DOI: 10.5846/stxb202110112849

李志鹏,张心怡,王苗苗,陈宏,赵健.优于单一最大熵生态位模型的混合烟粉虱生境风险评估模型.生态学报,2023,43(3):1276-1285. Li Z P, Zhang X Y, Wang M M, Chen H, Zhao J.A habitat risk assessment model for mixed *Bemisia tabaci* that outperforms a single MaxEnt. Acta Ecologica Sinica,2023,43(3):1276-1285.

优于单一最大熵生态位模型的混合烟粉虱生境风险评 估模型

李志鹏1,张心怡1,2,3,王苗苗1,陈 宏1,赵 健1,*

1 福建省农业科学院数字农业研究所, 福州 350001

2 福建农林大学应用生态研究所,福州 350002

3 福建农林大学闽台作物有害生物生态防控国家重点实验室,福州 350002

摘要:预测入侵生物的潜在地理分布、快速评估其高脆弱性区域是实现入侵生物前瞻性风险预警的重要手段。MaxEnt 生态位 模型是目前应用最广泛的生境风险评估方法,操作简单,预测精度较高,但模型对数据的质量和数量过分依赖。以烟粉虱 Bemisia tabaci 为对象,引入地理探测器显式描述评价因子的空间关联规律和贡献度,结合 MaxEnt 生态位模型,提出一种混合生 境风险评估模型(Geo-MaxEnt),并与单一 MaxEnt 生态位模型进行对比。结果表明:(1)地理探测器模型显示,海拔(0.56)、土 地利用(0.43)、最热月最高温度(0.36)和年平均温度(0.30),对烟粉虱的空间分布具有显著影响,各因子对烟粉虱生境的影响 存在显著的差异。海拔和土地利用 PD 值最高,是影响烟粉虱生境的主要驱动因子。环境因子的交互作用强化了各个因子的 影响力。(2)单一 MaxEnt 生态位和所构建的模型总体精度分别是 94.86%(AUC 0.91)和 98.13%(AUC 0.94),相较之下,所构建 的模型精度略高,表明所构建的模型是合理的,具有高度的可靠性;(3)对于高风险区,混合模型优于 MaxEnt 模型,但两者在空 间分布方面高度一致,主要分布在东部区域;对于非适生区,两种模型结果较为一致,MaxEnt 模型的非适生区略大于混合模型。 地理探测器能够解释入侵驱动因素相互作用和协同效应,能够较好地表达入侵昆虫生境适宜度与候选因子的生态学意义,在评 价入侵昆虫生境风险上更为有效。

关键词:生境风险;地理信息系统(GIS);地理探测器;最大熵生态位模型(MaxEnt);烟粉虱

A habitat risk assessment model for mixed *Bemisia tabaci* that outperforms a single MaxEnt

LI Zhipeng¹, ZHANG Xinyi^{1,2,3}, WANG Miaomiao¹, CHEN Hong¹, ZHAO Jian^{1,*}

1 Institute of Digital Agriculture, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350001, China

2 Institute of Applied Ecology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

3 State Key Laboratory For Ecological Pest Control of Fujian and Taiwan Crop, Fuzhou 350002, China

Abstract: Predicting the potentially geographical distribution of invasive species and rapidly assessing their high vulnerability areas are important means to realize the prospective risk warning of invasive species. At present, the MaxEnt niche model is the most widely used habitat risk assessment method with simple operation and high prediction accuracy, but it is too dependent on the quality and quantity of data. This study took *Bemisia tabaci* as the object, introduced geographic detectors to explicitly describe the spatial correlation and contribution of evaluation factors, and combined with the MaxEnt niche model to propose a mixed habitat risk assessment model (Geo-Maxent) and compare with the single MaxEnt niche

收稿日期:2021-10-11; 网络出版日期:2022-10-10

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhaojian@faas.cn

基金项目:福建省自然基金面上项目(2020J011376);国家重点研发计划(2021YFC2600403);福建省农业高质量发展协同创新工程(XTCXGC2021015);福建省智慧农业科技创新团队(CXTD2021013-1)

model. The results showed that: (1) Geo-detector model showed that altitude (0.56), land use (0.43), the max temperature in the warmest month (0.36) and annual average temperature (0.30) had significant effects on the spatial distribution of *Bemisia tabaci*, and there were significant differences in the effects of various factors on the habitat of *Bemisia tabaci*. In addition, the *PD*(Factor detection) values of altitude and land use were high, indicating that altitude and land use are the main driving factors affecting the habitat of *Bemisia tabaci*. Besides, the interaction of environmental factors strengthened the influence of each single factor. (2) The overall accuracy of the single MaxEnt niche and the constructed model was 94.86% (AUC is 0.91) and 98.13% (AUC is 0.94), respectively, indicating that the accuracy of the constructed model was higher. (3) As for the high risk regions, the mixed model is better than the MaxEnt model, but the spatial distribution is highly consistent, mainly in the eastern region. As for the unsuitable regions, the results of the two models are consistent, and the unsuitable regions of the MaxEnt model are slightly larger than the mixed model. Geographic detectors can explain the interaction and synergistic effects of invasion driving factors, and can better express the ecological significance of habitat suitability and candidate factors of invasive insects, which is more effective in evaluating the habitat risk of invasive insects.

Key Words: habitat risk assessment; GIS; geographical detector; MaxEnt; Bemisia tabaci

生物入侵是全球物种灭绝和生物多样性锐减的重要驱动因子,是21世纪重要的生态问题之一^[1],对侵入 地生态系统、人类健康和整体福祉构成了严重威胁^[2-3],并造成了巨大的经济损失^[4]。我国是受外来入侵生 物影响最为严重的国家之一,目前已知农林外来入侵生物达662种,每年造成直接经济损失逾500亿元^[5-6]。 烟粉虱 *Bemisia tabaci* (Gennadius) 是一种世界性害虫,它通过直接取食、分泌蜜露和传播双生病毒,直接或间 接影响600多种植物,导致重大的农业损失^[7-9],因其传播迅速、危害严重,被列入全球100种最危险的入侵 生物之一^[10]。深入了解烟粉虱的生态位,准确评估其空间适生性,揭示入侵驱动因素及其相互作用和协同效 应,对于制定有效的管理策略至关重要^[11],但由于其体型小、寄主范围和生态位广,导致难以在宏观层面制定 有效的管理策略^[12-13]。

物种分布模型(Species Distribution Model,SDM)被广泛地应用于生态学、地理学等诸多学科中,为解释种 群趋势、量化生物入侵和疾病爆发的风险提供了手段^[14-15]。仅需要物种分布数据的模型包括栖息地模型、生 态位因子分析模型、马氏距离和贝叶斯网络模型等,既要物种分布也要不分布数据的模型有广义线性模型、分 类树分析、柔性判别分析、人工神经网络、随机森林和最大熵模型等^[15-16],其中,MaxEnt 生态位模型是目前应 用最广泛的生境风险评估方法。SDM 通过客观数理分析与非线性特征保证了计算分析结果的准确性,但需 要大量且全局空间代表性好的观测样本,存在无法深度挖掘入侵生物生态机理的问题,分析结果易出现欠拟 合或过度拟合现象,从而导致对潜在物种分布区域的低估^[17]。地理探测器,结合了空间统计学相关原理,较 好地克服传统统计方法在类型变量中的不足,能够探测影响因子对结果变量的相关关系^[18],已经在入侵植 物^[19]、城市建设^[20]、医疗^[21]中广泛应用。

环境条件,如温度、降水对烟粉虱生存有明显的影响^[8],海拔与这些变量相关,可以通过影响太阳辐射、 温度、降水等对烟粉虱的寄主植物产生影响,进而影响烟粉虱的发生和繁殖^[22-23]。此外,烟粉虱是公认的杂 食性害虫^[7,24],土地利用对其有重要的影响^[13,23]。因此,本研究旨在构建一种新的烟粉虱生境风险评估模型 (简称 Geo-MaxEnt 混合模型),综合考虑气候变量、土地利用和地形因子,运用 AHP 层次分析法构建烟粉虱生 境风险评估指标体系,以地理探测器探讨影响其分布的主导因子,确定影响因子的相关权重,综合运用 MaxEnt 模型中的刀切法(jackknife)结果和烟粉虱相关文献确定影响因子量化标准。以此获得烟粉虱的空间 分布模式,建立烟粉虱风险评价模型,并将结果与单一的 MaxEnt 模型进行对比分析。本研究所构建的生境风 险评估模型旨在为入侵昆虫的生境评价方法提供一种新的思路。

1 材料与方法

1.1 数据来源

烟粉虱数据:通过公开发表的文献、全球生物多样性数据库(https://www.gbif.org/)、国际应用生物科学中心(https://www.cabi.org/isc/datasheet/8927)和实际调查中获得研究对象空间分布的样点,删除错误及重复数据后获取了烟粉虱空间分布数据858条。物种分布模型仅需要入侵生物的分布数据,但有研究认为引入不分布样点数据与分布样点数据结合可以提高物种的分布预测的准确度^[25],因此,还对烟粉虱的非分布点进行了采集,包括野外调查中未发现烟粉虱的点和运用 ArcGIS 10.1 软件在尚未发现的省份随机获取,共计102个。将上述数据导入 ArcGIS 10.1 软件中,获取各环境因子的属性值。

环境变量数据中平均日较差、等温性、温度季节性变动系数、多年平均降水量、降水量季节性变动系数来 源于 Worldelim 网站(http://www.worldelim.org);平均温度、最热月最高温、土地利用数据来源于中国科学院资源 环境科学数据中心数据注册与出版系统,为2015年的年均温、最热月温度和全国遥感土地利用分类数据;海拔数 据源于中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统,为90m精度的SRTM数据;基础地图数据(中 国行政区划数据):从自然资源部标准地图服务系统(http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/)下载的1:6000万标准地图。

1.2 MaxEnt 生态位模型

MaxEnt 生态位模型最初被用来估计整个景观的存在密度,通过已有的物种分布点来预测研究对象在一定区域范围的适宜性^[26],是目前应用最广泛的生态位模型^[27]。本研究随机选取 75%的烟粉虱数据作为训练 集,剩余 25%的数据作为测试集,通过多次运行后,输出预测结果,并以 AUC(area under curve)作为模型精度 校验的值,值越大说明预测精度越高。运用刀切法(jackknife)来测试各个环境因子对物种空间分布的重要程 度,得出的值与相关文献结合以确定影响因子量化标准。刀切法以正规化训练增益值用于判断各因子对烟粉 虱适生区分布的影响程度,值越大说明影响越大,该结果可以与地理探测器的结果进行对比。

1.3 地理探测器

地理探测器由王劲峰等^[28]提出,包括了风险探测器、因子探测器、生态探测器和交互探测器,因子探测器 的核心思想是如果某一物种在特定的空间位置上,若某一影响因子与物种在空间上的变化具有一致性,则说 明这个因子对物种空间分布的变化具有重要作用,用因子探测器获取各因子对物种生境的适宜性可以有效地 克服多指标法中影响因子权重受主观因素的影响。各因子对物种的栖息地生境适宜情况解释力(PD)的表达 式如下:

$$PD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{L} N_i \sigma_i^2}{N \sigma^2}$$
(1)

式中,i=1, 2, 3…, L 为候选因子 X 的分类数; N_i 和 N 分别为 i 和全部的分类数; σ_i^2 和 σ^2 分别为 i 和全部的 变量值的方差; PD 为影响因子对入侵生物栖息地生境适宜度的影响力值,取值范围为[0,1],值越大说明表 明该因子对入侵生物空间分布影响越大,反之影响越小。

交互探测器主要用于探测并解释不同影响因子是独立起作用还是具有交互作用。与传统统计分析方法 相比,交互探测能够同时分析2个或者多个变量之间的交互作用对烟粉虱空间分布的影响,其结果可以分为 5类:非线性减弱(交互结果小于任何一个独立因子)、单因子非线性减弱(交互结果小于独立因子中大的,但 是大于独立因子小的)、双因子增强(交互结果大于任何一个独立因子)、独立(交互结果等于两个独立因子相 加)和非线性增强(交互结果大于两个独立因子之和)。

1.4 烟粉虱生境风险评估指标体系构建

(1)评价因子

评价因子的选择是生境风险评价的关键。本研究从气候变量数据、土地利用数据和地形数据三个方面构

建烟粉虱生境风险评估指标(表1)。根据烟粉虱的生物学特征及生境要求,结合我国的气候条件,本研究选择了19个相关的气候变量,并运用 SPSS 17.0 软件中的 Pearson 系数对相关环境变量进行多重共线性检验, 对环境变量进行筛选,最终选取年平均温度、平均日较差等7个气候环境变量。烟粉虱是最具有破坏力的入侵昆虫,食性杂,为害农业经济作物,有研究表明,土地利用类型对烟粉虱的分布有重要的影响^[23]。地形数据主要为海拔数据,随着海拔的升高,温度会随之降低,从而影响到植被的生长,有研究表明海拔、温度对烟粉虱的生长具有较大的影响。因此有必要将海拔和土地利用纳入评价指标体系中。

目标层 Target Layer	准则层 Criterion Layer	指标层 Index Layer
烟粉虱生境风险评估指标	气候变量	平均温度(C1)
Invasive insect habitat risk assessment system		平均日较差(C2)
		等温性(C3)
		温度季节性变动系数(C4)
		最热月最高温度(C5)
		多年平均降水量(C6)
		降水量季节性变动系数(C7)
	地形因素	海拔(C8)
	土地利用	土地利用(C9)

	衣 1	生境迫且度影响因于评价准则
Table 1	Evaluation cr	iteria for influencing factors of habitat suitability

(2)评价指标数据标准化处理

构成入侵生物风险评估体系的评价因子都具有自己的量纲和数量级,且各指标彼此直接的量纲不同,因此,各因子之间无法直接进行比较和计算,在入侵生物生境风险评价过程中,需要对各评价因子进行标准化评分。为了保证评价结果的正确性和客观性,本研究运用生态位模型,在精度评价通过的情况下,运用刀切法(jackknife)测试自然环境因子对物种空间分布的影响力作为标准化的重要参考,并结合相关文献,对评价指标数据标准化(重分类),并进行赋值,结果如表2所示。

Table 2	Evaluation criteria for the im	pact factors of Bemisia tabac	i habitat risk assessment	
评价因子 Indicator		因子分值 Indicator Score		参考标准 Reference Standard
平均温度(C1)/℃ Annual mean temperature	[16,28]	(5,16)	(-∞,5];(28,+∞)	文献 ^[8,13,22-23,29] , 结合本研究
平均日较差(C2)/℃ Mean diurnal range	(−∞,13]	(13,16)	[16,+∞)	文献 ^[13,23] , 结合本研究
等温性(C3)/℃ Isothermality	(−∞,30]	(30,34)	[34,+∞)	文献 ^[13,23] , 结合本研究
温度季节性变动系数 (C4)Temperature seasonality	(800,1200)	(-∞, 800]; [1200, 1600)	[1600,+∞)	文献 ^[13,23] , 结合本研究
最热月最高温度(C5)/℃ Max temperature of warmest month	[20,27]	(15,20);(27,35)	(-∞,15];[35,+∞)	文献 ^[13,22—23] , 结合本研究
多年平均降水量(C6)/mm Annual precipitation	[500,600]	$(400,500);(600,+\infty)$	(-∞,400]	文献 ^[13,22—23,35] , 结合本研究
降水量季节性变动系数(C7) Precipitation seasonality	(130,+∞);(40,60)	(-∞,40];(120,130]; [60,80)	[80,120]	文献 ^[13,23] , 结合本研究
海拔(C8)/m Elevation	(-∞,200]	(200,800)	[800,+∞)	文献 ^[13,23] , 结合本研究
土地利用(C9) Landues	耕地 、滩涂、滩地、城乡 居民用地	河渠、湖泊、水库坑塘、 林地	未利用土地(沙地、沼泽 地、裸土地、盐碱地等)、 永久性冰川雪地等	文献 ^[13,23] ,结合 本研究
赋值 Score	100	60	20	

表 2 烟粉虱生境风险评价影响因子评价准则

当前,权重确立的方法有很多,为了减少主观评价,确定权重的方法采用各因子探测的 PD 值进行加权 平均。

(4)风险评估模型

根据上述确定的评价指标体系,结合各因子的标准化评分结果及对应的权重值,拟采用综合指数加权法 计算烟粉虱风险的综合指数,构建烟粉虱风险评价模型:

$$S = \sum_{i=1}^{n} S_i \times w_i \tag{2}$$

式中,S为烟粉虱风险评价总得分,即为综合风险指数;W_i为各因子的权重系数;表示各因子的标准化评分; S_i为第 i 个因子的标准化评分。考虑到不同模型结果量化方法不一致,研究采用自然间断法对预测的结果进 行分类评价,分为高风险区、风险区和非适生区三类。

(5)数据精度的验证

目前有关模型精度评价最常见的方法是 ROC 曲线法,通过计算曲线下面积(area under curve,AUC)值检 验模型的精度。但是,有研究认为 AUC 方法存在一定的过度拟合^[28],因此,本文除了 AUC 之外,还运用入侵 生物分布的历史记录来检测模型的精度,通过计算烟粉虱的实际分布情况与预测结果的重叠比来进行验证。 在实际操作中,运用 R 语言随机选取 75%的物种分布数据作为训练集,剩余 25%的分布数据作为测试集。

2 结果与分析

2.1 地理探测器结果分析

因子探测结果显示了各评价因子对烟粉虱生境影响大小的解释力,其结果依次为:海拔(0.56)、土地利用 (0.43)、最热月最高温度(0.36)、年平均温度(0.30)、等温性(0.18)、平均日较差(0.16)、多年平均降水量 (0.104)、温度季节性变动系数(0.09)、降水量季节性变动系数(0.04)。各因子对烟粉虱生境的影响存在显著 的差异,海拔和土地利用 PD 值最高,是影响烟粉虱生境的主要驱动因子。其结果与运用 MaxEnt 模型中采用 刀切法对环境变量分析的排序结果基本一致,但地理探测器能够直接给出因子的影响力,并且可以解释不同 影响因子之间的相互作用。

生态探测能够比较不同评价因子对烟粉虱的生境风险是否有显著影响,其结果如表 3 所示。海拔与土地 利用、平均温度、平均日较差、等温性、温度季节性变动系数、多年平均降水量、降水量季节性变动系数和海拔 中任何一个环境因子对烟粉虱的生境风险均有显著的影响;土地利用除与最热月最高温度对烟粉虱的生境无 显著影响外,与其他任何一个环境因子均有显著的影响;最热月最高温度、年平均温度均具有与土地利用相似 的特征;等温性、平均日较差、多年平均降水量、温度季节性变动系数、降水量季节性变动系数对烟粉虱的生境 风险没有显著的差异。将该结果与 PD 值的结果相结合,可以看出海拔、土地利用、最热月最高温度、年平均 温度对烟粉虱的影响较大。

交互探测器主要用于解释 2 个影响因子是独立起作用还是具有交互作用,其结果如表 4 所示,除土地利 用与年平均温度、海拔、最热月份最高温度,年平均温度与海拔、最热月份最高温度,海拔与最热月份最高温度 为双因子增强外,如土地利用(0.43)与海拔(0.56)相互作用后的解释力为 0.885 远高于单个因子,其余各因 子之间的相作用均为非线性增强,即两个因子互相作用后,其解释力大于两者之和。总体而言,各环境因子间 的交互作用都大于各单因子对烟粉虱生境风险的影响,即各影响因子的相互作用正向强化了各因子的影响 力,同时也说明了影响烟粉虱生境的因子具有多样性。

对各环境因子探测的值进行均一化处理,得到各环境因子的权重,如表5所示。

	Table 3	Statistically	significant	differences in	the effects of	different envir	onmental fact	ors on the hab	oitat of <i>Bemisia</i>	tabaci
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	С9
C1										
C2		Y								
C3		Y	Ν							
C4		Y	Ν	Ν						
C5		Y	Y	Y	Y					
C6		Y	Ν	Ν	Ν	Y				
C7		Y	Ν	Y	Ν	Y	Ν			
C8		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		
С9		Y	Y	Y	Y	Ν	Y	Y	Y	

表 3 不同环境因子对烟粉虱生境影响的统计显著性差异

Y表示 2 个环境因子对烟粉虱生境的影响具有显著性差异(置信度为 95%);N表示无显著性差异

Table

表4 2	2 种环境因子对烟粉虱生境影响的交互作用
------	----------------------

4	The interaction	of two	environmental	factors on	the	habitat	of	Bemisia	tabaci

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	С9
C1	0.302866								
C2	0.53041	0.159803							
C3	0.570162	0.632296	0.179527						
C4	0.563004	0.583898	0.565111	0.088166					
C5	0.620951	0.627144	0.583962	0.598976	0.364692				
C6	0.516708	0.387642	0.588826	0.49603	0.610819	0.103677			
C7	0.529802	0.411106	0.586295	0.530731	0.660422	0.368786	0.04447		
C8	0.795565	0.806544	0.804489	0.829058	0.768941	0.829475	0.87909	0.559487	
С9	0.729233	0.659647	0.78786	0.763004	0.782948	0.698786	0.729037	0.885344	0.429456

表 5 各环境因子所占权重

		Та	ble 5 The w	eight of each	ı environmen	tal factor			
影响因子 Indicator	C1	C2	С3	C4	C5	C6	C7	C8	С9
权重 Weight	0.134	0.071	0.079	0.039	0.174	0.046	0.020	0.247	0.190

2.2 烟粉虱生境评价结果分析

分别使用 MaxEnt 和基于地理探测器的混合模型对烟粉虱的生境风险进行预测和评价,其结果如图 1 所 示,三类结果占比如表6所示。MaxEnt 生态位模型预测的高风险区主要分布在黄淮海平原、松嫩平原南部、 鄱阳湖平原、珠三角平原和海南岛等地。混合模型高风险区则是主要分布在大兴安岭-太行山脉-巫山-雪峰山 以东区域和四川盆地的东部,在高风险区上,混合模型的结果显著高于 MaxEnt 的结果,但两者在空间分布方 面高度一致,主要分布在东部区域;在风险区域方面,MaxEnt生态位模型的面积则比混合模型的广,在空间分 布上存在一定差异,如在东北的黑龙江地区 MaxEnt 生态位模型预测结果为非适生区域,而混合模型的结果为 风险区;从非适生区的结果来看,两种模型的结果较为一致,MaxEnt 生态位模型的非适生区略高于混合模型。

		Table 6 Different	model prediction results		
	生态位模型 MaxEnt	混合模型 Geo-MaxEnt		生态位模型 MaxEnt	混合模型 Geo-MaxEnt
高风险区 High risk area	13.2%	26.69%	非适生区 Unsuitable area	46.14%	41.83%
风险区 risk area	40.66%	31.48%			

	表 6	不同模型	预测结果	
able 6	Diffe	rent model	prediction	resu

Y	Y	Ν	Y





2.3 结果验证

(1)ROC 曲线

MaxEnt 生态位模型的 ROC 曲线由 MaxEnt 软件运算生成,多次平均运算后 AUC 值为 0.91。基于地理探测器的混合模型 ROC 曲线由 SPSS 17.0 计算获得,将混合模型预测的值和相应的诊断结果(非适生区和适生区(高风险区、风险区))赋值给验证数据,并在 SPSS 17.0 中进行 ROC 曲线分析,AUC 值为 0.94。

(2)预测值和实际值匹配分析

运用剩余的 25% 样本数据(214 个,均为已知分布点数据,随机选取的非分布点存在伪分布的情况,为提高预测精度全部采用存在点的数据) 对烟粉虱的风险评估点进行模型验证。在 ArcGIS 10.1 中将烟粉虱的预测点数据与两种模型预测的结果,运用栅格分析中的点值提取工具获取预测结果,并对结果进行统计分析,其结果如表 7 所示。

从结果来看, MaxEnt 生态位模型非适生区、风险区和高风险区分别为 5.14%、18.69%、76.17%、总体精度 为 94.86%(风险区+高风险区),基于地理探测器的混合模型非适生区、风险区和高风险区分别为 1.87%、 11.68%、86.45%、总体精度为 98.13%(风险区+高风险区)。高风险区和总体精度,混合模型的结果均高于生态位模型。

表 7 不同模型结果验证

3 讨论

3.1 模型建立的合理性与适用性

SDM 被广泛的应用于入侵生物的预测、风险评估中,取得了良好的成效,但也存在些问题,SDM 过度强调 气候在物种分布中的作用,而忽略了即使在气候有利的情况下也可能限制物种分布的其他特征,例如耐盐 性^[30]、扩散限制^[31]、栖息地^[32]和社会经济因素等其他驱动因素,因此将专家观点与生理数据相结合,可以提 高气候变化对入侵生物分布的预测^[33]。其次,新兴研究表明,必须解决入侵驱动因素相互作用的协同效 应^[34],以提高模型的预测能力,地理探测器是空间统计学的一种延伸,能深入探究各环境因子之间交互作用, 了解不同驱动因子的协同作用。第三,环境变量的选择对生境预测的结果会产生影响,目前许多研究所使用 的气候环境变量多采用 Worldelim 中的数据集,存在预测过程中冗余信息^[28],加剧某些区域的过度代表 性^[34],需要结合所在区域进行环境因子的选择,因此本研究的温度数据(年平均温和最热月最高温)采用的 是我国 2015 年的温度数据,地形数据也进行了温度校正。

本文针对烟粉虱的生存自然条件,提出了一种基于地理探测器和 MaxEnt 生态位模型的混合烟粉虱生境 风险评估模型(Geo-MaxEnt)。运用 AHP 层次分析法构建烟粉虱生境风险评估体系,综合考虑了气候条件、土 地利用和地形要素,选取年平均温度、平均日较差、土地利用、地形等 9 个环境变量,以地理探测器确定影响因 子的权重,综合运用 MaxEnt 模型和相关文献确定影响因子量化标准,并建立烟粉虱风险评价模型,获得烟粉 虱的空间分布模式。经过 ROC 曲线验证 AUC 值为 0.94,表明所构建的模型是合理的,具有高度的可靠性,可 用于烟粉虱的生境风险评估中。

3.2 烟粉虱生境风险评估

从研究的结果来看,所构建的混合 Geo-MaxEnt 模型高风险区主要分布在江淮平原、长江中下游等东部区 域、东北平原南部和大兴安岭-太行山脉-巫山-雪峰山以东区域(第三级阶梯以东区域,平均海拔在 500 m 以 下),四川盆地东部。研究结果与前人的研究基本相符合^[13,23,35],但是混合模型所预测的结果更具有应用价 值,研究结果与烟粉虱实际的分布更符合,将随机的 214 个已知烟粉虱分布点数据与预测结果进行重叠,结果 显示 98.13%的点发生在风险区与高风险区,高于单一 MaxEnt 生态位模型的 94.86%。此外,烟粉虱的野外调 查显示烟粉虱已经分布在我国除青海外的大部分省份,且其中部分地区与成为优势种^[29],且其传播的番茄黄 化曲叶病毒病呈面状在我国 14 个省份大面积发生危害(http://www.moa.gov.cn/gk/nszd_1/2014nszd/ 201403/t20140325_3828234.htm),这也验证了,混合模型所预测的结果更符合烟粉虱发生的实际情况。

地理探测器结果显示,地形因素、土地利用、最热月最高温度和年平均温度的 PD 值均超过了 0.3,是烟粉 虱生境的主要影响因子,这与相关研究结果是基本符合的^[13,23],生态探测结果也验证了这一点。各环境因子 间的交互作用都大于各单因子对烟粉虱生境风险的影响,即各影响因子的相互作用正向强化了各因子的影响 力,同时也说明了影响烟粉虱生境的因子具有多样性。

地形因子是影响烟粉虱生存最大的影响因子,生态探测结果表明地形与土地利用、平均温度、平均日较差、等温性、温度季节性变动系数、多年平均降水量、降水量季节性变动系数和海拔中任何一个环境因子对烟粉虱的生境风险均有显著的影响。研究表明地形可以通过影响太阳辐射和土壤会对烟粉虱的寄主植物的盖度和多度产生影响^[19],且地形与温度之间有重要的相关性,温度随海拔的升高而下降。此外,烟粉虱具有较高的温度耐热性^[36-38],对温度的波动非常的敏感^[38],因此地形与温度的互相作用增强了对烟粉虱生境适宜的影响,这一点在地理探测器的交互探测中也得到了证明。土地利用类型对烟粉虱的寄主植物产生直接的影响,城市用地和建设用地最适合烟粉虱的生存,其次是耕地,烟粉虱为食杂性昆虫,这可能是这类用地类型周围存在着各类作物丰富,为其提供了丰富的食物来源,也表明烟粉虱的生存依赖于寄主植物,这可能与人类活动密切相关。土地利用与地形、温度息息相关,地理探测器中交互探测结果亦表明这些影响因子的互相作用

3.3 混合 Geo-MaxEnt 模型与单一 MaxEnt 生态位模型对比

针对 MaxEnt 操作简单,精度较高但模型可解释性较差的问题,本研究结合地理探测器模型和其优势,建 立了混合 Geo-MaxEnt 模型,使烟粉虱的生境适宜性评价结果兼具主观判断和客观优化。从研究结果来看,对 于高风险区,混合 Geo-MaxEnt 模型优于 MaxEnt 模型,但两者在空间分布方面高度一致,主要分布在东部区 域,从烟粉虱在全国的分布情况来看^[10,35],混合 Geo-MaxEnt 模型的结果与实际情况相符合,如在黑龙江等高 纬度地区显示单一于 MaxEnt 模型主要为风险区,而混合模型则显示其存在高风险区,这与实际结果是相符合 的^[39],中国台湾省是最早发生烟粉虱的区域,危害严重^[10],混合模型的结果更符合实际情况。对于非适生 区,两种模型结果较为一致,MaxEnt 模型的非适生区略大于混合模型。从精度评价看,混合 Geo-MaxEnt 模型 总体精度达到了 98.13%(AUC 0.94)较单一 MaxEnt 生态位的精度 94.86%(AUC 0.91)略高,表明基于地理探 测器的混合模型结果优于单一 MaxEnt 生态位模型,具有较高的预测精度。

有关物种分布模型优劣讨论的研究屡见不鲜^[14,40],但是模型的选择没有统一的解决方法。运用多个模型信息的集合模型预测成为了提高模型预测精度的一个共识和发展趋势^[16,41]。因此,模型的评估和最优化选择方法成为生物入侵领域亟待解决的问题之一,针对不同的研究目标,减少模型的不确定性,增加模型的精度,探索运用不同模型的优点,并集成运用在入侵生物的前瞻性风险评估中具有重要的科学意义。本研究以烟粉虱为例,有效地将经典生态位模型与地理学相结合,探讨烟粉虱生境因子之间的互相关系,结果表明,各环境因子间的交互作用都大于各单因子对烟粉虱生境风险的影响。所构建的混合模型,能够为入侵昆虫的生境评价方法提供一种新的思路。

为进行模型之间的对比,本研究仅考虑了自然环境因子,没有将社会经济因子和生物本身的可塑性考虑 在内。现有研究表明,人均国内生产总值高、人口密度高的地区与入侵生物数量呈正相关^[42]。在今后的研究 中,可以将多指标综合模型与 GIS 结合,并进一步考虑社会经济因素的影响。

参考文献(References):

- [1] Seebens H, Blackburn T M, Dyer E E, Genovesi P, Hulme P E, Jeschke J M, Pagad S, Pyšek P, Winter M, Arianoutsou M, Bacher S, Blasius B, Brundu G, Capinha C, Celesti-Grapow L, Dawson W, Dullinger S, Fuentes N, Jäger H, Kartesz J, Kenis M, Kreft H, Kühn I, Lenzner B, Liebhold A, Mosena A, Moser D, Nishino M, Pearman D, Pergl J, Rabitsch W, Rojas-Sandoval J, Roques A, Rorke S, Rossinelli S, Roy H E, Scalera R, Schindler S, Štajerová K, Tokarska-Guzik B, van Kleunen M, Walker K, Weigelt P, Yamanaka T, Essl F. No saturation in the accumulation of alien species worldwide. Nature Communications, 2017, 8: 14435.
- [2] Doherty T S, Glen A S, Nimmo D G, Ritchie E G, Dickman C R. Invasive predators and global biodiversity loss. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(40): 11261-11265.
- [3] Seebens H, Blackburn T M, Dyer E E, Genovesi P, Hulme P E, Jeschke J M, Pagad S, Pyšek P, van Kleunen M, Winter M, Ansong M, Arianoutsou M, Bacher S, Blasius B, Brockerhoff E G, Brundu G, Capinha C, Causton C E, Celesti-Grapow L, Dawson W, Dullinger S, Economo E P, Fuentes N, Guénard B, Jäger H, Kartesz J, Kenis M, Kühn I, Lenzner B, Liebhold A M, Mosena A, Moser D, Nentwig W, Nishino M, Pearman D, Pergl J, Rabitsch W, Rojas-Sandoval J, Roques A, Rorke S, Rossinelli S, Roy H E, Scalera R, Schindler S, Štajerová K, Tokarska-Guzik B, Walker K, Ward D F, Yamanaka T, Essl F. Global rise in emerging alien species results from increased accessibility of new source pools. PNAS, 2018, 115(10): 201719429.
- [4] Diagne C, Leroy B, Vaissière A C, Gozlan R E, Roiz D, Jarić I, Salles J M, Bradshaw C J A, Courchamp F. High and rising economic costs of biological invasions worldwide. Nature, 2021, 592(7855): 571-576.
- [5] Wan F H, Jiang M X, Zhan A B. Biological Invasions and Its Management in China. Dordrecht: Springer Netherlands, 2017.
- [6] 郭建洋, 冼晓青, 张桂芬, 刘万学, 万方浩. 我国入侵昆虫研究进展. 应用昆虫学报, 2019, 56(6): 1186-1192.
- [7] Xia J X, Guo Z J, Yang Z Z, Han H L, Wang S L, Xu H F, Yang X, Yang F S, Wu Q J, Xie W, Zhou X G, Dermauw W, Turlings T C J, Zhang Y J. Whitefly hijacks a plant detoxification gene that neutralizes plant toxins. Cell, 2021, 184(7): 1693-1705.e17.
- [8] Naranjo S E, Castle S J, de Barro P J, Liu S S. Population dynamics, demography, dispersal and spread of *Bemisia tabaci*. Bemisia: Bionomics and Management of a Global Pest. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009: 185-226.
- [9] Guo C L, Zhu Y Z, Zhang Y J, Keller M A, Liu T X, Chu D. Invasion biology and management of sweetpotato whitefly (Hemiptera: Aleyrodidae) in China. Journal of Integrated Pest Management, 2021, 12(1). DOI: https://doi.org/10.1093/jipm/pmaa024
- [10] 刘银泉, 刘树生. 烟粉虱的分类地位及在中国的分布. 生物安全学报, 2012, 21(4): 247-255.
- [11] 万方浩,彭德良, 王瑞. 生物入侵. 北京:科学出版社, 2010.

- [12] Perring T M. The *Bemisia tabaci* species complex. Crop Protection, 2001, 20(9): 725-737.
- [13] Xue Y T, Lin C T, Wang Y Z, Zhang Y B, Ji L Q. Ecological niche complexity of invasive and native cryptic species of the *Bemisia tabaci* species complex in China. Journal of Pest Science, 2021: 1-15.
- [14] Pili A N, Tingley R, Sy E Y, Diesmos M L L, Diesmos A C. Niche shifts and environmental non-equilibrium undermine the usefulness of ecological niche models for invasion risk assessments. Scientific Reports, 2020, 10: 7972.
- [15] Yates K L, Bouchet P J, Caley M J, Mengersen K, Randin C F, Parnell S, Fielding A H, Bamford A J, Ban S, Barbosa A M, Dormann C F, Elith J, Embling C B, Ervin G N, Fisher R, Gould S, Graf R F, Gregr E J, Sequeira A M M. Outstanding challenges in the transferability of ecological models. Trends in Ecology & Evolution, 2018, 33(10): 790-802.
- [16] 郭彦龙, 赵泽芳, 乔慧捷, 王然, 卫海燕, 王璐坤, 顾蔚, 李新. 物种分布模型面临的挑战与发展趋势. 地球科学进展, 2020, 35(12): 1292-1305.
- [17] Phillips S J, Dudík M, Elith J, Graham C H, Lehmann A, Leathwick J, Ferrier S. Sample selection bias and presence-only distribution models: implications for background and pseudo-absence data. Ecological Applications, 2009, 19(1): 181-197.
- [18] 王劲峰, 廖一兰, 刘鑫. 空间数据分析教程. 北京: 科学出版社, 2019.
- [19] 李志鹏,赵健,陈业滨,陈宏,林娜,邱荣洲.福建省主要入侵植物空间分异及其影响因素.应用生态学报,2019,30(8):2682-2690.
- [20] 赵小风,李娅娅,赵雲泰,田志强.基于地理探测器的土地开发度时空差异及其驱动因素.长江流域资源与环境,2018,27(11): 2425-2433.
- [21] 赵雪雁, 王晓琪, 刘江华, 王蓉, 薛冰. 基于不同尺度的中国优质医疗资源区域差异研究. 经济地理, 2020, 40(7): 22-31.
- [22] 顾爱祥,张网定,周福才,邬亚红,张海波,韩杜斌.温度和降水对蔬菜烟粉虱的影响.环境昆虫学报,2019,41(2):310-315.
- [23] 赵健, 李志鹏, 张华纬, 陈宏, 翁启勇. 基于 MaxEnt 模型和 GIS 技术的烟粉虱适生区预测. 植物保护学报, 2019, 46(6): 1292-1300.
- [24] Oliveira M R V, Henneberry T J, Anderson P. History, current status, and collaborative research projects for *Bemisia tabaci*. Crop Protection, 2001, 20(9): 709-723.
- [25] 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法. 生态学报, 2015, 35(2): 557-567.
- [26] 王国峥, 耿其芳, 肖孟阳, 张孟源, 张云燕, 王中生. 基于 4 种生态位模型的金钱松潜在适生区预测. 生态学报, 2020, 40(17): 6096-6104.
- [27] West A M, Kumar S, Brown C S, Stohlgren T J, Bromberg J. Field validation of an invasive species Maxent model. Ecological Informatics, 2016, 36: 126-134.
- [28] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [29] 薛延韬. 中国烟粉虱地理分布、种群遗传结构及其次生内共生菌多样性研究[D]. 重庆: 西南大学,2018.
- [30] Gröner F, Lenz M, Wahl M, Jenkins S R. Stress resistance in two colonial ascidians from the Irish Sea: the recent invader *Didemnum vexillum* is more tolerant to low salinity than the cosmopolitan *Diplosoma listerianum*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2011, 409(1/2): 48-52.
- [31] Rodríguez-Rey M, Jiménez-Valverde A, Acevedo P. Species distribution models predict range expansion better than chance but not better than a simple dispersal model. Ecological Modelling, 2013, 256: 1-5.
- [32] Purse B V, Comont R, Butler A, Brown P M J, Kessel C, Roy H E. Landscape and climate determine patterns of spread for all colour morphs of the alien ladybird *Harmonia axyridis*. Journal of Biogeography, 2015, 42(3): 575-588.
- [33] Hulme P E. Climate change and biological invasions: evidence, expectations, and response options. Biological Reviews, 2017, 92(3): 1297-1313.
- [34] Jennings A P, Veron G. Predicted distributions and ecological niches of 8 civet and mongoose species in Southeast Asia. Journal of Mammalogy, 2011, 92(2): 316-327.
- [35] 褚栋,潘慧鹏,国栋,陶云荔,刘佰明,张友军.Q型烟粉虱在中国的人侵生态过程及机制.昆虫学报,2012,55(12):1399-1405.
- [36] 崔旭红. B 型烟粉虱和温室粉虱热胁迫适应性及其分子生态机制[D]. 北京:中国农业科学院, 2007.
- [37] Gao X L, Li J M, Xu H X, Yan G H, Jiu M, Liu S S, Wang X W. Cloning of a putative extracellular Cu/Zn superoxide dismutase and functional differences of superoxide dismutases in invasive and indigenous whiteflies. Insect Science, 2015, 22(1): 52-64.
- [38] Zidon R, Tsueda H, Morin E, Morin S. Projecting pest population dynamics under global warming: the combined effect of inter- and intra-annual variations. Ecological Applications, 2016, 26(4): 1198-1210.
- [39] 付雪, 叶乐夫, 王贵强, 戈峰. 黑龙江地区烟粉虱和温室白粉虱发生动态. 应用昆虫学报, 2011, 48(1): 32-37.
- [40] 乔慧捷, 胡军华, 黄继红. 生态位模型的理论基础、发展方向与挑战. 中国科学: 生命科学, 2013, 43(11): 915-927.
- [41] Lenzner B, Leclère D, Franklin O, Seebens H, Roura-Pascual N, Obersteiner M, Dullinger S, Essl F. A framework for global twenty-first century scenarios and models of biological invasions. BioScience, 2019, 69(9): 697-710.
- [42] Pyšek P, Hulme P E, Simberloff D, Bacher S, Blackburn T M, Carlton J T, Dawson W, Essl F, Foxcroft L C, Genovesi P, Jeschke J M, Kühn I, Liebhold A M, Mandrak N E, Meyerson L A, Pauchard A, Pergl J, Roy H E, Seebens H, Kleunen M, Vilà M, Wingfield M J, Richardson D M. Scientists' warning on invasive alien species. Biological Reviews, 2020, 95(6): 1511-1534.