个发生点数据, 根据计算需求将其保存为.csv 格式文件, 供后续模型分析使用。

1.2 气候数据获取与整理

本文使用的全国高程数据 (DEM), 以及 2003-2020 年全国月度最低气温、全国月度最高气温和全国月度降水量等原始气象数据均来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心 (Peng *et al.*, 2019), 分辨率为 1 km。基于上述原始气象数据, 构建了物种分布模型最为常用的年平均气温、昼夜温差月均值、昼夜温差与年温差比等 19 个生物气候变量 (表 1)。未来气候数据来自 Worldclim 网站 (<http://worldclim.org/data/index.html>) BCC-CSM2-MR 气候模式在社会经济路径 ssp245 和 ssp370 情景下的 2021-2040 年和 2041-2060 年的生物气候变量, 分辨率为 30 s。由于各个栅格数据的分辨率不同会导致在使用 raster 包的 stack 函数无法对其进行叠加, 因此预先使用 Arcmap10.8 中 ArcToolbox 工具箱的重采样功能对所有栅格数据进行转化, 将空间分辨率统一为 1 km。此外, 考虑到变量的多重共线性会影响预测精度 (Wen *et al.*, 2022), 首先采用斯皮尔曼相关系数 (Spearman) 和方差膨

胀因子 (Variance inflation factor, VIF) 对所有生物气候变量的相关性和显著性进行检验, 并将筛选后的变量用于模型的计算。具体筛选流程为: 1) 对所收集的环境变量进行两两组合, 并使用 R 语言中自带包内的 “cor” 函数进行斯皮尔曼相关系数 $|r|$ 的计算, 最终保留 $|r| < 0.7$ 的变量组。2) 使用 R 语言中 usdm 程序包内 “vifcor” 函数构建以任意常量作为因变量, 以所有环境变量为自变量的线性方程, 计算所有自变量的 VIF 值。若产生的 VIF 最大值大于 7 则删除该最大值对应的环境变量并根据剩余的环境变量重新构建线性方程重复上述操作, 直到产生的 VIF 最大值小于 7。3) 取以上两种筛选结果中的相同环境变量用于最终模型构建。

1.3 模型的构建与评估

Biomod2 运行使用的 R-Studio 来源于 <https://www.rstudio.com/products/rstudio/> 网站, R 语言 (版本 4.2.1) 来源于 <https://mirrors.tuna.tsinghua.edu.cn/CRAN/>。Biomod2 在建立模型时, 需要有物种存在点与缺失点两组数据, 由于缺失点难以

表 1 19 种生物气候变量
Table 1 19 bioclimatic variables

编号 ID	描述 Description	编号 ID	描述 Description
bio1	年平均气温 Annual mean temperature	bio11	最冷季平均气温 Mean temperature of the coldest quarter
bio2	昼夜温差月均值 Mean diurnal range	bio12	年降水量 Annual precipitation
bio3	昼夜温差与年温差比 Isothermality	bio13	最湿月份降水量 Precipitation of the wettest month
bio4	温度变化方差 Temperature seasonality	bio14	最干月份降水量 Precipitation of the driest month
bio5	最热月份最高气温 Max temperature of the warmest month	bio15	降雨量变化方差 Precipitation seasonality
bio6	最冷月份最低气温 Min temperature of the coldest month	bio16	最湿季降水量 Precipitation of the wettest quarter
bio7	年温变化范围 Temperature annual range	bio17	最干季降水量 Precipitation of the driest quarter
bio8	最湿季平均气温 Mean temperature of the wettest quarter	bio18	最热季降水量 Precipitation of the warmest quarter
bio9	最干季平均气温 Mean temperature of the driest quarter	bio19	最冷季降水量 Precipitation of the coldest quarter
bio10	最暖季平均气温 Mean temperature of the warmest quarter		

获取, 因此使用 Biomod2 自带的“random”指令随机生成 10 组 1 000 个伪缺失点, 并随机将构建好的数据集的 80% 作为训练集, 剩余的数据作为测试集。设置存在点与伪缺失点两组数据权重相同, 单一模型的参数设置为默认值, 每个模型运行 10 次, 共产生 900 组训练结果 (9 种模型 10 组×数据×10 次运算), 并对模型结果进行归一化处理。受试者工作特征曲线 (Receiver operating characteristic curve, ROC) 和真实技巧统计值 (True skill statistics, TSS) 目前已被广泛应用于模型的评价中 (Baldwin and Kain, 2006; Landgrebe and Duin, 2008), ROC 曲线能够反映被观察量的敏感性和特异性, 为了更直观地展示出各个模型的效果, 往往采用 ROC 曲线下的面积 (Area under curve, AUC), AUC 值通常为 0.5-1, AUC 值越接近 1 说明预测效果越好。而 TSS 值能够通过敏感性和特异性反应模型真阳性率和假阳性率之间的差值, 其差值越接近 1 说明预测效果越好。本文采用这两种方法进行模型的评价和筛选。

2 结果与分析

2.1 影响因子重要性及模型预测精度评估

各变量对于物种分布模型的重要性评估见图 1, 其中对美国白蛾适生区预测影响最大的环境变量是最湿月份降水量 (bio13), 其余环境变量的重要性由高到低排序分别为高程 (Digital elevation model, DEM)、最湿季平均气温 (bio8)、昼夜温差与年温差比 (bio3)、最热季降水量 (bio18)、最冷季降水量 (bio19)、最干季降水量 (bio17)、降雨量变化方差 (bio15)、最干月份降水量 (bio14)。根据我国目前美国白蛾的分布情况在 Arcmap 中获取发生点的相关环境变量信息, 绝大部分发生点的高程集中在 350 m 以下, 分布于东北、华北以及长江中下游平原, 最湿月份降水量集中在 120-310 mm, 最湿季平均气温在 25 °C 左右。

由单一模型预测的 AUC 值和 TSS 值见图 2 和表 2, 可知单一模型在美国白蛾适生区预测中

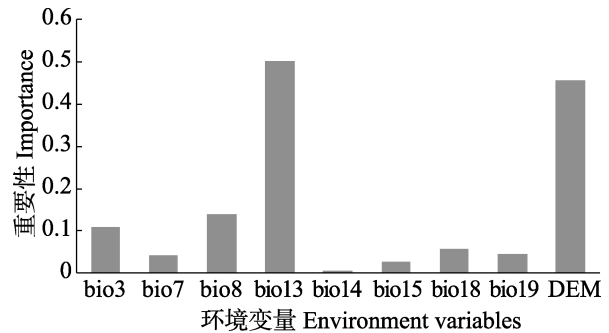


图 1 环境变量重要性

Fig. 1 Importance of environment variables

bio3: 昼夜温差与年温差比 Isothermality; bio7: 年温变化范围 Temperature annual range; bio8: 最湿季平均气温 Mean temperature of the wettest quarter; bio13: 最湿月份降水量 Precipitation of the wettest month; bio14: 最干月份降水量 Precipitation of the driest month; bio15: 降雨量变化方差 Precipitation seasonality; bio18: 最热季降水量 Precipitation of the warmest quarter; bio19: 最冷季降水量 Precipitation of the coldest quarter; DEM: 高程数据 Digital Elevation model.

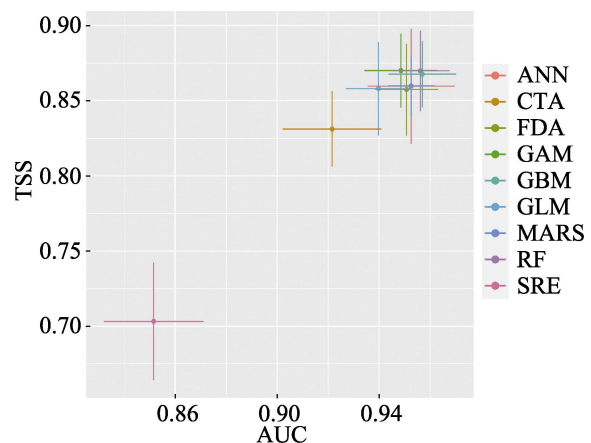


图 2 9 种模型的 TSS 及 AUC 评价分布图

Fig. 2 TSS and AUC distribution by 9 models

AUC: 受试者工作特征曲线下面积 Area under curve; TSS: 真实技巧统计值 True skill statistics; ANN: 人工神经模型 Artificial neural network; CTA: 分类与回归树模型 Classification tree analysis; FDA: 柔性判别分析模型 Flexible discriminant analysis; GAM: 广义相加模型 Generalized additive model; GBM: 通用梯度回归模型 Generalized boosted regression models; GLM: 广义线性模型 Generalized linear model; MARS: 多元自适应回归模型 Multivariate adaptive regression splines; RF: 随机森林模型 Random forest; SRE: 表面分布区分室模型 Surface range envelope. 表 2 同。The same as table 2.

表现最好的是随机森林模型 (RF), 预测效果最差的是 SRE 模型。为了提高组合模型的预测精度, 在 900 组训练结果中, 保留 $AUC \geq 0.9$, $TSS \geq 0.85$ 的结果共 842 个, 按照其 AUC 值作为权重, 使用加权平均法构建组合模型。最终通过组合模型预测结果得到的 $AUC=0.988$, $TSS=0.897$, 表明组合模型的预测效果极好且均优于单一模型。

2.2 当前适生区预测

通过组合模型以当前时期环境变量预测美国白蛾在我国的适生区, 结果以.asc 格式导出。使用 Arcmap10.8 中 ArcToolbox 工具箱的重分类功能, 以自然间断法对预测结果进行区划, 将低于预测过程中模型会产生的阈值 (CUT-OFF) 的

区域视为不会发生, 即非适生区; 高于此阈值的部分依据其适生指数分为低适生区、中适生区和高适生区, 并对各等级适生区进行面积统计。当前时期我国美国白蛾适生区共 $72.45 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中: 高适生区 $47.55 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要集中在辽宁、河北、天津、北京、山东、河南、安徽和江苏等省 (市); 中适生区 $12.60 \times 10^4 \text{ km}^2$, 中适生区整体围绕高适生区蔓延, 主要分布在河南-湖北交界、内蒙古-吉林-辽宁交界以及安徽和江苏省的南部; 低适生区共 $12.30 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要分布在当前未发生过美国白蛾的省市, 如浙江、江西及湖南等 (表 3)。

通过与当前我国美国白蛾的发生点比较, 发现 409 个发生点位于预测结果中的高适生区, 48 个发生点位于中适生区, 21 个发生点位于低适

表 2 单一模型的平均评价指标
Table 2 Average evaluation index of single models

	GLM	GBM	GAM	CTA	ANN	SRE	FDA	MARS	RF
AUC	0.939 8	0.957 0	0.948 6	0.921 6	0.952 6	0.851 6	0.950 8	0.952 6	0.956 2
TSS	0.858 0	0.867 6	0.870 0	0.831 2	0.859 6	0.703 2	0.857 4	0.859 8	0.869 8

表 3 当前时期不同程度美国白蛾适生区面积
Table 3 Current suitable area of *Hyphantria cunea*

地区 Region	高适生区 (km ²) Highly suitable area (km ²)	中适生区 (km ²) Moderately suitable area (km ²)	低适生区 (km ²) Lowly suitable area (km ²)
北京 Beijing	17.03×10^3	93.72×10^1	11.65×10^2
天津 Tianjin	10.18×10^3	98.44×10^1	10.34×10^3
河北 Hebei	76.09×10^3	95.21×10^2	13.97×10^3
内蒙古 Inner Mongoria	0	20.48×10^1	20.14×10^3
辽宁 Liaoning	41.44×10^3	24.35×10^3	17.62×10^3
吉林 Jilin	0	53.59×10^2	15.78×10^2
江苏 Jiangsu	62.54×10^3	14.94×10^3	16.29×10^3
浙江 Zhejiang	0	0	7.63
安徽 Anhui	58.574×10^3	19.67×10^3	19.33×10^3
江西 Jiangxi	0	0	7.36
山东 Shandong	15.20×10^4	16.91×10^3	14.21×10^3
河南 Henan	57.59×10^3	29.02×10^3	13.89×10^3
湖北 Hubei	0	41.44×10^2	12.53×10^3
湖南 Hunan	0	0	23.41
总计 Total	47.55×10^4	12.60×10^4	12.30×10^4

生区。而有 21 个发生点位于非适生区, 其中 10 个发生点因环境变量数据缺失而导致。

2.3 未来适生区预测

使用组合模型对 BCC-CSM2-MR 气候模式在社会经济路径 ssp245 和 ssp370 情景下的未来气候数据和当前时期高程数据进行 2021-2040 年和 2041-2060 年 (简称 2040s 时期和 2060s 时期) 的美国白蛾适生区预测。使用当前时期的预测结果中的阈值, 对未来时期的预测结果使用自然间断法进行重分类并统计面积 (表 4)。在 ssp245

情景下, 2040s 时期我国美国白蛾适生区面积达到 $134.26 \times 10^4 \text{ km}^2$, 2060s 时期我国美国白蛾适生区面积为 $134.36 \times 10^4 \text{ km}^2$, 相较于当前的适生区面积分别增加 85.31% 和 85.45%。在 ssp370 情景下, 2040s 时期我国美国白蛾适生区面积为 $138.53 \times 10^4 \text{ km}^2$, 2060s 时期适生区面积为 $132.75 \times 10^4 \text{ km}^2$, 相较于当前适生区面积分别增幅 91.21% 和 83.33% (表 5)。

此外, 在未来环境条件下, 我国美国白蛾适生区扩张主要集中在吉林、黑龙江、内蒙古东北部以及南部沿海地区。并且两种不同情景下对

表 4 ssp245 情景下不同时期美国白蛾适生区面积

Table 4 Suitable area of *Hyphantria cunea* in different period based on the ssp245

地区 Region	2040s			2060s		
	高适生区(km^2) Highly suitable area (km^2)	中适生区(km^2) Moderately suitable area (km^2)	低适生区(km^2) Lowly suitable area (km^2)	高适生区(km^2) Highly suitable area (km^2)	中适生区(km^2) Moderately suitable area (km^2)	低适生区(km^2) Lowly suitable area (km^2)
北京 Beijing	38.35×10^2	49.87×10^2	25.20×10^1	20.17×10^2	69.56×10^2	11.94×10^1
天津 Tianjin	86.52×10^1	10.37×10^3	44.51×10^1	26.21×10^2	90.48×10^2	20.13×10^1
河北 Hebei	58.34×10^2	32.00×10^3	39.61×10^2	58.26×10^3	34.90×10^3	11.99×10^2
山西 Shanxi	0	1.38	43.05	0	2.08	14.58
内蒙古 Inner Mongoria	35.01×10^2	34.48×10^3	30.60×10^3	66.20×10^2	33.62×10^3	28.35×10^3
辽宁 Liaoning	49.70×10^3	36.57×10^3	15.32×10^3	37.32×10^3	52.00×10^3	36.35×10^3
吉林 Jilin	21.14×10^3	79.70×10^3	35.97×10^2	40.64×10^3	61.59×10^3	24.76×10^2
黑龙江 Heilongjiang	10.50×10^4	15.75×10^4	32.55×10^2	38.82×10^3	12.98×10^4	65.51×10^3
上海 Shanghai	34.72×10^1	31.72×10^2	24.23×10^2	35.34×10^2	87.15×10^1	15.36×10^2
江苏 Jiangsu	11.45×10^3	13.13×10^3	71.27×10^2	15.60×10^3	25.72×10^3	54.66×10^3
浙江 Zhejiang	77.08	59.90×10^2	20.76×10^3	10.46×10^2	25.19×10^2	45.06×10^3
安徽 Anhui	39.79×10^3	18.84×10^3	34.61×10^3	36.68×10^3	16.91×10^3	32.52×10^3
福建 Fujian	11.72×10^2	17.91×10^2	11.44×10^3	47.98×10^1	16.34×10^2	12.79×10^3
江西 Jiangxi	0	0	0	0	0	32.43×10^1
山东 Shandong	91.21×10^3	59.92×10^3	18.61×10^2	63.36×10^3	81.28×10^3	13.45×10^2
河南 Henan	61.28×10^3	32.42×10^3	20.47×10^2	57.06×10^3	29.88×10^3	25.08×10^3
湖北 Hubei	17.23×10^3	99.58×10^2	51.51×10^3	16.17×10^3	11.43×10^3	54.24×10^3
湖南 Hunan	0	0	20.59×10^3	0	59.72	29.94×10^3
广东 Guangdong	0	0	24.16×10^2	0	0	33.00×10^3
广西 Guangxi	0	2.77	88.77×10^2	0	80.55	10.57×10^3
海南 Hainan	0	18.06×10^2	81.71×10^2	0	21.80×10^1	17.36×10^3
重庆 Chongqing	0	1.38	16.57×10^2	0	8.33	12.17×10^2

续表 4 (Table 4 continued)

地区 Region	2040s			2060s		
	高适生区(km ²) Highly suitable area (km ²)	中适生区 (km ²) Moderately suitable area (km ²)	低适生区(km ²) Lowly suitable area (km ²)	高适生区(km ²) Highly suitable area (km ²)	中适生区 (km ²) Moderately suitable area (km ²)	低适生区 (km ²) Lowly suitable area (km ²)
四川 Sichuan	0	0	77.77	0	0	0
云南 Yunnan	0	0	51.38	0	0	62.5
西藏 Tibet	0	0	42.43×10 ¹	0	0	59.23×10 ¹
陕西 Shanxi	0	0	22.22	0	3.47	20.13
新疆 Xinjiang	0	0	11.11×10 ²	0	0	20.00×10 ²
台湾 Taiwan	18.75	47.22×10 ¹	69.71×10 ²	0	19.61×10 ²	59.97×10 ²
香港 Hong Kong	0	0	50.62×10 ¹	0	0	52.43×10 ¹
澳门 Macao	0	0	14.58	0	0	16.66
总计 Total	46.51×10 ⁴	50.31×10 ⁴	37.44×10 ⁴	38.02×10 ⁴	50.06×10 ⁴	46.29×10 ⁴

表 5 ssp370 情景下不同时期美国白蛾适生区面积

Table 5 Suitable area of *Hyphantria cunea* in different period based on the ssp370

地区 Region	2040s			2060s		
	高适生区(km ²) Highly suitable area (km ²)	中适生区 (km ²) Moderately suitable area (km ²)	低适生区(km ²) Lowly suitable area (km ²)	高适生区(km ²) Highly suitable area (km ²)	中适生区 (km ²) Moderately suitable area (km ²)	低适生区 (km ²) Lowly suitable area (km ²)
北京 Beijing	40.10×10 ²	49.90×10 ²	84.72×10 ²	48.85×10 ²	42.03×10 ²	26.87×10 ¹
天津 Tianjin	27.59×10 ²	89.18×10 ²	12.50	23.00×10 ²	93.89×10 ²	43.75
河北 Hebei	31.76×10 ³	31.94×10 ³	64.16×10 ¹	35.82×10 ³	28.50×10 ³	16.72×10 ²
山西 Shanxi	0	15.97	56.25	0	11.80	29.86
内蒙古 Inner Mongoria	61.92×10 ²	34.10×10 ³	58.29×10 ³	27.67×10 ³	20.54×10 ³	21.76×10 ²
辽宁 Liaoning	34.23×10 ³	37.16×10 ³	30.23×10 ³	63.45×10 ³	23.36×10 ³	90.88×10 ²
吉林 Jilin	20.51×10 ³	60.28×10 ³	33.49×10 ³	58.21×10 ³	16.32×10 ³	14.10×10 ³
黑龙江 Heilongjiang	59.89×10 ³	13.25×10 ⁴	99.56×10 ³	50.36×10 ³	72.90×10 ³	95.00×10 ³
上海 Shanghai	19.09×10 ¹	13.29×10 ²	44.22×10 ²	43.47×10 ²	15.95×10 ²	0
江苏 Jiangsu	36.64×10 ³	35.38×10 ³	24.05×10 ³	30.04×10 ³	35.78×10 ³	27.01×10 ¹
浙江 Zhejiang	91.38×10 ¹	10.36×10 ³	22.13×10 ³	31.82×10 ²	16.58×10 ³	20.99×10 ³
安徽 Anhui	33.69×10 ³	11.03×10 ³	27.33×10 ³	59.87×10 ²	81.61×10 ³	17.84×10 ³
福建 Fujian	38.75×10 ¹	11.08×10 ²	12.16×10 ³	18.16×10 ²	99.27×10 ²	56.51×10 ²
江西 Jiangxi	0	0	24.15×10 ²	0	0	37.94×10 ³
山东 Shandong	50.47×10 ³	94.63×10 ³	50.89×10 ³	51.41×10 ³	54.54×10 ³	33.39×10 ²
河南 Henan	40.41×10 ³	29.15×10 ³	14.75×10 ³	50.95×10 ³	57.59×10 ³	11.16×10 ³
湖北 Hubei	16.82×10 ³	15.03×10 ³	56.33×10 ³	14.00×10 ²	35.27×10 ³	25.77×10 ³

续表 5 (Table 5 continued)

地区 Region	2040s			2060s		
	高适生区 (km ²) Highly suitable area (km ²)	中适生区 (km ²) Moderately suitable area (km ²)	低适生区 (km ²) Lowly suitable area (km ²)	高适生区 (km ²) Highly suitable area (km ²)	中适生区 (km ²) Moderately suitable area (km ²)	低适生区 (km ²) Lowly suitable area (km ²)
广西 Guangxi	0	63.88	73.00×10 ²	0	60.27×10 ¹	33.04×10 ³
广东 Guangdong	0	0	26.52×10 ³	0	10.56×10 ²	64.96×10 ³
湖南 Hunan	0	36.11	29.02×10 ³	0	11.03×10 ³	69.03×10 ³
海南 Hainan	0	12.55×10 ²	89.39×10 ²	2.08	37.34×10 ²	16.06×10 ³
重庆 Chongqing	0	40.97	16.49×10 ²	0	27.91×10 ¹	17.61×10 ²
四川 Sichuan	0	0	84.02	0	0	71.38×10 ¹
贵州 Guizhou	0	0	0	0	0	22.91
云南 Yunnan	0	0	17.29×10 ¹	0	10.62×10 ¹	24.72×10 ¹
西藏 Tibet	0	0	68.61×10 ¹	0	41.66×10 ¹	14.82×10 ²
陕西 Shanxi	0	9.02	14.58	0	21.52	21.87×10 ¹
新疆 Xinjiang	0	0	15.74×10 ²	0	49.09×10 ¹	74.46×10 ²
台湾 Taiwan	31.25	10.38×10 ²	57.00×10 ²	40.27	66.03×10 ²	20.61×10 ²
香港 Hong Kong	0	0	50.13×10 ¹	0	37.70×10 ¹	27.15×10 ¹
澳门 Macao	0	0	16.66	0	0	16.66
总计 Total	33.90×10 ⁴	52.73×10 ⁴	51.90×10 ⁴	38.02×10 ⁴	50.06×10 ⁴	46.29×10 ⁴

同一时期的预测结果有所不同。如在 2040s 时期, ssp245 和 ssp370 两个情景下的预测结果表现出不一样, 其中最大的差异点表现在江苏省和安徽省, 在 ssp370 情景中的高适生区和中适生区在 ssp245 情景中则表现为低适生区。而在山东省以及吉林省的部分地区, 在 ssp245 情景中为高适生区, 而在 ssp370 情景中表现为中适生区。在 2060s 时期, ssp245 情景下在河南省、安徽省、湖北省等地区的高适生区面积明显多于 ssp370 情景, 而 ssp370 情景下的高风险区集中在山东东部以及长三角地区。

3 结论与讨论

本文通过搜集整理我国 2003-2020 年美国白蛾发生县区经纬度数据, 从气候和高程等 20 个环境变量中筛选出 9 个作为决定性变量, 基于 Biomod 集成模型产生 1 000 个伪缺失点开展了美国白蛾在我国适生区预测分析研究, 并最终在 Arcmap 中实现适生等级划分。相较于以往的生

物适生区预测的相关研究, 本研究所使用的气候变量能够更好地与当前发生数据在时间尺度上匹配, 并且采用多种模型构建组合模型的方法, 有效地解决了单一模型在数据量较大时预测性能降低的问题。结果也表明, 组合模型的预测精度明显优于单一模型。经 Spearman 和 VIF 检验后筛选出 9 种环境变量用于适生区预测分析, 其中最湿月份降水量和高程两个环境变量显著影响美国白蛾的适生区。在此基础上对当前和未来时期我国美国白蛾适生区进行预测, 结果表明, 虽然不同的气候情景下美国白蛾在不同区域适生程度有所差异, 但是美国白蛾在我国的适生区面积将进一步扩张, 该结果将为未来我国美国白蛾的防控工作提供一定的理论依据。

美国白蛾入侵中国已有 40 余年, 在各发生地均造成了严重的经济损失并影响了居民的日常生活。根据本研究组合模型的预测结果来看, 当前我国美国白蛾适生区集中在辽宁、河北、北京、天津、山东、河南、安徽、江苏、湖北等省

(市),而在未来 20-40 年,美国白蛾适生区将在我国东北部、南部持续扩散。本研究预测的我国美国白蛾适生区与叶江霞等(2021)对我国美国白蛾扩散传播风险区划中的极高风险地区重合度较高,且扩散方向也基本一致。但本研究所预测的美国白蛾适生区面积远低于叶江霞等(2021)所预测的风险区域,可能是因他们所使用的空间矩阵模型预测精度较低、未考虑高程变量所致。在本研究中,在环境因子变量中添加了全国高程数据,以当前时期以及 ssp245 情景下 2040s 时期的预测结果为例(表 6),从两组不同的预测结果可以看出,在环境因子变量中添加

DEM 数据时,美国白蛾的适生区域尤其是高适生区在未来时期的扩张主要集中在河南、湖北、安徽以及长三角地区;仅使用气候因子时,未来适生区的主要扩张集中在辽宁、内蒙古以及黑龙江等省(自治区)。除有无高程数据以外,造成这一现象的主要可能是由于未来气候条件下我国东北地区与长江中下游地区降水量提升(邓荔等,2022)以及夏季气温提升(董兆克和戈峰,2011)所致,与构建组合模型时着重考虑的最湿月份降水量因子重要性一致,同时有 DEM 数据的预测结果也与卢修亮等(2021)对我国当前时期美国白蛾扩散趋势研判分析的结果相符。

表 6 无 DEM 数据的预测结果
Table 6 The prediction results without DEM data

地区 Region	当前 Now			2040s			2060s		
	高适生区	中适生区	低适生区	高适生区	中适生区	低适生区	高适生区	中适生区	低适生区
	(km ²)	(km ²)	(km ²)	(km ²)	(km ²)	(km ²)	(km ²)	(km ²)	(km ²)
	Highly suitable area (km ²)	Moderately suitable area (km ²)	Lowly suitable area (km ²)	Highly suitable area (km ²)	Moderately suitable area (km ²)	Lowly suitable area (km ²)	Highly suitable area (km ²)	Moderately suitable area (km ²)	Lowly suitable area (km ²)
北京 Beijing	89.06×10 ²	21.22×10 ²	10.50×10 ²	76.25×10 ²	89.68×10 ²	58.26×10 ¹	29.63×10 ²	42.03×10 ²	59.73×10 ²
天津 Tianjin	11.32×10 ³	30.41×10 ¹	34.02	76.34×10 ²	41.79×10 ²	25.69	14.34×10 ²	93.89×10 ²	71.94×10 ¹
河北 Hebei	74.01×10 ³	18.08×10 ³	69.17×10 ²	39.64×10 ³	76.14×10 ³	27.55×10 ³	21.80×10 ³	28.50×10 ³	46.79×10 ³
山西 Shanxi	0	17.36	22.29×10 ¹	34.72	58.61×10 ³	28.11×10 ²	76.38	11.80	38.34×10 ²
内蒙古 Inner Mongolia	0	40.97×10 ¹	52.26×10 ²	26.57×10 ³	73.36×10 ³	31.19×10 ³	42.00×10 ³	20.54×10 ³	36.60×10 ³
辽宁 Liaoning	31.92×10 ³	21.29×10 ³	18.25×10 ³	12.84×10 ⁴	19.72×10 ³	26.56×10 ²	13.07×10 ⁴	23.36×10 ³	67.06×10 ²
吉林 Jilin	2.77	56.25	16.20×10 ²	43.52×10 ³	93.87×10 ³	19.12×10 ³	68.23×10 ³	16.32×10 ³	18.96×10 ³
黑龙江 Heilongjiang	0	0	0	13.72×10 ³	97.52×10 ³	16.64×10 ⁴	11.02×10 ³	72.90×10 ³	11.52×10 ⁴
江苏 Jiangsu	57.47×10 ³	92.47×10 ²	27.10×10 ²	84.41×10 ²	27.52×10 ³	43.64×10 ²	27.36×10 ²	15.95×10 ²	11.37×10 ³
安徽 Anhui	55.01×10 ³	17.73×10 ³	15.77×10 ³	22.91	20.25×10 ³	30.85×10 ³	0	35.78×10 ³	38.27×10 ³
河南 Henan	63.24×10 ³	33.03×10 ³	17.98×10 ³	0	79.23×10 ¹	14.52×10 ³	0	99.27×10 ²	46.15×10 ²
江西 Jiangxi	0	0	0	84.20×10 ³	52.69×10 ³	16.57×10 ³	47.56×10 ³	16.58×10 ³	37.22×10 ³
山东 Shandong	13.03×10 ⁴	15.89×10 ³	26.69×10 ²	10.13×10 ²	28.32×10 ³	65.91×10 ³	10.41	81.61×10 ³	42.29×10 ³
湖北 Hubei	67.36×10 ¹	20.03×10 ³	22.47×10 ³	0	0	0	0	0	0
重庆 Chongqing	0	0	0	0	0	10.89×10 ²	0	0	16.18×10 ²
四川 Sichuan	0	0	52.08	0	26.38	60.49×10 ²	0	54.54×10 ³	51.49×10 ²
陕西 Shanxi	0	0	14.37×10 ¹	0	44.93×10 ¹	14.22×10 ³	0	57.59×10 ³	14.21×10 ³
甘肃 Gansu	0	0	0	0	0	12.79×10 ²	0	35.27×10 ³	27.91×10 ²
总计 Total	43.30×10 ⁴	13.82×10 ⁴	9.51×10 ⁴	36.09×10 ⁴	50.44×10 ⁴	40.53×10 ⁴	32.86×10 ⁴	59.55×10 ⁴	39.24×10 ⁴

本研究预测结果显示, 除异常的高温情况外, 未来我国美国白蛾适生区面积将多年稳定在 $135 \times 10^4 \text{ km}^2$ 左右; 美国白蛾将向我国东北和南部地区扩散, 其中黑龙江省和吉林省将会成为高适生区。美国白蛾具有传播距离远、传播速度快、扩张面积大等特点, 各级部门应加强重点地区的监控, 做好成虫发生时间和发生数量的及时监测, 加强各部门间协作, 尤其是气象部门 (姜玉英等, 2021; 张智等, 2021), 及时获取实时的数值, 制定有效的防治措施, 如利用美国白蛾成虫的趋光性, 在美国白蛾当前的发生区设置高强度诱捕灯对成虫进行灭杀, 或利用周氏啮小蜂进行生物防治, 在极端天气频发时做好美国白蛾的普查防治力度等。

实际上, 影响美国白蛾繁殖和传播的因素还有很多, 但由于一些数据较难获取, 本研究仅利用生物气候因子预测了美国白蛾未来的适生区, 预测结果尚需在实际环境中进行验证。后续研究将根据区域性气候条件, 结合更多的环境变量和人为因素进行预测分析, 以提高模型预测的准确性, 为美国白蛾的监测预警提供科学依据。

参考文献 (References)

- Baldwin ME, Kain JS, 2006. Sensitivity of several performance measures to displacement error, bias, and event frequency. *Weather and Forecasting*, 21(4): 636–648.
- Deng L, Zhu HH, Jiang ZH, 2022. Projection of climate change in China under carbon neutral scenarios. *Trans. Atmos. Sci.*, 45(3): 364–375. [邓荔, 朱欢欢, 江志红, 2022. 不同情景达到碳中和下中国区域气候变化的预估. *大气科学学报*, 45(3): 364–375.]
- Dong ZK, Ge F, 2011. The fitness of insects in response to climate warming. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(5): 1141–1148. [董兆克, 戈峰, 2011. 温度升高对昆虫发生发展的影响. *应用昆虫学报*, 48(5): 1141–1148.]
- Hao CJ, Li JZ, Wang Y, Chen YF, Liu F, 2022. Occurrence and 2022 trend forecast of the fall webworm *Hyphantria cunea*. *Forest Pest and Disease*, 41(1): 46–48. [赫传杰, 李加正, 王越, 陈怡帆, 刘枫, 2022. 美国白蛾发生情况及 2022 年趋势预测. *中国森林病虫*, 41(1): 46–48.]
- Huang F, Zhang WJ, Zhang HY, 2021. Potential distribution of *Sminthurus viridis* in China analyzed by BIOCLIM model. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 33(11): 2098–2103. [黄芳, 张文俊, 张建成, 张红英, 2021. 基于 BIOCLIM 模型的绿圆跳虫在中国的适生区分析. *浙江农业学报*, 33(11): 2098–2103.]
- Lee WH, Song JW, Yoon SH, Jung JM, 2022. Spatial evaluation of machine learning-based species distribution models for prediction of invasive ant species distribution. *Applied Sciences*, 12(20): 10260.
- Landgrebe TCW, Duin RPW, 2008. Efficient multiclass ROC approximation by decomposition via confusion matrix perturbation analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(5): 810–822.
- Li ZM, 2021. Harm characteristics and control measures of *Hyphantria cunea*. *South China Agriculture*, 15(32): 122–124. [李志明, 2021. 美国白蛾的为害特点及防治措施. *南方农业*, 15(32): 122–124.]
- Lu XL, Han FY, Wen XY, Qiu LX, Qu T, Chang GB, 2021. Analysis of occurrence situation and countermeasure of the fall webworm *Hyphantria cunea*. *Forest Pest and Disease*, 40(1): 44–48. [卢修亮, 韩凤英, 温玄烨, 邱立新, 曲涛, 常国彬, 2021. 美国白蛾发生形势分析与对策建议. *中国森林病虫*, 40(1): 44–48.]
- Luo LP, Wang XY, Yang ZQ, Cao ML, 2018. Research progress in the management of fall webworm, *Hyphantria cunea* (Drury) (Lepidoptera: Arctiidae). *Journal of Environmental Entomology*, 40(4): 721–735. [罗立平, 王小艺, 杨忠岐, 曹亮明, 2018. 美国白蛾防控技术研究进展. *环境昆虫学报*, 40(4): 721–735.]
- Lu X, Du XM, An JM, 2016. GARP based prediction of suitable habitat for white moth in China. *Agriculture and Technology*, 36(19): 46–50. [陆霞, 杜新民, 安建梅, 2016. 基于 GARP 的美国白蛾在中国的适生区预测. *农业与技术*, 36(19): 46–50.]
- Jia HM, Zhang HJ, Zhang X, 2022. Occurrence characteristic and comprehensive countermeasure of *Hyphantria cunea*. *Journal of Fruit Resources*, 3(2): 60–62. [贾红梅, 张宏杰, 张旭, 2022. 美国白蛾发生危害特点及综合防控措施. *果树资源学报*, 3(2): 60–62.]
- Jiang YY, Liu J, Zeng J, Huang C, Zhang T, 2021. Occurrence of, and damage caused by, major migratory pests and techniques for monitoring and forecasting these in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 58(3): 542–551. [姜玉英, 刘杰, 曾娟, 黄冲, 张涛, 2021. 我国农作物重大迁飞性害虫发生为害及监测预报技术. *应用昆虫学报*, 58(3): 542–551.]
- Ji YL, Su XY, Yu ZJ, 2019. Potential habitat prediction of *Hyphantria cunea* based on a random forest model in China. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 43(6): 121–128. [纪烨琳, 苏喜友, 于治军, 2019. 基于随机森林模型的美国白蛾在中国的潜在生境预测. *南京林业大学学报*

- 报(自然科学版), 43(6): 121–128.]
- Pan MX, Zhu SR, Zhang Z, 2022. Prediction of suitable habitat of invasive plant of *Solidago canadensis* L. in China. *Journal of Xi'an University(Natural Science Edition)*, 25(1): 90–96. [潘铭心, 朱思睿, 张震, 2022. 外来入侵植物加拿大一枝黄花在中国的适生区预测. 西安文理学院学报(自然科学版), 25(1): 90–96.]
- Peng SZ, Ding YX, Liu WZ, Li Z, 2019. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, 11(4): 1931–1946.
- Schowalter TD, Ring DR, 2017. Biology and management of the fall webworm, *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Erebidae), *Journal of Integrated Pest Management*, 8(1) : 1–6.
- Thuiller W, Lafourcade B, Engler R, Araujo MB, 2009. BIOMOD - a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*, 32(3): 369–373.
- Wen XY, Zhao GH, Cheng, XT, Chang GB, Dong XB, Lin X, 2022. Prediction of the potential distribution pattern of the great gerbil (*Rhombomys opimus*) under climate change based on ensemble modelling. *Pest. Manag. Sci.*, 78: 3128–3134.
- Ye JX, Wang JW, Zhang MS, Zhou RL, Shi L, 2021. Risk pattern analysis of *Hyphantria cunea* based on spatial matrix model and 0-1 measure. *Scientia Silvae Sinicae*, 57(1): 140–152. [叶江霞, 王敬文, 张明莎, 周汝良, 石雷, 2021. 基于空间矩阵模型及 0-1 测度的美国白蛾风险格局分析. 林业科学, 57(1): 140–152.]
- Zhang Z, Qi JF, Zhang Y, Lin PJ, Zhang YH, 2021. Development of monitoring and forecasting technologies for migratory insect pests and suggestions for their future application. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 58(3): 530–541. [张智, 祁俊锋, 张瑜, 林培炯, 张云慧, 2021. 迁飞性害虫监测预警技术发展概况与应用展望. 应用昆虫学报, 58(3): 530–541.]