

# 气候变化情景下茶丽纹象甲在中国的潜在适生区预测

陈李林<sup>1,2,3</sup>, 钟文玉<sup>1,2,3,4</sup>, 胡海琴<sup>1,2,4</sup>, 林昌进<sup>1,2,3</sup>,

姜明鑫<sup>1,2,3,4</sup>, 李雅萍<sup>1,2,3</sup>, 王萌萌<sup>1,2,4</sup>, 雷国铨<sup>4</sup>, 陈梅英<sup>5\*</sup>

(1. 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; 2. 中国白茶研究院, 福建福鼎 355200; 3. 中国农技协安溪铁观音茶科技小院, 福建泉州 362406; 4. 福建农林大学安溪茶学院, 福建泉州 362406; 5. 福建农林大学经济管理学院, 福州 350002)

**摘要:** 茶丽纹象甲 *Myllocerinus aurolineatus* Voss 是茶树上重要的食叶性害虫之一, 近年在中国各大产茶区广泛发生, 并在局部茶园暴发成灾。本研究通过搜集整理茶丽纹象甲在中国的分布点数据, 利用 MaxEnt 模型预测其在中国当前及未来气候变化情景下的潜在适生区, 并确定影响其潜在分布的主导环境变量。结果表明: 模型重复运行 10 次的平均 AUC 值为 0.923, 标准差为 0.007, 预测效果表现为非常好。当前气候条件下, 茶丽纹象甲的潜在适生区均主要集中在中国华东、华中、华南、西南大部分地区, 总适生区面积为 247.18 万 km<sup>2</sup>。未来气候情景下总适生区面积逐步增加, 适生区边界沿当前适生区继续向北扩张, 最北扩散至吉林省。在 2061-2080 年 SSP5\_85 情景下总适生区面积达到最大, 为 255.59 万 km<sup>2</sup>, 占中国总面积的 26.62%。影响茶丽纹象甲潜在适生区分布的主导环境变量是最干月份降水量、年平均降水量、最冷月最低温、昼夜温差与年温差比值。因此研究当前及未来不同气候情景下茶丽纹象甲的潜在适生区变化, 可为其监测预警和制定防控方案提供科学依据, 有效防止其大范围扩散造成更大危害。

**关键词:** 茶丽纹象甲; 气候变化; 最大熵模型; 适生性分析

中图分类号: Q968.1;S433

文献标识码: A

## Prediction of potential geographical distribution of *Myllocerinus aurolineatus* in China under climate change

CHEN Li-Lin<sup>1,2,3</sup>, ZHONG Wen-Yu<sup>1,2,3,4</sup>, HU Hai-Qin<sup>1,2,4</sup>, LIN Chang-Jin<sup>1,2,3</sup>, JIANG Ming-Xin<sup>1,2,3,4</sup>, LI Ya-Ping<sup>1,2,3</sup>, WANG Meng-Meng<sup>1,2,4</sup>, LEI Guo-Quan<sup>4</sup>, CHEN Mei-Ying<sup>5\*</sup> (1.

基金项目: 国家社科基金 (20BJY128)

作者简介: 陈李林, 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为茶树病虫害生态调控和茶叶质量安全, E-mail: llchen@fafu.edu.cn

\*通讯作者 Author for correspondence: 陈梅英, 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为农产品安全, E-mail: cmy2816@126.com

收稿日期 Received: 2023-09-27; 接受日期 Accepted: 2024-01-17

State Key Laboratory of Ecological Pest Control in Fujian and Taiwan Crops, College of Plant Protection, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Institute of China White Tea, Fuding 355200, Fujian Province, China; 3. China Agricultural Technology Association Anxi Tieguanyin Tea Science and Technology Academy, Quanzhou 362406, Fujian Province, China; 4. Anxi Tea College, Fujian Agriculture and Forestry University, Quanzhou 362406, Fujian Province, China; 5. College of Economics and Management, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** *Myloccerinus aurolineatus* is an important Coleoptera pest on tea trees. In recent years, it has occurred widely in major tea areas in China and broke out in some areas. This study collected and sorted out the distribution point data of *M. aurolineatus* in China, predicted its potential suitable area under the current and future climate change scenarios in China by using MaxEnt model, and determined the dominant environmental variables affecting its potential distribution. The results showed that the average AUC of 10 repeated runs of the model was 0.923 and the standard deviation was 0.007, and the prediction effect was very good. Under the current climate conditions, the potential suitable areas of *M. aurolineatus* were mainly concentrated in most areas of East China, central China, South China and southwest China, with a total suitable area of 2.4718 million km<sup>2</sup> respectively. Under the future climate scenario, the total suitable area will gradually increase, and the boundary of the suitable area will continue to expand to the north along the current suitable area, and the northernmost will spread to Jilin Province, in SSP5\_85 scenario from 2061 to 2080, the total suitable area reaches the maximum of 2.5559 million km<sup>2</sup>, accounting for 26.62% of the total area of China. The dominant environment variable affecting the distribution of potential suitable areas of *M. aurolineatus* are the precipitation of the driest month, the annual precipitation, the min temperature of the coldest month, and the isothermality. Therefore, the study on the changes of potential suitable areas of *M. aurolineatus* under current and future climate scenarios can provide scientific guidance for its monitoring and early warning, and effectively prevent its large-scale spread from causing greater harm.

**Key words:** Tea leaf weevil; climate change; maximum entropy model; habitat suitability analysis

茶丽纹象甲 *Mylokerinus aurolineatus* Voss 是茶园重要的食叶性害虫之一，常年发生严重，难防难治。茶丽纹象甲又称丽纹象甲、茶叶象甲、茶小黑象甲、黑绿象甲、小绿象鼻虫等，俗称花鸡娘、茶蚩、乌蚩仔等，隶属鞘翅目 Coleoptera 象甲科 Curculionidae 丽纹象甲属 *Mylokerinus*。广泛分布于我国各产茶区，以湖北、湖南、江苏、安徽、浙江、江西、福建、广东、广西和云南等省（市、自治区）发生为害较严重；寄主植物主要是茶树 *Camellia sinensis*，还包括山茶 *Camellia japonica*、柑橘 *Citrus reticulata* Blanco、梨 *Pyrus* spp.、桃 *Prunus persica*、苹果 *Malus pumila*、翅荚木 *Zenia insignis*、辣蓼 *Persicaria hydropiper* subsp. *hydropiper* 等（曾明森等，2003；孙晓玲，2018；吴慧枫，2018）。茶丽纹象甲 1 年发生 1 代，成虫发生期 3 月下旬-9 月上旬，盛发期为 4 月中下旬-6 月，喜食嫩叶，主要危害绿茶产区的春夏茶、乌龙茶产区及部分白茶产区的春茶，成虫喜食 2~4 片新叶，造成嫩叶不规则弧形缺刻，大爆发时造成全园残叶秃脉，造成减产 15%~50%，还损伤树势，被害茶叶制成干茶汤色浊暗、叶底破碎，品质差；卵、幼虫和蛹栖息土中，幼虫以有机质和须根为食，以老熟幼虫在茶园树冠表土中越冬（汪荣灶，1988；吕文明，1993；王庆森和吴光远，2001；黄世雄，2005；孙晓玲，2018；吴慧枫，2018；林武等，2021）。茶丽纹象甲成虫寿命长且食叶量大，成虫寿命长达 61~185 d，取食量为 1 150~3 344.2 mm<sup>2</sup>/头，且成虫寿命与食叶量呈极显著正相关（吕文明，1993）。茶丽纹象甲在茶园发生为害逐年严重，2003 年福建武夷山茶丽纹象甲发生面积达 56.7 km<sup>2</sup>，占全市茶园面积的 85.0%，为害严重的茶园成虫密度高达 154 头/m<sup>2</sup>；2016 年江苏宜兴部分茶园茶丽纹象甲大爆发（王敏鑫等，2017）；2019 年湖北赤壁、鹤峰、利川等部分茶园夏茶被害严重，甚至绿叶均被蚕食光（黄世雄，2005）；2020 福建福安茶丽纹象甲发生面积达 152 km<sup>2</sup>，占全市茶园面积的 76.0%（林武等，2021）。

目前对茶丽纹象甲的研究主要集中在形态特征（高宇等，2013；孙晓玲，2018；吴慧枫，2018；李耀明，2021）、生物生态学特性（朱俊庆和商建农，1990；吕文明，1993；曾明森等，1994；刘丰静等，2015；孙晓玲，2018；吴慧枫，2018；李耀明，2021）、诱导挥发物（蔡晓明，2009；Sun *et al.*，2010；王国昌，2010；韩娟娟等，2017；王让剑等，2018；高香凤等，2019）、预测预报（朱俊庆和商建农，1990，1994；刘丰静等，2015）、生物防治及其他防控措施（孙晓玲和陈宗懋，2009；王定锋等，2015；王敏鑫等，2017；孙晓玲，2018；林武等，2021）等方面，还未见关于其潜在适生区的报道。物种分布模型（Species distribution models, SDMs）主要依据物种现有分布信息及环境变量数据，通过运用特定的结构算法来构建模型，模拟预测全球气候变化情景下，未来不同时空物种的潜在地理分布（De Meyer *et*

al., 2010; Guisan *et al.*, 2013), 如 CLIMEX 模型、生态位因子分析模型 (Ecological niche factor analysis, ENFA)、生物气候分析和预测系统模型 (Bioclim)、分类与回归树模型 (Classification and regression tree, CART)、基于遗传算法的规则组合模型 (Genetic algorithm for rule-set production, GARP)、最大熵模型 (Maximum entropy, MaxEnt) 等。MaxEnt 模型与其它模型相比具有所需样本量较少、操作简单并且预测结果稳定准确等优点 (Barbosa and Schneck, 2015; 李志红和秦誉嘉, 2018)。MaxEnt 模型已被广泛应用于物种潜在分布区预测、外来入侵物种风险评估、气候变化对物种分布区和生物多样性的影响等研究 (Phillips and Dudik, 2008; 朱耿平等, 2013; Yan *et al.*, 2017), 如埃及吹绵蚧 *Icerya aegyptiaca* (刘洋和石娟, 2020)、地中海实蝇 *Ceratitis capitata* (孙佩珊等, 2017)、云南松毛虫 *Dendrolimus houi* (吴思俊等, 2021) 等。

茶丽纹象甲的寄主植物广泛分布于中国, 且在未来气候影响下茶树 (张晓玲等, 2019)、苹果 (许伟, 2021)、豆梨 *Pyrus calleryana* (刘超等, 2018) 等寄主植物适宜分布区将不断扩张, 未来中国更多地区可能会成为该害虫的潜在适生区。因此, 本研究基于获取并处理茶丽纹象甲的地理分布数据、筛选影响其分布的重要环境变量, 利用 MaxEnt 模型对其在当前及未来不同气候变化情景下在中国的潜在适生区进行预测, 旨在明确茶丽纹象甲的适生范围及适生程度, 以期为中国茶丽纹象甲的监测预警及制定防控方案提供理论依据, 保障茶叶安全优质生产。

## 1 材料与方法

### 1.1 茶丽纹象甲分布数据收集及处理

茶丽纹象甲的分布点数据主要来源于国内外公开发表的文献、各省 (市、自治区) 植保站、农科院所、实地调查采集数据及网站记录的分布数据, 如通过网站记录的分布数据, 主要有世界生物多样性信息交换平台 <https://www.gbif.org> 台湾生命大百科 <https://taieol.tw/pages/94646> <https://portal.taibif.tw/>, 共获得茶丽纹象甲分布点 206 个。分布点中缺少经纬度信息的, 利用百度地图坐标拾取系统 (<https://api.map.baidu.com>) 确定经纬度信息, 并剔除错误和重复的分布点。利用 ArcGIS 缓冲区功能对分布点进行筛选, 设置半径 0.5 km 缓冲区, 删除距离小于 1 km 的重复分布点, 从而避免分布点距离过近造成模型预测过度拟合。最终获得 201 个茶丽纹象甲有效分布点 (图 1)。

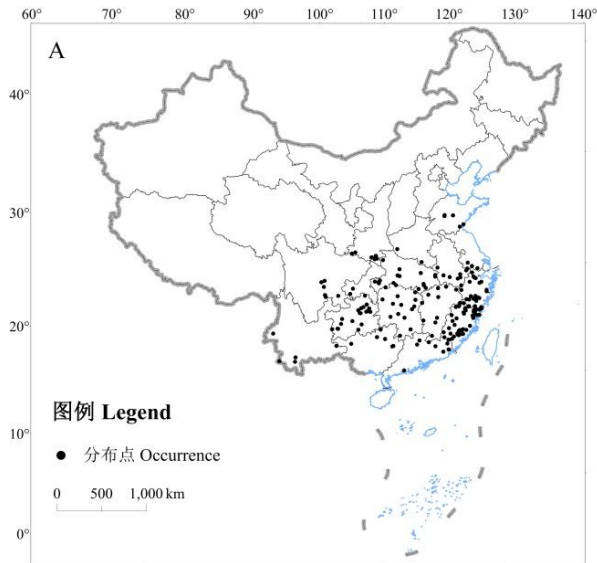


图 1 茶丽纹象甲分布点

Fig. 1 The geographical distribution of *Myllocerinus aurolineatus*

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) 4372 号的标准地图制作, 底图无修改。Note: The map was based on the standard map with drawing No. GS (2020) 4372 downloaded from the standard map service website of the Ministry of natural resources, and the base map has not been modified.

## 1.2 环境数据的收集和筛选

从 Worldclim 网站 (<http://www.worldclim.org>) 下载当前 (1970-2000 年) 和未来 (2041-2060 年、2061-2080 年) 空间分辨率为 2.5 arc-minutes 的 19 个生物气候变量 bio1~bio19, 包括年平均温、昼夜温差月均值、昼夜温差与年温差比值、温度变化方差、最热月份最高温、最冷月份最低温、年温变化范围、最湿季平均温度、最干季平均温度、最暖季平均温度、最冷季平均温度、年平均降水量、最湿月份降水量、最干月份降水量、降水量变化方差、最湿季降水量、最干季降水量、最暖季平均降水量、最冷季平均降水量。共享社会经济路径 (Shared socioeconomic pathways, SSPs) 不仅考虑了温室气体排放量与气候变化的关系, 还结合社会经济、土地利用等因素对气候变化的影响, 与代表浓度路径 (Representative concentration pathways, RCPs) 相比能够更全面的描述未来的排放和发展情况 (van Vuuren *et al.*, 2012)。本研究选用第六次全球耦合模式比较计划 (Coupled model intercomparison project 6, CMIP6) 中 BCC\_CSM2\_MR 模式下 SSP2\_45 和 SSP5\_85 的气候数据。SSP2\_45 情景描述的是未来社会经济发展继续沿用当前低碳低排放的绿色发展模式; SSP5\_85 情景描述的是以化石燃料为主的社会经济充分发展但大量排放温室气体为前提的高排放路径。

变量间可能存在相关性会导致多重共线性问题，从而引起参数估计方差增大，变量显著性检验偏差，要对各个环境变量进行去相关性分析（朱耿平等，2014）。首先利用 MaxEnt 模型刀切法获取 19 个变量的贡献率，并剔除贡献率小于 0.8 的变量，再运用 SPSS 软件对贡献率大于 0.8 的变量进行 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用于后续模型分析（Yang *et al.*，2013）。对 19 个环境变量进行相关性分析以及筛选后，最终确定影响茶丽纹象甲分布的主要环境因子有 7 个（表 1）。

表 1 茶丽纹象甲环境变量相关性分析

Table 1 Correlation analysis of environmental variables of *Myllocerinus aurolineatus*

	bio2	bio3	Bio6	Bio8	bio10	bio12	bio14
bio2	1						
bio3	0.650	1					
Bio6	-0.181	0.445	1				
Bio8	0.039	-0.094	0.006	1			
bio10	-0.159	-0.383	0.289	0.371	1		
bio12	-0.093	0.143	0.522	-0.385	0.287	1	
bio14	-0.268	-0.287	0.267	-0.351	-0.546	0.748	1

注：bio2，昼夜温差月均值；bio3，昼夜温差与年温差比值；bio6，最冷月份最低温；bio8，最湿季平均温度；bio10，最暖季平均温度；bio12，年平均降水；bio14，最干月份降水量。Note: bio2, Monthly diurnal range; bio3, Isothermality; bio6, Min temperature of the coldest month; bio8, Mean temperature of wettest quarter; bio10, Mean temperature of the warmest quarter; bio12, Annual precipitation; bio14, Precipitation of the driest month.

### 1.3 地图数据来源

本研究所用地图来源于中国科学院资源环境科学数据中心（<http://www.resdc.cn>）2015 年中国省级行政边界数据，审图号为 GS (2020) 4372 号。

### 1.4 MaxEnt 模型参数设置

将茶丽纹象甲分布点和筛选后的环境变量导入 MaxEnt 模型，参照 Moreno 等（Moreno *et al.*，2011）的研究方法设置 MaxEnt 模型参数：随机选取 75% 的分布点作为训练集，剩下 25% 的分布点作为测试集；勾选刀切法评价各环境因子的权重 Do jackknife to measure variable importance、绘制响应曲线 Create response curves、制作预

测图 Make picture of predictions; 重复运行 10 次, 重复运行规则选择 Subsample, 结果输出格式选择 Logistic 格式, 最大迭代次数设置 5 000 次, 其余参数采用默认值。

采用受试者工作特征曲线 (Receiver operating characteristic curve, ROC) 下面积值, 即 AUC 值 (Area under curve, AUC) 为判断依据来评价模型模拟结果。AUC 值取值范围为 0~1, 模拟预测等级依次为失败 (0.0~0.6)、差 (0.6~0.7)、一般 (0.7~0.8)、较好 (0.8~0.9)、非常好 (0.9~1.0) (Pearce and Boyce, 2006)。由于 AUC 值不受阈值的影响, 所以对于模型的评价更为客观 (De Meyer *et al.*, 2010)。AUC 值越大, 说明 MaxEnt 模型的预测效果越好。

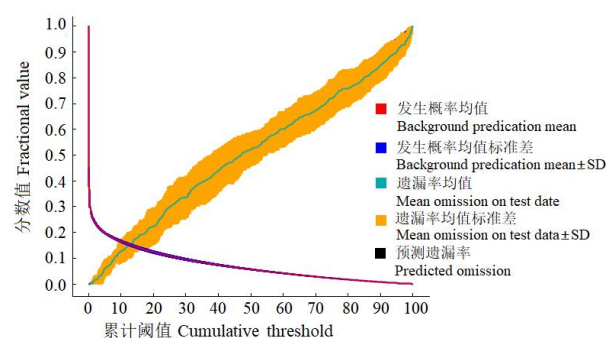
### 1.5 茶丽纹象甲适生等级划分

利用 ArcGIS 软件对 MaxEnt 运行得到的 ASCII 格式文件进行可视化处理, 转化为栅格格式。再利用自然间断点分级法对 MaxEnt 模型运行结果进行重分类, 将茶丽纹象甲潜在适生区划分为非适生区 (0.00~0.08)、低适生区 (0.08~0.23)、中适生区 (0.23~0.46)、高适生区 (0.46~1.00) 4 个等级 (张玉, 2020)。

## 2 结果与分析

### 2.1 MaxEnt 模型预测精度评价

ROC 曲线分析结果表明茶丽纹象甲 10 次重复运行的平均 AUC 值为 0.923, 标准差为 0.007 (图 2)。AUC 值远大于随机预测值 0.5, 预测效果表现为非常好, 说明 MaxEnt 模型对茶丽纹象甲的潜在分布区的预测效果非常好。



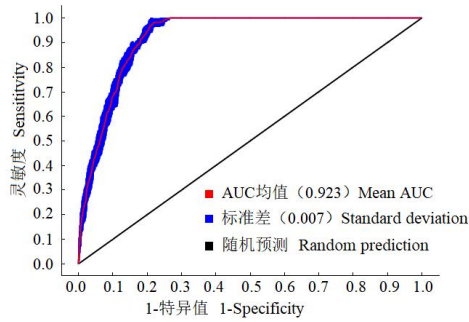


图 2 基于 MaxEnt 模型预测的 ROC 检验

Fig. 2 ROC test based on MaxEnt model prediction

## 2.2 刀切法检验

由刀切法检验结果可知，仅使用单一环境变量（单独变量）对茶丽纹象甲进行模拟时，对正规化训练增益影响最大的 3 个环境变量分别为最干月份降水量（bio14）、年平均降水量（bio12）、最冷月份最低温（bio6；图 3），表明这三个变量预测能力较高，对茶丽纹象甲的潜在分布影响较大。除去某一变量（其他变量）时正规化训练增益减少最多的 3 个环境变量分别为最湿季平均温度（bio8）、最干月份降水量（bio14）、最暖季平均温度（bio10；图 3），表明这些变量包含其他变量不具有的独特信息，其对茶丽纹象甲的潜在分布影响也较大。

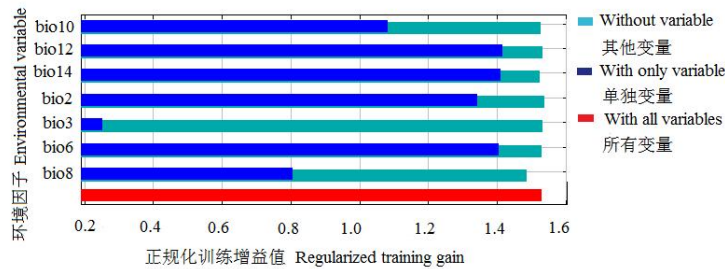


图 3 茶丽纹象甲环境变量重要性的刀切法检验

Fig. 3 Knife cutting test of the importance of environmental variables of *Mylokerinus aurolineatus*

## 2.3 确定主导环境变量

由不同环境变量对茶丽纹象甲潜在分布的贡献率及置换重要值可知，最干月份降水量（bio14）、年平均降水量（bio12）和最冷月份最低温（bio6）贡献率最高，其贡献率分别为 67.9%、19.1%和 4.0%，累计贡献率达 87.4%（表 2）。置换重要性位居前三的变量分别为最冷月份最低温（bio6）、年平均降水量（bio12）和昼夜温差与年温差比值（bio3），随机分布重要性分别为 40.6%、30.3%和 8.4%，累计达到 79.3%（表 2），表



明对茶丽纹象甲生境分布的影响也较大。综上，结果表明影响茶丽纹象甲潜在适生区分布的主导环境变量是最干月份降水量、年平均降水量、最冷月最低温、昼夜温差与年温差比值。

表 2 影响茶丽纹象甲分布的环境变量贡献率及置换重要值

Table 2 Percent contribution of environmental variables and the permutation importance affecting the distribution of *Myllocerinus aurolineatus*

变量	贡献百分率 (%)	置换重要值 (%)
Variable	Percent contribution	Permutation importance
bio14	67.9	1.6
bio12	19.1	30.3
bio6	4.0	40.6
bio8	3.4	7.6
bio3	2.8	8.4
bio10	1.7	3.4
bio2	1.1	8.0

注：bio14，最干月份降水量；bio12，年平均降水；bio6，最冷月份最低温；bio8，最湿季平均温度；bio10，最暖季平均温度；bio3，昼夜温差与年温差比值；bio2，昼夜温差月均值。Note：bio14，Precipitation of the driest month；bio12，Annual precipitation；bio6，Min temperature of the coldest month；bio8，Mean temperature of wettest Quarter；bio10，Mean temperature of the warmest quarter；bio3，Isothermality；bio2，Monthly diurnal range。

根据环境变量对茶丽纹象甲分布区预测概率贡献值的反应曲线（图 4），参考 Alexander 等（2013）对存在概率的评判标准，认为存在概率在 0.265 以上才适合该物种生存。最干月份降水量适生分布范围是-20~74 mm，最适值为 28 mm（图 4-A）；年平均降水量适生范围是 620~4 700 mm，最适值为 3 450 mm（图 4-B）；最冷月最低温适生范围是-7~26℃，最适值为 14℃（图 4-C）；昼夜温差与年温差比值最低温适生范围是 14~38℃，14~17℃范围内存在概率最大（图 4-D）。

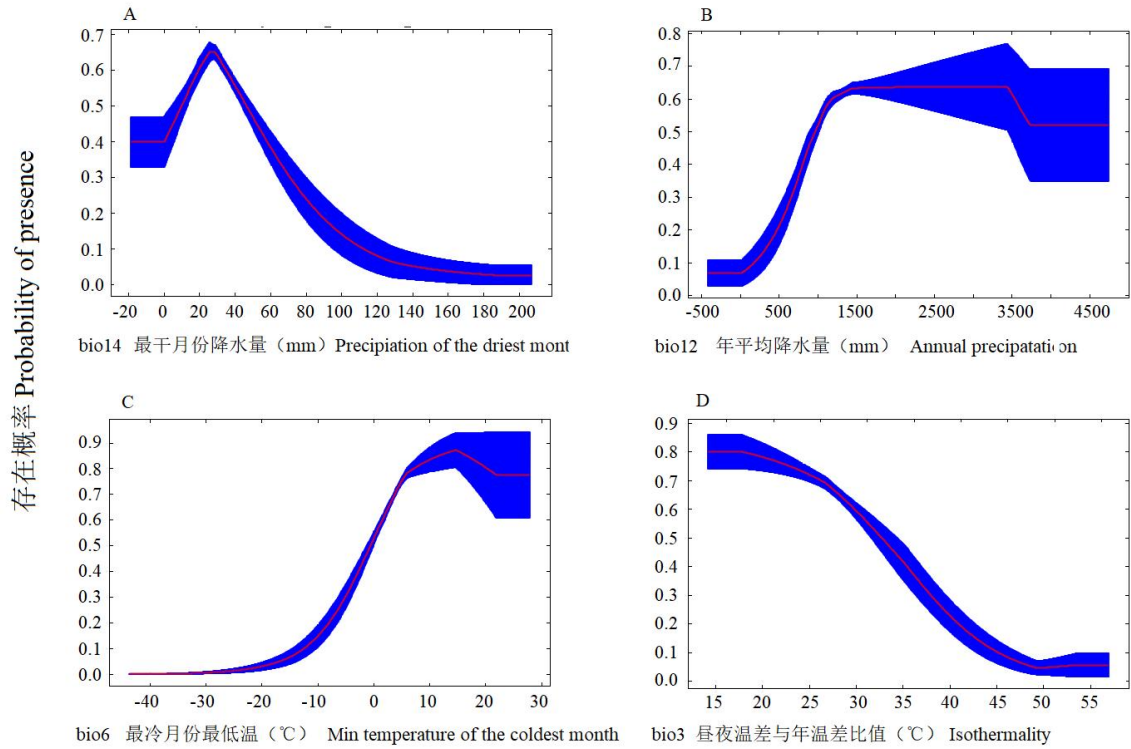


图 4 环境变量对茶丽纹象甲的适生区预测概率贡献值的反应曲线

Fig. 4 Response curve of environmental variables to the prediction probability contribution values of the suitable region of *Myllocerinus aurolineatus*

#### 2.4 当前情景下茶丽纹象甲的地理分布

茶丽纹象甲在中国的潜在分布区主要集中在华东、华中、华南、西南大部分地区以及台湾地区（图 5）。总适生区面积 247.18 万 km<sup>2</sup>，占中国总面积的 25.75%，其中高、中、低度适生区分别占比 9.82%、10.25%、5.68%（图 6）。高适生区 94.26 万 km<sup>2</sup>，主要分布于福建、江西、湖南大部分地区，浙江南部、安徽南部、湖北南部、重庆中部、贵州西部、广东北部、广西北部地区。中适生区 98.42 万 km<sup>2</sup>，主要分布于江苏、湖北、广西大部分地区，浙江北部、安徽中部、河南南部、陕西南部、重庆西南部、四川西部、云南西南部、广东中部、西藏南部地区。低适生区 54.50 万 km<sup>2</sup>，主要分布于江苏北部、山东半岛、河南中部、陕西中部、四川北部、云南南部、广西南部、广东南部、台湾西部、海南中部、甘肃南部和西藏南部地区。

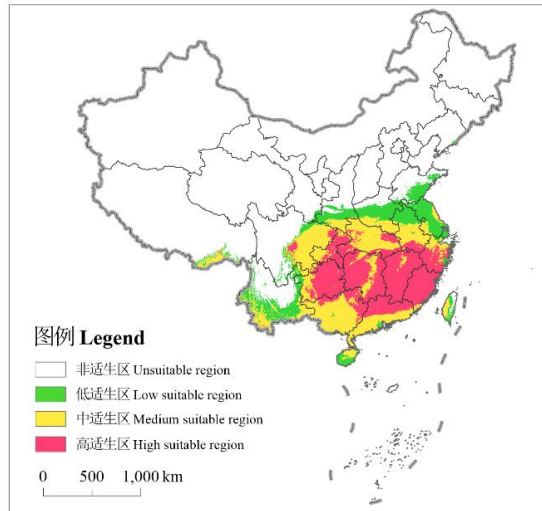


图 5 茶丽纹象甲在中国的适生区及适生程度

Fig. 5 Suitable regions and levels of *Myllocerinus aurolineatus* 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) 4372 号的标准地图制作, 底图无修改。Note: The map was based on the standard map with drawing No. GS (2020) 4372 downloaded from the standard map service website of the Ministry of natural resources, and the base map has not been modified.

## 2.5 气候变化情景下茶丽纹象甲的地理分布

根据茶丽纹象甲在未来不同气候条件下适生区预测结果 (图 6 和图 7) 可知, 到 2041-2060 年, 在 SSP2\_45 气候情景下, 总适生区面积 253.58 万  $\text{km}^2$ , 高适生区增加 9.78 万  $\text{km}^2$ , 主要在安徽南部、湖北东部和西南部、湖南中部地区。中适生区面积减少 8.6 万  $\text{km}^2$ , 主要减少在广西北部。低适生区面积增加 5.22 万  $\text{km}^2$ , 总体表现为逐步向北扩张, 云南中部、陕西中部、河南中部由当前的非适生区转变为低适生区, 云南南部、广西中部由中适生区转变为低适生区。在 SSP5\_85 气候情景下, 总适生区面积 249.29 万  $\text{km}^2$ , 高适生区减少 8.56 万  $\text{km}^2$ , 体现在湖南中部、贵州中部、广西北部高适生区转为中适生区。中适生区面积增加 5.20 万  $\text{km}^2$ , 大部分由高适生区转化而来, 低适生区面积增加 5.47 万  $\text{km}^2$ , 表现为从山东、河南、陕西等地向北移动 (图 6 和图 7-A, B)。

到 2061-2080 年, SSP2\_45 情景下总适生区面积 252.67 万  $\text{km}^2$ , 高适生区增加 15.99 万  $\text{km}^2$ , 主要增加在贵州中部、湖北西南部、浙江中部。中适生区总面积减少 9.25 万  $\text{km}^2$ , 陕西、安徽、河南、山东等地中适生区面积减少, 广东、广西两省中适生区也出现不同程度收缩。低适生区面积减少 1.25 万  $\text{km}^2$ , 表现为江苏中部和南部大部分地区由低适生区转化为中适生区。SSP5\_85 情景下总适生区面积 255.59 万  $\text{km}^2$ , 低适生区范围整体扩大, 增加 5.88 万  $\text{km}^2$ , 吉林首次出现低适生区, 呈不断向北扩张的趋势,

辽宁东部、云南中部低适生区大范围扩大（图 6 和图 7-C, D）。

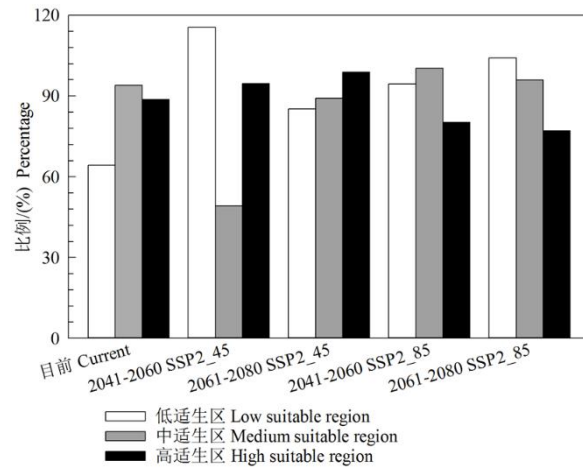
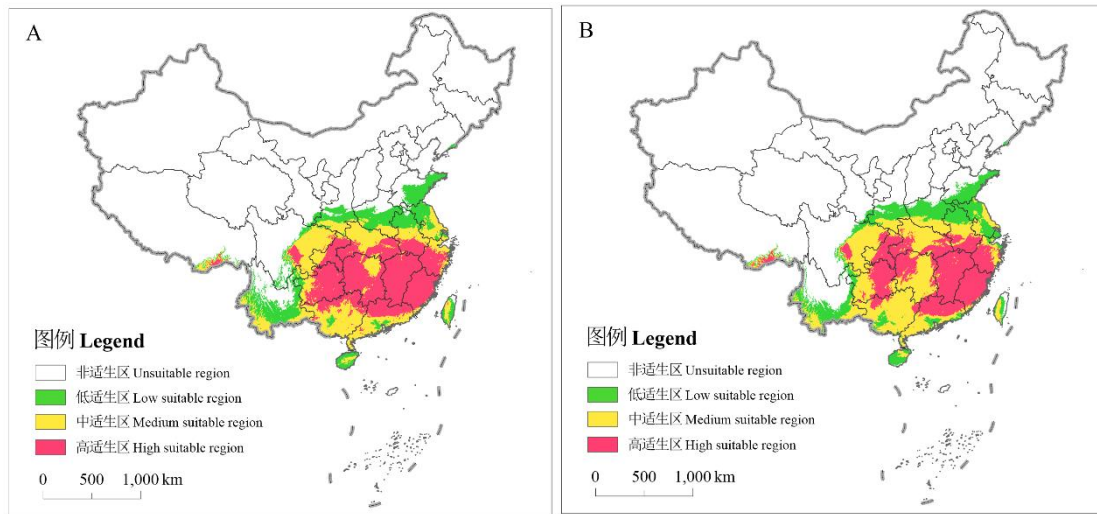


图 6 不同气候变化情景下 MaxEnt 模型预测茶丽纹象甲在中国的适生区面积

Fig. 6 The suitable area of MaxEnt model prediction *Myllocerinus aurolineatus* in China under different climate change scenarios



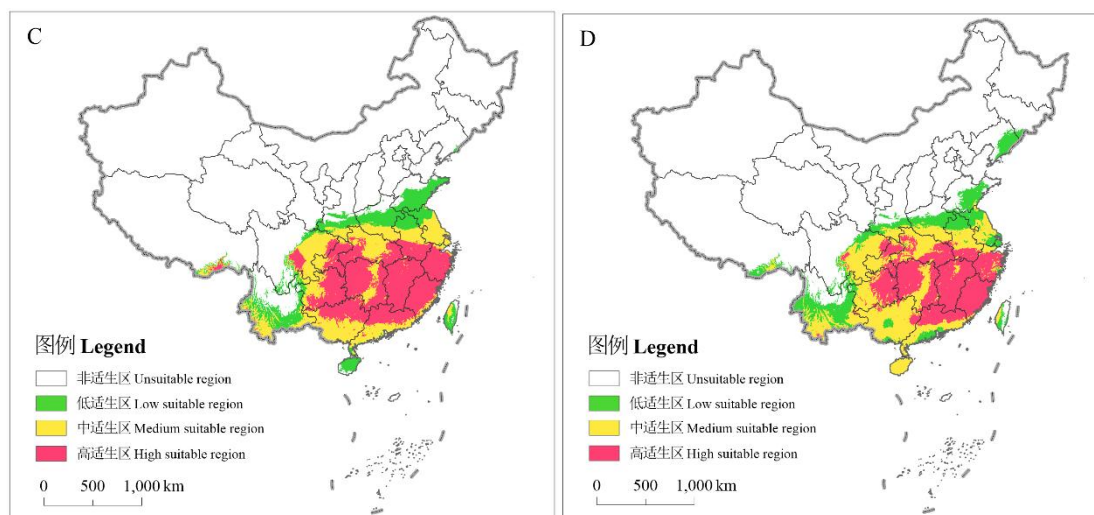


图 7 不同气候变化情景下茶丽纹象甲在中国的适生区分布

Fig. 7 Distribution of *Myllocerinus aurolineatus* in suitable regions of China under different climate change scenarios

注：A, 2041-2060 年 SSP2\_45; B, 2041-2060 年 SSP5\_85; C, 2061-2080 年 SSP2\_45; D, 2061-2080 年 SSP5\_85。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) 4372 号的标准地图制作，底图无修改。Note: A, 2041-2060 under climate scenarios SSP2\_45; B, 2041-2060 under climate scenarios SSP5\_85; C, 2061-2080 under climate scenarios SSP2\_45; D, 2061-2080 under climate scenarios SSP5\_85. The map was based on the standard map with drawing No. GS (2020) 4372 downloaded from the standard map service website of the Ministry of natural resources, and the base map has not been modified.

### 3 结论与讨论

本研究根据茶丽纹象甲当前分布点数据，结合当前以及未来两种不同气候情景下的气候数据，利用最大熵模型 MaxEnt 对其在中国的潜在地理分布区进行模拟预测。预测精度评价结果显示茶丽纹象甲重复运行 10 次的平均 AUC 值大于 0.9，标准差小于 0.007，模型测评效果非常好，预测结果与茶丽纹象甲的实际分布区域相符。

由环境变量贡献率及置换重要值结果可知，最干月份降水量贡献率为 67.9%、最冷月最低温置换重要值为 40.6%，二者对茶丽纹象甲的分布影响最大。茶丽纹象甲的生存主要受温度和降水因子影响，前人研究发现，茶丽纹象甲成虫出土时期早晚与温度有密切关系，温度越高，出土期越早，反之则迟（汪荣灶，1988）。本研究发现，最冷月份最低温在 -7~26℃ 范围内，茶丽纹象甲存在概率随温度的升高而增加，与前人研究结论相符。茶丽纹象甲的卵、幼虫、蛹都生活在茶园土壤中，疏松湿润的茶园土壤有利于茶丽纹象甲卵的孵化及幼虫和蛹的生长发育，因此湿润松软且荫庇茶园一般有助该

虫口发生(孙晓玲, 2018)。遇文婧等(2014)研究发现, 牡丹江地区栗实象甲 *Curculio davidi* 幼虫适宜在土壤湿润的环境下越冬, 但 6、7 月降雨量较大时成虫死亡率较高, 产卵量相对减少, 据此推测象甲类昆虫喜湿润的生存环境; 但降水量过高、湿度过大也会导致其数量减少。本研究结果中最干月份降水量响应曲线显示茶丽纹象甲存在概率最适范围是 -20~74 mm, 降水量超过 28 mm 则存在概率急剧下降, 与栗实象甲对降水量增加过大时的响应相吻合(遇文婧等, 2014)。

当前气候情景下茶丽纹象甲在中国的潜在适生区集中分布在华东、华中、华南、西南大部分地区, 总适生区面积 247.18 万 km<sup>2</sup>, 占中国总面积的 25.75%。未来气候情景下适生区范围向东北和西南方向扩张, 其中辽宁东部、云南大部分地区为非适生区转变而来的新增低适生区。可能是由于未来高排放情景不仅导致温度升高, 也带来了更多的降水(程雪蓉等, 2016), 满足了茶丽纹象甲生长发育所需的气候条件, 再加上海拔、地形以及人为因素等综合因素影响导致其适生程度升高(张健榕等, 2017)。贾栋等(2020)利用 MaxEnt 模型预测当前和未来气候条件下苹红缢管蚜 *Rhopalosiphum oxyacanthae* 在中国的潜在适生区, 发现随着全球气候变暖苹红缢管蚜适生区范围向东北方向迁移扩散, 低适生区呈现增加趋势, 与本研究结果相似。未来 SSP5\_85 气候情景下, 茶丽纹象甲高适生区在湖南大幅减少, SSP5\_85 情景是以化石燃料为主的高排放路径, 湖南省受西太平洋副热带高压的持续影响, 易出现高温状态, 夏季日最高气温 35℃ 以上持续时间较长(罗伯良和李易芝, 2014), 而茶丽纹象甲成虫在 30℃ 以上高温时产卵量减少, 寿命缩减(孙晓玲, 2018), 可能是其高适生区大幅减少的重要原因。未来气候变化情景下茶丽纹象甲的潜在适生区面积呈现扩大趋势, 陈李林等(2020)预测灰茶尺蠖 *Ectropis grisescens* 当前及未来在中国的潜在适生区分布, 发现适生区面积呈增加趋势且适生区向北移动, 与本研究茶丽纹象甲在未来气候变化情景下的变化趋势相同。茶树是茶丽纹象甲的主要寄主植物之一, 张晓玲等(2019)研究发现, 中国是未来气候变化情景下茶树适宜分布区增加最多的国家, 山东、河南、陕西、四川等地茶适宜分布区扩张; 本研究发现未来茶丽纹象甲由当前适生区向山西、陕西、甘肃、河北、辽宁等北部地区扩张。表明在未来气候变化情景下, 茶丽纹象甲的发生趋势与寄主植物茶树的变化趋势一致, 寄主植物的普遍存在为害虫频发提供了基础条件。

在实际茶园农事操作过程中, 应根据茶丽纹象甲生态位需求、生物学特性以及重要影响因子等科学有效地对其进行防控, 完善茶园害虫监测预警及防控机制(孙晓玲和陈宗懋, 2009)。茶丽纹象甲的卵、幼虫和蛹在土中潜伏期长, 在幼虫期和蛹期应采

取有效防控措施，准确把握害虫防治关键期，强化监测预警工作。由于茶丽纹象甲可随茶苗带土移栽或远距离调运茶苗转移，应加强检疫与管理，防止大范围扩散。从保护茶园生态系统出发，改善茶园生态环境，保护茶园生物多样性，发挥茶园的天然调控能力，坚持绿色防控，综合利用农业防治、物理防治、生物防治、化学防治等多重防控措施，做好茶丽纹象甲生态调控，保障茶叶安全优质生产（毛新荣，2010；王敏鑫等，2017）。

本研究基于现有分布点数据及环境数据，对当前和未来气候情景下茶丽纹象甲潜在适生区进行预测，并探讨影响其潜在地理分布的主要气候因子，提出防控建议。在自然条件下，影响物种潜在地理分布的决定因素无疑是气候（刘鸣和张德顺，2018；Raghavan *et al.*, 2021），但物种分布环境的适宜与否是由环境因素和其他因子共同作用决定的；本研究预测仅基于气候变量，但在实际物种生存环境中，地貌特征（胡耀升等，2014）、海拔（Thakur and Chawla, 2019）、土壤类型（李伟等，2015）以及物种间相互作用（Alaniz *et al.*, 2018）等同样会对物种的潜在分布产生重要影响，若能引入多种影响因子将使得预测结果更加准确。本研究选用的当前 1970-2000 年以及未来 2041-2060 年和 2061-2080 年的 19 个生物气候变量均来源于世界气候数据库，缺失了 2001-2040 年的气候数据。缺失气候变量时间跨度较大，可能导致预测结果出现一定的偏差，因此在后续的研究中需要补充缺失的数据，使预测结果更为准确。

综上，本研究采用 MaxEnt 模型预测了茶丽纹象甲当前及未来 4 个气候情景在中国潜在地理分布及变化情况。结果表明，最干月份降水量、年平均降水量、最冷月最低温、昼夜温差与年温差比值是影响茶丽纹象甲潜在适生区分布的主导环境变量。当前茶丽纹象甲适生区主要分布在 18°N~37°N，主要集中于中国华东、华中、华南、西南大部分地区，适生面积为 247.18 万 km<sup>2</sup>，占中国总面积的 25.75%；未来气候变化条件下，茶丽纹象甲潜在适生区持续扩大，在 2061-2080 年 SSP5\_85 情景下总适生区达到最大，面积 255.59 万 km<sup>2</sup>，占中国总面积的 26.62%，潜在适生区最北可扩散至吉林地区。吉林地处我国东北寒冷地区，未来气候变化也将适合茶丽纹象甲生存，表明气候变化条件下茶丽纹象甲将给我国绝大部分省份带来适生威胁，应加强其监测预警，并做好适生区防控。

## 参考文献 (References)

- Alaniz AJ, Grez AA, Zaviezo T. Potential spatial interaction of the invasive species *Harmonia axyridis* (Pallas) with native and endemic coccinellids [J]. *Journal of Applied Entomology*, 2018, 142 (5): 513-524.

- Alexander LV, Allen SK, Bindoff NL, *et al.* Summary for Policymakers [M]. Cambridge: Cambridge University Press; 2013: 11-12.
- Barbosa FG, Schneck F. Characteristics of the top-cited papers in species distribution predictive models [J]. *Ecological Modelling*, 2015, 313: 77-83.
- De Meyer M, Robertson MP, Mansell MW, *et al.* Ecological niche and potential geographic distribution of the invasive fruit fly *Bactrocera invadens* (Diptera, Tephritidae) [J]. *Bulletin of Entomological Research*, 2010, 100 (1): 35-48.
- Guisan A, Tingley R, Baumgartner JB, *et al.* Predicting species distributions for conservation decisions [J]. *Ecology Letters*, 2013, 16 (12): 1424-1435.
- Moreno R, Zamora R, Molina JR, *et al.* Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in south Chilean temperate forests using maximum entropy (MaxEnt) [J]. *Ecological Informatics*, 2011, 6 (6): 364-370.
- Pearce JL, Boyce MS. Modelling distribution and abundance with presence-only data [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43 (3): 405-412.
- Phillips SJ, Dudík M. Modeling of species distributions with MaxEnt: New extensions and a comprehensive evaluation [J]. *Ecography*, 2008, 31 (2): 161-175.
- Raghavan RK, Koestel Z, Ierardi R, *et al.* Climatic suitability of the eastern paralysis tick, *Ixodes holocyclus*, and its likely geographic distribution in the year 2050 [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11 (1): 15330.
- Thakur D, Chawla A. Functional diversity along elevational gradients in the high altitude vegetation of the western Himalaya [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2019, 28 (8-9): 1977-1996.
- van Vuuren DP, Riahi K, Moss R, *et al.* A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities [J]. *Global Environmental Change*, 2012, 22 (1): 21-35.
- Sun XL, Wang GC, Cai XM, *et al.* The tea weevil, *Mylokerinus aurolineatus*, is attracted to volatiles induced by conspecifics [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2010, 36 (4): 388-395.
- Yan Y, Li Y, Wang WJ, *et al.* Range shifts in response to climate change of *Ophiocordyceps sinensis*, a fungus endemic to the Tibetan plateau [J]. *Biological Conservation*, 2017, 206: 143-150.
- Yang XQ, Kushwaha SPS, Saran S, *et al.* Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 51 (1): 83-87.
- Cai XM. The Emission of Tea Plant Volatiles Induced by Three Herbivore Insect Pests [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Doctoral Thesis, 2009. [蔡晓明. 三种茶树害虫诱导茶树挥发物的释放规律 [D]. 北京: 中国农业科学院博士论文, 2009]
- Zeng MS, Wu GY, Lin AX. A preliminary study on the distribution of *Mylokerinus aurolineatus* larvae and pupae in tea plantations [J]. *Tea Science Bulletin*, 1994, 3: 19-22. [曾明森, 吴光远, 林阿祥. 茶丽纹象甲幼虫、蛹茶园分布规律初探 [J]. 茶叶科学简报,



1994, 3: 19-22]

- Zeng MS, Wu GY, Wang QS. Research progress on *Myllocerinus aurolineatus* Voss in China [J]. *Journal of Henan University of Science and Technology* (Agronomic Science), 2003, 4: 16-20. [曾明森, 吴光远, 王庆森. 我国茶丽纹象甲的研究进展 [J]. 河南科技大学学报(农学版), 2003, 4: 16-20]
- Chen LL, Zhou H, Zhao J. Potential climate-suitable distribution of *Ectropis Grisescens* in China based on the CLIMEX and ArcGIS prediction [J]. *Journal of Tea Science*, 2020, 40 (6): 817-829. [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 [J]. 茶叶科学, 2020, 40 (6): 817-829]
- Cheng XR, Ren LL, Yang XL, et al. A CMIP5 multi-model estimation of spatio-temporal characteristics of temperature, precipitation in 7 regions of China [J]. *Hydrology*, 2016, 36 (4): 37-43. [程雪蓉, 任立良, 杨肖丽, 等. CMIP5 多模式对中国及各分区气温和降水时空特征的预估 [J]. 水文, 2016, 36 (4): 37-43]
- Gao XF, Li HL, Wang RJ. Defense response of tea plants induced by *Myllocerinus aurolineatus* Voss damage [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39 (11): 1943-1951. [高香凤, 李慧玲, 王让剑. 茶丽纹象甲为害诱导的茶树防御反应分析 [J]. 西北植物学报, 2019, 39 (11): 1943-1951]
- Gao Y, Chen ZM, Sun XL. Antennal sensilla of the tea weevil *Myllocerinus aurolineatus* [J]. *Plant Protection*, 2013, 39 (3): 45-50. [高宇, 陈宗懋, 孙晓玲. 茶丽纹象甲触角感器的扫描电镜观察 [J]. 植物保护, 2013, 39 (3): 45-50]
- Han JJ, Li XW, Liu FJ, et al. Feeding selection of tea cultivars by the tea weevil and the four induced terpenoids [J]. *Journal of Tea Science*, 2017, 37 (2): 220-227. [韩娟娟, 李喜旺, 刘丰静, 等. 茶丽纹象甲对茶树品种的取食选择及其诱导的 4 种萜烯类化合物 [J]. 茶叶科学, 2017, 37 (2): 220-227]
- Hu YS, Mo XY, Liu YH. The functional traits of forests at different succession stages and their relationship to terrain factors in Changbai Mountains [J]. *Acta Ecological Sinica*, 2014, 34 (20): 5915-5924. [胡耀升, 么旭阳, 刘艳红. 长白山不同演替阶段森林植物功能性状及其与地形因子间的关系 [J]. 生态学报, 2014, 34 (20): 5915-5924]
- Huang SX. Occurrence and integrated prevention and control technology of *Myllocerinus aurolineatus* Voss [J]. *Tea Science and Technology*, 2005, 3: 38. [黄世雄. 茶丽纹象甲发生与综合防治技术 [J]. 茶叶科学技术, 2005, 3: 38]
- Jia D, Xu CQ, Liu YH, et al. Potential distribution prediction of apple-grass aphid *Rhopalosiphum oxyacanthae* in China based on MaxEnt model [J]. *Journal of Plant Protection*, 2020, 47 (3): 528-536. [贾栋, 徐朝茜, 刘艳红, 等. 基于 MaxEnt 模型预测苹红缢管蚜在中国的适生区 [J]. 植物保护学报, 2020, 47 (3): 528-536]
- Li W, Cui LJ, Zhao XS, et al. Community structure and diversity of soil animals in the lake Taihu lakeshore wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (4): 944-955. [李伟, 崔丽娟, 赵欣胜, 等. 太湖岸带湿地土壤动物群落结构与多样性 [J]. 生态学报, 2015, 35 (4): 944-955]
- Li YM. Identification and prevention and control of *Myllocerinus aurolineatus* Voss [J]. *Hunan Agriculture*, 2021, 4: 19. [李耀明. 茶丽

- 纹象甲的识别与防控 [J]. 湖南农业, 2021, 4: 19]
- Li ZH, Qin YJ. Review on the quantitative assessment models for pest risk analysis and their comparison [J]. *Plant Protection*, 2018, 44 (5): 134-145. [李志红, 秦誉嘉. 有害生物风险分析定量评估模型及其比较 [J]. 植物保护, 2018, 44 (5): 134-145]
- Lin W, Lin J, Lin CZ. Occurrence characteristics and green prevention and control technology of *Myllocerinus aurolinealus* Voss in Fu'an tea garden [J]. *Farm Staff Officer*, 2021, 12: 54-55. [林武, 林杰, 林长征. 福安茶园茶丽纹象甲的发生为害特点与绿色防控技术 [J]. 农家参谋, 2021, 12: 54-55]
- Liu C, Huo HL, Tian LM, et al. Potential geographical distribution of *Pyrus calleryana* under different climate change scenarios based on the MaxEnt model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29 (11): 3696-3704. [刘超, 霍宏亮, 田路明, 等. 基于 MaxEnt 模型不同气候变化情景下的豆梨潜在地理分布 [J]. 应用生态学报, 2018, 29 (11): 3696-3704]
- Liu FJ, Li HL, Wang DF, et al. Research on feeding habit and economic thresholds in *Myllocerinus aurolineatus* Voss (Coleoptera, Curculionidae) control [J]. *Acta Tea Sinica*, 2015, 56 (1): 45-50. [刘丰静, 李慧玲, 王定锋, 等. 茶丽纹象甲取食习性与防治指标研究 [J]. 茶叶学报, 2015, 56 (1): 45-50]
- Liu M, Zhang DS. Adaptability of landscape tree species response to climate change in Shanghai within the past 55 years [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, 40 (9): 107-117. [刘鸣, 张德顺. 近 55 年气候变化对上海园林树种适应性的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2018, 40 (9): 107-117]
- Liu Y, Shi J. Prediction of potential geographical distribution of *Icerya aegyptiaca* in China under climate change [J]. *Plant Protection*, 2020, 46 (1): 108-117. [刘洋, 石娟. 气候变化背景下埃及吹绵蚧在中国的适生区预测 [J]. 植物保护, 2020, 46 (1): 108-117]
- Lv WM. Dynamics of growth and decline of adult *Myllocerinus aurolineatus* Voss and their leaf feeding [J]. *China Tea*, 1993, 1: 30-31. [吕文明. 茶丽纹象甲成虫消长动态及其食叶量 [J]. 中国茶叶, 1993, 1: 30-31]
- Luo BL, Li YZ. Characteristics of serious high temperature and drought and anomalies of atmospheric circulation in summer of 2013 in Hu'nan Province [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2014, 32 (4): 593-598. [罗伯良, 李易芝. 2013 年夏季湖南严重高温干旱及其大气环流异常 [J]. 干旱气象, 2014, 32 (4): 593-598]
- Mao XR. Occurrence and prevention methods of tea weevils in Jian'ou tea area [J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2010, 5: 53-54. [毛新荣. 建瓯茶区茶丽纹象甲的发生及其防治方法 [J]. 福建农业科技, 2010, 5: 53-54]
- Sun PS, Jiang F, Zhang XL, et al. Invasion risk assessment of the Mediterranean fruit fly *Ceratitidis capitata* into China [J]. *Journal of Plant Protection*, 2017, 44 (3): 436-444. [孙佩珊, 姜帆, 张祥林, 等. 地中海实蝇入侵中国的风险评估 [J]. 植物保护学报, 2017, 44 (3): 436-444]
- Sun XL. The leaf-eating expert "Flower Chicken Lady" in tea plantations—*Myllocerinus aurolineatus* Voss [J]. *China Tea*, 2018, 40 (11): 14-16. [孙晓玲. 茶园食叶能手“花鸡娘”——茶丽纹象甲 [J]. 中国茶叶, 2018, 40 (11): 14-16]
- Sun XL, Chen ZM. Research status and prospect of the prevention and treatment of *Myllocerinus aurolineatus* Voss [J]. *China Tea*, 2009,

- 31 (11): 8-10. [孙晓玲, 陈宗懋. 茶丽纹象甲防治研究现状及展望 [J]. 中国茶叶, 2009, 31 (11): 8-10]
- Wang RZ. Occurrence and forecast of *Myllocerinus aurolineatus* Voss [J]. *Newsletter of Sericulture and Tea*, 1988, 4: 19-20, 18. [汪荣灶. 茶丽纹象甲的发生与测报 [J]. 蚕桑茶叶通讯, 1988, 4: 19-20, 18]
- Wang DF, Li JL, Li HL, *et al.* Identification and biology characteristics research of a *Myllocerinus aurolineatus-Beauveria* strain isolated from Guangdong Province [J]. *Journal of Tea Science*, 2015, 35 (5): 449-457. [王定锋, 黎健龙, 李慧玲, 等. 茶丽纹象甲白僵菌广东分离株的鉴定及生物学特性研究 [J]. 茶叶科学, 2015, 35 (5): 449-457]
- Wang GC. Ecological Functions of Tea Plant Volatiles Induced by Three Herbivores [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Doctoral Thesis, 2010. [王国昌. 三种害虫诱导茶树挥发物的生态功能 [D]. 北京: 中国农业科学院博士论文, 2010]
- Wang MX, Shao YH, Xu DL. Differences in damage and control efficiency of *Myllocerinus aurolineatus* Voss and *Apolygus lucorum* (Meyer-Dür) [J]. *Journal of Tea*, 2017, 43 (4): 210-212. [王敏鑫, 邵元海, 徐德良. 茶丽纹象甲和绿盲蝽田间为害及防治差异性分析 [J]. 茶叶, 2017, 43 (4): 210-212]
- Wang QS, Wu GY. Occurrence of major tea pests and key points of pollution-free control in Fujian Province [J]. *Tea Science and Technology*, 2001, 4: 33-35. [王庆森, 吴光远. 福建省茶树主要害虫的发生及其无公害防治要点 [J]. 茶叶科学技术, 2001, 4: 33-35]
- Wang RJ, Li HL, Gao XF. Enzyme genes related to defense mechanism in tea plant induced by tea weevil (*Myllocerinus aurolineatus* Voss) Feeding [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32 (12): 2313-2325. [王让剑, 李慧玲, 高香凤. 茶丽纹象甲危害诱导的茶树防御机制相关酶基因发掘 [J]. 核农学报, 2018, 32 (12): 2313-2325]
- Wu HF. Studies on the Bioecology of *Myllocerinus Aurolineatus* Voss and Its Biological Control [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University Master Thesis, 2018. [吴慧枫. 茶丽纹象甲危害翅荚木的种群生物生态学及生防研究 [D]. 福州: 福建农林大学硕士论文, 2018]
- Wu SJ, Zhu TH, Chen TM. Projections of Yunnan pine moth *Dendrolimus houi* in Sichuan Province under future climate change based on species distribution model [J]. *Journal of Plant Protection*, 2021, 48 (4): 882-890. [吴思俊, 朱天辉, 譙天敏. 基于物种分布模型对未来气候变化下云南松毛虫在四川省适生区的预测 [J]. 植物保护学报, 2021, 48 (4): 882-890]
- Xu W. Modeling the Suitable Habitats of *Malus pumila* Mill on the Loess Plateau under Two Future Climate Scenarios [D]. Xianyang: University of Chinese Academy of Sciences Doctoral Thesis, 2021. [许伟. 两种气候情景下黄土高原苹果适宜区的模拟 [D]. 咸阳: 中国科学院大学博士论文, 2021]
- Yu WJ, Song XS, Zhao HY, *et al.* Study of life history and occurrence regularity of *Curculio davidi* Fairmaire in the Mudanjiang area [J]. *Forestry Science & Technology*, 2014, 39 (5): 24-26. [遇文婧, 宋小双, 赵红盈, 等. 牡丹江地区栗实象甲生活史及发生规律研究 [J]. 林业科技, 2014, 39 (5): 24-26]
- Zhang JR, Luosang ZM, Yang WJ, *et al.* Hazards and control of typical invasive alien species *Sicyos angulatus* in Dalian area, Liaoning

- Province [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2017, 26: 188-189. [张健榕, 洛桑竹玛, 杨文举, 等. 辽宁大连地区典型外来入侵物种刺果瓜危害与防治 [J]. 科学技术创新, 2017, 26: 188-189]
- Zhang XL, Li YC, Wang YY, *et al.* Influence of future climate change in suitable habitats of tea in different countries [J]. *Biodiversity Science*, 2019, 27 (6): 595-606. [张晓玲, 李亦超, 王芸芸, 等. 未来气候变化对不同国家茶适宜分布区的影响 [J]. 生物多样性, 2019, 27 (6): 595-606]
- Zhang Y. The Invasion Risk of *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) and *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae) under the Global Climate Change [D]. Beijing: China Agricultural University Master Thesis, 2020. [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: 中国农业大学硕士论文, 2020]
- Zhu GP, Liu GQ, Bu WJ, *et al.* Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation [J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21 (1): 90-98. [朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 等. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用 [J]. 生物多样性, 2013, 21 (1): 90-98]
- Zhu GP, Liu Q, Gao YB. Improving ecological niche model transferability to predict the potential distribution of invasive exotic species [J]. *Biodiversity Science*, 2014, 22 (2): 223-230. [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 [J]. 生物多样性, 2014, 22 (2): 223-230]
- Zhu JQ, Shang JN. Prediction of the optimum control of *Mylokerinus aurolinealus* Voss [J]. *Tea Communication*, 1994, 2: 14-17. [朱俊庆, 商建农. 茶丽纹象甲防治适期的预测 [J]. 茶叶通讯, 1994, 2: 14-17]
- Zhu JQ, Shang JN. Studies on the control index of *Mylokerinus aurolinealus* Voss [J]. *Journal of Tea*, 1994, 3: 22-24. [朱俊庆, 商建农. 茶丽纹象甲防治指标的研究 [J]. 茶叶, 1994, 3: 22-24]