植物保护学报 Journal of Plant Protection，2021，48(4)：872-881 DOI：10.13802/j.cnki.zwbhxb.2021.2020220

气候变暖背景下柑橘木虱在中国的适生区变化

刘 丹[1,2] 姚俊萌[1*] 余焰文[3] 段里成[1] 蔡 哲[1]

（1. 江西省农业气象中心，南昌 330096；2. 江西省气象科学研究所，南昌 330096；
3. 抚州市气象局，江西 抚州 344199）

摘要：为明确气候变暖背景下柑橘木虱*Diaphorina citri*在中国的适生区变化趋势，通过对影响柑橘木虱分布的关键气候环境变量进行筛选，并基于其在中国的历史分布数据，利用最大熵MaxEnt模型分析过去50年间气候变暖对柑橘木虱在中国的适生区变化趋势的影响。结果表明，影响柑橘木虱适生区的6个主要气候环境变量是最冷季节降水量、最冷季节平均温度、冬季日平均气温小于等于-5℃的日数、温度季节性变化标准差、最暖月最高温度以及8月日平均气温大于30℃的日数。受气候变暖影响，20世纪60年代至21世纪初，柑橘木虱在我国的总适生区、中适生区和高适生区分布面积呈明显扩大趋势，高适生区扩大趋势较中适生区更为明显。其中高适生区在广西、贵州、湖南、江西、湖北、安徽和浙江等省区增加明显；中适生区在云南、贵州、重庆、湖北、安徽、江西和江苏等省市增加明显；低适生区的总体面积虽然在减少，却是由于中、高适生区北移造成的，且湖北省、四川省、重庆市和江苏省的北部部分地区由原来的不适生区转为低适生区。表明气候变暖导致我国气候更加适宜柑橘木虱生存，高适生区、中适生区和低适生区的北界都在北移，而其传播的柑橘黄龙病扩散风险加大，需要给予足够的重视。

关键词：柑橘木虱；MaxEnt模型；潜在分布；气候变化

Suitable distribution changes of Asian citrus psyllid *Diaphorina citri* in China under global warming

Liu Dan[1,2] Yao Junmeng[1*] Yu Yanwen[3] Duan Licheng[1] Cai Zhe[1]

（1. Jiangxi Agricultural Meteorological Center, Nanchang 330096, Jiangxi Province, China; 2. Jiangxi Provincial Research Institute of Meteorological Science, Nanchang 330096, Jiangxi Province, China;
3. Fuzhou Bureau of Meteorology, Fuzhou 344199, Jiangxi Province, China）

Abstract: To clarify the changing trend of the suitable areas of Asian citrus psyllid *Diaphorina citri* in China under the background of climate change, the key climate-environmental variables and climatic suitability for *D. citri* were calculated, and the suitable areas of *D. citri* in China were modeled by the maximum entropy model (MaxEnt) with the historic distribution data from the 1960s to the beginning of the 21st century. The results showed that the key climate-environmental variables limiting the distribution of *D. citri* were the precipitation and average temperature in the coldest season, the days of daily average temperature below −5℃ in winter, standard deviation of temperature seasonality, the maximum temperature of warmest month and the days of daily average temperature above 30℃ in August. Affected by climate warming, the distribution of *D. citri* displayed an obvious expansion trend in China from 1960s to the beginning of the 21st century, including the total suitable areas, highly suitable areas and moderately suitable areas. In particular, the highly suitable areas expanded more obviously than the

基金项目：江西省气象局重点项目（JXQXZD201811）
* 通信作者（Author for correspondence），E-mail：569486573@qq.com
收稿日期：2020-08-15

moderately suitable areas. The highly suitable areas increased significantly in Guangxi, Guizhou, Hunan, Jiangxi, Hubei, Anhui and Zhejiang; meanwhile, the moderately suitable areas expanded in Yunnan, Guizhou, Chongqing, Hubei, Anhui, Jiangxi and Jiangsu. The slightly suitable areas decreased due to the northward movement of the highly and moderately suitable areas. At the same time, the northern parts of Hubei, Sichuan, Chongqing and Jiangsu turned from the originally unsuitable areas to slightly suitable areas. The results indicated that the global warming provided better survival conditions for *D. citri* in China and the northern boundary of the highly, moderately and slightly suitable areas for *D. citri* expanded northward. With the increasing risk of Huanglongbing (*Candidatus* Liberobacter asiaticus), enough attention should be paid to the psyllid.

Key words: *Diaphorina citri*; MaxEnt model; potential distribution; climate change

柑橘黄龙病又称黄梢病、青果病，是全球柑橘生产上最具毁灭性的病害之一，一旦感染此病会导致柑橘果实品质变差，产量降低，丧失经济价值，因此黄龙病的流行给柑橘生产带来了重大威胁，对柑橘产业破坏力极大（李彬等，2020）。柑橘黄龙病主要通过柑橘木虱 *Diaphorina citri* 成虫扩散传播，由于目前黄龙病缺少有效防治措施，因此防控柑橘木虱扩散成为阻止黄龙病蔓延的重要手段。气候条件是影响柑橘木虱繁殖、生存和分布的重要环境因素，其中温度、降水和光照等是制约柑橘木虱分布的重要气候因子（杨余兵，1989）。政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）第五次评估报告指出，1880年到2012年，全球海陆表面平均温度呈线性上升趋势，升高了0.85℃；2003年到2012年平均温度比1850年到1900年平均温度上升了0.78℃。全球气候变暖改变了病虫害适生范围，导致其地理分布区域扩大，尤其增加了受低温限制的昆虫向高纬度或高海拔地区传播的机会。因此，深入了解影响柑橘木虱分布的主要气候因子，分析气候变暖对柑橘木虱在我国的适生区变化的影响，预测柑橘木虱扩散风险，对于科学防控柑橘黄龙病，促进柑橘产业健康发展具有重要意义。

以往多采用田间调查方法研究柑橘木虱种群的分布规律和分布北界，如熊红利等（2011）通过对浙江、江西、湖南、四川和贵州等省的调查初步明确了国内柑橘黄龙病与柑橘木虱的发生北界；刘慧等（2019）通过田间调查研究了柑橘木虱在湖南省的发生规律；黄静等（2020）通过田间调查分析了柑橘木虱在广东省梅州市的发生规律。田间调查方法可信度较强，对于柑橘木虱迁移和监测具有很强的指导意义，但对于中国乃至全球大尺度区域的分析和预测，整体实施难度较大，耗时耗力。目前，基于调查资料、气候和土地环境要素，利用物种分布模型分析和预测物种分布已成为一种新的高效方法。

物种分布模型是研究物种适生性的重要工具，其代表模型有最大熵（maximum entropy model，MaxEnt）模型、规则集遗传算法（genetic algorithm for rule set prediction，GARP）模型、广义线性模型、生物气候（bioclimatic prediction，Bioclim）模型和领域（Domain）模型（王茹琳等，2019）。MaxEnt模型是根据农业气候相似原理，计算一定生态位约束条件下物种分布规律的最理想状态，即熵最大时物种在预测地区的可能分布情况（林珊等，2020）。Elith et al.（2006）研究认为MaxEnt模型的性能较其他模型更好；闫东等（2020）在对长爪沙鼠 *Meriones unguiculatus* 鼠疫源地动物间疫情潜在风险的研究中证明MaxEnt模型的预测结果较GARP模型更准确；段义忠等（2020）在利用MaxEnt、Bioclim和Domain模型对沙冬青属植物潜在地理分布进行预测时，也认为MaxEnt模型具有较高的准确度。目前，MaxEnt模型已经成功应用于多种昆虫在中国的潜在地理分布研究，如亮壮异蝽 *Urochela distincta*（崔麟和魏洪义，2016）、突颊侧琵甲 *Prosodes*（*Lioprosodes*）*dilaticollis*（李培先等，2017）、烟粉虱 *Bemisia tabaci*（赵健等，2019）和苹红缢管蚜 *Rhopalosiphum oxyacanthae*（贾栋等，2020）等。针对柑橘木虱在中国的适生性研究，MaxEnt模型目前应用比较少，仅罗伟等（2019）利用MaxEnt模型研究了未来不同气候情景下柑橘木虱在中国的潜在地理分布，但未分析过去50年气候变化对柑橘木虱潜在分布区变化的影响。

20世纪60年代以来，全球气候呈现变暖趋势，柑橘木虱在中国的适生区和生存北界发生了明显变化。本研究利用实地调查和文献整理得到柑橘木虱地理分布数据，并基于近50年中国地面格点气象数据集，结合柑橘木虱生物学特性，利用MaxEnt模型确定影响柑橘木虱适生性的关键气候环境变量，分

析过去50年气候变暖对柑橘木虱在我国适生区变化的影响，探讨柑橘木虱向北蔓延的北界范围，以期为柑橘木虱的监测、预防和控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

样本数据：柑橘木虱的分布数据通过实地调查及查阅文献获得，共获取212个柑橘木虱发生点的经纬度信息，组成柑橘木虱在我国的分布数据，但未包括港澳台地区。

环境变量数据：本研究使用中国气象局地面格点数据集2.0中的日值和月值数据，包括1961—2010年中国地面气温0.5°×0.5°格点数据集和中国地面降水0.5°×0.5°格点数据集。环境变量在参考Worldclim（https://www.worldclim.org）气候数据库中气候因子的基础上，再结合柑橘木虱生物学特性以及相关文献中柑橘木虱适生性指标（谢佩华等，1988；杨余兵，1989），共选择19个环境变量因子，分别为年平均气温、平均日较差、温度季节性变化标准差、最暖月最高温度、最冷月最低温度、最干季节平均温度、最暖季节平均温度、最冷季节平均温度、年降水量、最湿月降水量、最干月降水量、降水量变异系数、最干季节降水量、最暖季节降水量、最冷季节降水量、冬季日平均气温小于等于−5℃的日数、冬季日平均气温低于0℃的日数、7月日平均气温大于30℃的日数以及8月日平均气温大于30℃的日数，并计算形成20世纪60年代、70年代、80年代、90年代和21世纪初5个年代数据集。

1.2 方法

1.2.1 影响柑橘木虱分布的主要环境变量筛选

影响柑橘木虱分布的环境变量包括气候因子、植被分布和柑橘自身特性等。本研究在构建初始模型时共选择了19个环境变量，但其变量因子之间易产生多重共线性以及数据冗余等问题。为提升MaxEnt模型的运算效率，采用环境因子多重共线性检验对相关变量进行共线性分析（王雨生等，2019）。当2个环境变量间的多重共线性检验相关系数大于或等于0.8时，则表明两者间存在共线性关系，只需保留其中1个环境变量，且选择保留在MaxEnt初始模型中贡献率较高的环境变量。当2个环境变量间的相关系数小于0.8时，表示两者间不存在共线性关系，均需要保留用于后续分析。通过共线性检验剔除部分变量后，将剩余变量再次输入MaxEnt模型进行运行，根据MaxEnt模型计算的环境变量贡献率，剔除贡献率为0的变量，筛选得到影响柑橘木虱分布的主要环境变量。

1.2.2 MaxEnt模型模拟结果评价

采用接受者操作特征（receiver operating characteristic，ROC）曲线进行MaxEnt模型精准度的检验，ROC曲线以特异度和灵敏度为横纵坐标绘制而成，曲线与横坐标围成的面积即为AUC（area under curve）值，用以评价模型预测结果的精准度。一般来说，AUC取值范围为[0.5，0.6)，定义模型模拟结果失败；AUC取值范围为[0.6，0.7)，定义模型模拟结果较差；AUC取值范围为[0.7，0.8)，定义模型模拟结果一般；AUC取值范围为[0.8，0.9)，定义模型模拟结果好；AUC取值范围为[0.9，1.0]，定义模型模拟结果很好（张华等，2020）。

1.2.3 柑橘木虱适生区的等级划分

利用MaxEnt模型模拟柑橘木虱的潜在分布区，通过AUC值评价精准度后，将运算结果导入ArcGIS 10.2软件，转化成栅格形式展示。根据MaxEnt模型计算得到的柑橘木虱适宜性分布概率P，P的取值范围为[0~1]，并结合柑橘木虱在中国的实际分布情况，将柑橘木虱的适生区分为4类：当$0\leq P<0.05$时，为不适生区；当$0.05\leq P<0.15$时，为低适生区；当$0.15\leq P<0.40$时，为中适生区；当$0.40\leq P\leq 1.00$时，为高适生区。

1.2.4 环境变量对柑橘木虱适生区分布的影响

为探讨主要环境变量对柑橘木虱的影响程度，开展环境变量与柑橘木虱分布概率之间的相关研究。不同环境变量与柑橘木虱分布概率间的关系可以反映环境变量取值范围对柑橘木虱分布概率的影响。采用刀切法检验各个主要环境变量对柑橘木虱的影响程度，分别计算“仅此变量”、“除此变量”和“所有变量”模拟时的规则化训练得分情况，判定标准为：“仅此变量”模拟时规则化训练得分较高，说明该因子具有较高的预测能力，对物种分布贡献较大；“除此变量”模拟时规则化训练得分降低较多，说明该变量具有较多的独特信息，对物种分布较为重要（马菁等，2019）。

1.2.5 MaxEnt模型模拟不同年代柑橘木虱适生区

将计算得到的5个年代数据集、已有的柑橘木虱分布数据和筛选出的主要环境变量数据作为MaxEnt模型输入数据，模型运行时随机将75%的物种分布数据作为训练集，剩余25%的分布数据作为训练集（王茹琳等，2017）。通过多次运行后，输出不同年代的柑橘木虱分布预测结果，输出格式为ASCII，利用ArcGIS 10.2软件转化成栅格形式显示，并结合1.2.3中关于适生区等级划分标准，划分出不

同年代柑橘木虱的适生区。同时，为了判断不同适生区在年代间的变化趋势，利用Matlab 2016b软件进行适生区面积与年代间的线性回归分析，得到线性回归系数，并计算气候倾向率，即线性回归系数乘以10，表征年代间适生区面积的变率，正值表示呈现增加趋势，负值表示呈现减少趋势。

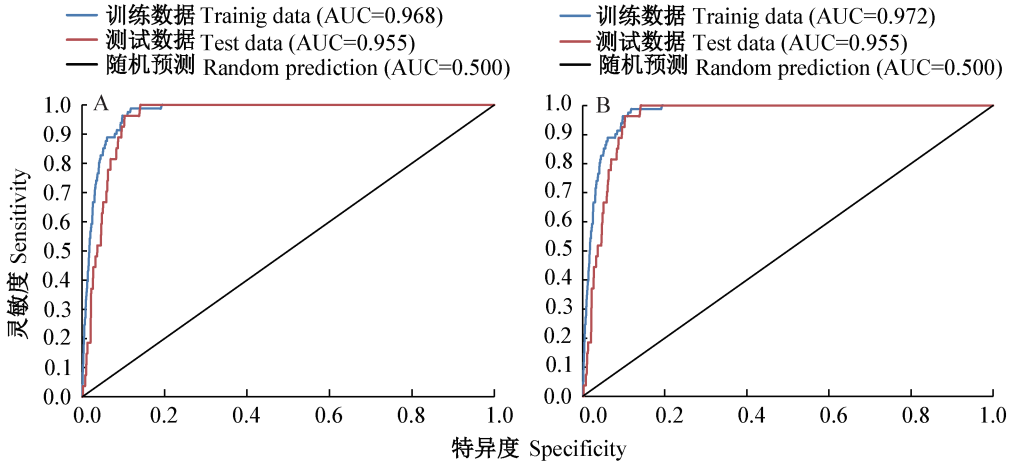
2 结果与分析

2.1 影响柑橘木虱分布的主要环境变量筛选

首先剔除贡献率为0的变量，包括年平均气温和平均日较差；再通过因子间多重共线性检验结果，剔除相关系数在0.8以上且贡献率较小的变量，包括最干月降水量、最暖季节降水量、最干季节降水量、最干季节平均温度、最暖季节平均温度、最冷月最低温度、最湿月降水量、冬季日平均气温低于0℃的日数、7月日平均气温大于30℃的日数和年降水量这10个变量；然后将剩余变量输入模型重新运算，继续剔除贡献率为0的变量；如此反复迭代10次后，确定影响柑橘木虱分布的6个主要环境变量，分别为冬季日平均气温小于等于−5℃的日数、最冷季节降水量、温度季节性变化标准差、最冷季节平均温度、8月日平均气温大于30℃的日数以及最暖月最高温度，贡献率分别为71.8%、20.2%、3.0%、2.6%、1.7%和0.7%。

2.2 MaxEnt模型的准确性检验结果

为检验主要环境变量的可靠性，将由6个主要环境变量重构的MaxEnt模型检验结果（图1-A）与基于19个初始环境变量构建的MaxEnt模型检验结果（图1-B）进行对比，发现两者模拟结果接近，AUC分别为0.968和0.972。依据AUC评价标准，由6个主要环境变量重构的MaxEnt模型预测准确性达到很好标准，表明选择的主要环境变量有很好的代表性，可作为主导环境变量用于柑橘木虱适生区的研究。



A：关键环境变量重构模型；B：未经筛选环境变量构建模型。A: A model based on the key enviromental factor; B: a model based on all enviromental factors.

图1 MaxEnt模型适用性检验AUC值

Fig. 1 The AUC values of the applicability test based on MaxEnt model

2.3 影响柑橘木虱分布的主要环境变量检验与分析

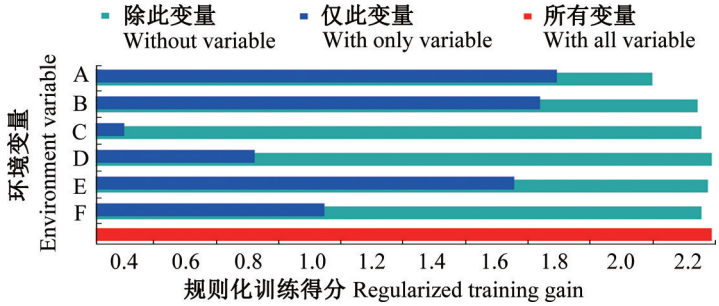
2.3.1 主要环境变量检验

利用模型自带的刀切法对2.1中筛选得到的6个主要环境变量进行检验，得到各环境变量对柑橘木虱的重要性结果（图2），重要性大小由规则化训练得分确定。其中，最冷季节降水量、最冷季节平均温度和冬季日平均气温小于等于−5℃的日数是影响柑橘木虱分布的关键环境变量，其规则化训练得分均超过了1.5；温度季节性变化标准差也是较为重要的环境变量，其规则化训练得分为0.9，说明这4个指标对柑橘木虱分布的影响较大；最暖月最高温度和8月日平均气温大于30℃的日数的规则化训练得分稍低，分别为0.7和0.3，对柑橘木虱分布的影响相对较小。

2.3.2 主要环境变量的适宜范围

总体来看，柑橘木虱的分布概率与冬季日平均气温小于等于−5℃的日数呈负相关，与最冷季节平均温度呈正相关；柑橘木虱的分布概率随着最冷季节降水量、温度季节性变化标准差、最暖月最高温度以及8月日平均气温大于30℃的日数的增加，均呈先上升后下降的趋势（图3）。在主要环境变量的适宜范围内，柑橘木虱的分布概率随着各主要环境变量的变化而变化，而在适宜范围之外时对柑橘木虱的分布影响概率逐渐减小，直至不适宜柑橘木虱生存。最冷季节降水量、最冷季节平均温度、冬季日平均气温小于等于−5℃的日数、温度季节性变化标准

差、最暖月最高温度和8月日平均气温大于30℃的日数的适宜范围分别为63~341 mm、3~20℃、0~3 d、0~7.7℃、27.2~41.0℃和0~22 d，各因子的最适值依次为211 mm、18.5℃、0 d、6.1℃、34℃和2 d。



A：最冷季节降水量；B：最冷季节平均温度；C：8月日平均气温大于30℃的日数；D：最暖月最高温度；E：冬季日平均气温小于等于−5℃的日数；F：温度季节性变化标准差。A: Precipitation in the coldest season; B: average temperature in the coldest season; C: days of daily average temperature above 30℃ in August; D: maximum temperature of warmest month; E: days of daily average temperature below −5℃ in winter; F: standard deviation of temperature seasonality.

图2 主要环境变量对柑橘木虱分布的重要性

Fig. 2 Importance of environmental variables to the distribution of *Diaphorina citri*

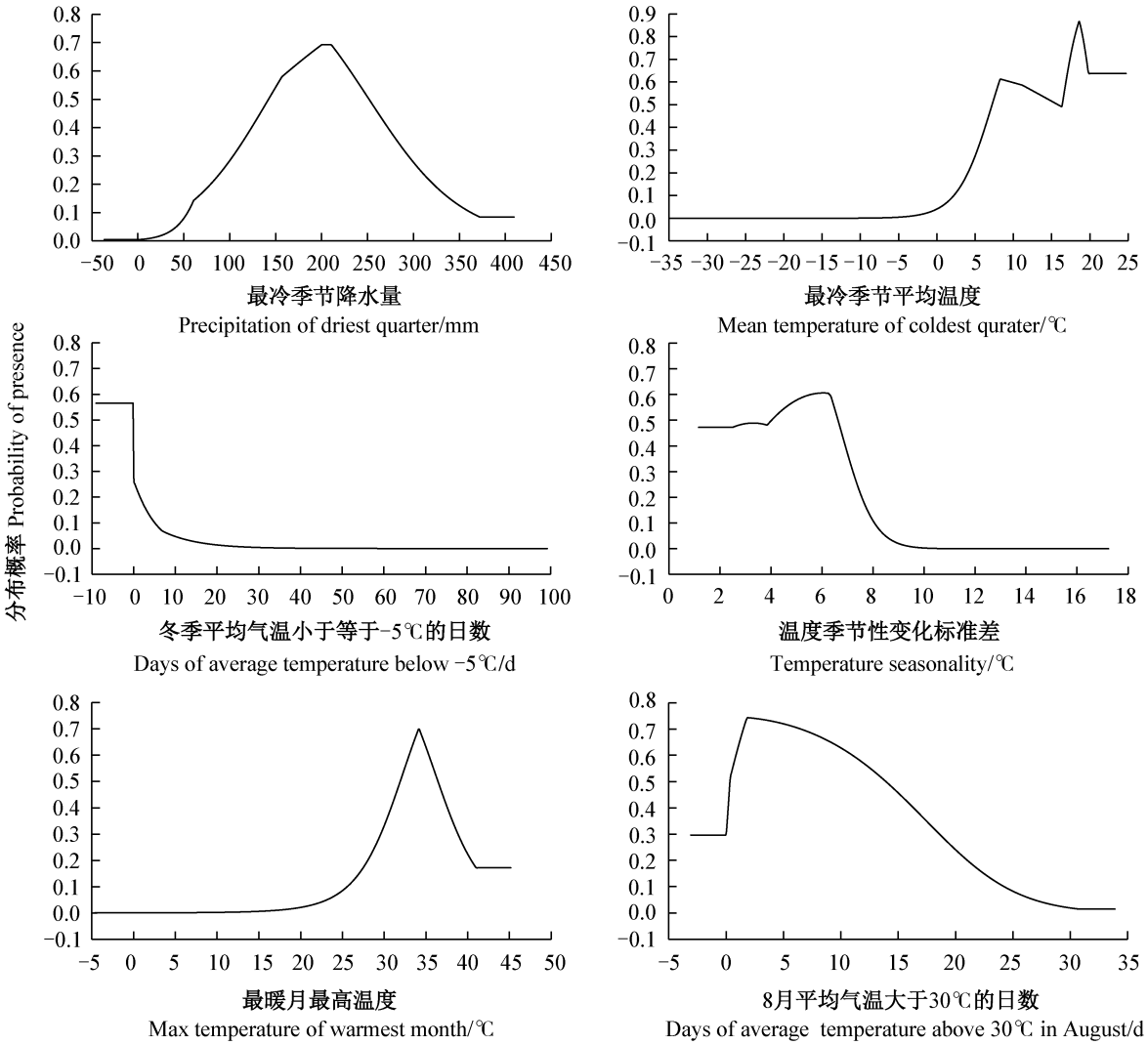


图3 主要环境变量与柑橘木虱分布概率间的关系

Fig. 3 Relationships between different environment effectors and distribution probability of *Diaphorina citri*

2.4 气候变暖背景下柑橘木虱在中国的适生区变化

2.4.1 气候变暖背景下柑橘木虱适生区的年代变化

从适生区的年代变化来看，相对于20世纪60年代，21世纪初柑橘木虱在中国的潜在适生区呈现持续增加的趋势，总适生区面积增加了9.22%，由179.59×10^4 km^2扩大到了196.16×10^4 km^2。其中，高适生区面积增加速率最快，21世纪初高适生区面积较20世纪60年代增加了29.18%，面积扩大了16.51×10^4 km^2；中适生区面积增加了19.30%，面积扩大了7.36×10^4 km^2；低适生区面积减少了8.59%，面积缩小了7.29 ×10^4 km^2（表1）。

表1 柑橘木虱在中国的适生区面积的年代变化

Table 1 Interdecadal changes of suitability areas of *Diaphorina citri*　　×10^4 km^2

年代 Age	低适生区 Slightly suitable area	中适生区 Moderately suitable area	高适生区 Highly suitable area	总适生区 Total suitable area
20世纪60年代 1960s	84.87	38.14	56.58	179.59
20世纪70年代 1970s	84.47	34.75	62.20	181.42
20世纪80年代 1980s	79.55	33.60	76.95	190.10
20世纪90年代 1990s	81.24	41.22	73.34	195.80
21世纪初 The beginning of 21st century	77.58	45.50	73.09	196.16

2.4.2 气候变暖背景下柑橘木虱在中国的适生区变化

从不同年代的空间分布来看，在20世纪60—70年代，高适生区集中在海南省、广西壮族自治区（简称广西）东部、广东省、福建省、江西省南部、湖南省南部和浙江省南部；中适生区在20世纪60年代和70年代在浙江省存在较大差异，20世纪60年代集中在浙江省中部，20世纪70年代集中在浙江省北部，而在其他省份大致保证一致，集中在广西西部、贵州省南部边缘和东部边缘、湖南省中西部和江西省中部；低适生区在江苏省和浙江省存在较大差异，20世纪60年代集中在浙江省北部边缘和江苏省南部边缘地区，20世纪70年代集中在江苏省南部、云南省、贵州省大部、四川省东部、重庆市、湖南省北部、湖北省西南角和安徽省南部（图4-A~B）。在20世纪80年代和90年代，高适生区集中在海南省、广西东部、广东省、福建省、江西省南部、湖南省中南部和浙江省南部；中适生区位于广西西部、贵州省南部和东部边缘地区、湖南省北部、江西省北部、安徽省南部边缘地区和浙江省北部；低适生区位于云南省、贵州省北部和西部、四川省东部、重庆市、湖北省南部、安徽省中部和江苏省南部（图4-C~D）。在21世纪初，高适生区集中在海南省、广东省、广西西部、福建省、湖南省南部、江西省南部和浙江省南部；中适生区集中在广西西部、贵州省东部和南部、湖南省北部、江西省北部、湖北省南部、安徽省南部、浙江省北部边缘地区和江苏省南部；低适生区集中在云南省、贵州省西部和北部、四川省东部、重庆市和湖北省中部（图4-E）。

从不同地区来看，自20世纪60年代以来，柑橘木虱的潜在适宜分布区主要集中在云南、贵州、重庆、四川、湖南、湖北、江西、安徽、浙江、江苏、海南、广西、广东和福建这14个省（自治区、直辖市）。其中，自20世纪70年代起，海南省一直为高适生区，广东和福建2省的高适生区占到该省的85%以上。高适生区与中适生区的分界线沿着广西、贵州省、湖南省、江西省、湖北省、安徽省及浙江省一线分布，且这7个省区的高适生区面积呈增加趋势（气候倾向率为正值），表明高适生区北界正在逐渐北移（表2）。中适生区与低适生区的分界线存在于云南、广西、贵州、四川、湖南、重庆、湖北、江西、安徽、浙江和江苏等省（自治区、直辖市），其中云南、贵州、重庆、湖北、安徽、江西和江苏各省市的中适生区面积呈增加趋势，在四川省则基本保持不变，湖南、浙江和广西各省区的中适生区面积减少（气候倾向率为负值），且是由高适生区的增加造成，表明中适生区的北界也在逐渐北移。低适生区与非适生区的分界线存在于云南、四川、重庆、湖北、安徽和江苏等省市，其中四川、重庆、湖北和江苏各省市的低适生区呈增加趋势，云南省和安徽省的低适生区减少（气候倾向率为负值），主要是由中、高适生区的增加引起，表明柑橘木虱在四川、重庆、湖北和江苏各省市的适生区逐渐向北扩散。

综上所述，受气候变暖影响，柑橘木虱在我国的潜在气候适宜区呈现向北扩散趋势。其中，中、高适生区北扩明显，高适生区北扩较中适生区更显著；低适生区的南部部分转为中适生区，而湖北、四川、重

庆和江苏的北部部分地区由原来的不适生区转为了低适生区。

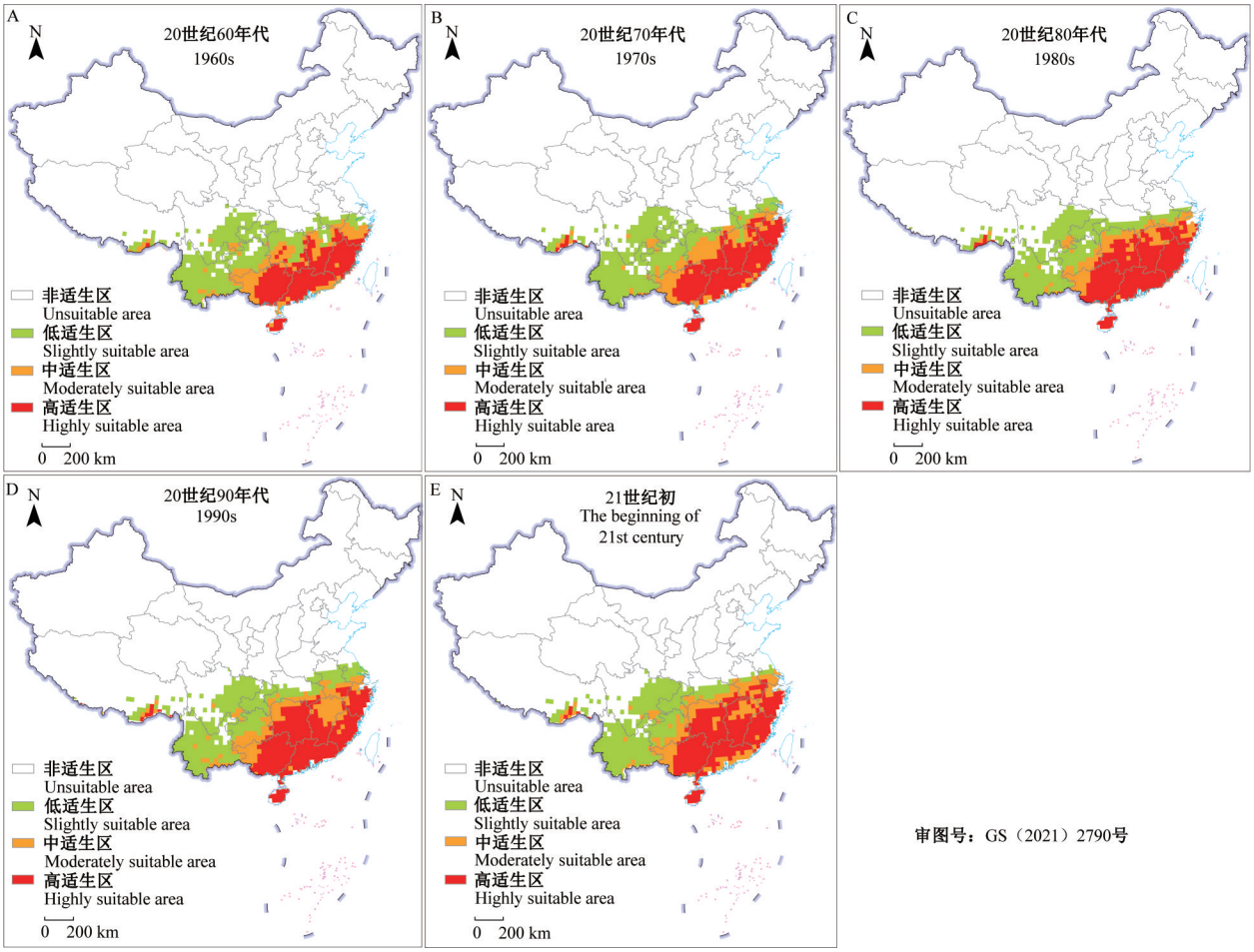


图4 基于MaxEnt模型预测柑橘木虱在中国的适生区年代变化

Fig. 4 The interannual variation of suitable areas predicted by MaxEnt model

3 讨论

柑橘木虱是喜温性昆虫，气温变化对柑橘木虱种群的影响较大。谢佩华等(1988)在柑橘的耐寒性研究中指出最冷月的平均气温及极端低温和低温持续时间是限制柑橘木虱地理分布的主要因子。赖剑锋和杨清华(1991)及冯贻富等(2013)研究证实气温是影响柑橘木虱种群数量消长的主要因素之一；邓铁军(2010)通过实地调研分析得出0℃持续天数与柑橘木虱死亡率明显相关；邝凡等(2017)认为高温导致柑橘木虱种群生存时间缩减是其在高温季节出现种群消退现象的主要原因；赵健等(2019)认为选择的自然环境变量不同则其预测结果会有差异，在选择变量时应充分参考前人研究结果进行综合判断。因此本研究根据柑橘木虱的生物学特性，重点考虑将夏季高温、高温持续时间、冬季低温和低温持续时间等指标作为输入因子，结合文献中的柑橘木虱研究指标和气象上常用的低温、高温指标，增加了7月日平均气温大于30℃的日数、8月日平均气温大于30℃的日数、冬季日平均气温低于0℃的日数以及冬季日平均气温小于等于-5℃的日数4个更贴近柑橘木虱生存环境的变量，这更贴合柑橘木虱在中国的实际消亡和扩散规律。

在利用MaxEnt模型对各类物种、入侵昆虫等的潜在分布研究中，通常生物气候因子选择的是世界气候数据库中一套固定的生物气候变量，其数据为1970—2000年的平均值(杨彪等，2020；杨楠等，2020)，没有年代间的变化，也不包含高温、低温的持续天数等与特定物种生物学指标的数据，在针对柑橘木虱潜在分布的不同年代动态分析上具有一定的局限性。鉴于此，本研究选择了中国气象局网格化日值、月值气象数据，计算得到了7月日平均气温大于30℃的日数、8月日平均气温大于30℃的日数、冬季日平均气温低于0℃的日数、冬季日平均气温小于等于-5℃的日数等限制柑橘木虱种群生长的生

态学指标数据集以及与Worldclim世界气候数据库中相同的15个生物气候变量进行综合分析。与以往研究结果相比，8月日平均气温大于30℃的日数和冬季日平均气温小于等于−5℃的日数对于柑橘木虱的分布具有主导性，反映了温度限制是制约柑橘木虱适生性的主要因素，这与柑橘木虱的喜温性一致，因而能更加准确地预测柑橘木虱的潜在分布区。

表2 柑橘木虱在中国各省（自治区、直辖市）的适生区年代变化

Table 2 The decadal variation of *Diaphorina citri* suitable areas in various provinces (autonomous regions, cities) of China

适生等级 Suitability grade	省（自治区、直辖市） Province (autonomous region, city)	面积 Area/×10⁴ km²					气候倾向率 Climatic tendency/（×10⁴ km²/10 a）
		20世纪60年代 1960s	20世纪70年代 1970s	20世纪80年代 1980s	20世纪90年代 1990s	21世纪初 The beginning of 21st century	
高适生区 Highly suitable area	广西 Guangxi	14.17	12.84	15.65	16.02	14.69	0.42
	贵州 Guizhou	0.13	0.11	1.10	0.65	0.65	0.16
	湖南 Hunan	5.65	5.78	12.60	14.22	13.56	2.43
	江西 Jiangxi	9.73	10.14	12.09	7.64	11.08	0.02
	湖北 Hubei	0.13	0.13	0.47	0.55	1.27	0.27
	安徽 Anhui	0.23	1.11	0.75	1.13	2.05	0.37
	浙江 Zhejiang	3.00	6.34	5.56	6.53	6.37	0.69
中适生区 Moderately suitable area	云南 Yunnan	2.44	1.25	1.85	3.41	1.81	0.09
	广西 Guangxi	6.67	7.45	5.05	4.86	6.15	−0.36
	贵州 Guizhou	4.86	3.04	5.64	6.59	5.43	0.47
	四川 Sichuan	1.57	1.57	1.61	1.32	1.66	−0.01
	湖南 Hunan	6.47	8.05	5.85	4.83	5.81	−0.45
	重庆 Chongqing	0.15	0.02	0.28	0.27	0.50	0.10
	湖北 Hubei	0.91	0.91	2.36	2.85	4.45	0.90
	江西 Jiangxi	3.37	3.87	3.19	7.65	4.20	0.54
	安徽 Anhui	1.73	1.68	2.61	3.12	4.57	0.71
	浙江 Zhejiang	4.01	2.32	3.05	2.13	2.28	−0.36
	江苏 Jiangsu	0.00	0.36	0.61	0.80	2.28	0.50
低适生区 Slightly suitable area	云南 Yunnan	28.01	28.40	27.21	26.18	28.37	−0.15
	四川 Sichuan	18.37	18.18	18.99	18.09	19.05	0.13
	重庆 Chongqing	5.69	4.68	6.04	6.46	6.72	0.38
	湖北 Hubei	4.48	3.96	7.51	6.70	6.71	0.72
	安徽 Anhui	3.57	3.10	2.77	4.89	1.00	−0.34
	江苏 Jiangsu	0.71	2.97	1.79	3.83	1.20	0.18

关于柑橘木虱迁移北界问题，熊红利等（2011）和王晓亮等（2016）通过调查柑橘木虱的实际发生情况，发现我国柑橘木虱区域正在逐步北移，本研究也得到了相似的结论，而且筛选到了影响柑橘木虱北移的主要环境变量，发现最冷季节降水量、最冷季节平均温度、冬季日平均气温小于等于−5℃的日数这3个变量的变动起到了主要作用：最冷季节降水量从20世纪60年代的31.5 mm增加到21世纪初的38.3 mm，最冷季节平均气温从−8.2℃增加到−6.5℃，冬季日平均气温小于等于−5℃的日数从58.7 d降到54.0 d。表明气候变化造成的中国冬季变暖、变湿是柑橘木虱不断向北迁移和扩散的主要诱因，导致柑橘木虱适生区的总体面积呈增加趋势，部分原来气候条件不适宜柑橘木虱生存的区域开始适宜柑橘木虱分布；另一方面柑橘木虱中、高适生区的面积持续增加，区域内气候条件越来越适宜柑橘木虱生存，表明柑橘黄龙病在我国扩散的风险相应加大。

在我国柑橘产区中，已有广东、广西、福建、海南、台湾、云南、贵州、四川、江西、浙江和湖南共计11个省区报道有柑橘木虱发生，而重庆、湖北、安徽和江苏等省市尚未发现该虫，其中重庆市和湖北省是我国柑橘的重要产区。本研究结果表明，湖北省南部和重庆市大部均为柑橘木虱的适生区，与汪善勤等（2015）和罗伟等（2019）的预测结果一致，且这2个地区与四川、贵州、湖南和江西等中、高适生区省份交界，柑橘木虱有极高的传入风险，应加强这2个地区的苗木检验检疫，做好果园监测预警，严防严控外来性输入。柑橘木虱的生长消亡除与气候环境

因子相关外，还与土地利用类型、地形地势和人为防控密切相关，如赵健等(2019)在对烟粉虱潜在分布的研究中发现土地利用类型是影响烟粉虱在我国发生的重要因素，同理认为柑橘果园分布对柑橘木虱的发生也是一个重要因素，本研究着重于探讨气候环境变化对柑橘木虱分布的潜在影响，后续可结合土地利用类型和地形地势展开进一步的深入研究。

参 考 文 献（References）

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]

Deng TJ, Wang KX, Qin GL. 2010. The research analysis on the survival rate of the citrus psyllid with the effect of freeze disaster and protection countermeasure. Guangxi Plant Protection, 23(1): 9−11 (in Chinese) [邓铁军, 王凯学, 覃贵亮. 2010. 冰冻灾害对柑桔木虱越冬存活率影响的调研分析及灾后防治对策. 广西植保, 23(1): 9−11]

Duan YZ, Wang C, Wang HT, Du ZY, He YM, Chai GQ. 2020. Predicting the potential distribution of *Ammopiptanthus* species in China under different climates using ecological niche models. Acta Ecologica Sinica, 40(21): 7668−7680 (in Chinese) [段义忠, 王驰, 王海涛, 杜忠毓, 贺一鸣, 柴乖强. 2020. 不同气候条件下沙冬青属植物在我国的潜在分布: 基于生态位模型预测. 生态学报, 40(21): 7668−7680]

Elith J, Graham CH, Anderson RP, Dudík M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans RJ, Huettmann F, Leathwick JR, Lehmann A, et al. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. Ecography, 29(2): 129−151

Feng YF, Wang EG, Pan W. 2013. Study on the population quantity fluctuation of citrus psyllid. Chinese Horticulture Abstracts, 29(5): 39−40 (in Chinese) [冯贻富, 汪恩国, 潘伟. 2013. 柑橘园柑橘木虱种群数量消长规律研究. 中国园艺文摘, 29(5): 39−40]

Huang J, Zhong JL, Liu R, Zhou YR. 2020. The occurrence regularity and control technology of citrus psyllid in Meizhou area. Anhui Agricultural Science Bulletin, 26(9): 97−98 (in Chinese) [黄静, 钟进良, 刘蕊, 周玉蓉. 2020. 柑橘木虱在梅州地区的发生规律及防治技术. 安徽农学通报, 26(9): 97−98]

Jia D, Xu CQ, Liu YH, Hu J, Li N, Ma RY. 2020. Potential distribution prediction of apple-grass aphid *Rhopalosiphum oxyacanthae* in China based on MaxEnt model. Journal of Plant Protection, 47(3): 528−536 (in Chinese) [贾栋, 徐朝茜, 刘艳红, 胡军, 李娜, 马瑞燕. 2020. 基于MaxEnt模型预测苹红缢管蚜在中国的适生区. 植物保护学报, 47(3): 528−536]

Kuang F, Lin MQ, Yuan SX, Luo YQ, Zhang N, Lu ZJ, Hu W. 2017. Effects of high temperature on mortality and activity behavior of *Diaphorina citri* Kuwayama. Journal of Southern Agriculture, 48(9): 1600−1604 (in Chinese) [邝凡, 林梦琪, 袁水秀, 罗友泉, 张宁, 卢占军, 胡威. 2017. 高温对亚洲柑橘木虱死亡率和活动行为的影响. 南方农业学报, 48(9): 1600−1604]

Lai JF, Yang QH. 1991. Study on the occurrence law and prevention on the citrus psyllid in South Jiangxi. Jiangxi Plant Protection, 14(3): 67−74 (in Chinese) [赖剑锋, 杨清华. 1991. 赣南柑桔木虱发生规律与防治研究. 江西植保, 14(3): 67−74]

Li B, Luo C, Su L, Huang GX, He XH. 2020. Research progress on rapid detection technology of citrus huanglongbing pathogen. Genomics and Applied Biology, 39(2): 652−657 (in Chinese) [李彬, 罗聪, 苏玲, 黄桂香, 何新华. 2020. 柑橘黄龙病病原快速检测技术研究进展. 基因组学与应用生物学, 39(2): 652−657]

Li PX, Zheng JH, Lin J, Maidi·Kuerman, Xiao HW, Wu JG. 2017. Prediction of potential geographic distribution and analysis of the major driving factors for *Prosodes* (*Lioprosodes*) *dilaticollis* Motschulsky in Xinjiang by using MaxEnt model. Journal of Plant Protection, 44(3): 445−452 (in Chinese) [李培先, 郑江华, 林峻, 麦迪·库尔曼, 肖宏伟, 吴建国. 2017. 基于MaxEnt模型的突颊侧琵甲新疆潜在地理分布预测和主要影响因子分析. 植物保护学报, 44(3): 445−452]

Lin S, Lu XL, Wang RL, Li Q, Wang MT, Guo X, Wen G. 2020. Impacts of climate change on geographical distribution of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* in Sichuan Province under RCP8.5 scenario. Jiangsu Agricultural Sciences, 48(3): 124−129 (in Chinese) [林姗, 陆兴利, 王茹琳, 李庆, 王明田, 郭翔, 文刚. 2020. RCP8.5情景下气候变化对四川省猕猴桃溃疡病病菌地理分布的影响. 江苏农业科学, 48(3): 124−129]

Liu H, He LT, Gong BY, Xiang M, Yang SZ, Xiao FL. 2019. Preliminary study on occurrence regularity of *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) in Hunan. Hunan Agricultural Sciences, (10): 49−52 (in Chinese) [刘慧, 何利庭, 龚碧涯, 向敏, 杨水芝, 肖伏莲. 2019. 柑橘木虱在湖南发生规律的初步研究. 湖南农业科学, (10): 49−52]

Luo W, Wang YL, Lin S, Wang MT, Duan XR, Li Q, Wang RL. 2019. Effect of climate change scenarios on potential geographical distribution of *Diaphorina citri*. Guizhou Agricultural Sciences, 47(9): 30−35 (in Chinese) [罗伟, 王闫利, 林姗, 王明田, 段修荣, 李强, 王茹琳. 2019. 气候变化情景对柑橘木虱潜在地理分布的影响. 贵州农业科学, 47(9): 30−35]

Ma J, Liu Y, Zhang XJ. 2019. Prediction on potential establishment area of *Aphis* sp. in Ningxia based on MaxEnt model. Geography and Geo-Information Science, 35(5): 40−45 (in Chinese) [马菁, 刘垚, 张学俭. 2019. 基于MaxEnt模型的宁夏枸杞蚜虫适生分布预测研究. 地理与地理信息科学, 35(5): 40−45]

Wang RL, Guo X, Li Q, Wang MT, You C. 2019. Potential distribution and suitability regionalization of kiwifruit canker disease in Sichuan Province, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 30(12): 4222−4230 (in Chinese) [王茹琳, 郭翔, 李庆, 王明田, 游超. 2019. 四川省猕猴桃溃疡病潜在分布预测及适生区域划分. 应用生态学报, 30(12): 4222−4230]

Wang RL, Li Q, Feng CH, Shi ZP. 2017. Predicting potential ecological distribution of *Locusta migratoria tibetensis* in China using

MaxEnt ecological niche modeling. Acta Ecologica Sinica, 37 (24): 8556−8566 (in Chinese) [王茹琳, 李庆, 封传红, 石朝鹏. 2017. 基于MaxEnt的西藏飞蝗在中国的适生区预测. 生态学报, 37(24): 8556−8566]

Wang SQ, Xiao YL, Zhang HY. 2015. Studies of the past, current and future potential distributions of *Diaphorina citri* Kuwayama (Homoptera: Psyllidae) in China. Chinese Journal of Applied Entomology, 52(5): 1140−1148 (in Chinese) [汪善勤, 肖云丽, 张宏宇. 2015. 我国柑橘木虱潜在适生区分布及趋势分析 应用昆虫学报, 52(5): 1140−1148]

Wang XL, Li XN, Feng XD, Wu LF. 2016. The investigation on the occurrences of the citrus psyllid and Huanglongbing in China. Plant Quarantine, 30(2): 44 (in Chinese) [王晓亮, 李潇楠, 冯晓东, 吴立峰. 2016. 柑橘黄龙病与柑橘木虱在我国发生情况调查. 植物检疫, 30(2): 44]

Wang YS, Wang ZH, Xing HF, Li JW, Sun S. 2019. Prediction of potential suitable distribution of *Davidia involucrata* Baill in China based on MaxEnt. Chinese Journal of Ecology, 38(4): 1230−1237 (in Chinese) [王雨生, 王召海, 邢汉发, 厉静文, 孙硕. 2019. 基于MaxEnt模型的珙桐在中国潜在适生区预测. 生态学杂志, 38(4): 1230−1237]

Xie PH, Su CA, Lin ZG. 1988. Study on the cold tolerance of citrus psyllid. Plant Protection, 14(1): 5−7 (in Chinese) [谢佩华, 苏朝安, 林自国. 1988. 柑桔木虱耐寒性研究. 植物保护, 14(1): 5−7]

Xiong HL, Lin YB, Xiang Y, Liu H, Li XN. 2011. The investigation on the northern boundary of citrus psyllid and Huanglongbing in China. Plant Quarantine, 25(4): 79−80 (in Chinese) [熊红利, 林云彪, 项宇, 刘慧, 李潇楠. 2011. 柑橘黄龙病与柑橘木虱在我国发生北界调查. 植物检疫, 25(4): 79−80]

Yan D, Liu GC, Hou ZL, Kang DM, Yang SL, Lan XY. 2020. Using two ecological niche models to predict the potential risk of epizootic situation in the foci of *Meriones unguiculatus* plague. Chinese Journal of Vector Biology and Control, 31(1): 12−15 (in Chinese) [闫东, 刘冠纯, 候芝林, 康东梅, 杨顺林, 兰晓宇. 2020. 利用两种生态位模型预测长爪沙鼠鼠疫疫源地动物间疫情潜在风险. 中国媒介生物学及控制杂志, 31(1): 12−15]

Yang B, Zhang QJ, Wang B, Gong X, Duan CS, Zhang YB. 2020. The habitat suitability evaluation of *Salweenia bouffordiana* based on MaxEnt model. Acta Ecologica Sinica, 40(17): 6077−6085 (in Chinese) [杨彪, 张全建, 王彬, 龚旭, 段晨松, 张远彬. 2020. 基于MaxEnt模型的雅砻江冬麻豆生境适宜性评价. 生态学报, 40(17): 6077−6085]

Yang N, Ma DY, Zhong X, Yang K, Zhou ZQ, Zhou HL, Zhou CQ, Wang B. 2020. Habitat suitability assessment of blue eared-pheasant based on MaxEnt modeling in Wanglang National Nature Reserve, Sichuan Province. Acta Ecologica Sinica, 40(19): 7064−7072 (in Chinese) [杨楠, 马东源, 钟雪, 杨孔, 周志强, 周华龙, 周材权, 王彬. 2020. 基于MaxEnt模型的四川王朗国家级自然保护区蓝马鸡栖息地适宜性评价. 生态学报, 40(19): 7064−7072]

Yang YB. 1989. Effects of light, temperature and humidity on the development, reproduction and survival of citrus psylla. Acta Ecologica Sinica, 9(4): 348−354 (in Chinese) [杨余兵. 1989. 光、温湿度对柑桔木虱发育、繁殖与存活的影响. 生态学报, 9(4): 348−354]

Zhang H, Zhao HX, Wang H. 2020. Potential geographical distribution of *Populus euphratica* in China under future climate change scenarios based on MaxEnt model. Acta Ecologica Sinica, 40(18): 6552−6563 (in Chinese) [张华, 赵浩翔, 王浩. 2020. 基于MaxEnt模型的未来气候变化情景下胡杨在中国的潜在地理分布. 生态学报, 40(18): 6552−6563]

Zhao J, Li ZP, Zhang HW, Chen H, Weng QY. 2019. Prediction of potential distribution of tobacco whitefly *Bemisia tabaci* in China based on MaxEnt niche model and GIS. Journal of Plant Protection, 46(6): 1292−1300 (in Chinese) [赵健, 李志鹏, 张华纬, 陈宏, 翁启勇. 2019. 基于MaxEnt模型和GIS技术的烟粉虱适生区预测. 植物保护学报, 46(6): 1292−1300]

（责任编辑：李美娟）