环境昆虫学报 2022，44（6）：1382－1388
Journal of Environmental Entomology
http：//hjkcxb. alljournals. net
doi：10. 3969/j. issn. 1674－0858. 2022. 06. 6



徐艳玲，秦誉嘉，刘慧，朱景全，李志红，方焱，马晨，赵守歧．考虑农业保护地因素下的红火蚁适生性分析［J］．环境昆虫学报，2022，44（6）：1382－1388．

考虑农业保护地因素下的红火蚁适生性分析

徐艳玲[1,2]，秦誉嘉[1]，刘　慧[2]，朱景全[2]，李志红[1]，
方　焱[3]，马　晨[2*]，赵守歧[2*]
（1．中国农业大学植物保护学院生物安全系，农业农村部植物检疫性有害生物监测防控重点实验室，北京 100193；
2．全国农业技术推广服务中心，北京 100125；3．天津海关，天津 300461）

摘要：为明确外来入侵物种红火蚁 *Solenopsis invicta* 在我国的适生区分布格局及农业保护地对其分布的影响，本研究基于集成模型预测了红火蚁的潜在分布，并结合农业保护地的面积占比情况进行分析。结果显示，集成模型 TSS、ROC 值在 0. 85、0. 95 左右，预测结果可靠；温度和降水是影响红火蚁分布的关键环境变量；在历史气候条件下，红火蚁适生区将遍布到中国的 28 个省（市、自治区）；考虑农业保护地因素，山东省、云南省、北京市、新疆维吾尔自治区、辽宁省和黑龙江省的部分地区适生区等级升高。

关键词：红火蚁；适生区；集成模型；农业保护地
中图分类号：Q968. 1；S433　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1674－0858（2022）06－1382－07

Suitability analysis of *Solenopsis invicta* considering the factor of agricultural protected areas

XU Yan-Ling[1,2], QIN Yu-Jia[1], LIU Hui[2], ZHU Jing-Quan[2], LI Zhi-Hong[1], FANG Yan[3], MA Chen[2*], ZHAO Shou-Qi[2*]（1. Department of Entomology, College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China; 3. Tianjin Customs, Tianjin 300461, China）

Abstract: To clarify the distribution pattern of the suitable habitat of the alien invasive species *Solenopsis invicta* in China and the impact of agricultural protected areas on its distribution, the study predicted the potential distribution of *S. invicta* based on the ensemble models, combining with the proportion of agricultural protected areas. The results showed that the prediction results of the ensemble models were reliable, and the TSS and ROC values were about 0. 85 and 0. 95; Temperature and precipitation were the key environmental variables affecting the distribution of *S. invicta*; Under the historical conditions, the suitable areas for *S. invicta* will spread to 28 provinces (cities、autonomous regions) in China. Considering the factor of agricultural protected areas, the level of suitable areas in some regions of Shandong, Yunnan, Beijing, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Liaoning and Heilongjiang Province will be improved.

Key words: *Solenopsis invicta*; suitable area; ensemble models; agricultural protection areas

---

基金项目：国家重点研发计划（2021YFD1000500）
作者简介：徐艳玲，女，1999 年生，硕士研究生，主要从事有害生物风险分析研究，E－mail：xyl0402@163. com
* 共同通讯作者 Author for correspondence：马晨，男，农艺师，主要从事有害生物风险分析、检疫处理技术研究，E－mail：macfov@hotmail. com；赵守歧，男，推广研究员，主要从事植物检疫相关工作，E－mail：zhaoshouqi@agri. gov. cn
收稿日期 Received：2022－09－20；接受日期 Accepted：2022－10－18

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren，属膜翅目 Hymenoptera 蚁科 Formicidae 切叶蚁亚科 Myrmicinae 火蚁属 *Solenopsis*，原产于南美洲巴拉那河流域（Wetterer *et al.*，2013）。2003 年在中国台湾桃园地区发现红火蚁（周卫川和蔡开珍，2005），2004 年广东省吴川市发现红火蚁入侵（Zeng *et al.*，2005），随后红火蚁在我国大陆地区迅速传播扩散。截至 2021 年 7 月，红火蚁已入侵我国大陆 12 个省（市）（浙江省、福建省、江西省、湖北省、湖南省、广东省、广西省、海南省、重庆市、四川省、贵州省、云南省）、500 多个县（市、区、旗）。红火蚁极具攻击性，不仅会蛰咬打扰其活动的人类，还会对农业生产、建筑设施及自然环境造成危害。由于强大的入侵性和破坏性，红火蚁被世界自然保护联盟（IUCN）列为全球100 种最具威胁的外来物种之一（http://www.iucngisd.org/gisd/100_worst.php），农业农村部于 2005 年发布公告，将红火蚁定为中华人民共和国进境植物检疫性有害生物和全国植物检疫性有害生物，并组织相关地区及部门对该有害生物进行封锁与控制。2021 年，农业农村部、住房和城乡建设部、交通运输部、水利部等九部门联合启动全国红火蚁联合防控行动，全力阻截防控红火蚁蔓延危害，保护农林业生产、生态环境和人民生命安全。

国内外研究人员基于不同模型，开展了大量红火蚁在中国的潜在扩散风险及适生区（潜在地理分布）相关研究。陈晓燕等（2015）基于 CLIMEX 模型预测了红火蚁在云南的潜在地理分布范围；Sung *et al.*（2018）使用 6 种不同的物种分布模型（包括 GLM、GAM、MARS、ANN、CTA、RF）对历史气候条件下红火蚁的潜在分布进行了建模，并选择 RF 模型来预测气候变化下红火蚁在全球的适生区；柳晓燕等（2019）通过调用 ENMeval 数据包优化 MaxEnt 模型参数，基于气候、高程、土地利用等环境因子及分布数据对红火蚁在中国的适生范围进行了预测分析；Chen *et al.*（2020）综合分析可能影响红火蚁分布的气候、地理和人为因素，并利用增强回归树（BRT）模型定量模拟每种因素与红火蚁存在之间的关系；为了了解中国大陆当前和未来气候情景下红火蚁的适宜生境分布，Wang *et al.*（2022）构建了 9 个物种分布模型，并比较了哪种模型更适合预测入侵红火蚁的分布。物种分布模型（SDMs）已被广泛用于评估气候变化对物种分布的影响（Zhang *et al.*，2022）。现已有最大熵（maximum entropy，MaxEnt）模型、广义线性模型（generalized linear model，GLM）及广义相加模型（generalized additive model，GAM）等模型被用于模拟入侵物种的潜在分布（Wei *et al.*，2020）。不同模型算法不同，且均具有各自的优势及不足，因此以各单一模型的预测为基础构建集成模型能够更大程度降低预测的不确定性（韩欣娆等，2021）。Biomod2 是基于 R 语言的一个集成模型平台，能够使用其中 10 种单一物种分布模型进行预测（Thuiller *et al.*，2016）。本研究使用 10 种常用生态位模型（表 1）构建集成模型来预测红火蚁的潜在分布，以提高预测精度。

表 1　10 种常用生态位模型

Table 1　10 common niche models

中文全称 Chinese name	英文全称 English name	模型缩写 Model abbreviation
人工神经网络	Artificial neural network	ANN
分类回归树分析	Classification tree analysis	CTA
柔性判别分析	Flexible discriminant analysis	FDA
广义相加模型	Generalized additive model	GAM
助推法	Generalized boosting model	GBM
广义线性模型	Generalized linear model	GLM
多元适应回归样条模型	Multiple adaptive regression splines	MARS
随机森林	Random forest	RF
最大熵模型	Maximum entropy	MaxEnt
表面分室模型	Surface range envelop	SRE

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

农业中使用温室和塑料大棚等农业设施可能会缓冲极端的热事件，使昆虫在冬季寒冷、低温的条件下生存（Duffy *et al.*，2015；MacLean *et al.*，2016）。这些农业保护地设施可能成为热带或亚热带地区入侵物种成功入侵、持续存在和种群增加的热点（Wang *et al.*，2015）。Wang *et al.*（2022）研究发现，历史气候条件下红火蚁的最北界已至30°N，未来2070平均年段SSP585情景下红火蚁的适生范围可北至辽宁省，西北部新疆维吾尔自治区也局部适生的区域。2019年，我国农业植物检疫部门在新疆温室内发现并处置了红火蚁疫情，表明农业保护地的存在可为红火蚁提供适宜的条件，由此传入我国各地农业保护地的风险变高，因此开展考虑农业保护地因素下红火蚁在我国的风险研究意义重大。在本研究中，使用基于Biomod2平台的集成模型来评估气候变化对红火蚁在我国潜在分布的影响，并结合中国的农业保护地分布情况，以期更加精准评估红火蚁的潜在风险。

1 材料与方法

1.1 物种分布数据

红火蚁的全球地理分布数据来源于国际农业与生物科学中心（https://www.cabi.org/isc/）、全球生物多样性信息网络（https://www.gbif.org/）、中华人民共和国农业农村部网站（http://moa.gov.cn/）以及相关文献。为了减少空间自相关及采样的偏差，调用R语言中“spThin”包对数据进行处理，去除重复分布点。最终，获得1 905个分布点记录用于运行模型。

1.2 环境数据及筛选

本研究从世界气候数据集（https://www.worldclim.org/）中下载了19个生物气候变量以模拟红火蚁在中国的当前分布。19个生物气候变量包括年平均气温bio1、月平均昼夜温差bio2、平均日温/年温变化范围bio3、气候季节性变化bio4、最热月的最高温bio5、最冷月的最低温bio6、年气温变化范围bio7、最湿季节的平均气温bio8、最干季节的平均气温bio9、最热季节的平均气温bio10、最冷季节的平均气温bio11、年降水量bio12、最湿月的降水量bio13、最干月的降水量bio14、降水的季节变化bio15、最湿季节的降水量bio16、最干季节的降水量bio17、最暖季节的降水量bio18和最冷季节的降水量bio19。从SCIENCE DATA BANK数据库（https://www.scidb.cn/en）下载2019年全国农业塑料大棚空间分布数据集，作为中国农业保护地数据集，将各省数据在ArcGis 10.2软件中进行镶嵌处理，生成全国塑料大棚面积百分比图，并作为叠加图层。

建立模型之前，首先使用ArcGis 10.2软件中的提取分析工具对导入的分布数据和环境变量进行采样分析，获得红火蚁的分布点环境数据。使用SPSS软件对其进行皮尔逊（Person）相关系数分析和主成分分析（PCA）进行环境变量筛选，若变量间相关性大于0.8，则保留主成分分析中贡献率较高的因子，从而避免变量间高相关性。

1.3 模型运行

本研究使用Biomod2平台的“disk”功能创建三组伪不存在点，每组10 000个。将所有发生点随机分为训练集和测试集，其中75%的数据用于建立模型，25%用于评价模型的性能。10种生态位模型每一个都使用不同的缺失和存在的随机样本运行3次，计算每个模型3次运行平均真实技巧统计（true skill statistic，TSS）值和受试者工作特征（receiver operating characteristic，ROC）值，使用具有良好准确性的模型（TSS > 0.8和ROC > 0.95）。将模型运行的结果导入ArcGIS中进行归一化处理，并根据自然点断法，将模拟结果划分为：非适生区、低适生区、中适生区及高适生区4个等级，将农业塑料大棚面积占比同样分为4个等级。

最后，基于Biomod2集成模型预测的红火蚁历史气候条件下在我国的潜在地理分布和冯权泷等人（2021）的全国农业塑料大棚结果以二维地图（bivariate map）的形式叠加展示，并利用农业保护地面积占比分布结果重新对红火蚁适生性等级进行调整与校准。

2 结果与分析

2.1 环境变量选择与模型性能评价

经过对环境变量进行主成分分析及相关性分析获取影响红火蚁适生区分布的主要环境变量，最终得到bio7、bio10、bio16、bio17这4个环境变量，说明红火蚁生存和扩散的限制因子是温度和降水。

本研究用于构建集成建模的10个单物种分布

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

模型算法的平均 TSS 和 AUC 值如图 1，结果表明大多数模型算法具有良好的预测性能。其中，RF 模型的精度较高，而相比之下 SRE 精度较低。通过 TSS ＞ 0.8，ROC ＞ 0.95 的模型加权运行生成一个集成模型，其中包括 RF、GAM、GBM、GLM、ANN、CTA、MARS、MaxEnt、FDA 9 种模型。将以上 9 种单一模型进行集成，集成模型的 TSS、ROC 3 次重复运行均在 0.85、0.95 左右，可见基于集成模型预测物种潜在地理分布可以在一定程度上降低模型自身的不确定性，提高模型精度。

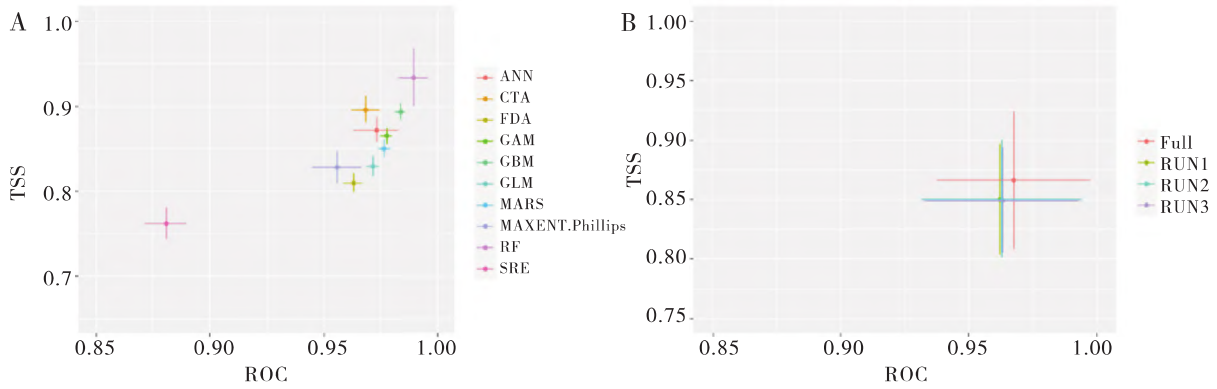


图 1　单个模型的 TSS 和 AUC 值（图 A）和三次交叉验证（图 B）

Fig. 1　TSS and AUC values of a single model (Fig. A) and three cross validations (Fig. B)

2.2　历史气候条件下红火蚁的分布

基于 Biomod2 集成模型算法对历史气候条件下红火蚁在我国的潜在地理分布区预测结果如图 2。根据自然点断法将适生区分为非适生区［0，0.17），低适生区［0.17，0.45），中适生区［0.45，0.73），高适生区［0.73，1］。

基于历史气候数据预测结果显示，红火蚁的适生区主要集中在海南省、广西省、广东省、福建省、中国台湾、浙江省、江西省、湖南省、湖北省、安徽省、江苏省、上海市、云南省、贵州省、四川省、河南省、山东省以及陕西省、河北省、西藏自治区、辽宁省的部分地区。在历史气候条件下红火蚁在我国的总适生面积为 259.55 × 10^4 km^2，占中国陆地总面积的 26.98%。

其中高适生区主要为广西省、广东省、福建省、浙江省、江西省、湖南省、上海市以及安徽省、湖北省、江苏省的部分地区，高适生区面积为 101.33 × 10^4 km^2，占总陆地面积的 10.53%。中、低适生区主要集中在云南省、四川省、贵州省、重庆市、湖北省、河南省、山东省等地区，面积分别为 87.41 × 10^4 km^2、70.81 × 10^4 km^2，分别占中国陆地总面积的 9.09%、7.36%。

2.3　考虑农业保护地下红火蚁分布预测

考虑到红火蚁适生区等级划分成 4 个等级，参考冯权泷等人（2021）的研究，将农业塑料大棚面积占比同样分为 4 个等级，等级划分范围为

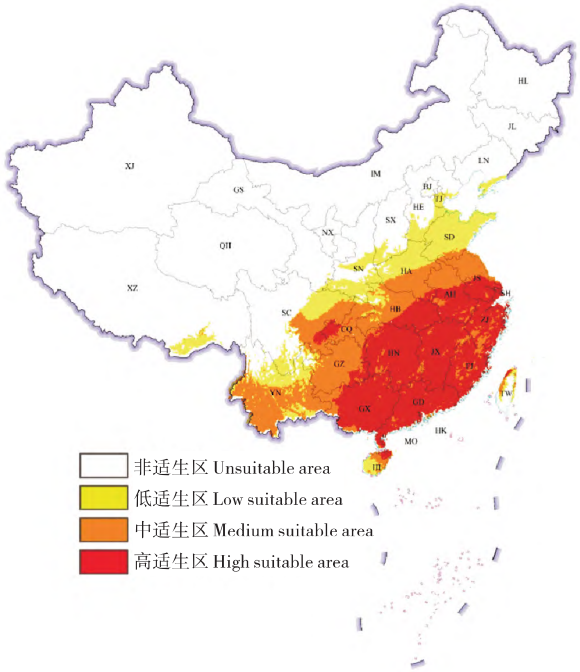


图 2　历史气候条件下（1970－2000）红火蚁在中国的潜在地理分布

Fig. 2　Potential geographical distribution of *Solenopsis invicta* under historical climatic conditions (1970－2000) in China

注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS（2020）4619 号的标准地图制作，底图无修改。下图同。Note: The map was made based on the standard map of GS (2020) No. 4619 downloaded from the standard map service website of the National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, and the base map was not modified. Same below.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

0～1%、1%～2%、2%～3%及>3%。如图3所示，全国农业塑料大棚主要集中在北部，包括山东省东北部（寿光市）、西部地区（莘县）；辽宁省的中部地区（新名市）；河北省的中南部地区（保定市）等。在中国南部，农业塑料大棚主要集中在云南省的中部地区（昆明市、陆良县）等。

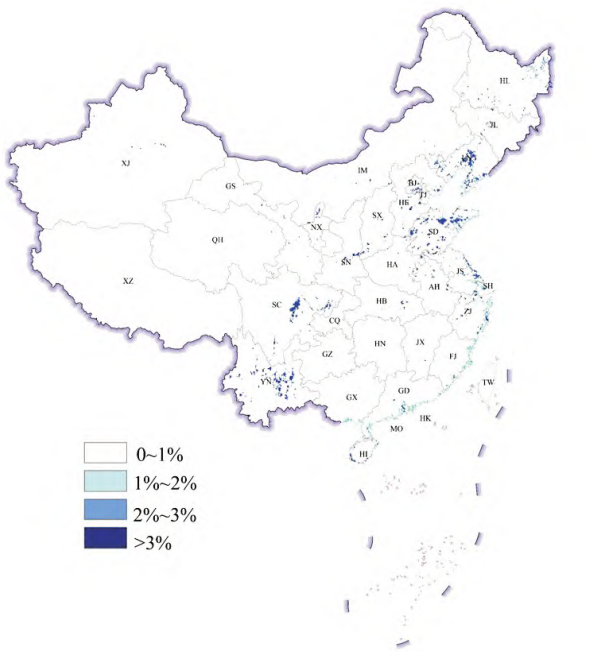


图3 2019年全国农业塑料大棚面积占比

Fig. 3 Proportion of agricultural plastic greenhouse area in 2019

通过构建二维地图对红火蚁潜在地理分布区及农业保护地分布进行叠加，本研究考虑了农业保护地因素会在一定程度上缓冲极端热事件使得红火蚁在冬季可以生存，利用农业保护地面积占比分布结果重新对红火蚁适生性等级进行调整与校准。在原来适生区等级的基础上，根据农业保护地面积占比情况对红火蚁和农业保护地二维地图综合分析重新划定适生区等级（图4）。根据二维地图显示结果（图4），农业保护地分布在北方地区较多，而红火蚁的潜在地理分布区域主要集中在南方地区，两者的重叠地区主要集中在山东省和云南省，二者的部分低、中适生区转变为中、高适生区；新疆维吾尔自治区及北京市的零星地区因为农业保护地的占比面积程度大，分别由非适生区、低适生区转变为中适生区；辽宁省和黑龙江省部分地区由非适生区重新划定为低适生区。当不考虑农业保护地的因素时，历史气候条件下红火蚁的潜在适生区北部可至辽宁省；在考虑农业保护地的情况下，红火蚁潜在地理分布区域北达黑龙江省，红火蚁在北方地区（包括东北地区及西北地区）的适宜性提高，总适生面区域有所扩大（图4）。

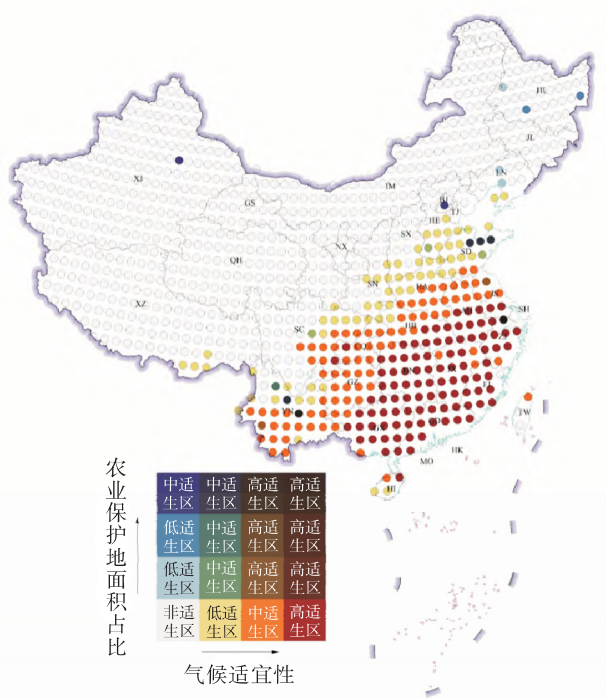


图4 红火蚁的潜在分布和农业保护地在我国的二维分布图

Fig. 4 Bivariate maps of *Solenopsis invicta* potential distribution and agriculture protected areas in China

3 结论与讨论

红火蚁被IUCN列为世界上最严重的外来入侵物种之一，对人类健康和生态系统造成了巨大的危害。本研究利用集成模型预测的红火蚁在我国的潜在地理分布区域完全覆盖了红火蚁当前已经入侵分布的点位，说明集成模型的预测结果可靠。红火蚁已知分布点外围仍有较大面积的红火蚁潜在适生区，如安徽省、江苏省、河南省及山东省等，说明红火蚁虽然暂时未在这些区域分布危害，但具有较高的潜在适生风险，以当前红火蚁的扩张速度为参考，需要更加警惕其进一步向新地区扩张。与单一模型相比较而言，集成的组合模型精度更高，能够较好地预测红火蚁的分布及变化情况。

本研究采用考虑了气候变化及农业保护地对红火蚁的保护作用的双重影响，二维地图显示，在不考虑农业保护地的情况下，红火蚁的北部边

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

界约为 40°N，适生区面积占中国总陆地面积的 26.98%。当考虑农业保护地的情况下，北方部分地区如西北地区的部分地区（包括新疆东北部）和东北地区辽宁省中北部以及南部沿海地区、黑龙江省东北部和西南部地区等（图 3）由于农业保护地对红火蚁的庇护影响，可能在某种程度上使得红火蚁在自然条件下不可越冬生存的区域定殖。2019 年在新疆温室大棚里发现红火蚁，推测红火蚁在其非越冬区的出现与农业温室等人为增温设施的出现有关，农业保护地为红火蚁在不利的气候条件下提供庇护环境。根据红火蚁出现在新疆温室大棚这一迹象，预测在北方非适生区广泛分布的温室也可能为其提供合适的生存条件，推动其进一步向更高的纬度扩散。本研究预测的北方部分地区由非适生区转变成适生区验证了这一点。

随着国际贸易活动的日趋频繁以及社会经济的发展，入侵生物的扩散逐渐呈现出途径种类不断增加、范围持续扩大等特点，入侵生物的扩散也日益受到贸易和交通格局、人类活动的影响。以红火蚁为例，一方面红火蚁可通过废旧物品、原木等入侵我国，在国内主要通过草皮、花卉苗木等携带传播（陆永跃等，2019）；另一方面农业保护设施适宜的温湿度、充足的寄主植物等为红火蚁提供了良好的生存条件。我国作为一个农业大国，自改革开放以来，设施农业发展较为迅速，2017 年温室占地面积超过 200 万 hm^2（刘孝贤等，2021），农业保护地面积的增加为红火蚁越冬提供了庇护场所，因此北方广泛存在的设施农业区域会出现红火蚁局部点状入侵及季节性发生的风险（王磊等，2022）。

在中国，红火蚁的传播速度范围在 26.5 ~ 48.1 km/年之间（陆永跃，2014），结合历史气候条件下红火蚁在我国的潜在地理分布区域，未来红火蚁在我国进一步扩散的风险很高，会影响入侵地的生物多样性且危及人类健康。此外，对温室的管理不完善也可能导致入侵生物逃逸到温室之外进而扩散，进而扩大扩散范围（Wang *et al.*，2015），因此要对红火蚁的监测及防控工作加大力度。如在黑龙江省、新疆维吾尔族自治区等地区农业保护地中，冬季可采用冻棚防止红火蚁利用保护设施进行定殖，减轻其危害；完善农业保护地设施的管理模式，防止红火蚁逃逸到保护设施之外进而扩散蔓延。

本研究结果显示红火蚁的最北界可至 40°N 左右，研究结果较 Wang *et al.*（2021）利用 RF、GLM、CTA、ANN、GBM、FDA、GAM、SRE、MaxEnt 等 9 种模型预测的红火蚁北界，以及柳晓燕等人（2019）通过 MaxEnt 模型预测的红火蚁北界均为 30°N 左右相对较北，适生区预测范围不同可能是由于模型选择、红火蚁分布数据及环境变量选取不同造成的。农业保护地包括如温室和塑料大棚等，本文的农业保护地数据集使用的是冯权泷等人（2021）公开发布的全国农业塑料大棚空间分布数据，并不能完全代表我国全部农业保护地的分布，仅在一定程度上可以给相关部门及管理者提供参考。

参考文献（References）

Chen S, Ding F, Hao M, *et al.* Mapping the potential global distribution of red imported fire ant (*Solenopsis invicta* Buren) based on a machine learning method [J]. *Sustainability*, 2020, 12 (23): 10182.

Chen XY, Ma P, Li YC, *et al.* The prediction on potential distribution of *Solenopsis invicta* in Yunnan Province based on CLIMEX and ArcGis [J]. *Plant Quarantine*, 2015, 29 (3): 34 – 39. [陈晓燕, 马平, 李永川, 等. 基于 CLIMEX 和 ArcGIS 预测红火蚁在云南的潜在适生区 [J]. 植物检疫, 2015, 29 (3): 34 – 39]

Duffy GA, Coetzee BWT, Janion – Scheepers C, *et al.* Microclimate – based macrophysiology: Implications for insects in a warming world [J]. *Current Opinion in Insect Science*, 2015, 11: 84 – 89.

Feng QL, Niu BW, Zhu DH, *et al.* A dataset of remote sensing – based classification for agricultural plastic greenhouses in China in 2019 [J]. *China Scientific Data*, 2021, 6 (4): 153 – 170. [冯权泷, 牛博文, 朱德海, 等. 2019 年全国农业塑料大棚遥感分类数据集 [J]. 中国科学数据, 2021, 6 (4): 153 – 170]

Han XR, Zhu GP, Men YL, *et al.* Ensemble predicting of *Spodoptera frugiperda* potential distribution [J]. *Journal of Biosafety*, 2021, 30 (1): 65 – 71. [韩欣娆, 朱耿平, 门永亮, 等. 基于集合模型的草地贪夜蛾的潜在分布预测 [J]. 生物安全学报, 2021, 30 (1): 65 – 71]

Liu XX, Han P, Zhang X, *et al.* Prediction of geographical distribution and overwintering boundary of tomato leaf miner *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40 (10): 3243 – 3251. [刘孝贤, 韩鹏, 张鑫, 等. 番茄潜麦蛾地理分布范围及越冬边界预测 [J]. 生态学杂志, 2021, 40 (10): 3243 – 3251]

Liu XY, Zhao CY, Li FF, *et al.* Prediction of potential geographical distribution of *Solenopsis invicta* Buren in China based on MaxEnt [J]. *Plant Quarantine*, 2019, 33 (6): 70 – 76. [柳晓燕, 赵彩云, 李飞飞, 等. 基于 MaxEnt 模型预测红火蚁在中国的适生区 [J]. 植物检疫, 2019, 33 (6): 70 – 76]

Lu YY. Long – distance spreading speed and trend prediction of red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren, in mainland China [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41 (10): 70 – 72,

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3. [陆永跃. 中国大陆红火蚁远距离传播速度探讨和趋势预测[J]. 广东农业科学, 2014, 41 (10): 70 – 72, 3]

Lu YY, Zeng L, Xu YJ, *et al.* Research progress of invasion biology and management of red imported fire ant [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2019, 40 (5): 149 – 160. [陆永跃, 曾玲, 许益镌, 等. 外来物种红火蚁入侵生物学与防控研究进展[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40 (5): 149 – 160]

MacLean HJ, Higgins JK, Buckley LB, *et al.* Geographic divergence in upper thermal limits across insect life stages: Does behavior matter? [J]. *Oecologia*, 2016, 181 (1): 107 – 114.

Sung S, Kwon YS, Lee DK, *et al.* Predicting the potential distribution of an invasive species, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae), under climate change using species distribution models [J]. *Entomological Research*, 2018, 48 (6): 505 – 513.

Thuiller W, Georges D, Engler R, *et al.* Package 'biomod2'. Species distribution modeling within an ensemble forecasting framework [J]. *Ecography*, 2016, 32: 369 – 373.

Wang C, Zhang X, Pan X, *et al.* Greenhouses: Hotspots in the invasive network for alien species [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2015, 24 (7): 1825 – 1829.

Wang H, Zhang Q, Liu R, *et al.* Impacts of changing climate on the distribution of *Solenopsis invicta* Buren in Mainland China: Exposed urban population distribution and suitable habitat change [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 139: 108944.

Wang L, Chen KW, Feng XD, *et al.* Long – term predication of red imported fire ant (*Solenopsis invicta* Buren) expansion in Chinese mainland [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2022, 44 (2): 339 – 344. [王磊, 陈科伟, 冯晓东, 等. 我国大陆红火蚁入侵扩张趋势长期预测[J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (2): 339 – 344]

Wei J, Peng L, He Z, *et al.* Potential distribution of two invasive pineapple pests under climate change [J]. *Pest Management Science*, 2020, 76 (5): 1652 – 1663.

Wetterer JK. Exotic spread of *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) beyond North America [J]. *Sociobiology*, 2013, 60 (1): 50 – 55.

Zeng L, Lu YY, He XF, *et al.* Identification of red imported fire ant, *Solenopsis invicta*, to invade mainland China and infestation in Wuchuan, Guangdong [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2005, 42 (2): 144 – 148.

Zhang M, Keenan TF, Luo X, *et al.* Elevated CO_2 moderates the impact of climate change on future bamboo distribution in Madagascar [J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 810: 152235.

Zhou WC, Cai KZ. Summary of the invasive species red fire ant in Taiwan [J]. *Taiwan Agricultural Research*, 2005, 1: 39 – 41. [周卫川, 蔡开珍. 台湾外来入侵物种红火蚁概述[J]. 台湾农业探索, 2005, 1: 39 – 41]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net