

DOI: 10.20103/j.stxb.202309051927

李玉闯, 郭倩倩, 刘怀, 李广云. 引种捕食螨胡瓜新小绥螨在中国的适生区分布预测. 生态学报, 2024, 44(12): 5219-5229.

Li Y C, Guo Q Q, Liu H, Li G Y. Prediction of the potential distribution of introduced predatory mite *Neoseiulus cucumeris*. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 5219-5229.

引种捕食螨胡瓜新小绥螨在中国的适生区分布预测

李玉闯^{1,2}, 郭倩倩^{1,2}, 刘怀^{1,2}, 李广云^{1,2,*}

1 西南大学植物保护学院昆虫学及害虫控制工程重庆市重点实验室, 重庆 400715

2 西南大学长江上游农业生物安全与绿色生产教育部重点实验室, 重庆 400715

摘要: 胡瓜新小绥螨 (*Neoseiulus cucumeris*) 是一种商业化的广食性生防天敌, 可以防治多种农业害螨和害虫, 具有重要的经济和生态价值。但是作为一种外来引种的捕食螨, 它在我国的适生区域分布以及气候变化对其分布的影响尚不明确。根据胡瓜新小绥螨的现有分布点和 19 个生物气候因子, 利用刀切法评估关键气候因素的重要性, 并采用 Maxent 生态位模型分别预测了目前和未来气候条件下它在中国分布情况, 分析了其在中国的潜在适生区域的变化。结果表明模型预测得到的受试者工作特征曲线 ROC 曲线下的面积 AUC (Area under curve) 值为 0.87, 表明模型的准确度好。最冷季节的降水量 (Bio_19)、等温性 (Bio_3) 和气温季节性 (Bio_4) 是影响胡瓜新小绥螨适生性的最重要的环境因子, 对模型的贡献率分别为 36.2%、25% 和 18.1%。目前胡瓜新小绥螨的适生区面积约占我国陆地面积的 60%, 在未来气候条件下, 其适生区域有进一步扩大的趋势, 在 2050 年其中高度适生区域扩张至 63%。不同时期胡瓜新小绥螨的分布中心比较稳定, 均分布于四川省内, 但有向东北迁移的趋势。本研究明确了胡瓜新小绥螨在中国适宜的释放区域及可能定殖的区域, 为该引种天敌的合理利用提供了理论依据。

关键词: 胡瓜新小绥螨; MaxEnt 模型; 潜在分布; 环境因子

Prediction of the potential distribution of introduced predatory mite *Neoseiulus cucumeris*

LI Yuchuang^{1,2}, GUO Qianqian^{1,2}, LIU Huai^{1,2}, LI Guangyun^{1,2,*}

1 Key Laboratory of Entomology and Pest Control Engineering, College of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 Key Laboratory of Agricultural Biosafety and Green Production of Upper Yangtze River (Ministry of Education), Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: *Neoseiulus cucumeris* is generalist predatory mite with an extensive prey spectrum encompassing many small agricultural mites and pests, having significant economic and ecological importance as a globally commercialized biological control agent. Despite its early introduction to China, its suitable distribution areas in China and the potential influences of climate changes on its distribution remain predominantly uncharted. In this study, MaxEnt model was employed to predict its distribution in China currently and under climate changes at 2050S and 2070S with 19 bioclimatic variables. The AUC values predicted by the model were 0.87, indicating that the accuracy of the model was high. Three most important environmental variables affecting its distribution were precipitation of the coldest quarter, mean temperature of the wettest quarter and annual precipitation, with contribution rates of 36.2%, 25% and 18.1%, respectively. The analysis showed that the suitable area of *N. cucumeris* accounted for about 60% of China's total area currently. The suitable area of this predatory mite showed an expansion, would be 63% by 2050S under climate changes. Its distribution center was presently situated in Sichuan Province, with a projected shift towards northeastern China. This study clarified the suitable release areas and possible colonization areas of *N. cucumeris* in China, which provided a theoretical basis for the field application of this

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD400600)

收稿日期: 2023-09-05; 采用日期: 2024-05-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liguangyun@swu.edu.cn

introduced natural enemy.

Key Words: *Neoseiulus cucumeris*; MaxEnt model; potential distribution; environmental variables

生物防治作为有害生物综合治理的一种方法,是实现农业绿色可持续发展的重要策略之一。用于生物防治的有益生物资源包含寄生性天敌、捕食性天敌和各种病原微生物等。在各种天敌资源中,节肢动物门的蜱螨目是仅次于膜翅目寄生蜂的第二大天敌类群^[1]。在蜱螨目植绥螨科中,目前世界上已发掘出多种捕食螨资源,如胡瓜新小绥螨(*Neoseiulus cucumeris*)、智利小植绥螨(*Phytoseiulus persimilis*)、加州新小绥螨(*Neoseiulus californicus*)和斯氏钝绥螨(*Amblyseius swirskii*)等^[1-3]。其中,胡瓜新小绥螨作为一种广食性的捕食螨,可捕食多种农业害虫如粉虱、蓟马、线虫、木虱和各种害螨^[4-5]。自1985年首次释放并应用于生防以来,已经在包括我国在内的20多个国家得到了应用^[1,6]。从引种到我国后,已在国内实现规模化生产,并在多地等进行了田间防治试验并都取得了明显的防治效果^[7]。目前,已有大量的室内研究探明了胡瓜新小绥螨对各种作物和果树害虫和害螨的捕食潜力,以及非生物因子对胡瓜新小绥螨适合度的影响等^[1,8-13]。因此,进一步明确影响胡瓜新小绥螨在我国潜在适生区的关键环境因子,及其适生区的分布对于该天敌的田间释放和应用有着重要指导意义。

气候变化是影响物种分布的重要因子之一^[14]。在全球气候变暖的背景下,预计到2100年,全球温度将上升0.3—4.8℃,极端高温事件在未来出现的概率也将大大增加^[15]。许多陆地生物的分布正在随着气候变化而发生纬度或海拔的变化^[16]。由于捕食螨是变温动物,对温度敏感,容易受到环境的影响^[17],因此,它们可能会通过改变地理分布或物候来应对温度的变化^[18]。所以,了解未来气候条件下引种捕食螨的分布格局的变化,研究该物种的潜在分布与气候变化的关系,对于明确捕食螨对未来气候的适应性有重要的理论意义。

物种分布区预测模型可以根据物种已知的地理分布情况,并结合气候因子来解析物种的适生区,被广泛应用于预测外来入侵物种扩散、濒危物种适生区的预测、保护区的规划以及全球气候变化对物种分布影响等领域^[19-21]。目前,已有多种基于不同算法的模型被应用于适生区的预测,如GARP、MARS、DOMAIN、BIOCLIM、CLIMEX和MaxEnt等。不同的生态位模型之间的预测效果存在一定差异^[22-23]。有研究表明,与其他生态位模型相比,Maxent模型具有稳定性好、预测结果准确的特点^[24-25]。此外,该模型可以使用较少的分布点数据获得较好的预测结果^[26-28],是目前应用最广的物种分布模型之一。

本研究基于MaxEnt模型对引种捕食螨胡瓜新小绥螨在我国的潜在分布进行预测,旨在探明影响胡瓜新小绥螨适生性的关键环境因子,明确气候变化下其适生区域的变化趋势,为引种天敌的田间释放提供相关的参考和理论依据。此外,引种天敌胡瓜新小绥螨作为广食性的天敌,具有集团内捕食的生活习性,与其他捕食螨例如本土捕食螨加州新小绥螨存在年龄阶段特异性捕食^[29-30]。因此,明确该捕食螨的潜在分布区对于进一步估计它与本土捕食螨的种间竞争以及存在的潜在风险有重要参考意义。

1 研究数据

1.1 地理分布数据

胡瓜新小绥螨的分布数据通过全球生物多样性信息网站 Global Biodiversity Information Facility (GBIF, <https://www.gbif.org/>)、国际农业与生物科学中心网站 (Center for Agriculture and Bioscience International (CABI, <https://www.cabi.org/>) 和植绥螨科数据库 Phytoseiidae Database (<http://www.lea.esalq.usp.br/phytoseiidae/authors.php>) 获得。其中植绥螨科数据库获取的地点名称并通过在线 GeoNames 地名数据库 (<https://www.geonames.org/>) 查询分布点地理信息,然后通过在线经纬度格式转换网站 (<http://minigps.net/fc.html>) 进行格式转换。由 GBIF、CABI 和 Phytoseiidae Database 得到的地理分布点数分别为 46、24 和 43,共 113 个分布点。然后将数据进行整理,格式转化为 *.csv^[31]。

1.2 地图数据和环境变量数据

世界行政区划图下载于 DIVA-GIS 网站 (<https://www.diva-gis.org/>)。中国省级行政区域图(1:400 万)下载于国家基础地理信息中心 (<http://www.ngcc.cn/>)。由于温度和降水是影响昆虫分布的重要气候因子,因此本研究中从全球气候数据库 WorldClim (<https://worldclim.org/>) 下载 CMIP5 格式下全球当前 (Current)、未来 (2050S 和未来 (2070S) 空间分辨率为 2.5 arc-minutes (约 4.5 km²) RCP 2.6 版本的气候环境数据^[32,33],包括 19 个与温度和降水相关的变量变量分别是: Bio_1 (年平均温)、Bio_2 (昼夜温差:每月最高温度-最低温度的平均值)、Bio_3 (昼夜温差与年温差比值:(Bio_2/Bio_7) (×100))、Bio_4 (温度变化的方差:标准差 ×100)、Bio_5 (最热月最高温)、Bio_6 (最冷月最低温)、Bio_7 (年温的变化范围:Bio_5-Bio_6)、Bio_8 (最湿季平均温)、Bio_9 (最干季平均温)、Bio_10 (最暖季平均温)、Bio_11 (最冷季平均温)、Bio_12 (年均降雨量)、Bio_13 (最湿月降雨量)、Bio_14 (最干月降雨量)、Bio_15 (降雨量变化的方差)、Bio_16 (最湿季降雨量)、Bio_17 (最干季降雨量)、Bio_18 (最暖季降雨量)、Bio_19 (最冷季降雨量)。

2 研究方法

2.1 地理分布数据筛选和环境因子筛选

将收集到的胡瓜新小绥螨的分布点使用 ArcGIS 软件将缓冲区的半径设置为 1.5 km^[20] 进行筛选,当分布点重合时只保留其中一点,最终获得胡瓜新小绥螨分布点共 79 个(图 1)。

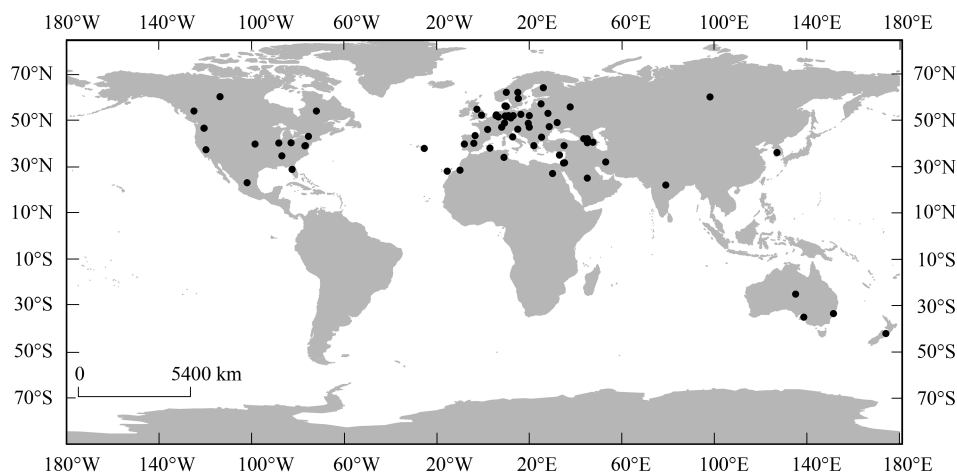


图 1 胡瓜新小绥螨分布点

Fig.1 The distribution records of predatory mite *Neoseiulus cucumeris*

由于环境因子之间的相关性会使模型的可信度降低,因此本研究首先通过 SPSS25.0 对 19 个环境因子的相关性进行了分析(表 1),并通过刀切法(Jackknife)判定环境因子对模型的贡献大小。当两个环境因子的相关性 $|r| < 0.9$ 时全部保留;当 $|r| \geq 0.9$ 时对比初始模型中两者贡献率,仅保留贡献率较高的因子,最终保留 9 个环境因子用于构建 MaxEnt 模型,包括平均气温日较差(Bio_2)、等温性(Bio_3)、气温季节性变动系数(Bio_4)、最热月份最高温度(Bio_5)、最湿季度平均温度(Bio_8)、最干季度平均温度(Bio_9)、年降水量(Bio_12)、降水量季节性变化(Bio_15)和最冷季度降水量(Bio_19)。

2.2 模型参数设置、运行和评估

基于最大熵模型的 MaxEnt 模型软件(3.4.2 版本)被用于预测胡瓜新小绥螨在中国的适生区。在该模型中训练集和测试集的分布点的比例分别设置为全部分布点的 75% 和 25%,重复训练的次数设置为 10,其余参数采用默认设置。MaxEnt 模型的预测结果由受试者工作特征曲线 ROC 曲线下的面积(AUC)来对模型进行评估。0.5<AUC<1,且数值越大表示预测准确性越高。

表 1 19 个环境因子的相关性
Table 1 Correlation of the 19 environmental factors

Bio_1	Bio_2	Bio_3	Bio_4	Bio_5	Bio_6	Bio_7	Bio_8	Bio_9	Bio_10	Bio_11	Bio_12	Bio_13	Bio_14	Bio_15	Bio_16	Bio_17	Bio_18	Bio_19
1																		
Bio_1	1																	
Bio_2	0.447**	1																
Bio_3	0.770**	0.551**	1															
Bio_4	-0.614**	0.129	-0.713**	1														
Bio_5	0.813**	0.764**	0.532**	-0.079	1													
Bio_6	0.893**	0.097	0.750**	-0.880**	0.493**	1												
Bio_7	-0.390**	0.469**	-0.441**	0.931**	0.202	-0.752**	1											
Bio_8	0.363**	0.052	0.06	-0.009	0.329**	0.224	-0.003	1										
Bio_9	0.860**	0.406**	0.738**	-0.599**	0.703**	0.817**	-0.388**	-0.03	1									
Bio_10	0.887**	0.622**	0.531**	-0.182	0.969**	0.603**	0.055	0.440**	0.727**	1								
Bio_11	0.952**	0.265*	0.820**	-0.825**	0.613**	0.981**	-0.640**	0.257*	0.850**	0.705**	1							
Bio_12	-0.06	-0.381**	-0.11	-0.175	-0.268*	0.078	-0.291*	0.165	-0.211	-0.17	0.026	1						
Bio_13	0.135	-0.157	0.015	-0.159	0.015	0.162	-0.171	0.217	-0.033	0.086	0.161	0.805**	1					
Bio_14	-0.246*	-0.463**	-0.247*	-0.08	-0.448**	-0.07	-0.260*	0.152	-0.376**	-0.355**	-0.148	0.807**	0.363**	1				
Bio_15	0.428**	0.431**	0.374**	-0.085	0.528**	0.258*	0.109	0.008	0.474**	0.487**	0.341**	-0.305**	0.217	-0.694**	1			
Bio_16	0.124	-0.188	0.015	-0.183	-0.017	0.169	-0.202	0.212	-0.045	0.058	0.162	0.836**	0.994**	0.401**	0.182	1		
Bio_17	-0.229*	-0.464**	-0.234*	-0.096	-0.436**	-0.05	-0.273*	0.141	-0.355**	-0.341**	-0.129	0.827**	0.380**	0.994**	-0.700**	0.419**	1	
Bio_18	-0.261*	-0.329**	-0.295**	0.104	-0.356**	-0.205	-0.039	0.373**	-0.508**	-0.268*	-0.231*	0.790**	0.620**	-0.379**	0.632**	0.734**	1	
Bio_19	0.136	-0.286*	0.154	-0.375**	-0.114	0.327**	-0.454**	-0.226*	0.244*	-0.041	0.249*	0.651**	0.473**	-0.098	0.508**	0.484**	0.163	1

表中数字代表相关性系数, * 和 ** 代表两环境因子相关性显著, 分别达到 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平

2.3 适生等级分区标准和刀切法结果检验方法

刀切法结果检验时,“仅此变量”与“除此变量”分别代表环境因子的预测能力和对物种分布的重要性^[34]。MaxEnt 模型输出结果为胡瓜新小绥螨在世界范围内的存在概率,其数值在 0—1 之间,值越接近 1 表示物种越可能存在。根据分布概率 P 确定胡瓜新小绥螨适生区等级划分: $P<0.05$ 为非适生区, $0.05\leq P<0.30$ 为低适生区, $0.30\leq P<0.60$ 为中适生区, $P\geq 0.60$ 为高适生区。

3 研究结果

3.1 模型的适用性分析

MaxEnt 模型模拟输出的平均受试者工作特征曲线 (ROC 曲线) 如图 2,模型的下面积 (AUC 测试值) 均高于 0.87,依据模型准确性的评价标准,此次构建的模型都达到了“好”的标准,说明构建的模型可用于适生区预测。

9 个环境变量对胡瓜新小绥螨的分布有着不同的贡献率,如表 2 所示。其中最冷季节的降水量贡献率最高,单因子的贡献率达到了 35.6%。等温性的贡献率次之,为 24.6%。温度的季节性贡献率也超过了 20%。其他几个环境因子的贡献率均小于 5。

环境变量贡献率分析结果见图 3,其中等温性 (Bio_3) 的训练增益为 0.7,对胡瓜新小绥螨分布增益贡献最大,说明它是影响胡瓜新小绥螨分布的最关键环境变量。温度季节性变化标准差 (Bio_4)、最冷季度的降水量 (Bio_19) 和最干季度的均温度 (Bio_9) 模型增益均大于 0.4,对胡瓜新小绥螨分布也具有重要的影响。其它 5 个环境变量的训练增益在 0.1 至 0.3 之间,大小排序依次为降水量变异系数 (Bio_15)>年降水量 (Bio_12)>最暖月最高温度 (Bio_5)>最湿季度平均温度 (Bio_8)>平均日较差 (Bio_2),对胡瓜新小绥螨分布有不可替代的影响。

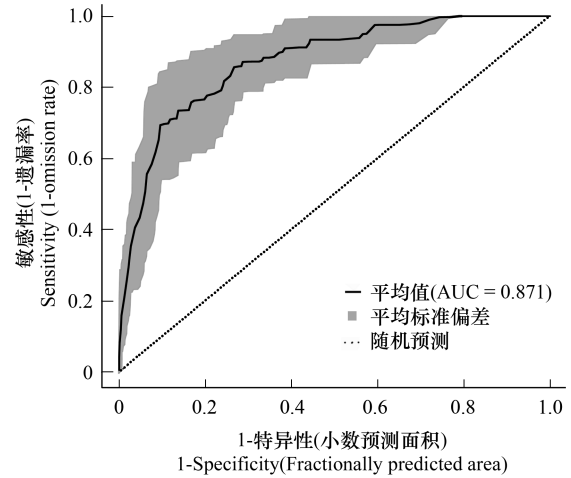


图 2 MaxEnt 模型适用性检验的 ROC 曲线和 AUC 值
Fig.2 The receiver operating characteristic (ROC) curve and the AUC value testing the applicability of the MaxEnt model

表 2 基于最大熵模型筛选所得的环境因子及其贡献率

Table 2 Selected environmental variables based on Maxent model and their contribution rates			
环境变量 Environmental variables	不同时期贡献率 Contribution rates in different period/%		
	当前 Current	2050S	2070S
Bio_19 Precipitation of Coldest Quarter	35.6	32.5	34.9
Bio_3 Isothermally (BIO2/BIO7) (×100)	24.6	28.2	25.8
Bio_4 Temperature Seasonality (standard deviation ×100)	20.3	19.9	22.4
Bio_2 Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp-min temp))	5.3	5.5	4.6
Bio_5 Max Temperature of Warmest Month	4.4	4.3	5.2
Bio_8 Mean Temperature of Wettest Quarter	4.3	2	1.5
Bio_12 Annual Precipitation	3.6	3.2	2.8
Bio_15 Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)	1.5	3.7	2.2
Bio_9 Mean Temperature of Driest Quarter	0.4	0.6	0.6

MaxEnt 模型中主要环境变量的反馈曲线如图 4。该曲线反映了主要环境变量与分布概率之间相互关系。结果表明胡瓜新小绥螨的分布概率与等温性、温度的季节性和最冷季节的降水量之间的关系表现为单峰型曲线。随着环境因子的增大,胡瓜新小绥螨的分布概率首先呈现增大趋势。在最适值之后,随着环境因子的增大,分布概率逐渐降低。等温性的适宜范围为 23.32—50.05,最适值为 31.83。温度的季节性适宜范围为

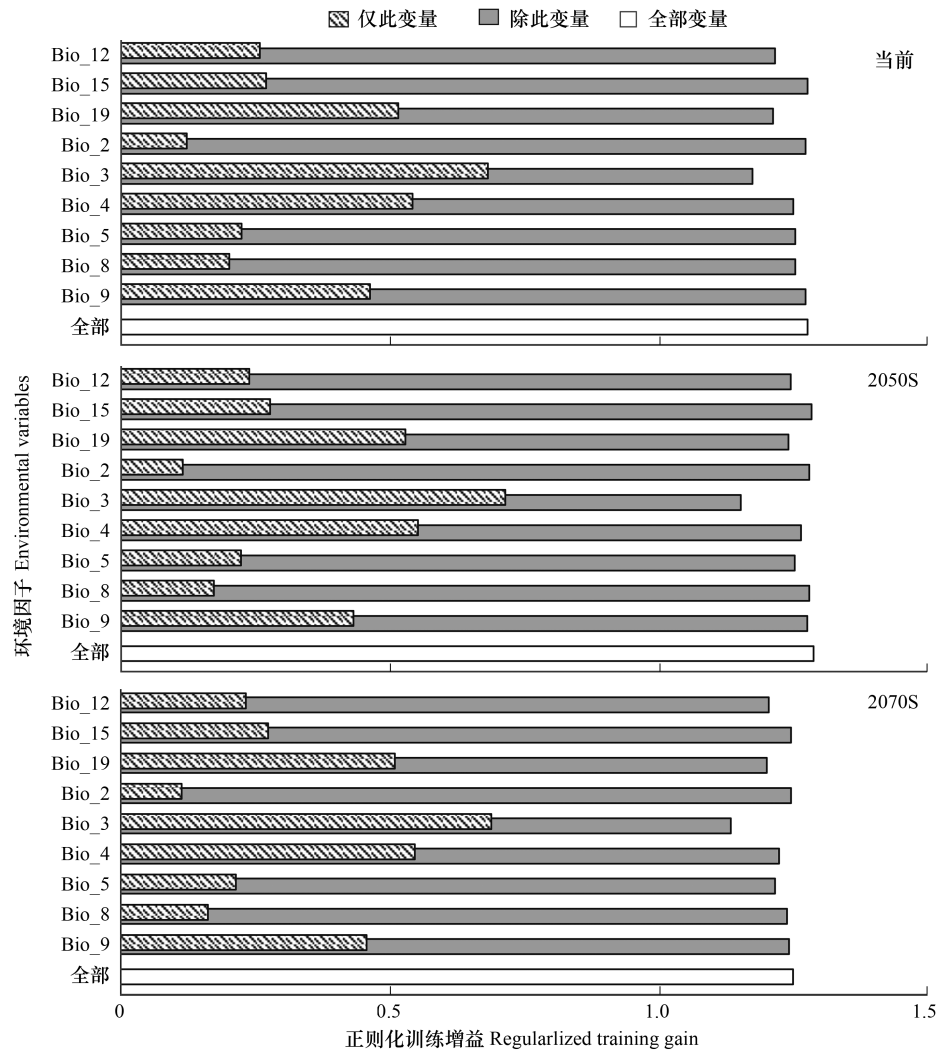


图 3 关键环境因子对胡瓜新小绥螨分布重要性

Fig.3 The importance of key environmental factors on the distribution of predatory mite *Neoseiulus cucumeris*

2670.3—11110.1 ℃, 最适值为 6496.4 ℃。最冷季节降水量适宜范围为 53.81—567.70 mm, 最适值为 226.76 mm。

3.2 胡瓜新小绥螨在中国的适生区分布预测

根据预测结果胡瓜新小绥螨的各个适生区呈现扇形分布,由沿海到内陆其分布概率逐渐降低(图 5)。其中在当前气候条件下,胡瓜新小绥螨的高度适生区主要分布在贵州省、广西壮族自治区、福建省,约占 3%;中度适生区主要分布在河南省、湖北省、贵州省、重庆市、湖南省、广西壮族自治区、广东省、福建省、海南省、台湾,约占我国面积的 15%;低度适生区主要分布在新疆维吾尔自治区南部、云南省、四川省东部、湖南省东部、湖北省、江西省、浙江省、江苏省、山东省、河北省、北京市、陕西省、山西省、宁夏回族自治区和甘肃省,占比 42%;不适生区主要分布在内蒙古自治区东北部、黑龙江省、吉林省、辽宁省、新疆维吾尔自治区北部、青海省西南部和西藏自治区,占比 40%(图 5)。总体上该捕食螨未来的不适生区面积约占我国陆地面积的 37%—39%,有降低的趋势。未来气候条件下,胡瓜新小绥螨在我国的高度适生区和中度适生区占比分别降低 2%左右,但是低度适生区比例增加 5%—6%(图 5)。

3.3 胡瓜新小绥螨在中国的适生区变化和地理分布中心的迁移

根据预测,在气候变化的条件下胡瓜新小绥螨的分布情况将会发生变化。其分布面积扩大的区域主要集

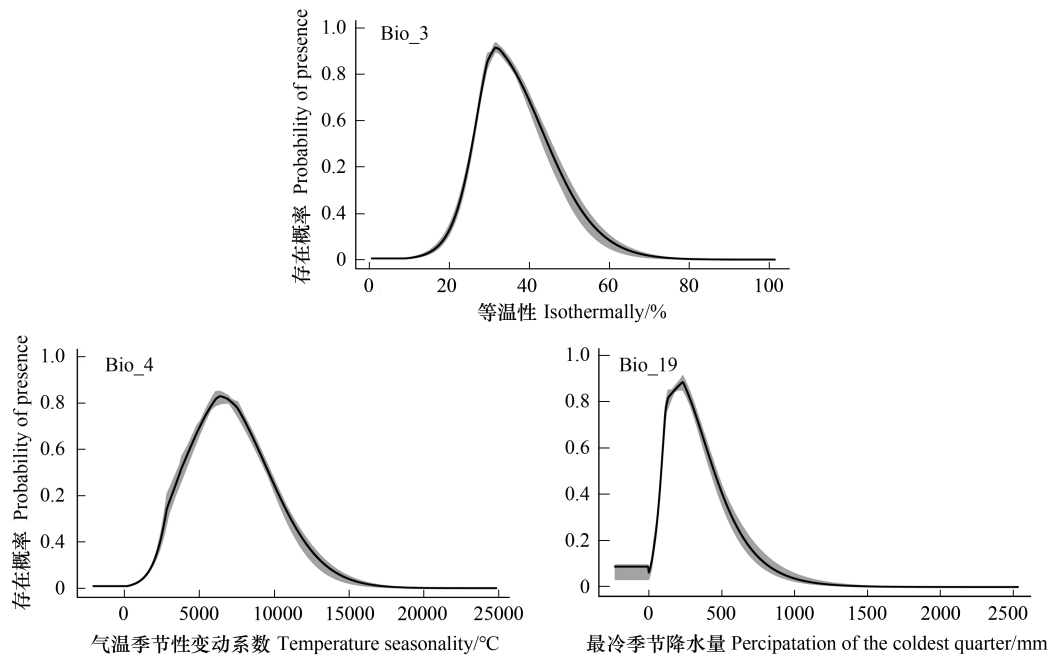


图4 MaxEnt 模型中胡瓜新小绥螨对三个主要环境变量的反馈曲线

Fig.4 Response curves of the three environmental variables most related to the distribution of predatory mite *Neoseiulus cucumeris*

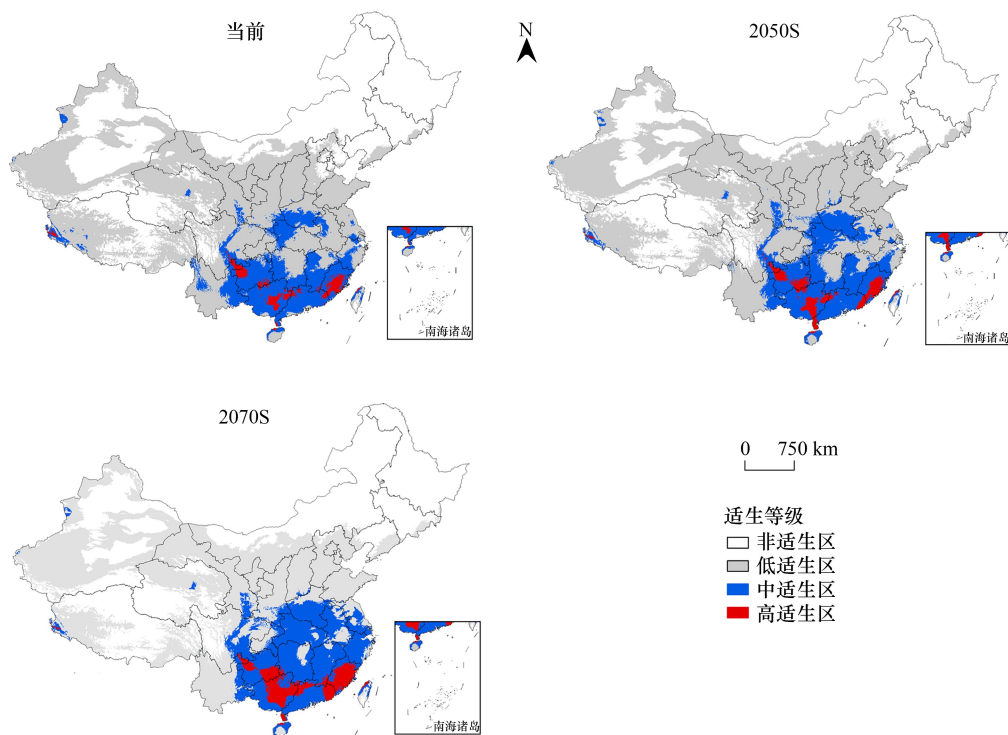


图5 基于 MaxEnt 模型预测的三个时期胡瓜新小绥螨在中国的潜在适生区分布

Fig.5 Distribution of two introduced species of predatory mites in China in three different periods predicted by the MaxEnt model

中在新疆塔里木盆地周围、内蒙古南部以及渤海湾周围地区,扩大的区域大致呈条带状分布,在 37.19°N 和 43.63°N 之间(图 6)。胡瓜新小绥螨面积缩小的区域主要集中在西藏自治区以及青海省呈离散型点状分布。

相对于当前,未来(2050S)适生区面积扩大约 $39.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,缩小的区域面积约为 $26.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图7);未来(2070S)相对于当前适生区面积扩大约 $37.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,缩小的区域面积约为 $44.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

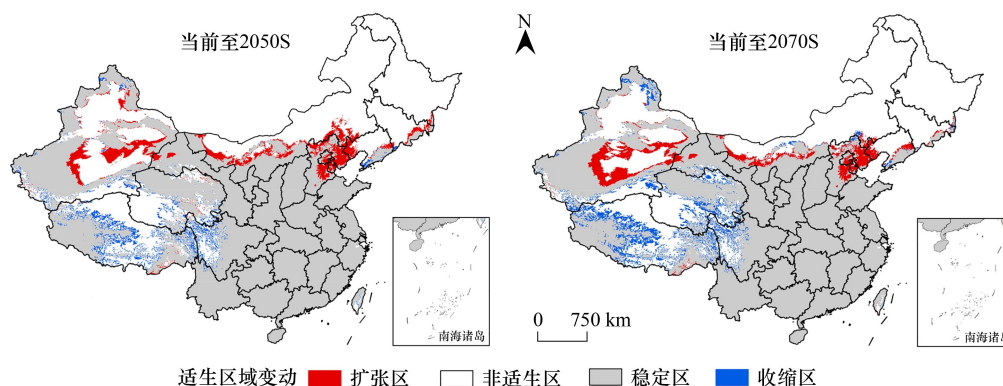


图6 胡瓜新小绥螨在不同时期分布区域变化

Fig.6 Shift of the distribution area of predatory mite *Neoseiulus cucumeris* at different times

由图8可知,胡瓜新小绥螨在3个不同时期的气候下的几何分布中心坐标分别为(102.619E, 33.242N)(Current)、(103.115E, 33.739N)(2050S)、(103.238E, 33.614N)(2070S),分布中心向东北方向迁移的距离分别为71.5 km、17.8 km,但在三个不同时期均位于四川省境内。

4 讨论

本研究基于MaxEnt模型对引种捕食螨胡瓜新小绥螨在我国的适生区域进行了首次预测,明确了影响其分布的主要气候因子,以及当前和未来气候条件下该捕食螨在我国的潜在分布情况。等温性、温度季节性变化标准差和最冷季度的降水量是影响胡瓜新小绥螨分布最重要的环境变量。它的适生区域占我国陆地面积的60%—63%,说明该生防天敌在我国的适生区域广泛,有很高的应用价值。它的各个适生区由沿海到内陆分别为高度适生区、中度适生区、低度适生区、不适生区,大致呈现扇形分布的分布。胡瓜新小绥螨三个时期的分布中心在都分布在四川省境内,并向东北方向迁移。未来气候条件下,胡瓜新小绥螨在37.19N—43.63N区域的适生面积有进一步扩大的趋势。

在利用MaxEnt模型探究环境变量对胡瓜新小绥螨分布的影响中发现,最冷季度的降水量(Bio_19)对胡瓜新小绥螨分布模型的贡献率最高。与此结果相似,在捕食螨智利小植绥螨和加州新小绥螨适生区的预测中也发现最冷季节的降水量是主要环境因子之一^[35—37],这表明最冷季度的降水量对植绥螨科这三种捕食螨的潜在分布有重要影响。据报道,胡瓜新小绥螨的适宜发育温度在20—32℃,相对湿度在60%—82% RH^[38—40]。本次模型预测其适生区和最适生区主要分布于北纬30°(秦岭淮河)以南,根据中国气候公报和统计年鉴,秦岭淮河以南地区的年均温在15℃以上,而到了南岭以南的南部沿海地区,年均温在20℃以上,南方主要城市的相对湿度在65%—80%,基本符合胡瓜新小绥螨对温度和湿度的要求,证明了模型的准确性。受降水量影响的湿度对捕食螨的生存有关键作用,这与以往研究发现胡瓜新小绥螨、加州新小绥螨和智利小植绥螨在低湿度条件下孵化率很低的结果一致^[38]。此外,在低温下温度和湿度这两个影响生物生存的环境因

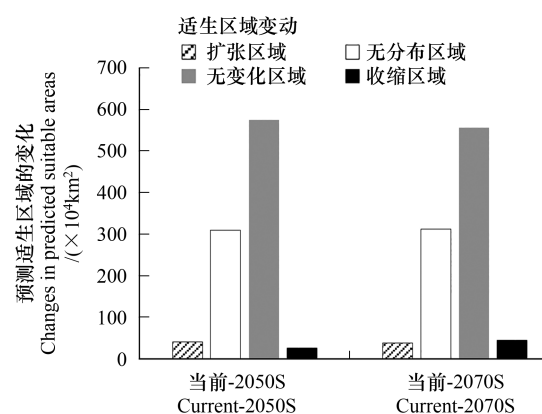


图7 不同时期胡瓜新小绥螨适生区面积变化

Fig.7 Changes in suitable areas of predatory mite *Neoseiulus cucumeris* at different times

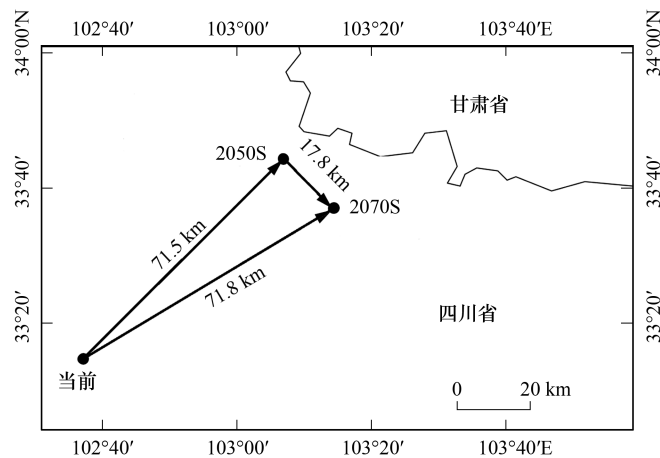


图 8 三个时期胡瓜新小绥螨分布中心的迁移路线

Fig.8 Migration routes of the distribution center of predatory mite *Neoseiulus cucumeris* in the three periods

子共同决定了捕食螨的存活,具有交互效应。等温性和温度的季节性这两个环境因子也对胡瓜新小绥螨的分布也有重要影响。因此本研究推测是否成功越冬是限制胡瓜新小绥螨分布的决定因素。我国东南沿海地区冬季温度相对较高,且比内陆地区降水量相对较高,因此有利于该捕食螨的存活。

胡瓜新小绥螨除了在内蒙古自治区东北部、黑龙江省、吉林省、辽宁省、新疆维吾尔自治区北部、青海省西南部、西藏自治区不适生,在我国其他地区都有分布,这可能是由于这些省份冬季温度低或降水量低有关。在本研究中,发现胡瓜新小绥螨在我国的适生区占比约为 60%,与我国的本土捕食螨加州新小绥螨相比,其高度适生区和中度适生区都比较低^[36],表明引种捕食螨胡瓜新小绥螨在适应性方面不足。虽然这两种捕食螨在分布区域占我国陆地面积的比例上存在一定的差异,但它们的大部分的潜在适生区均位于我国东南沿海的各省份,同时这两物种均属于新小绥螨属。已有报道表明集团内捕食在捕食螨中普遍发生^[29],且这两种捕食螨之间也存在互相捕食^[29-30]。此外这两种捕食螨均以叶螨为食。胡瓜新小绥螨的田间释放和定殖可能会导致两者的生境重叠,进而可能引发种间的生殖干扰和竞争。因此,胡瓜新小绥螨的定殖和扩散可能对本土捕食螨种群存在潜在不利影响。

全球气候变化将如何影响生物多样性的地理分布是生态学和保护生物学的一个关键问题^[41-43]。据研究,不同物种间的栖息地迁移变化方向和速率不同,但是整体上每 10 年以 11 m 的中位速度向高海拔地区迁移,每十年以 16.9 km 的中位速度向更高纬度地区迁移^[44]。本研究中预测了在低排放量的情境下胡瓜新小绥螨的未来分布情况,发现适生区域扩增的地区主要分布在内蒙古和新疆等纬度较高的地区。与胡瓜新小绥螨相反,加州新小绥螨的高适生区和中适生区在未来有缩减的趋势^[37]。这可能是由于两种捕食螨对环境因子的不同适应性所导致的。这种差异也可能来源于未来环境因子水平的不同,针对加州新小绥螨的研究充分考虑了不同碳排放水平下的气候变化,而本研究中采用了低排放量水平下的环境因子。胡瓜新小绥螨的低适生区将会缩减,主要分布于西藏自治区等海拔较高且处于内陆,可能全球变暖导致其降雨量下降,不利于捕食螨的生存。

本次实验中 MaxEnt 模型 3 次预测的 AUC 值虽达到“好”的标准,但是模型预测的 AUC 值并没有达到“极好”的标准,说明模型仍存在一定的不足,可能是由于筛选环境因子时设置阈值相对较低^[23],也可能归因于参与模型构建的分布点较少,导致用于构建模型的数据具有一定的局限性,使 MaxEnt 模型的准确性不足^[25]。本研究中只考虑部分非生物因素对新小绥螨的影响,未考虑如海拔、光周期、土地利用类型等非生物因素。同时也未考虑人类活动、猎物种类和分布等生物因素的影响。因此,增加新的分布点数据,并充分考虑各种因子将会进一步提高预测模型的准确性。

5 结论

胡瓜新小绥螨在我国 40°N 以南地区分布概率高,适生面积广,推测在这些中高度适生区进行田间释放和生物防治将会取得更好的成效。根据环境因素对其适生性的影响,最冷季节的降水量、等温性和温度的季节性是限制其分布的重要因子。据此通过品种优化来提高它对温度和湿度的适应性是扩大其应用的重要策略之一。然而,引种胡瓜新小绥螨与加州新小绥螨在潜在适生区有相似性,进一步通过物种分布模型预测两种捕食螨的地理分布重叠和生态位重叠情况,并明确引种风险对本土天敌资源的保护利用至关重要。

参考文献 (References):

- [1] van Lenteren J C. The state of commercial augmentative biological control: plenty of natural enemies, but a frustrating lack of uptake. *BioControl*, 2012, 57(1): 1-20.
- [2] 徐学农, 吕佳乐, 王恩东. 捕食螨在中国的研究与应用. *中国植保导刊*, 2013, 33(10): 26-34.
- [3] Knapp M, van Houten Y, van Baal E, Groot T. Use of predatory mites in commercial biocontrol: current status and future prospects. *Acarologia*, 2018, 58: 72-82.
- [4] McMurtry J A, De Moraes G J, Sourassou N F. Revision of the lifestyles of phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae) and implications for biological control strategies. *Systematic and Applied Acarology*, 2013, 18(4): 297.
- [5] 全林发, 徐海明, 董易之, 阙引利, 陈炳旭. 胡瓜新小绥螨对荔枝叶螨的控制潜力. *中国生物防治学报*, 2019, 35(6): 835-840.
- [6] 张礼生, 陈红印. 我国天敌昆虫与生防微生物资源引种三十年成就与展望. *植物保护*, 2016, 42(5): 24-32.
- [7] Zhang Y X, Chen X, Wang J P, Zhang Z Q, Wei H, Yu H Y, Zheng H K, Chen Y, Zhang L S, Lin J Z, Sun L, Liu D Y, Tang J, Lei Y, Li X M, Liu M. Genomic insights into mite phylogeny, fitness, development, and reproduction. *BMC Genomics*, 2019, 20(1): 954.
- [8] Li G Y, Zhang Z Q. Some factors affecting the development, survival and prey consumption of *Neoseiulus cucumeris* (Acari: Phytoseiidae) feeding on *Tetranychus urticae* eggs (Acari: Tetranychidae). *Systematic and Applied Acarology*, 2016, 21(5): 555.
- [9] Li G Y, Zhang Z Q. Can supplementary food (pollen) modulate the functional response of a generalist predatory mite (*Neoseiulus cucumeris*) to its prey (*Tetranychus urticae*)? *BioControl*, 2020, 65(2): 165-174.
- [10] Dalir S, Hajiqaibar H, Fathipour Y, Khanamani M. Age-dependent functional and numerical responses of *Neoseiulus cucumeris* (Acari: Phytoseiidae) on two-spotted spider mite (Acari: Tetranychidae). *Journal of Economic Entomology*, 2021, 114(1): 50-61.
- [11] Dalir S, Hajiqaibar H, Fathipour Y, Khanamani M. A comprehensive picture of foraging strategies of *Neoseiulus cucumeris* and *Amblyseius swirskii* on western flower thrips. *Pest Management Science*, 2021, 77(12): 5418-5429.
- [12] Yazdanpanah S, Fathipour Y, Riahi E, Zalucki M P. Mass production of *Neoseiulus cucumeris* (Acari: Phytoseiidae): an assessment of 50 generations reared on almond pollen. *Journal of Economic Entomology*, 2021, 114(6): 2255-2263.
- [13] Yari S, Hajiqaibar H, Farazmand A, Rashed A, Fathipour Y. Efficacy assessment of *Neoseiulus cucumeris* at different release rates in control of *Frankliniella occidentalis* on rose plants under laboratory and microcosm conditions. *Systematic and Applied Acarology*, 2023: 607-618.
- [14] 滕明坤, 刘俊, 陆雨婷, 程向元, 王誉栋. 气候变化下野生扬子鳄(鳄目:短吻鳄科)在中国的分布模拟. *生态学报*, 2023, 43(13): 5442-5452.
- [15] Hansen J, Sato M, Ruedy R. Perception of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(37): E2415-E2423.
- [16] Chen I C, Hill J K, Ohlemüller R, Roy D B, Thomas C D. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 2011, 333(6045): 1024-1026.
- [17] Paaijmans K P, Heinig R L, Seliga R A, Blanford J I, Blanford S, Murdock C C, Thomas M B. Temperature variation makes ectotherms more sensitive to climate change. *Global Change Biology*, 2013, 19(8): 2373-2380.
- [18] Forrest J R. Complex responses of insect phenology to climate change. *Current Opinion in Insect Science*, 2016, 17: 49-54.
- [19] 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.
- [20] 姚政宇, 韩其飞, 林彬. 基于最大熵模型的新疆主要有毒杂草分布区预测. *生态学报*, 2023, 43(12): 5096-5109.
- [21] Guisan A, Thuiller W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 2005, 8(9): 993-1009.
- [22] Kurnaz M. Geographic distribution of two *Montivipera taxa* using ecological niche modeling. *Journal of Biosciences*, 2023, 48(1): 7.
- [23] 朱耿平, 刘晨, 李敏, 刘强. 基于 Maxent 和 GARP 模型的日本双棘长蠹在中国的潜在地理分布分析. *昆虫学报*, 2014, 57(5): 581-586.
- [24] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 肖启明, 戴良英. 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*, 2007, 15(4): 365-372.
- [25] 陈新美, 雷渊才, 张雄清, 贾宏炎. 样本量对 MaxEnt 模型预测物种分布精度和稳定性的影响. *林业科学*, 2012, 48(1): 53-59.
- [26] Hernandez P A, Graham C H, Master L L, Albert D L. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species

- distribution modeling methods. *Ecography*, 2006, 29(5): 773-785.
- [27] Wisz M S, Hijmans R J, Li J, Peterson A T, Graham C H, Guisan A. Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions*, 2008, 14(5): 763-773.
- [28] Bean W T, Stafford R, Brashares J S. The effects of small sample size and sample bias on threshold selection and accuracy assessment of species distribution models. *Ecography*, 2012, 35(3): 250-258.
- [29] Schausberger P, Croft B A. Cannibalism and intraguild predation among phytoseiid mites: are aggressiveness and prey preference related to diet specialization? *Experimental & Applied Acarology*, 2000, 24(9): 709-725.
- [30] Mendel D, Schausberger P. Diet-dependent intraguild predation between the predatory mites *Neoseiulus californicus* and *Neoseiulus cucumeris*. *Journal of Applied Entomology*, 2011, 135(4): 311-319.
- [31] Zhang K L, Yao L J, Meng J S, Tao J. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 1326-1334.
- [32] 李璇, 李垚, 方炎明. 基于优化的 Maxent 模型预测白栎在中国的潜在分布区. *林业科学*, 2018, 54(8): 153-164.
- [33] 王茹琳, 李庆, 封传红, 石朝鹏. 基于 MaxEnt 的西藏飞蝗在中国的适生区预测. *生态学报*, 2017, 37(24): 8556-8566.
- [34] Phillips H R P, Guerra C A, Bartz M L C, Briones M J I, Brown G, Crowther T W, Ferlian O, Gongalsky K B, van den Hoogen J, Krebs J, Orgiazzi A, Routh D, Schwarz B, Bach E M, Bennett J, Brose U, Decaëns T, König-Ries B, Loreau M, Mathieu J, Mulder C, van der Putten W H, Ramirez K S, Rillig M C, Russell D, Rutgers M, Thakur M P, de Vries F T, Wall D H, Wardle D A, Arai M, Ayuke F O, Baker G H, Beauséjour R, Bedano J C, Birkhofer K, Blanchart E, Blossey B, Bolger T, Bradley R L, Callahan M A, Capowiez Y, Caulfield M E, Choi A, Crotty F V, Dávalos A, Diaz Cosin D J, Dominguez A, Duhour A E, van Eekeren N, Emmerling C, Falco L B, Fernández R, Fonte S J, Fragoso C, Franco A L C, Fugère M, Fusilero A T, Gholami S, Gundale M J, López M G, Hackenberger D K, Hernández L M, Hishi T, Holdsworth A R, Holmstrup M, Hopfensperger K N, Lwanga E H, Huhta V, Hurisso T T, Iannone B V 3rd, Iordache M, Joschko M, Kaneko N, Kanianska R, Keith A M, Kelly C A, Kernecker M L, Klaminder J, Koné A W, Kooch Y, Kukkonen S T, Lalthanzara H, Lammel D R, Lebedev I M, Li Y Q, Jesus Lidon J B, Lincoln N K, Loss S R, Marichal R, Matula R, Moos J H, Moreno G, Morón-Ríos A, Muys B, Neirynck J, Norgrove L, Novo M, Nuutinen V, Nuzzo V, Mujeeb R P, Pansu J, Paudel S, Pérès G, Pérez-Camacho L, Piñeiro R, Ponge J F, Rashid M I, Rebollo S, Rodeiro-Iglesias J, Rodríguez M Á, Roth A M, Rousseau G X, Rozen A, Sayad E, van Schaik L, Scharenbroch B C, Schirrmann M, Schmidt O, Schröder B, Seeber J, Shashkov M P, Singh J, Smith S M, Steinwandter M, Talavera J A, Trigo D, Tsukamoto J, de Valença A W, Vanek S J, Virto I, Wackett A A, Warren M W, Wehr N H, Whalen J K, Wironen M B, Wolters V, Zenkova I V, Zhang W X, Cameron E K, Eisenhauer N. Global distribution of earthworm diversity. *Science*, 2019, 366(6464): 480-485.
- [35] Wang R L, Jiang C X, Liu L, Shen Z H, Yang J T, Wang Y L, Hu J Y, Wang M T, Hu J Y, Lu X L, Li Q. Prediction of the potential distribution of the predatory mite *Neoseiulus californicus* McGregor in China using MaxEnt. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 29: e01733.
- [36] Chen L, Jiang C X, Zhang X Y, Song C C, Wang R L, Wang X, Li Q. Prediction of the potential distribution of the predatory mite *Neoseiulus californicus* (McGregor) in China under current and future climate scenarios. *Scientific Reports*, 2022, 12: 11807.
- [37] Liao J R, Ho C C, Chiu M C, Ko C C. Niche modeling may explain the historical population failure of *Phytoseiulus persimilis* in Taiwan: implications of biocontrol strategies. *Insects*, 2021, 12(5): 418.
- [38] De Courcy Williams M E, Kravar-garde L, Fenlon J S, Sunderland K D. Phytoseiid mites in protected crops: the effect of humidity and food availability on egg hatch and adult life span of *Iphiseius degenerans*, *Neoseiulus cucumeris*, *N. californicus* and *Phytoseiulus persimilis* (Acari: Phytoseiidae). *Experimental & Applied Acarology*, 2004, 32(1): 1-13.
- [39] 张艳璇, 林公羽, 魏辉, 林坚贞, 田瑞冬, 陈霞, 孙莉, 曾宜. 从捕食者、猎物的生物学分析胡瓜新小绥螨对针叶小爪螨的控制作用. *应用昆虫学报*, 2016, 53(1): 55-63.
- [40] Yazdanpanah S, Fathipour Y, Riahi E, Zalucki M P. Modeling temperature-dependent development rate of *Neoseiulus cucumeris* (Acari: Phytoseiidae) fed on two alternative diets. *Environmental Entomology*, 2022, 51(1): 145-152.
- [41] Thomas C D. Climate, climate change and range boundaries. *Diversity and Distributions*, 2010, 16(3): 488-495.
- [42] Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 2012, 15(4): 365-377.
- [43] Ehrlén J, Morris W F. Predicting changes in the distribution and abundance of species under environmental change. *Ecology Letters*, 2015, 18(3): 303-314.
- [44] Trumbo D R, Burgett A A, Knouft J H. Testing climate-based species distribution models with recent field surveys of pond-breeding amphibians in eastern Missouri. *Canadian Journal of Zoology*, 2011, 89(11): 1074-1083.