

基于MaxEnt模型和GIS技术的烟粉虱适生区预测

赵 健¹ 李志鹏¹ 张华伟^{1,2} 陈 宏¹ 翁启勇^{3*}

(1. 福建省农业科学院数字农业研究所, 福州 350001; 2. 福州大学, 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州 350100; 3. 福建省农业科学院, 福州 350003)

摘要: 为分析烟粉虱 *Bemisia tabaci* 在我国的潜在适生区, 以我国 351 个烟粉虱分布记录点、全国气候环境数据和土地利用数据为基础, 利用 MaxEnt 生态位模型结合 GIS 技术进行烟粉虱适生区预测。结果表明, 影响烟粉虱适生区预测的主要因子包括土地利用类型、海拔、年平均温度和最热月份最高温度。预测的烟粉虱高适生区、中适生区、低适生区与非适生区分别占全国陆地总面积的 5.6%、12.3%、35.2% 和 46.9%。华北平原、东北平原的南部以及湖南、湖北两省交界处为烟粉虱最适宜生存区域, 且这些区域作物生产潜力大, 造成的损失较为严重; 非适生区包括青藏高原、南疆沙漠区域、大兴安岭及东北极寒地区。本研究预测的烟粉虱中、高适生区域均有烟粉虱发生为害的报道, 烟粉虱在我国的防控形势仍然严峻。

关键词: 烟粉虱; MaxEnt 生态位模型; 潜在分布; 环境因子

Prediction of potential distribution of tobacco whitefly *Bemisia tabaci* in China based on MaxEnt niche model and GIS

Zhao Jian¹ Li Zhipeng¹ Zhang Huawei^{1,2} Chen Hong¹ Weng Qiyong^{3*}

(1. Institute of Digital Agriculture, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, Fujian Province, China; 2. Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing of Ministry of Education, Fuzhou University, Fuzhou 350100, Fujian Province, China; 3. Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, Fujian Province, China)

Abstract: In order to analyze the potential suitable areas of tobacco whitefly *Bemisia tabaci* in China, the MaxEnt niche model combined with GIS technology was used to predict the suitable areas of *B. tabaci* based on 351 distribution record points, national climate and environmental data and landuse data in China. The results showed that the main factors affecting the prediction of the suitable areas of *B. tabaci* were the landuse type, altitude, annual average temperature and maximum temperature in the hottest month. The predicted highly suitable area, moderately suitable area, least suitable area and unsuitable area of *B. tabaci* accounted for 5.6%, 12.3%, 35.2% and 46.9% of the total land area of China, respectively. The North China Plain, the southern part of the Northeast Plain and the junction of Hunan and Hubei provinces were the most suitable areas for *B. tabaci*. The unsuitable areas included Qinghai-Tibet Plateau, southern Xinjiang desert area, Daxing'anling and northeast extremely cold area. The occurrence of *B. tabaci* had been reported the moderately and highly suitable areas of *B. tabaci* predicted in this study. The prevention and control situation of *B. tabaci* is still grim in China.

Key words: *Bemisia tabaci*; MaxEnt niche model; potential distribution; ecological factor

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1200600), 福建省科技重大专项(2017NZ003-1), 福建省农科院创新基金项目(YDXM2019005)

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: Wengqy@faas.cn

收稿日期: 2019-09-10

生物入侵是仅次于栖息地丧失而威胁生物多样性的第二大因素(Wilcove et al., 1998), 是 21 世纪重要的生态问题之一(Tittensor et al., 2014; Schindler et al., 2015; Seebens et al., 2017)。在我国口岸截获的有害生物中, 昆虫占比最多(万方浩等, 2011), 它们具有隐蔽性强、成灾时间短、扩散速度快等特点, 由于信息存在滞后性, 往往成灾后才容易引起关注(陈燕婷等, 2013)。烟粉虱 *Bemisia tabaci* 隶属半翅目 Hemiptera 粉虱科 Aleyrodidae, 源于热带和亚热带区的一种多食性物种, 被认为是世界上为害农作物最严重的一种入侵害虫, 具有很强的入侵性和破坏性, 给农业经济造成巨大损失(de Barro et al., 2011; 罗晨, 2016)。因此, 深入了解影响其分布的环境影响, 预测其潜在适生区域, 可以有效协助区域有害生物风险评估和管理。

生态位模型通过已知物种的空间分布数据和自然环境变量, 根据一定的算法模拟预测物种的潜在分布, 常见的有 CLIMEX、MaxEnt、GARP、BIOCLIM 等模型(王聪等, 2018)。多数研究认为, MaxEnt 生态位模型与 GIS 相结合是目前效果最好且稳定性强的一种预测方法(Phillips et al., 2006; West et al., 2016; 王聪等, 2018)。王运生等(2007)以相似穿孔线虫 *Radopholus similis* 为例, 对 BIOCLIM、CLIMEX、DOMAIN、GARP、MaxEnt 等模型的预测结果进行了分析, 认为即使在已知分布数据有限的情况下, MaxEnt 模型的预测效果仍然优于同类模型。MaxEnt 生态位模型与 GIS 相结合, 通过已知分布的物种数据与环境数据相结合, 生成的预测结果可以用专题地图的形式直观展示, 目前已广泛应用于入侵物种等的适生性分析及评估中, 如稻水象甲 *Lissorhoptrus oryzophilus* (齐国君等, 2012)、豚草 *Ambrosia artemisiifolia* (柳晓燕等, 2016)、亮壮异蝽 *Urochela distincta* (崔麟和魏洪义, 2016)、地中海实蝇 *Ceratitis capitata* (孙佩珊等, 2017)、大嘴鲈鱼 *Largemouth bass* (Mamun et al., 2018) 等。

烟粉虱是一种多种姐妹种物种复合体, 其中 B 型和 Q 型烟粉虱最具侵入性和破坏性(Boykin & Barro, 2014)。在我国除了西藏自治区外, 其余地区均有烟粉虱发生, 密集分布区主要为华北平原以及湖北、湖南、陕西、海南等省份, 总体分布较为均匀(刘银泉和刘树生, 2013)。烟粉虱研究已取得了大量成果, 涵盖了分类学(Grávalos et al., 2015)、化学防治(McKenzie et al., 2014)、种群密度(姚凤奎等, 2019)、共生菌(陈吉强等, 2019)、双生病毒(纠敏等,

2006)等方面。但根据自然环境参数对其潜在适生区预测的报道较少, 本研究以我国已有的烟粉虱分布记录数据, 结合相关环境变量及土地利用类型数据, 综合运用 MaxEnt 模型和 GIS 技术预测烟粉虱在我国的潜在适生区, 分析其发生的主要影响因子, 以期为我国农业部门加强烟粉虱的防控管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

物种分布点数据: 已发现的烟粉虱分布数据是构建生态位模型的基础前提(Feeley & Silman, 2011), 物种分布点越多, 其预测精度也随之提高。本研究从中国外来入侵物种数据库(<http://www.chinaias.cn/>)、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>)及国内外相关文献记录采集数据, 删除错误及重复数据后一共获取了烟粉虱有效分布数据 351 条, 数据不包含港澳台地区。

环境变量数据: 在较大的地理空间尺度下, 气候因子对物种的分布影响较大, 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: 年平均温度(bio1)、平均温度日较差(bio2)、等温性(bio3)、温度季节性变动系数(bio4)、最热月份最高温度(bio5)、最冷月份最低温度(bio6)、平均温度年较差(bio7)、最湿季度平均温度(bio8)、最干季度平均温度(bio9)、最暖季度平均温度(bio10)、最冷季度平均温度(bio11)、多年平均降水量(bio12)、最湿月份降水量(bio13)、最干月份降水量(bio14)、降水量季节性变动系数(bio15)、最湿季度降水量(bio16)、最干季度降水量(bio17)、最暖季度降水量(bio18)、最冷季度降水量(bio19)。其中平均温度、最热月份最高温度、最冷月份最低温度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(<http://www.resdc.cn/DOI>)以及国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>), 其余气候数据均来源于 Worldclim 网站(<http://www.worldclim.org>)。

土地利用类型数据: 烟粉虱主要为害农业经济作物, 包括南瓜、黄瓜、茄子、向日葵、棉花、豆类和番茄等(徐维红等, 2003)。对于某些土地类型数据, 也许气候条件非常适合, 但是由于缺乏寄主, 也难以生存。因此本研究除了气候变量、海拔外, 引用土地利用数据(2015 年全国遥感土地利用分类数据)来预测烟粉虱的潜在适生区域。土地利用类型包括耕地

(水田、旱地),林地(林地、灌木林、疏林地、其它林地),草地(高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地),水域(河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地、滩涂、滩地),城乡居民用地(农村居民用地、城镇用地、其它建设用地),未利用地(沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石砾地、其它未利用地),共涉及二级土地利用类型 25 个。

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 1:6 000 万标准中国地图,审图号为 GS(2019)1697 号。

1.2 方法

1.2.1 数据处理

各因子数据处理基本步骤为:首先,统一物种分布点数据格式,删除重复数据;将 csv 格式数据导入 ArcGIS 10.1 中进行空间化,导出 .Shp 的数据格式;然后利用栅格分析、表面分析等空间分析工具得到自然环境因子中的地形因子数据(海拔、坡度、坡向);由于我国 60% 以上的地区为山区,山区的气象指标在很大程度上受到地形的影响,因此气候数据以海拔每上升 100 m 气温降低 0.6℃ 的温度递减率为依据,对气温进行了海拔校正;统一数据的地理坐标系,并把所有环境数据转换为 MaxEnt 软件所需要的 *.asc 格式;以上操作在 ArcGIS 10.1 中完成。

1.2.2 环境变量相关性的检验和筛选

考虑到烟粉虱种群的存活、分布与环境变量之间可能存在相关性,并非所有的环境变量对烟粉虱的分布都存在影响,为降低环境变量的冗余,提升 MaxEnt 模型的运算效率,对环境变量进行筛选,在 SPSS 22.0 软件中,采用 Pearson 系数对相关环境变量进行多重共线性检验(Rinnhofer et al., 2012; Yang et al., 2013)。当 2 个环境变量间的 Pearson 系数值大于或等于 0.8 时,则表明两者存在共线性关系,只要保留其中 1 个环境因子即可;小于 0.8 表示不存在共线性关系,均需要保留为后续分析(Yang et al., 2013)。

1.2.3 运用 MaxEnt 模型预测烟粉虱适生区

运用 MaxEnt 模型预测烟粉虱适生区,根据处理后的烟粉虱分布点位数据和筛选后的环境变量,通过 ArcGIS 10.1 空间化分布数据;将筛选后的环境变量数据导入 MaxEnt 软件中,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,由于训练集数据多于 80 个,所有的要素类型都将被使用到。剩余的参数设置:设置了 15 次运行,并对多次创建的模型结果进行平均;选择子样本

(subsample)采样技术;迭代收敛次数设置为 5 000 (默认为 500)。通过多次重复运行后,输出烟粉虱分布的预测结果,输出格式为 ASCII,利用 ArcGIS 软件转化成栅格(Raster)形式显示。

1.2.4 MaxEnt 模型预测结果评价

对模型评价指标的计算一般基于真阳性(模型预测物种存在且实际物种有发生的单元数)、假阳性(模型预测物种存在,但实际物种并未发生的单元数)、真阴性(模型正确预测物种不存在且实际物种也未发生的单元数)、假阴性(模型预测物种不存在,但实际物种有发生的单元数)4 类数据。通过这 4 类数据可以计算数据的灵敏度(真阳性率)和特异度(真阴性率),并以 1-特异度(假阳性率)作为横坐标,灵敏度为纵坐标绘制受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线,计算曲线下面积(area under curve, AUC)作为该模型预测精度的检验标准值,AUC 值越大说明模型预测的结果越精准(Hanley & McNeil, 1982)。

1.2.5 烟粉虱潜在分布区域适生等级划分

利用 MaxEnt 模型预测得到的烟粉虱潜在分布结果,通过 AUC 值精度评价后,将其导入 ArcGIS 软件,转化成栅格形式展示。基于模型生成的烟粉虱适生区指数(雷军成和徐海根, 2010; 刘银泉和刘树生, 2012; 薛延韬, 2018),把烟粉虱的适生区等级分为 4 级:高适生区[0.5, 1),中适生区[0.25, 0.5), [0.05, 0.25)低适生区,非适生区[0, 0.05),利用 ArcGIS 10.1 中重分类功能得到烟粉虱在我国的适生区空间分布等级图。

1.2.6 环境变量对烟粉虱适生区分布的影响

为探讨土地利用类型、海拔、年平均温度和最热月份最高温度等主要环境因子对烟粉虱的影响程度,开展了环境因子与烟粉虱生存概率之间的相关性研究。刀切法(jackknife)被用于测试气候条件因素、地形因素和土地利用类型各个环境变量对烟粉虱空间分布的重要程度以及影响力(Phillips et al., 2004),以正规化训练增益值判断各个环境变量对烟粉虱适生区分布的影响程度,值越大说明影响越大(柳晓燕等, 2016)。其原理是:依次去除 1 个环境变量,用剩余的环境变量重新建模,然后分析去除的环境变量和遗漏误差的相关性(柳晓燕等, 2016),以此来确定各个环境变量对该模型预测物种潜在适生区时的影响程度。如果某一环境变量的缺失导致遗漏误差显著提高,表明模型预测的结果受该环境变量影响显著。本研究对环境变量进行相关性检验和筛选后得到 9 个环境变量(包含海拔和土地利

用类型),应用刀切法计算 9 个环境变量对烟粉虱生存的相关性重要程度,即生存概率。

2 结果与分析

2.1 环境变量相关性的检验和筛选结果

本研究中环境变量的相关性检验结果显示,最

终选取年平均温度(bio1)、平均温度日较差(bio2)、等温性(bio3)、温度季节性变动系数(bio4)、最热月份最高温度(bio5)、多年平均降水量(bio12)、降水量季节性变动系数(bio15)以及海拔(alt)、土地利用类型(land)共 9 个环境变量(表 1),将用于后续分析。

表 1 环境变量的相关系数矩阵

Table 1 Correlation matrix between environmental variables

环境变量 Environmental variable	bio1	bio2	bio3	bio4	bio5	bio12	bio15
bio1	1.000						
bio2	-0.702	1.000					
bio3	0.216	0.146	1.000				
bio4	-0.669	0.600	-0.663	1.000			
bio5	0.702	-0.310	-0.301	0.420	1.000		
bio12	0.733	-0.774	0.217	-0.741	0.254	1.000	
bio15	-0.497	0.562	0.047	0.401	-0.335	-0.573	1.000

bio1: 年平均温度; bio2: 平均温度日较差; bio3: 等温性; bio4: 温度季节性变动系数; bio5: 最热月份最高温度; bio12: 多年平均降水量; bio15: 降水量季节性变动系数。bio1: Annual mean temperature; bio2: mean temperature diurnal range; bio3: isothermality; bio4: temperature seasonality; bio5: max temperature of warmest month; bio12: annual mean precipitation; bio15: precipitation seasonality (coefficient of variation)。

2.2 MaxEnt 模型预测结果精度评价

采用训练集数据和测试集数据的 ROC 曲线对 MaxEnt 模型预测的准确度和可靠性进行检验,结果表明,训练集数据和测试集数据的 ROC 曲线均远离随机预测模型的 ROC 曲线,且多次重复运行的平均测试 AUC 值为 0.910,标准差为 0.022,明显高于随机预测模型的 AUC 值(0.500),均达到了精确水平(图 1)。说明利用我国现有的烟粉虱分布点数据和筛选后的环境变量能很好地预测烟粉虱在我国的潜在分布。

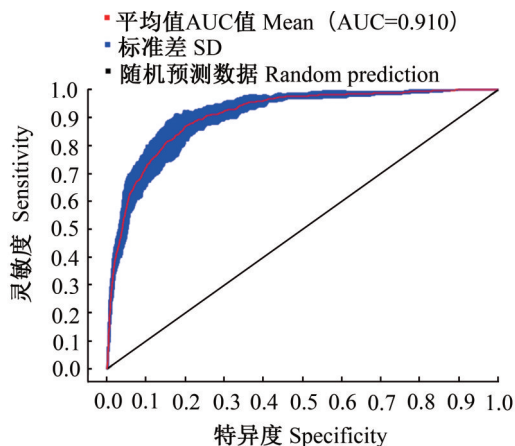


图 1 MaxEnt 模型对烟粉虱预测结果的 ROC 曲线验证

Fig. 1 ROC curve verification of the prediction process for *Bemisia tabaci* by MaxEnt model

2.3 烟粉虱在我国的适生区预测

运用 MaxEnt 软件得到的烟粉虱在我国的适生区分布图,发现烟粉虱在全国各个省份均有不同程度的适生区域,高、中、低适生区域分别占我国陆地总面积的 5.6%、12.3% 和 35.2%,非适生区占我国陆地总面积的 46.9%。高适生区域主要分布在东北平原的南部、北京市、天津市、河北省、山东省、江苏省、安徽省、海南省以及湖南、湖北两省交界处等平原地带;中适生区主要包括东北平原中部、陕西省、山西省、四川省中东部、新疆维吾尔自治区北部、海南省北部及广东省广州市等地;低适生区和非适生区主要分布在青藏高原、南疆沙漠区域、大兴安岭及东北极寒地区(图 2)。

2.4 影响烟粉虱分布的环境变量

采用刀切法对影响烟粉虱分布的环境变量进行分析,结果显示,土地利用类型(land)、海拔(alt)对于预测烟粉虱的地理分布有重要影响,正规化训练增益值大于 0.8;年平均温度(bio1)和最热月份最高温度(bio5)对烟粉虱的地理分布有较大影响,正规化训练增益值均大于 0.5,最热月份最高温度对烟粉虱的影响大于年平均温度。而温度季节性变动系数(bio4)、多年平均降雨量(bio12)、降水量季节性变动系数(bio15)等环境因子的影响相对较小(图 3)。

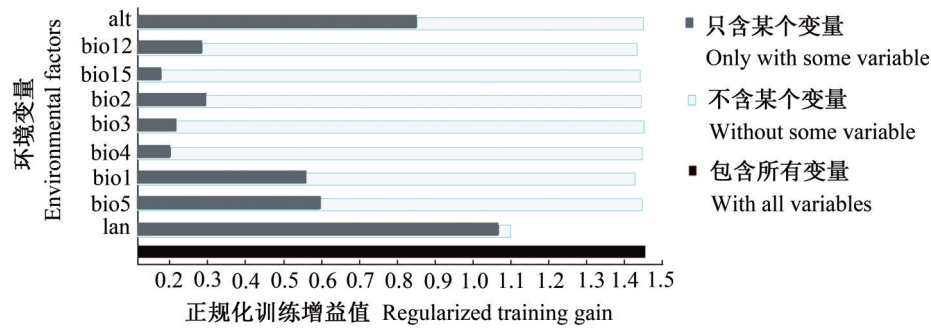


图 3 刀切法分析环境变量对烟粉虱在中国分布的重要程度

Fig. 3 Jackknife test for evaluating the relative importance of environmental variables for *Bemisia tabaci* in China

bio1: 年平均温度; bio2: 平均温度日较差; bio3: 等温性; bio4: 温度季节性变动系数; bio5: 最热月份最高温度; bio12: 多年平均降水量; bio15: 降水量季节性变动系数; alt: 海拔; lan: 土地利用类型。bio1: Annual mean temperature; bio2: mean diurnal range; bio3: isothermality; bio4: temperature seasonality; bio5: max temperature of warmest month; bio12: annual mean precipitation; bio15: precipitation seasonality (coefficient of variation); alt: DEM; lan: landuse type.

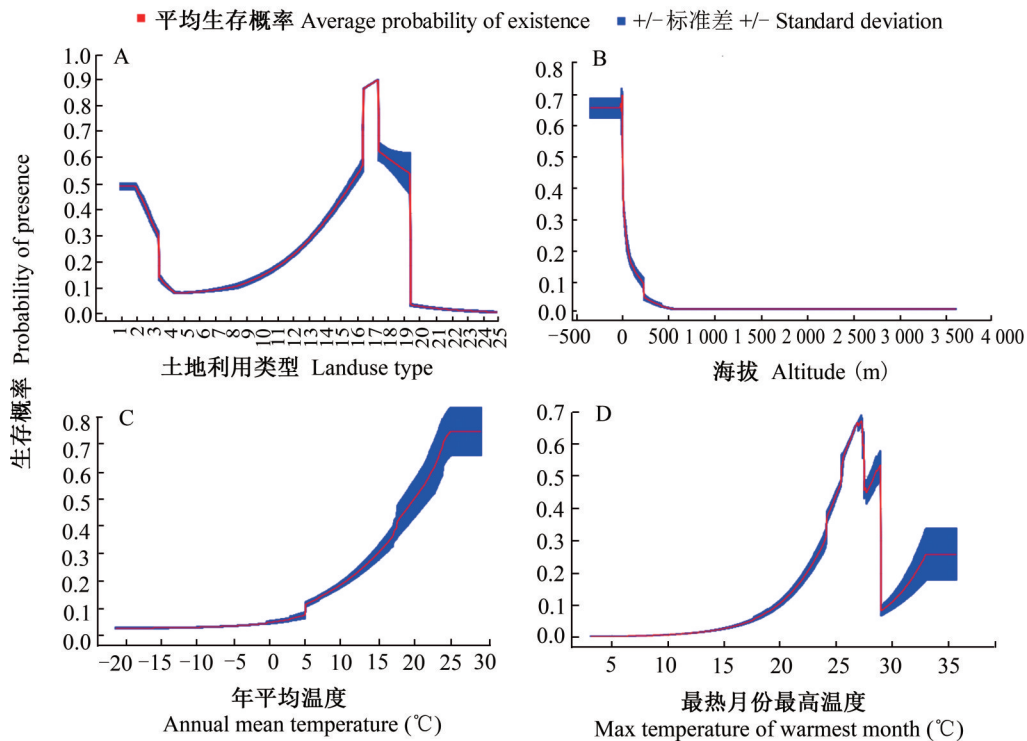


图 4 不同环境因子与烟粉虱生存概率间的关系

Fig. 4 Relationships between different environment effectors and presence probability of *Bemisia tabaci*

1: 水田; 2: 旱地; 3: 林地; 4: 灌木林; 5: 疏林地; 6: 其它林地; 7: 高覆盖度草地; 8: 中覆盖度草地; 9: 低覆盖度草地; 10: 河渠; 11: 湖泊; 12: 水库坑塘; 13: 永久性冰川雪地; 14: 滩涂; 15: 滩地; 16: 城镇用地; 17: 农村居民用地; 18: 其它建设用地; 19: 沙地; 20: 戈壁; 21: 盐碱地; 22: 沼泽地; 23: 裸土地; 24: 裸岩石砾地; 25: 其它未利用地。1: paddy fields; 2: dry land; 3: woodland; 4: shrubs; 5: sparse woodlands; 6: other wooded land; 7: high-coverage grassland; 8: medium-coverage grassland; 9: low-coverage grassland; 10: river canals; 11: lakes; 12: reservoir pits; 13: permanent glacier snow; 14: tidal flats; 15: beaches; 16: urban land; 17: rural residential land; 18: other construction land; 19: sand; 20: gobi; 21: saline-alkali land; 22: marshland; 23: bare land; 24: bare gravel; 25: other unutilized land.

3 讨论

常见的生态位模型有 CLIMEX、MaxEnt、GARP 等, CLIMEX 模型通过已知地理分布数据来预测物

种的潜在分布(侯柏华和张润杰, 2005; Ramos et al., 2019), 能全面、动态地模拟入侵生物在新区域的适生能力(秦誉嘉等, 2019), 但该模型假设物种的潜在生长能力与气候因素呈线性关系, 这可能与实际情

况相悖(郭晓华等,2007),且该模型无法考虑非气候因子如地形条件、土地利用因子等(王聪,2018)。GARP模型是基于遗传算法的分布预测模型,广泛应用于入侵物种的潜在分布及种群的生物多样性研究中(张超等,2016),要求的样本较小,计算速度快,但也存在着与CLIMEX一样的问题(陈乃中等,2007)。王运生等(2007)和West et al.(2016)认为MaxEnt生态位模型与GIS相结合能够更准确模拟入侵物种的空间分布。本研究参考以上方法将MaxEnt生态位模型与GIS相结合,在已知烟粉虱分布数据和环境变量的基础上,叠加土地利用类型数据,成功地预测了烟粉虱在我国的适生范围,对烟粉虱的扩散监测、风险评估有重要意义。

本研究所构建模型的预测结果与褚栋等(2012)和薛延韬(2018)的研究报道基本相符合。本研究结果显示,北京市、天津市、河北省、山东省、江苏省、安徽省、海南省、东北平原的南部以及湖南、湖北两省交界处等为高适生区,可能由于这些地区水热条件充足,大部分年平均气温在10℃以上,最热月份最高气温在30℃左右,适合烟粉虱生存;即使部分高适生区在冬季的温度较低,但设施温室内温度冬季仍高于15℃,烟粉虱也能正常越冬,并能维持一定的种群(林克剑等,2004);丁雪玲等(2019)研究认为,温室大棚是烟粉虱的主要越冬场所,大棚内烟粉虱可周年发生。此外,这些区域作物生产潜力指数高(刘洛等,2015),烟粉虱造成的农业损失将更为严重,是烟粉虱重点防控区域。

烟粉虱主要为害农业经济作物(徐维红等,2003)。本研究发现,土地利用类型是影响我国烟粉虱发生的重要影响因素,如农村居民点附近烟粉虱的生存概率最高,达0.9,这应当与农村居民点周边种植各类农业经济作物寄主有关。柳晓燕等(2016)和Petitpierre et al.(2017)认为在预测模型中增加土地利用类型数据,有助于提高物种适生性分布预测的真实性与准确率,这在本研究中也得到证实。

烟粉虱对气候的波动高度敏感(Zidon et al., 2016),温度对烟粉虱生长和发育有重要的影响。Albergaria & Cividanes(2002)研究结果显示,烟粉虱适合存活温度下限为8.3℃,上限为37℃,15~35℃最适合烟粉虱的生存;顾爱祥等(2019)认为烟粉虱不耐低温也不耐高温,26℃是其种群增长最适宜生存的温度;本试验结果表明20~30℃是其适合温度,25~30℃为最适温度,这与前述研究基本一致。此外,地形条件与温度变化密切相关,我国60%

以上区域为山地,为了得到更精准的结果,本研究对温度数据进行了地形校正后再进行适生区预测。烟粉虱高适生区主要位于我国的第三级阶梯,地势平坦,地形变化与温度叠加影响小;而青藏高原、大兴安岭及东北极寒地区地形变化大,地形和温度叠加影响较大,因此上述地区为其主要的低适生区和非适生区。

本研究预测的烟粉虱中、高适生区均有烟粉虱发生的报道,说明烟粉虱在我国的发生较为广泛,防控形势仍然严峻。需要说明的是MaxEnt模型利用已有的分布数据和环境变量预测物种的适生区域,不代表该区域发生该物种的必然性。对于不同的物种,所选择的自然环境变量不同则其预测结果会有差异,因此在选择变量时应充分参考前人研究结果进行统计分析和综合判断。此外,对增加非环境变量如物种本身的分型、生物学特性、种群关系及寄主分布等因素进行综合分析预测还有待进一步深入研究。

参考文献 (References)

- Albergaria NMMS, Cividanes FJ. 2002. Thermal requirements of *Bemisia tabaci* (Genn.) B-biotype (Hemiptera: Aleyrodidae). *Neotropical Entomology*, 31(3): 359–363
- Boykin LM, de Barro PJ. 2014. A practical guide to identifying members of the *Bemisia tabaci* species complex: and other morphologically identical species. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2: 45
- Chen JQ, Zhang YB, Zhang GF, Wan FH, Liu H. 2019. Localization and distribution of the main endosymbionts in *Bemisia tabaci* MEAM 1. *Plant Protection*, DOI: 10.16688/j.zwbh.2019072 (in Chinese) [陈吉强, 张毅波, 张桂芬, 万方浩, 刘怀. 2019. 烟粉虱 MEAM1 隐种主要内共生菌的定位和分布. 植物保护, DOI: 10.16688/j.zwbh.2019072]
- Chen NZ, Wang YP, Chen HJ, Chen Y, Liu ZL. 2007. Prediction of potential distribution area of *Wasmannia auropunctata* in China. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(6): 855–858 (in Chinese) [陈乃中, 王艳平, 陈洪俊, 陈岩, 刘泽良. 2007. 小火蚁及其在中国的适生区预测. 昆虫知识, 44(6): 855–858]
- Chen YT, Huang L, Wang R, Peng L, You MS. 2013. Current status and major progress on the risk analysis of invasive alien insects over the last decade. *Journal of Biosafety*, 22(4): 217–228 (in Chinese) [陈燕婷, 黄离, 王瑞, 彭露, 尤民生. 2013. 近10年外来入侵昆虫风险分析的研究现状及主要进展. 生物安全学报, 22(4): 217–228]
- Chu D, Pan HP, Guo D, Tao YL, Liu BM, Zhang YJ. 2012. Ecological processes and mechanisms of invasion of the alien whitefly *Bemisia tabaci* biotype Q in China. *Acta Entomologica Sinica*, 55(12): 1399–1405 (in Chinese) [褚栋, 潘慧鹏, 国栋, 陶云荔, 刘佰明, 张友军. 2012. Q型烟粉虱在中国的入侵生态过程及机制. 昆虫学

- 报, 55(12): 1399–1405]
- Cui L, Wei HY. 2016. Predicting the geographical distribution of *Urochela distincta* Distant with MaxEnt and DIVA-GIS. *Journal of Plant Protection*, 43(3): 362–368 (in Chinese) [崔麟, 魏洪义. 2016. 基于MaxEnt和DIVA-GIS的亮壮异蝽潜在地理分布预测. *植物保护学报*, 43(3): 362–368]
- de Barro PJ, Liu SS, Boykin LM, Dinsdale AB. 2011. *Bemisia tabaci*: a statement of species status. *Annual Review of Entomology*, 56: 1–19
- Ding XL, Zheng Y, Yao FL, Lu XS, He YX. 2018. Factors affecting the population dynamics of *Bemisia tabaci* (Gennadius) in Fujian Province. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(6): 1074–1080 (in Chinese) [丁雪玲, 郑宇, 姚凤鑫, 卢学松, 何玉仙. 2018. 福建省烟粉虱种群消长动态及影响因素分析. *应用昆虫学报*, 55(6): 1074–1080]
- Feeley KJ, Silman MR. 2011. Keep collecting: accurate species distribution modelling requires more collections than previously thought. *Diversity and Distributions*, 17(6): 1132–1140
- Grávalos C, Fernández E, Belando A, Moreno I, Ros C, Bielza P. 2015. Cross-resistance and baseline susceptibility of Mediterranean strains of *Bemisia tabaci* to cyantraniliprole. *Pest Management Science*, 71(7): 1030–1036
- Gu AX, Zhang WD, Zhou FC, Wu YH, Zhang HB, Han DB. 2019. Effects of temperature and rainfall on vegetable *Bemisia tabaci*. *Journal of Environmental Entomology*, 41(2): 310–315 (in Chinese) [顾爱祥, 张网定, 周福才, 郭亚红, 张海波, 韩杜斌. 2019. 温度和降水对蔬菜烟粉虱的影响. *环境昆虫学报*, 41(2): 310–315]
- Guo XH, Qi SY, Zhou XW, Sun XY. 2007. Research progress on alien pest risk assessment methods. *Chinese Journal of Ecology*, 26(9): 1486–1490 (in Chinese) [郭晓华, 齐淑艳, 周兴文, 孙晓扬. 2007. 外来有害生物风险评估方法研究进展. *生态学杂志*, 26(9): 1486–1490]
- Hanley JA, McNeil BJ. 1982. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology*, 143(1): 29–36
- Hou BH, Zhang RJ. 2005. Potential distributions of the fruit fly *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) in China as predicted by CLIMEX. *Acta Ecologica Sinica*, 25(7): 1569–1574 (in Chinese) [侯柏华, 张润杰. 2005. 基于CLIMEX的桔小实蝇在中国适生区的预测. *生态学报*, 25(7): 1569–1574]
- Jiu M, Zhou XP, Liu SS. 2006. Transmission of geminiviruses by whitefly. *Acta Entomologica Sinica*, 49(3): 513–520 (in Chinese) [纠敏, 周雪平, 刘树生. 2006. 烟粉虱传播双生病毒研究进展. *昆虫学报*, 49(3): 513–520]
- Lei JC, Xu HG. 2010. MaxEnt-based prediction of potential distribution of *Solidago canadensis* in China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 26(2): 137–141 (in Chinese) [雷军成, 徐海根. 2010. 基于MaxEnt的加拿大一枝黄花在中国的潜在分布区预测. *生态与农村环境学报*, 26(2): 137–141]
- Lin KJ, Wu KM, Wei HY, Guo YY. 2004. Effects of temperature and humidity on the development, survival and reproduction of B type of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae). *Journal of Plant Protection*, 31(1): 166–172 (in Chinese) [林克剑, 吴孔明, 魏洪义, 郭予元. 2004. 温度和湿度对B型烟粉虱发育、存活和生殖的影响. *植物保护学报*, 31(2): 166–172]
- Liu L, Xu XL, Liu JY, Chen X, Ning J. 2015. Impact of farmland changes on production potential in China during 1990–2010. *Acta Geographica Sinica*, 69(12): 1767–1778 (in Chinese) [刘洛, 徐新良, 刘纪远, 陈曦, 宁佳. 2015. 1990–2010年中国耕地变化对粮食生产潜力的影响. *地理学报*, 69(12): 1767–1778]
- Liu XY, Li JS, Zhao CY, Quan ZJ, Zhao XJ, Gong L. 2016. Prediction of potential suitable area of *Ambrosia artemisiifolia* L. in China based on MAXENT and ArcGIS. *Journal of Plant Protection*, 43(6): 1041–1048 (in Chinese) [柳晓燕, 李俊生, 赵彩云, 全占军, 赵相健, 宫璐. 2016. 基于MAXENT模型和ArcGIS预测豚草在中国的潜在适生区. *植物保护学报*, 43(6): 1041–1048]
- Liu YQ, Liu SS. 2013. Species status of *Bemisia tabaci* complex and their distributions in China. *Journal of Biosafety*, 21(4): 247–255 (in Chinese) [刘银泉, 刘树生. 2013. 烟粉虱的分类地位及在中国的分布. *生物安全学报*, 21(4): 247–255]
- Luo C. 2016. *Bemisia tabaci* species complex—small insect pests cause great damage. *Journal of Plant Protection*, 43(1): 1–4 (in Chinese) [罗晨. 2016. 烟粉虱复合种—小昆虫, 大危害. *植物保护学报*, 43(1): 1–4]
- Mamun M, Kim S, An KG. 2018. Distribution pattern prediction of an invasive alien species largemouth bass using a maximum entropy model (MaxEnt) in the Korean Peninsula. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 11(4): 516–524
- McKenzie CL, Kumar V, Palmer CL, Oetting RD, Osborne LS. 2014. Chemical class rotations for control of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) on poinsettia and their effect on cryptic species population composition. *Pest Management Science*, 70(10): 1573–1587
- Petitpierre B, Broennimann O, Kueffer C, Daehler C, Guisan A. 2017. Selecting predictors to maximize the transferability of species distribution models: lessons from cross-continental plant invasions. *Global Ecology and Biogeography*, 26(3): 275–287
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3/4): 231–259
- Phillips SJ, Dudík M, Schapire RE. 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. // *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Machine Learning*. Association for Computing Machinery, pp. 83
- Qi GJ, Gao Y, Huang DC, Lü LH. 2012. Historical invasion, expansion process and the potential geographic distributions for the rice water weevil, *Lissorhoptrus oryzophilus* in China based on MAX-ENT. *Journal of Plant Protection*, 39(2): 129–136 (in Chinese) [齐国君, 高燕, 黄德超, 吕利华. 2012. 基于MAXENT的稻水象甲在中国的入侵扩散动态及适生性分析. *植物保护学报*, 39(2): 129–136]
- Qin YJ, Lan S, Lu GC, Liu WQ, Liu YH, Li ZH. 2019. Prediction on potential geographical distribution of European cherry fruit fly

- Rhagoletis cerasi* in China under climate change. Journal of Plant Protection, 46(1): 63–70 (in Chinese) [秦誉嘉, 蓝帅, 卢国彩, 刘玮琦, 刘云慧, 李志红. 2019. 气候变化条件下樱桃实蝇在中国的潜在地理分布预测. 植物保护学报, 46(1): 63–70]
- Ramos RS, Kumar L, Shabani F, da Silva RS, de Araújo TA, Picanço MC. 2019. Climate model for seasonal variation in *Bemisia tabaci* using CLIMEX in tomato crops. International Journal of Biometeorology, 63(3): 281–291
- Rinnhofer LJ, Roura-Pascual N, Arthofer W, Dejaco T, Thaler-Knoflach B, Wachter GA, Christian E, Steiner FM, Schlick-Steiner BC. 2012. Iterative species distribution modelling and ground validation in endemism research: an Alpine jumping bristletail example. Biodiversity and Conservation, 21(11): 2845–2863
- Schindler S, Staska B, Adam M, Rabitsch W, Essl F. 2015. Alien species and public health impacts in Europe: a literature review. Neo-Biota, 27: 1–23
- Seebens H, Blackburn TM, Dyer EE, Genovesi P, Hulme PE, Jeschke JM, Pagad S, Pyšek P, Winter M, Arianoutsou M, et al. 2017. No saturation in the accumulation of alien species worldwide. Nature Communications, 8: 14435
- Sun PS, Jiang F, Zhang XL, Zhang JQ, Pan XB, Li ZH. 2017. Invasion risk assessment of the Mediterranean fruit fly *Ceratitis capitata* into China. Journal of Plant Protection, 44(3): 436–444 (in Chinese) [孙佩珊, 姜帆, 张祥林, 张静秋, 潘绪斌, 李志红. 2017. 地中海实蝇入侵中国的风险评估. 植物保护学报, 44(3): 436–444]
- Tittensor DP, Walpole M, Hill SLL, Daniel G, Boyce DG, Britten GL, Burgess ND, Butchart SHM, Leadley PW, Regan EC, AR, et al. 2014. A mid-term analysis of progress toward international biodiversity targets. Science, 346(6206): 241–244
- Wan FH, Feng J, Xu J. 2011. Biological invasions: detection surveillance and monitoring. Beijing: Science Press (in Chinese) [万方浩, 冯洁, 徐进. 2011. 生物入侵: 检测与监测篇. 北京: 科学出版社]
- Wang C, Cai PM, Yi CD, Chen JH. 2018. Bibliometric based analysis of the risk assessment of alien invasive pest from 2007 to 2017 and introduction of several risk assessment models. Journal of China Agricultural University, 23(8): 225–238 (in Chinese) [王聪, 蔡普默, 仪传冬, 陈家骅. 2018. 2007—2017 年外来入侵害虫风险评估的文献分析及常用风险评估模型介绍. 中国农业大学学报, 23(8): 225–238]
- Wang YS, Xie BY, Wan FH, Xiao QM, Dai LY. 2007. Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models. Biodiversity Science, 15(4): 365–372 (in Chinese) [王运生, 谢丙炎, 万方浩, 肖启明, 戴良英. 2007. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用. 生物多样性, 15(4): 365–372]
- West AM, Kumar S, Brown CS, Stohlgren TJ, Bromberg J. 2016. Field validation of an invasive species MaxEnt model. Ecological Informatics, 36: 126–134
- Wilcove DS, Rothstein D, Dubow J, Phillips A, Losos E. 1998. Quantifying threats to imperiled species in the United States. BioScience, 48(8): 607–615
- Xu WH, Zhu GR, Zhang YJ, Wu QJ, Xu BY, Li GL. 2003. An analysis of the life table parameters of *Bemisia tabaci* feeding on seven species of host plants. Entomological Knowledge, 40(5): 453–455 (in Chinese) [徐维红, 朱国仁, 张友军, 吴青君, 徐宝云, 李桂兰. 2003. 烟粉虱在七种寄主植物上的生命表参数分析. 昆虫知识, 40(5): 453–455]
- Xue YT. 2018. Geographical distribution, genetic structure of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) in China, and diversity of its secondary endosymbionts. Master Thesis. Chongqing: Southwest University (in Chinese) [薛延韬. 2018. 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. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学]
- Yang XQ, Kushwaha SPS, Saran S, Xu JC, Roy PS. 2013. MaxEnt modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. Ecological Engineering, 51: 83–87
- Yao FL, Zheng Y, Ding XL, Lu XS, He YX, Weng QY. 2019. Overwintering population density and cold tolerance of *Bemisia tabaci* in greenhouses and open fields in the Fujian Province. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 27(6): 825–835 (in Chinese) [姚凤鑫, 郑宇, 丁雪玲, 卢学松, 何玉仙, 翁启勇. 2019. 福建省露地及设施蔬菜烟粉虱越冬种群密度及耐寒性研究. 中国生态农业学报, 27(6): 825–835]
- Zhang C, Chen L, Tian CM, Li T, Wang R, Yang QQ. 2016. Predicting the distribution of dwarf mistletoe (*Arceuthobium sichuanense*) with GARP and MaxEnt models. Journal of Beijing Forestry University, 38(5): 23–32 (in Chinese) [张超, 陈磊, 田呈明, 李涛, 汪荣, 杨启青. 2016. 基于 GARP 和 MaxEnt 的云杉矮槲寄生分布区的预测. 北京林业大学学报, 38(5): 23–32]
- Zidon R, Tsueda H, Morin E, Morin S. 2016. Projecting pest population dynamics under global warming: the combined effect of inter- and intra-annual variations. Ecological Applications, 26(4): 1198–1210

(责任编辑:王璇)