

DOI: 10.5846/stxb202107021766

姜明鑫, 钟文玉, 陈李林. 茶园重要捕食性天敌白斑猎蛛在中国的潜在适生区预测. 生态学报, 2022, 42(10): 4225-4235.

Jiang M X, Zhong W Y, Chen L L. Prediction of potential geographical distribution of predatory enemy *Evarcha albaria* in tea plantations in China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 4225-4235.

茶园重要捕食性天敌白斑猎蛛在中国的潜在适生区预测

姜明鑫^{1,2,3}, 钟文玉^{1,2,3}, 陈李林^{2,3,*}

1 福建农林大学安溪茶学院, 泉州 362406

2 闽台作物有害生物生态防控国家重点实验室, 福建农林大学植物保护学院, 福州 350002

3 安溪女茶师非遗传习所科技特派员工作站, 泉州 362406

摘要: 白斑猎蛛是茶园重要的捕食性天敌, 对茶园害虫生物防治起着重要作用。研究白斑猎蛛的潜在分布范围以及气候变暖对其分布潜在的影响, 对保护和利用白斑猎蛛, 充分发挥其对茶园害虫的生态调控作用具有重要意义。基于白斑猎蛛当前在中国的 163 个分布点和 6 个环境变量, 利用 MaxEnt 模型预测当前及未来 (2050 年) 2 种气候情景 (SSP2_4.5、SSP5_8.5) 下白斑猎蛛在中国的潜在适生区。结果显示, MaxEnt 模型对白斑猎蛛潜在适生区分布预测具有较好的准确度, 平均受试者工作特征曲线下面积 (AUC) 值为 0.852; 测试样本遗漏率与预测遗漏率基本吻合, 模型构建效果很好。白斑猎蛛在中国大部分省份均有分布, 当前适宜分布区总面积约为 429.93 万 km², 占国土总面积的 44.78%; 高适生区主要分布在山东、河南、江苏、安徽、湖北、重庆、浙江、江西、湖南、贵州、福建。未来气候情景下, 白斑猎蛛潜在适生区面积呈扩大趋势, 主要体现在新疆、吉林、辽宁、内蒙古、陕西、广东、广西、海南的适生区范围扩张。在 SSP5_8.5 气候情景下, 总适生区面积变化最大, 由当前的 429.93 万 km² 增加到 562.22 万 km², 增幅达 30.77%。未来两种气候情景下, 白斑猎蛛的潜在适生区范围相对当前均有不同程度的扩大和北移。利用 Jackknife 刀切法计算得到影响白斑猎蛛潜在分布的主要环境变量为最冷月份最低温 (bio6)、最湿月份降水量 (bio13)、最干月份降水量 (bio14) 和最暖季平均温度 (bio10)。白斑猎蛛广泛分布于中国大部分地区, 未来气候条件有利于其生存和繁殖。应加强白斑猎蛛的保护和利用, 充分挖掘并发挥其对茶园害虫的控害作用, 减少茶园化学农药使用, 保障茶叶安全优质生产和茶产业的可持续发展。

关键词: 蜘蛛; 生物防治; 最大熵模型; 潜在分布区

Prediction of potential geographical distribution of predatory enemy *Evarcha albaria* in tea plantations in China

JIANG Mingxin^{1,2,3}, ZHONG Wenyu^{1,2,3}, CHEN Lilin^{2,3,*}

1 Anxi Tea College, Fujian Agriculture and Forestry University, Quanzhou 362406, China

2 State Key Laboratory of Ecological Pest Control in Fujian and Taiwan Crops, College of Plant Protection, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

3 Anxi County Female Tea Master Intangible Cultural Heritage Institute Science and Technology Commissioner Workstation, Quanzhou 362406, China

Abstract: *Evarcha albaria* (L. Koch) is an important predatory enemy in tea plantations, which plays an important role in biological control of pests in tea plantations. To study the potential distribution range of the *E. albaria* and the potential impact of climate warming on its distribution is of great significance for protecting and utilizing the *E. albaria* and giving full

基金项目: 福建省创新战略研究计划项目 (2020R0036); 国家自然科学基金项目 (31501650); 福建农林大学科技创新专项基金 (CXZX2019009G); 福建农林大学茶产业链科技创新与服务体系建设项目 (K1520005 A03)

收稿日期: 2021-07-02; 网络出版日期: 2022-01-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: llchen@fafu.edu.cn

play to its ecological regulation on pests in tea plantations. In this study, based on the current 163 distribution sites and 6 environmental variables in China, the maximum entropy model (MaxEnt) was used to predict the potential distribution regions of the *E. albaria* in current and future (2050) under two climate scenarios (SSP2_4.5 and SSP5_8.5) in China. The results showed that the MaxEnt model had a good accuracy in predicting the distribution of potential suitable regions of the *E. albaria*, and the average area under the receiver operating characteristic curve (AUC) value was 0.852; The missing rate of test samples was basically consistent with the predicted missing rate, and the model construction effect was very good. The suitable distribution regions of the *E. albaria* were about 4.2993 million km², accounting for 44.78% of the total area of China. The high suitable regions were mainly distributed in Shandong, Henan, Jiangsu, Anhui, Hubei, Chongqing, Zhejiang, Jiangxi, Hunan, Guizhou, and Fujian in current. Under the future climate scenarios, the potential suitable regions of the *E. albaria* were expanding, mainly in Xinjiang, Jilin, Liaoning, Inner Mongolia, Shaanxi, Guangdong, Guangxi, and Hainan. Under the SSP5_8.5 climate scenario, the total suitable regions changed the most, from the current 4.2993 million km² to 5.6222 million km², an increase of 30.77%. Under the two future climate scenarios, the potential suitable distribution regions of the *E. albaria* will expand and move northward in varying degrees compared with the current. The main environmental variables affecting the potential distribution of the *E. albaria* were the lowest temperature in the coldest month (bio6), the precipitation in the wettest month (bio13), the precipitation in the driest month (bio14), and the average temperature in the warmest season (bio10), which calculated by Jackknife method. The *E. albaria* is widely distributed in most regions of China, and the future climate conditions are conducive to its survival and reproduction. In order to ensure the safe and high-quality production of tea and the sustainable development of tea industry, it is necessary to strengthen the protection and utilization of the *E. albaria*, fully exploit and play its biological control, and reduce the use of chemical pesticides in tea plantations.

Key Words: spider; biological control; maximum entropy model; potential geographical distribution

化学农药防治茶树病虫害快速、高效且简易,但长期不科学合理使用带来的“3R”问题严重影响茶叶质量安全及茶产业的可持续发展^[1-2]。生物防治作为解决茶叶质量安全问题的重要途径之一,在茶园病虫害绿色防控体系中有广阔的应用前景^[2-3],该防治方法可通过保护、利用或释放天敌,将害虫控制在经济阈值水平之下^[4]。茶园中常见捕食性天敌包括蜘蛛、螳螂、瓢虫、捕食性步甲、猎蝽、食蚜蝇、草蛉等,蜘蛛是种类最多、数量最大的一个类群,其发生量占捕食性天敌的 65.0%—97.8%,对茶园害虫具有很好的生物防治效果^[5-6]。陈伯刚^[7]调查 10 多年未施用化学农药茶园发现,茶园主要害虫的种群数量随蜘蛛种群数量的上升而下降。白斑猎蛛 *Evarcha albaria* (L. Koch) 隶属跳蛛科 Salticidae 猎蛛属 *Evarcha*,是茶园蜘蛛优势种之一,也是茶园中重要的捕食性天敌^[8-9]。Yang 等^[10]调查发现白斑猎蛛占茶冠层蜘蛛总数的 43.2%,与假眼小绿叶蝉 *Empoasca vitis* (Göthe) 时间生态位重叠值达 1.28,目的 DNA 片段阳性率达 54.2%,对假眼小绿叶蝉的控制潜力最大。高景林等^[11]研究发现,白斑猎蛛雌蛛对假眼小绿叶蝉若虫和成虫的平均日捕食量分别达 24.6、21.4 头,雄蛛分别达 26.9、12.2 头。在猎物密度 1 : 10 时,48 h 后白斑猎蛛可降低假眼小绿叶蝉虫口数的 87%^[12]。白斑猎蛛对假眼小绿叶蝉诱导的茶树挥发物具有显著趋向性,能明显延长白斑猎蛛在觅食斑块中的停留时间^[13-14]。Yang 等^[15]对茶园 9 种主要蜘蛛捕食茶尺蠖 *Ectropis obliqua* (Prout) 幼虫效果进行评价,发现白斑猎蛛与茶尺蠖时间生态位重叠值达 1.71。袁龙宇^[16]研究发现白斑猎蛛对茶尺蠖 1、2 龄幼虫捕食率分别为 50.0%、40.0%;对拍网法采集到的白斑猎蛛进行检测,发现目的 DNA 片段阳性率达 44.2%,可见白斑猎蛛对茶尺蠖具有较强的捕食作用。充分保护利用并发挥白斑猎蛛在茶园害虫种群密度调控、茶园生态平衡维持等方面的关键作用,对茶园害虫生物防治具有重要意义。

政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental panel on climate change, IPCC) 第六次气候变化评估报告指出,在所有温室气体排放情景下,全球升温都将在本世纪 30 年代突破 1.5℃,并将保持在 1.5℃ 以上,直至本世纪末^[17]。气候变暖会影响物种的越冬存活率、世代数、迁移扩散、发生分布和发生物候等^[18]。前人研究发现,在未来气候变暖背景下,两种洞穴蜘蛛 *Meta bourneti* Simon 和 *Meta menardi* Latreille 的适生区面积和适生

范围均有不同程度的扩大^[19]。因此,探讨并明确白斑猎蛛在全球气候变暖背景下适生区范围和适生程度的变化,可为其保护和利用提供重要的参考依据。

生态位模型(Ecological niche models, ENMs)是利用物种已知分布数据及环境数据,依据特定算法模拟该物种的生态位需求,并将其应用到预测区域,从而得到目标物种的适生区域^[20]。常用的生态位模型有 MaxEnt、CLIMEX、GARP 和 Bioclim 等。MaxEnt 模型是一种以最大熵理论为基础预测物种地理分布的模型,操作便捷、运行速度快,且在物种分布数据较少的情况下准确性也很高^[21-22]。该模型目前广泛应用于物种适生区预测,如中华淡翅盲蝽 *Tytthus chinensis* Stål 和黑肩绿盲蝽 *Cyrtorhinus lividipennis* Reuter^[23],异色瓢虫 *Harmonia axyridis* Pallas、轮背猎蝽 *Arilus cristatus* L.和热带火蚁 *Solenopsis geminata* (Fabricius)^[24]。

本研究基于白斑猎蛛在中国的已知分布点及气候数据,利用 MaxEnt 模型预测当前及未来气候变化情景下白斑猎蛛在中国的潜在地理分布,以期更好地保护捕食性天敌白斑猎蛛,最大程度地发挥其对茶园害虫的生物防治效果,对建立绿色环保、可持续发展的茶园具有重要的理论指导作用和科学意义。

1 材料与方法

1.1 白斑猎蛛分布数据

白斑猎蛛分布数据主要来源于国内外公开发表的文献资料及 GBIF 网站(<http://www.gbif.org/>),经收集整理共获得 232 个分布点。对分布点进行处理和筛选:去除无效和重复的分布点;无明确经纬度信息的分布点,利用百度地图拾取坐标系统进行定位,补充经纬度信息;为减少分布点之间空间关联性较大对模型预测结果造成过拟合影响,利用 ArcGIS 缓冲区分析法对分布点进行筛选,由于环境变量空间分辨率为 2.5 arc-minutes(约 4.5 km),故设置缓冲半径为 1.5 km,当分布点之间距离小于 3.0 km 时,只保留其中一点^[25],最终获得 163 个分布点(图 1)。

1.2 环境数据

当前(1970—2000 年均值)和未来 2050 年(2041—2060 年均值)的环境变量均来源于 WorldClim 网站(<https://www.worldclim.org/>),空间分辨率为 2.5 arc-minutes(表 1)。未来气候数据选择第六次国际耦合模式比较计划(Coupled model intercomparison project 6, CMIP6)中 BCC—CSM2—MR 气候模式下 SSP2_4.5 和 SSP5_8.5 两种气候情景。利用 ArcGIS 软件提取中国 19 个环境变量,并将其转换为 ASCII 格式用于后续建模。

由于环境变量之间存在相关性,为避免影响模型预测精度,环境变量经相关分析后才可用于模型预测^[26]。首先,在 MaxEnt 模型中利用刀切法获得 19 个环境变量的贡献率;再利用 SPSS 软件对 19 个环境变量进行 Pearson 相关分析,若两个变量间的相关系数 $|r| > 0.8$,则选取贡献率大的变量进入模型^[27]。最终用于后续建模的变量包括昼夜温差与年温差比值(bio3)、最冷月份最低温(bio6)、最湿季平均温度(bio8)、最暖季平均温度(bio10)、最湿月份降水量(bio13)、最干月份降水量(bio14)共 6 个变量。经检验,6 个变量之间的相关系数均小于 0.8(表 2),可用于白斑猎蛛潜在适生区预测。

1.3 地图数据

本研究使用的中国行政边界底图来源于中国科学院资源环境科学数据中心发布的 2015 年中国省级行政

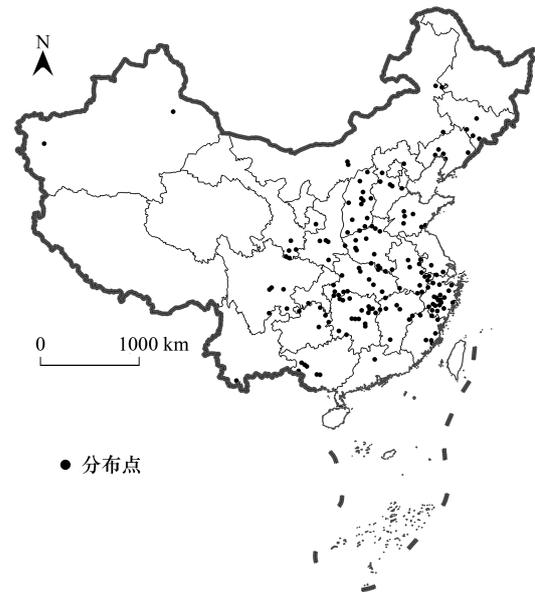


图 1 白斑猎蛛分布点

Fig.1 The geographical distribution of *Evarcha albaria*

边界数据(<http://www.resdc.cn>)。

表 1 环境变量描述

Table 1 Description of environmental variables

变量 Variable	描述 Details	变量 Variable	描述 Details	变量 Variable	描述 Details
bio1	年平均温/°C	bio8	最湿季平均温度/°C	bio15	降水量变化方差
bio2	昼夜温差月均值/°C	bio9	最干季平均温度/°C	bio16	最湿季降水量/mm
bio3	昼夜温差与年温差比值/°C	bio10	最暖季平均温度/°C	bio17	最干季降水量/mm
bio4	温度变化方差/°C	bio11	最冷季平均温度/°C	bio18	最暖季平均降水量/mm
bio5	最热月份最高温/°C	bio12	年平均降水量/mm	bio19	最冷季平均降水量/mm
bio6	最冷月份最低温/°C	bio13	最湿月份降水量/mm		
bio7	年温变化范围/°C	bio14	最干月份降水量/mm		

表 2 白斑猎蛛主要环境变量相关性分析

Table 2 Correlation analysis of main environmental variables for *Evarcha albaria*

	bio3	bio6	bio8	bio10	bio13	bio14
bio3	1					
bio6	0.134	1				
bio8	0.123	0.368	1			
bio10	-0.042	0.734	0.664	1		
bio13	-0.017	0.592	0.089	0.425	1	
bio14	-0.335	0.688	0.004	0.602	0.634	1

1.4 应用模型及软件

MaxEnt 模型:版本 3.4.1(http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/MaxEnt/);ArcGIS 软件:版本 10.3;SPSS 软件:版本 19.0。

1.5 MaxEnt 模型构建参数设置

将白斑猎蛛的分布数据和筛选后的环境变量导入 MaxEnt 模型中,随机选取 75%的分布点作为训练集,剩余 25%的分布点作为测试集。最大迭代次数设置为 5000,阈值为 10 percentile training presence。运行创建响应曲线 Create response curves、制作预测图 Make pictures of predictions、刀切法 Do jackknife to measure variable importance 功能。模型重复运行 10 次,以 Logistic 格式输出结果,其他参数为默认值。

1.6 模型预测结果评价

MaxEnt 模型预测准确性检验通过遗漏率与 ROC(Receiver operating characteristic,ROC)曲线下面积 AUC(Area under curve,AUC)值来判断。遗漏率是对使用的数据在特定的阈值上进行评估,测试遗漏率与理论遗漏率保持一致表示模型表现良好,若测试遗漏率高于或低于理论遗漏率,则表示建模数据存在空间自相关^[28]。AUC 值作为模型预测准确度的衡量指标,取值范围为 0—1,AUC 值越大代表模型预测结果越准确^[29],评价标准见表 3。

表 3 AUC 评价标准

Table 3 Evaluation standard of AUC

AUC 取值范围 Value range of AUC	评价标准 Evaluation standard	AUC 取值范围 Value range of AUC	评价标准 Evaluation standard
0.5≤AUC 值<0.6	失败	0.8≤AUC 值<0.9	准确
0.6≤AUC 值<0.7	一般	0.9≤AUC 值<1.0	极准确
0.7≤AUC 值<0.8	较准确		

AUC:接受者操作特征曲线下面积值 Area Under Curve

1.7 适生等级划分

利用 ArcGIS 软件对 MaxEnt 模型的运行结果进行可视化处理,即利用 ArcToolbox 中 Conversion tools 把 MaxEnt 模型输出的 ASCII 格式文件转化为 Raster 格式,再通过 Spatial analyst 工具中 Reclass 功能进行重分类,参照张玉^[30]的适生区等级划分方法将白斑猎蛛潜在适生区划分为 4 个等级:0.00—0.08 为非适生区,0.08—0.23 为低适生区,0.23—0.46 为中适生区,0.46—1.00 为高适生区。

2 结果

2.1 模型预测准确度评价

对 MaxEnt 模型输出结果进行准确度评价,数值为 10 次重复建模的均值。测试样本的遗漏率与预测遗漏率基本吻合,根据累计阈值的定义,表明模型构建效果很好,建模数据不存在空间自相关(图 2)。ROC 曲线显示,模型预测 AUC 均值为 0.852,标准差为 0.031(图 3)。依据 AUC 值评价标准,本次模型预测结果准确。综上所述此次建模结果可用于白斑猎蛛潜在适生区预测。

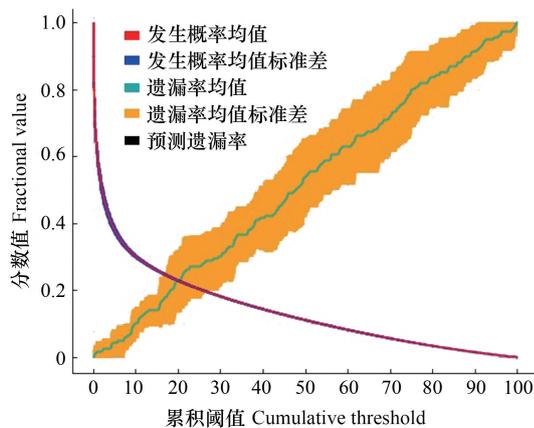


图 2 MaxEnt 模型预测遗漏率

Fig.2 Prediction omission of MaxEnt model

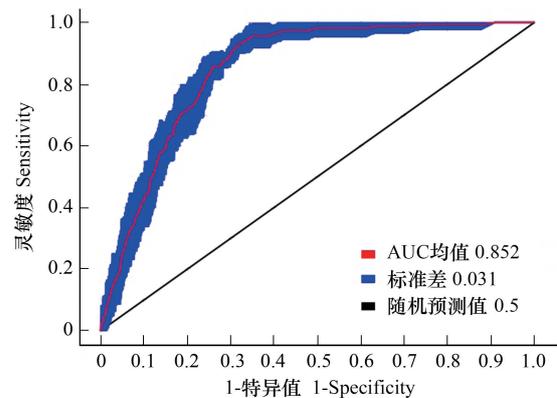


图 3 MaxEnt 模型 ROC 曲线

Fig.3 ROC curve of MaxEnt model

DOC: 接受者操作特征曲线;AUC: 曲线下面积值

2.2 当前气候情景下白斑猎蛛在中国的潜在适生区

白斑猎蛛当前在中国的潜在适生区范围广泛,全国大部分省份均有分布,总适生面积达 429.93 万 km^2 ,占国土总面积的 44.78%。高适生区面积为 237.12 万 km^2 ,主要分布于山东、河南、江苏、安徽、湖北、重庆、浙江、江西、湖南、贵州、福建大部分地区;辽宁东南部、河北东部和南部、山西南部、陕西中南部、甘肃南部、四川东部、云南东北部,广东、广西及新疆天山山脉东部局部地区。中适生区面积为 80.70 万 km^2 ,沿高适生区向周边延伸分布,主要位于吉林南部、辽宁西北部、河北北部、山西北部、陕西西北部、内蒙古南部和东部、甘肃南部、四川东南部、重庆西部、贵州西南部、福建南部以及广东、广西、海南和台湾的部分地区。低适生区面积为 112.11 万 km^2 ,主要分布于黑龙江中南部、吉林北部、内蒙古南部、宁夏、甘肃南部、四川南部、云南东部和北部、西藏东南部、新疆西北部、海南以及台湾部分地区(图 4)。以上适生区基本覆盖了白斑猎蛛的实际分布区域,表明模型预测结果与其实际分布较吻合。

2.3 未来气候情景下白斑猎蛛在中国的潜在分布区

2.3.1 未来气候情景下白斑猎蛛适生区面积变化

与当前气候相比,未来气候情景下白斑猎蛛在中国的适生区面积呈增加趋势。在 2050 年 SSP2_4.5 气候情景下,白斑猎蛛潜在适生区总面积为 540.21 万 km^2 ,占国土总面积的 56.27%,适生区面积较当前增加了 25.65%。其中,高适生区和低适生区面积增幅较大,与当前相比分别增加了 21.95% 和 40.11%。在 2050 年 SSP5_8.5 气候情景下,白斑猎蛛潜在适生区总面积为 562.22 万 km^2 ,占国土总面积的 58.56%,适生区面积较

当前增加了 30.77%。同样是高适生区和低适生区面积增幅较为显著,分别为 27.13%和 41.49%(表 4)。

综合 2050 年两种不同气候情景来看,在 SSP5_8.5 气候情景下,白斑猎蛛适生区面积增幅最大,说明在未来全球气候变暖背景下,白斑猎蛛对化石燃料为主的高浓度发展路径气候情景响应更加敏感。

2.3.2 未来气候情景下白斑猎蛛适生区范围变化

与当前气候相比,2050 年 SSP2_4.5 气候情景下,高适生区范围在吉林、辽宁、内蒙古、陕西、广东和广西扩大较多,新疆的高适生区范围在当前气候的基础上向四周有所扩张,台湾和海南也出现了高适生区分布。中适生区由当前吉林南部向北延伸至黑龙江东南部,黑龙江东南部由当前低适生区转变为中适生区,适生等级提高;内蒙古南部边缘地区、宁夏东部和南部的中适生区范围扩大;新疆塔里木盆地北部出现中适生区,广东和广西的中适生区范围缩小,由当前的中适生区转变为高适生区。低适生区范围扩大显著,在黑龙江向北延伸,内蒙古和新疆的低适生区范围扩大最为显著,甘肃、西藏中部和青海东部地区也出现了低适生区的零散分布,云南北部的低适生区范围扩大。在 2050 年 SSP5_8.5 气候情景下,白斑猎蛛适生区范围进一步扩大。新疆塔里木盆地北部出现高适生区分布,广西、广东和海南的高适生区范围扩大。中适生区在黑龙江北部、新疆塔里木盆地北部范围扩大,新疆天山山脉北部出现中适生区分布。低适生区的分布范围总体上继续向北延伸(图 5)。白斑猎蛛的适生范围呈向北向西延伸的趋势,未来气候变暖背景下,气候条件更加适宜白斑猎蛛生存,适生能力不断提高。

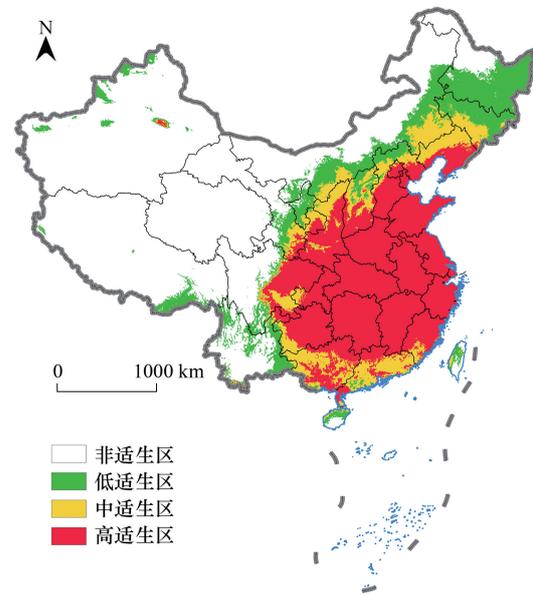


图 4 当前气候情景下白斑猎蛛在中国的潜在适生区分布图

Fig.4 Potentially suitable distribution regions of *Evarcha albaria* under the current climate scenario in China

表 4 当前和未来 2050 年不同气候情景下白斑猎蛛在中国的适生区面积/万 km²

Table 4 Suitable area in current and future 2050 of *Evarcha albaria* under different climate scenarios in China

气候情景 Climate scenario	高适生区面积 Highly suitable area	中适生区面积 Moderately suitable area	低适生区面积 Lowly suitable area	总面积 Total area	面积变化 Area change	面积变化比例/% Area change ratio
当前 Current	237.12	80.70	112.11	429.93		
SSP2_4.5	289.17	93.96	157.08	540.21	110.27	25.65
SSP5_8.5	301.45	102.15	158.62	562.22	132.29	30.77

SSP:共享社会经济路径 Shared Socioeconomic Pathway

2.4 影响白斑猎蛛分布的主导环境变量

根据 Jackknife 刀切图可以看出“仅此变量”建模时最冷月份最低温(bio6)、最湿月份降水量(bio13)、最干月份降水量(bio14)和最暖季平均温度(bio10)这 4 个变量对模型增益效果最显著(图 6);各环境变量对白斑猎蛛分布影响的贡献率显示,这 4 个变量的累计贡献率达 85%(表 5)。当“除此变量”建模时最冷月份最低温(bio6)模型预测结果降低最显著(图 6),说明最冷月份最低温(bio6)包含白斑猎蛛潜在适生区预测所需要的重要信息。综上所述,最湿月份降水量(bio13)、最干月份降水量(bio14)、最冷月份最低温(bio6)和最暖季平均温度(bio10)是影响白斑猎蛛分布的主导环境变量。

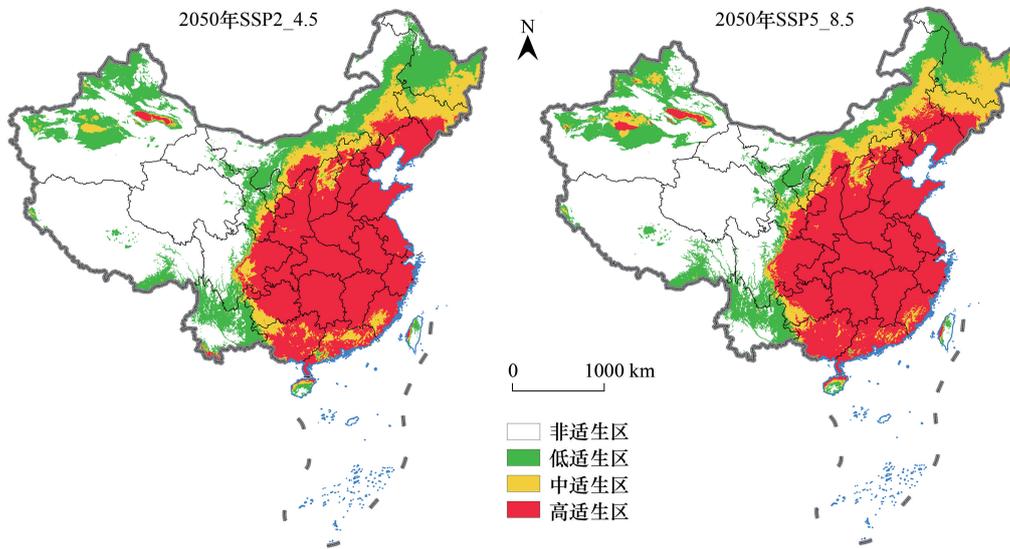


图 5 气候变化情景下白斑猎蛛在中国的适生区分布

Fig.5 Suitable distribution for *Evarcha albaria* in China under the changing climate scenarios

表 5 影响白斑猎蛛潜在分布的环境变量贡献率

Table 5 Contribution rate of environmental variables affecting potential suitable regions of *Evarcha albaria*

变量 Variable	贡献百分率/% Percent contribution	变量 Variable	贡献百分率/% Percent contribution	变量 Variable	贡献百分率/% Percent contribution
bio13	27.5	bio6	20.6	bio10	10.5
bio14	26.4	bio3	13.8	bio8	1.1

通过 MaxEnt 模型输出得到主导环境变量响应曲线,响应曲线表示白斑猎蛛适生程度与各环境变量之间的关系。参照白斑猎蛛适生等级,本文以 0.46 为阈值划分适合白斑猎蛛分布的环境变量范围。最冷月份最低温 (bio6) 适宜范围为 -10—10℃;0℃ 时,适生程度最大。最湿月份降水量 (bio13) 适宜范围为 150—550 mm;250 mm 时,适生程度最大。最干月份降水量 (bio14) 在 10—25 mm 时,适生程度逐渐增加;超过 25 mm 适生程度稳定。最暖季平均温度 (bio10) 在 18—30℃ 时,适生程度逐渐增加;超过 30℃ 适生程度稳定 (图 7)。

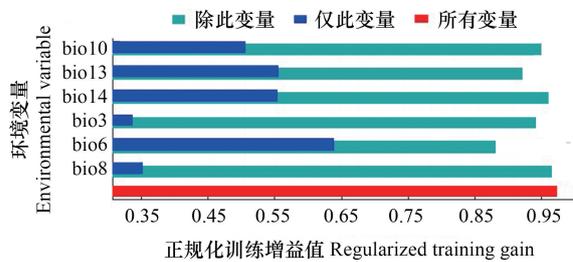


图 6 环境变量重要性刀切法检验

Fig.6 Jackknife test of the importance of environmental variables

3 讨论

本文利用 MaxEnt 模型预测白斑猎蛛在当前及未来 2050 年 2 种气候情景 (SSP2_4.5 和 SSP5_8.5) 下的潜在适生区分布,获得了不同气候条件下白斑猎蛛在中国的潜在适生区分布图;测试样本遗漏率与预测遗漏率基本吻合,AUC 均值为 0.852,预测结果准确。MaxEnt 模型预测结果显示,在当前气候条件下,白斑猎蛛高适生区主要位于中国辽宁、河北、山西、陕西、山东、河南、江苏、安徽、湖北、重庆、四川、浙江、江西、湖南、贵州、福建等地,与白斑猎蛛在中国的实际分布较为吻合,表明 MaxEnt 模型预测结果与实际分布相符,中国大部分省份的气候条件均适合白斑猎蛛生存。在未来气候变化情景下,白斑猎蛛适生范围北界向高纬度地区移动,高

适生区、中适生区及低适生区范围均有不同程度的扩大,吉林南部、内蒙古与辽宁和陕西交界处适生程度提高,由中适生区转变为高适生区;黑龙江东部和南部、内蒙古南部边缘地区适生程度提高,由低适生区转变为中适生区;新疆天山山脉北部及塔里木盆地北部低适生区大范围扩张,更多地区将适宜白斑猎蛛的生存。这反映了白斑猎蛛分布格局对未来全球气候变暖产生的响应和适应,与前人利用生态位模型预测未来气候变暖背景下棕色遁蛛 *Loxosceles reclusa* Gertsch & Mulaik^[31]、洞穴蜘蛛 *Meta bourneti* Simon 和 *Meta menardi* Latreille^[19] 的适生区变化趋势一致。Kwon 等^[32] 预测 2060 年 RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景下韩国白斑猎蛛的种群数量分别增加 13.6% 和 42.1%,且有向高纬度延伸的趋势。韩国与中国山东(34°22'N—38°23'N)和江苏北部(30°45'N—35°20'N)的纬度位置大致相同,气候条件类似,本研究也发现当前及未来气候情景下山东和江苏均为白斑猎蛛的高适生区。

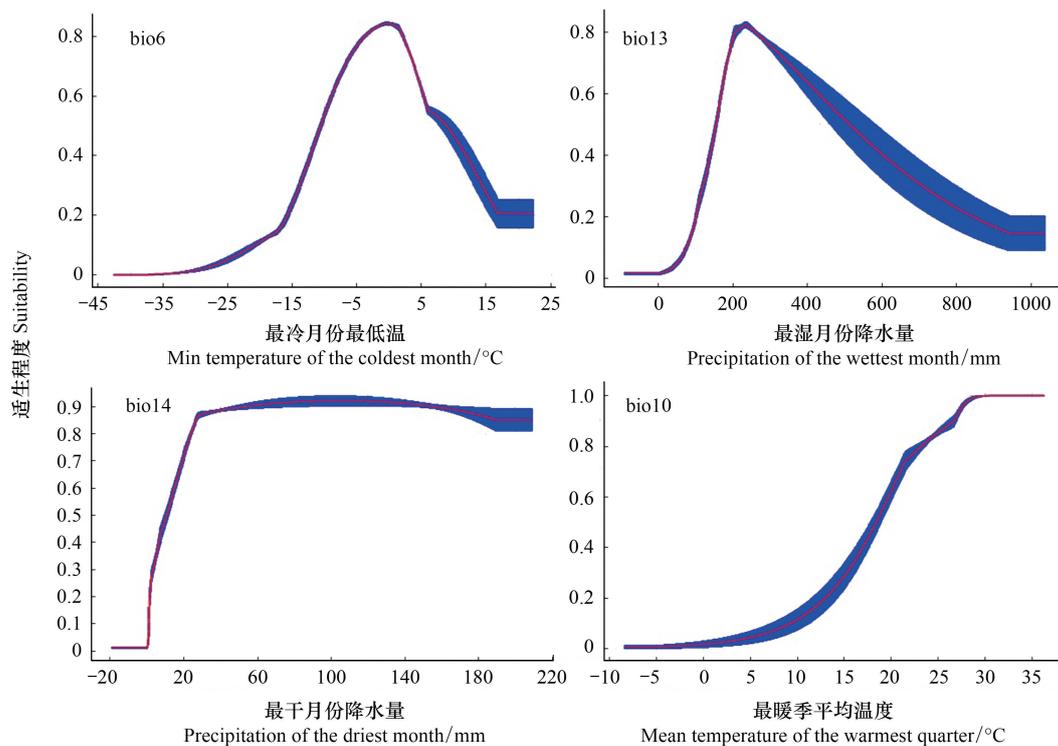


图 7 白斑猎蛛主导环境变量响应曲线

Fig.7 Response curves of dominant environmental variables of *Evarcha albaria*

MaxEnt 模型刀切法显示,温度是影响白斑猎蛛分布的主要环境因素,与赵敬钊^[33] 的研究结论相符,即温度是气候条件中对蜘蛛影响最大的因素。大多数蜘蛛发育起点温度在 10°C 左右^[33],随着全球气候变暖,高纬度地区的温度将满足白斑猎蛛发育起点温度,适宜其生存繁殖。Kwon 等^[32] 研究也指出温度与白斑猎蛛的种群数量具有显著相关性,随未来温度升高,白斑猎蛛种群数量呈上升趋势。适宜蜘蛛生存的温度范围为 15—30°C^[34],本研究也发现最暖季平均温度在 18—30°C 时,白斑猎蛛适生程度较高,并且随温度的升高适生程度逐渐提高。温度同时也是影响白斑猎蛛捕食效应的重要因素。捕食者对猎物的捕食效应受温度^[35]、猎物密度^[36]、空间异质性^[37] 及对猎物捕食偏好^[38] 等因素的影响,其中温度是最重要的影响因子之一。在适温范围内,随着温度升高,捕食者活动能力增强,体内新陈代谢加快,表现为攻击率上升,捕食效应增强^[39]。谭昭君等^[40] 和王国昌等^[41] 均研究发现,在适宜温度范围内,蜘蛛对猎物的捕食效应随温度的升高而增强。未来全球气候变暖背景下,白斑猎蛛的捕食效应也将呈增强趋势,在茶园中将发挥更重要的捕食作用。降水是影响白斑猎蛛分布另一个重要的环境因子,本研究发现最湿月份降水量是影响白斑猎蛛分布的主要因素。李金枝

等^[42]研究发现当降水量增多、相对湿度大于70%时,蜘蛛种群数量达到最大值(3.6头/m²)。蜘蛛喜湿^[5],但集中降雨对蜘蛛有一定的抑制作用,大雨或暴雨易使茶园土壤板结,破坏蜘蛛栖息环境,日降水量在30 mm以上且雨量集中,可使蜘蛛种群数量下降33%—50%^[43]。本研究也发现最湿月份降水量超过200 mm时,白斑猎蛛适生程度呈下降趋势,反映了过量降水对白斑猎蛛的抑制作用。

目前已有关于白斑猎蛛猎物灰茶尺蠖 *Ectropis griseascens* Warren 适生区预测的报道。陈李林等^[44]研究发现,未来气候条件下中国灰茶尺蠖适生范围将不断扩大。由本研究结果可知白斑猎蛛的适生范围远大于灰茶尺蠖的,且覆盖灰茶尺蠖未来适生区分布范围,可提前为白斑猎蛛创建适宜的生态环境,充分挖掘其对尺蠖的控制潜力。同时,白斑猎蛛也是假眼小绿叶蝉的主要天敌,白斑猎蛛种群增长能够抑制假眼小绿叶蝉种群的爆发,使假眼小绿叶蝉虫口数维持在防治指标之下,达到以蛛治虫的目的^[45]。天敌对目标害虫在数量、空间和时间上跟随关系密切与否决定了天敌对目标害虫的控制作用大小,跟随关系越密切,控制作用越大^[46]。前人研究发现,茶树上蜘蛛与假眼小绿叶蝉表现出天敌跟随效应,两者间存在显著正相关关系,蜘蛛对假眼小绿叶蝉具有潜在控制作用^[10, 47—51]。肖润林等^[52]研究发现稻草覆盖茶园蜘蛛密度由15.5只/m²增加到23.2只/m²,假眼小绿叶蝉密度由8.2只/m²减少到5.4只/m²,蜘蛛的增加能有效控制假眼小绿叶蝉的发生。因此,做好白斑猎蛛的保护工作对茶园生态调控具有重要意义。首先加强白斑猎蛛和茶园害虫预测预报,掌握天敌及害虫的发生动态,当茶园目标害虫为害水平在防控标准之下,可充分利用白斑猎蛛自然调控作用,无需用药^[53]。必要时选择对茶园害虫防效较好、对天敌安全的生物源农药,如印楝素、除虫菊、苦皮藤、藜芦碱、鱼藤酮、茶尺蠖核型多角体病毒 *Ectropis obliqua* nucleopolyhedrosis virus (*EoNPV*)、灰茶尺蠖核型多角体病毒 *Ectropis griseascens* nucleopolyhedrosis virus (*EgNPV*)、茶毛虫核型多角体病毒 *Euproctis pseudoconspersa* nucleopolyhedrosis virus (*EpNPV*)、苏云金芽孢杆菌 *Bacillus thuringiensis* Berliner (Bt) 等^[3, 54—57]。张晓玲等^[58]研究发现,在大部分原有茶树适宜分布区的基础上,未来茶树适生区向中国中高纬度地区扩张。本研究发现中国中高纬度大部分地区均为白斑猎蛛的适宜分布区,这些地区未来可通过在茶园铺草,强化茶园间作绿肥植物、杉树等生境管理措施,构建优良的茶园生态环境,为天敌蜘蛛提供避难所、栖息地、替代猎物等,增加天敌蜘蛛物种数和种群数量,提高茶园生物多样性,增强天敌蜘蛛对茶树害虫的自然联合控害潜能,为茶叶安全优质生产保驾护航^[49, 51, 59—61]。

参考文献 (References):

- [1] 郭灿, 高秀兵, 何莲, 张钦, 孟泽洪, 吕召云, 陈娟. 茶树病虫害生物防治应用研究进展. 广东农业科学, 2014, 41(6): 105-109.
- [2] 陈宗懋, 蔡晓明, 周利, 边磊, 罗宗秀. 中国茶园有害生物防控40年. 中国茶叶, 2020, 42(1): 1-8.
- [3] Ye G Y, Xiao Q, Chen M, Chen X X, Yuan Z J, Stanley D W, Hu C. Tea: biological control of insect and mite pests in China. *Biological Control*, 2014, 68: 73-91.
- [4] 戈峰. 论害虫生态调控策略与技术. 应用昆虫学报, 2020, 57(1): 10-19.
- [5] 陈银方, 宋昌琪, 刘文炜. 中国茶园蜘蛛调查和保护研究综述. 浙江农业科学, 2004, (6): 343-345.
- [6] Chen L L, You M S, Chen S B. Effects of cover crops on spider communities in tea plantations. *Biological Control*, 2011, 59(3): 326-335.
- [7] 陈伯刚. 蜘蛛对茶园害虫控制作用的研究. 蛛形学报, 2003, 12(2): 125-127.
- [8] Zhang Z Q, Zhou C, Xu Y Y, Huang X Q, Zhang L X, Mu W. Effects of intercropping tea with aromatic plants on population dynamics of arthropods in Chinese tea plantations. *Journal of Pest Science*, 2017, 90(1): 227-237.
- [9] Tian Y Y, Chen Z J, Huang X Q, Zhang L X, Zhang Z Q. Evaluation of botanicals for management of piercing-sucking pests and the effect on beneficial arthropod populations in tea trees *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze (Theaceae). *Journal of Insect Science*, 2020, 20(6): 27; 1-7.
- [10] Yang T B, Liu J, Yuan L Y, Zhang Y, Li D Q, Agnarsson I, Chen J. Molecular identification of spiders preying on *Empoasca vitis* in a tea plantation. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-10.
- [11] 高景林, 赵冬香, 陈宗懋. 白斑猎蛛对假眼小绿叶蝉的捕食作用. 热带作物学报, 2004, 25(3): 72-74.
- [12] 张觉晚. 捕食小绿叶蝉的茶园蜘蛛种群动态研究. 茶叶通讯, 1996, (2): 21-23.
- [13] 赵冬香, 陈宗懋, 程家安. 茶树-假眼小绿叶蝉-白斑猎蛛间化学通讯物的分离与活性鉴定. 茶叶科学, 2002, 22(2): 109-114.
- [14] 王国昌, 孙晓玲, 蔡晓明, 陈宗懋. 茶叶挥发物对白斑猎蛛觅食行为的影响. 生态与农村环境学报, 2012, 28(4): 394-398.

- [15] Yang T B, Liu J, Yuan L Y, Zhang Y, Peng Y, Li D Q, Chen J. Main predators of insect pests; screening and evaluation through comprehensive indices. *Pest Management Science*, 2017, 73(11): 2302-2309.
- [16] 袁龙宇. 白斑猎蛛对茶尺蠖捕食作用的评价及茶园蜘蛛群落的初步研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2015.
- [17] IPCC. *Climate Change 2021: the Physical Science Basis, the Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021.
- [18] 董兆克, 戈峰. 温度升高对昆虫发生发展的影响. *应用昆虫学报*, 2011, 48(5): 1141-1148.
- [19] Mammola S. Modelling the future spread of native and alien congeneric species in subterranean habitats — the case of *Meta* cave-dwelling spiders in Great Britain. *International Journal of Speleology*, 2017, 46(3): 427-437.
- [20] 朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 高玉葆. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用. *生物多样性*, 2013, 21(1): 90-98.
- [21] 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.
- [22] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [23] 祝梓杰, 王桂瑶, 乔飞, 白月亮, 程家安, Heong K L, 祝增荣. 基于 MaxEnt 模型的两种捕食性盲蝽潜在分布区及其适生性分析. *昆虫学报*, 2017, 60(3): 335-346.
- [24] McCoshum S M, Andreoli S L, Stenoien C M, Oberhauser K S, Baum K A. Species distribution models for natural enemies of monarch butterfly (*Danaus plexippus*) larvae and pupae: distribution patterns and implications for conservation. *Journal of Insect Conservation*, 2016, 20(2): 223-237.
- [25] 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.
- [26] 朱耿平, 刘强, 高玉葆. 提高生态位模型转移能力来模拟入侵物种的潜在分布. *生物多样性*, 2014, 22(2): 223-230.
- [27] Yang X Q, Kushwaha S P S, Saran S, Xu J C, Roy P S. MaxEnt modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, 2013, 51: 83-87.
- [28] Shcheglovitova M, Anderson R P. Estimating optimal complexity for ecological niche models: a jackknife approach for species with small sample sizes. *Ecological Modelling*, 2013, 269: 9-17.
- [29] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with MaxEnt; new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 2008, 31(2): 161-175.
- [30] 张玉. 全球气候变化下橘小实蝇与地中海实蝇的入侵风险[D]. 北京: 中国农业大学, 2020.
- [31] Saupe E E, Papes M, Selden P A, Vetter R S. Tracking a medically important spider; climate change, ecological niche modeling, and the brown recluse (*Loxosceles reclusa*). *PLoS One*, 2011, 6(3): 1-10.
- [32] Kwon T S, Lee C M, Kim T W, Kim S S, Sung J H. Prediction of abundance of forest spiders according to climate warming in South Korea. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 2014, 7(2): e133-e155.
- [33] 赵敬钊. 温度对蜘蛛个体发育的影响. *蛛形学报*, 2001, 10(1): 58-64.
- [34] 李荫昌. 茶园蜘蛛的初步调查及其保护和利用. *茶叶*, 1988, (2): 27-29.
- [35] Pakyari H, Fathipour Y, Rezapannah M, Kamali K. Temperature-dependent functional response of *Scolothrips longicornis* (Thysanoptera: Thripidae) preying on *Tetranychus urticae*. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2009, 12(1): 23-26.
- [36] 卢塘飞, 陈俊谕, 张方平, 叶政培, 李磊, 符悦冠. 不同猎物及密度对巴氏新小绥螨和拉戈钝绥螨同类相残和集团内捕食作用的影响. *环境昆虫学报*, 2021, 43(1): 214-223.
- [37] 李桂亭, 邹运鼎, 周夏芝, 刘同文. 干扰作用及空间异质性对大草蛉雄成虫捕食作用的影响. *应用生态学报*, 2002, 13(4): 433-434.
- [38] 杜军利, 武德功, 刘长仲. 异色瓢虫和多异瓢虫对两种色型豌豆蚜的捕食偏好研究. *中国生态农业学报*, 2015, 23(1): 102-109.
- [39] 唐美蓉, 赵丽, 魏宝阳, 王智. 温度对拟环纹豹蛛的捕食功能反应的影响. *湖南农业科学*, 2016, (9): 55-58.
- [40] 谭昭君, 汪波, 钟文涛, 龚瑶, 黄婷, 颜亨梅. 光照强度、颜色和温度对狼蛛捕食功能的影响. *湖南师范大学自然科学学报*, 2016, 39(3): 22-27.
- [41] 王国昌, 孙晓玲, 董文霞, 蔡晓明, 陈宗懋. 不同温度下鞍形花蟹蛛亚成蛛对茶尺蠖 3 日龄幼虫的捕食功能. *茶叶科学*, 2010, 30(3): 173-176.
- [42] 李金枝, 田方文. 鲁北沿海蝗区蜘蛛类群消长规律与环境条件关系初探. *中国植保导刊*, 2009, 29(3): 32-33.
- [43] 汪金香, 强润, 高宗仙. 棉田蜘蛛发生种类与发生规律研究. *安徽农业科学*, 2006, 34(4): 720.
- [44] 陈李林, 周浩, 赵杰. 基于 CLIMEX 和 ArcGIS 的灰茶尺蠖在中国的潜在适生区预测. *茶叶科学*, 2020, 40(6): 817-829.
- [45] 张觉晚, 孙少华. 茶园蜘蛛群落多样性研究. *中国茶叶*, 2004, 26(2): 20-21.
- [46] 邹运鼎. 害虫管理中的天敌评价理论与应用. 北京: 中国林业出版社, 1997: 27-64.
- [47] 高兴. 基于 SCAR 技术评价白斑猎蛛对假眼小绿叶蝉消化时间的研究及茶园蜘蛛的调查[D]. 武汉: 湖北大学, 2014.

- [48] 张杨. 基于 SCAR 技术评价茶园蜘蛛对害虫捕食作用的初步研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2014.
- [49] 黎健龙, 唐劲驰, 黎秀娣, 唐颖, 黎华寿. 周边不同生境条件对茶园蜘蛛群落及叶蝉种群时空结构的影响. 生态学报, 2014, 34(9): 2216-2227.
- [50] 韩宝瑜, 崔林, 董文霞. 有机、无公害和普通茶园管理方式对节肢动物群落和主要害虫的影响. 生态学报, 2006, 26(5): 1438-1443.
- [51] 叶火香, 崔林, 何迅民, 韩宝瑜. 茶园间作柑桔杨梅或吊瓜对叶蝉及蜘蛛类群数量和空间格局的影响. 生态学报, 2010, 30(22): 6019-6026.
- [52] 肖润林, 彭晚霞, 宋同清, 王久荣, 夏艳珺, 汤宇. 稻草覆盖对红壤丘陵茶园的生态调控效应. 生态学杂志, 2006, 25(5): 507-511.
- [53] 艾洪水, 赵士熙, 余志权. 茶毛虫天敌的研究. 华东昆虫学报, 2000, 9(1): 67-72.
- [54] Hazarika L K, Bhuyan M, Hazarika B N. Insect pests of tea and their management. Annual Review of Entomology, 2009, 54: 267-284.
- [55] 殷坤山, 陈华才, 肖强, 唐美君. 茶尺蠖核型多角体病毒制剂的试制与推广应用. 中国病毒学, 2000, 15: 81-84.
- [56] 龚自明, 刘明炎, 谭荣荣, 毛迎新, 李龙, 陈国华, 周正敏, 李小文. 灰茶尺蠖核型多角体病毒(*EgNPV*)安全性试验. 茶叶科学, 2010, 30(1): 13-18.
- [57] 唐美君, 郭华伟, 葛超美, 殷坤山, 肖强. *EoNPV* 对灰茶尺蠖的致病特性及高效毒株筛选. 浙江农业学报, 2017, 29(10): 1686-1691.
- [58] 张晓玲, 李亦超, 王芸芸, 蔡宏宇, 曾辉, 王志恒. 未来气候变化对不同国家茶适宜分布区的影响. 生物多样性, 2019, 27(6): 595-606.
- [59] 陈李林. 间作牧草对茶园动物群落组成与结构的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
- [60] 宋同清, 王克林, 彭晚霞, 王久荣, 肖润林, 曾馥平, 汤宇. 亚热带丘陵茶园间作白三叶草的生态效应. 生态学报, 2006, 26(11): 3647-3655.
- [61] Chen L L, Yuan P, Pozsgai G, Chen P, Zhu H P, You M S. The impact of cover crops on the predatory mite *Anystis baccarum* (Acari, Anystidae) and the leafhopper pest *Empoasca onukii* (Hemiptera, Cicadellidae) in a tea plantation. Pest Management Science, 2019, 75(12): 3371-3380.