

基于 MaxEnt 模型预测气候变化下 苜蓿切叶蜂的潜在地理分布*

朱猛蒙^{1**} 段盼² 王宪辉³ 侯丽³ 赵紫华^{2***}

(1. 宁夏农林科学院植物保护研究所, 银川 750002; 2. 中国农业大学植物保护学院植物生物安全系, 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; 3. 中国科学院动物研究所, 农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室, 北京 100101)

摘要 【目的】苜蓿切叶蜂 *Megachile rotundata* 是苜蓿的高效传粉昆虫之一, 为明确苜蓿切叶蜂的潜在地理分布区域, 为指导苜蓿切叶蜂的扩繁地选择及引种风险评估提供依据。【方法】本研究基于当前苜蓿切叶蜂在全球的分布点, 使用 MaxEnt 模型评估其不同气候情景下全球以及中国的潜在地理分布, 筛选主导其分布的环境因子。【结果】MaxEnt 模型的曲线下面积 (Area under curve, AUC) 值为 0.951, 模型预测结果可靠性较高; 最热季节的平均气温 bio10 是影响苜蓿切叶蜂分布最主要的气候因子, 累积贡献率为 31.4%。历史气候情景下, 苜蓿切叶蜂在全球的分布集中在欧洲和北美洲, 在中国集中于中西部地区的西藏、青海、甘肃、新疆和宁夏等地; 未来气候情景下, 其在全球的总适生区收缩, 在中国的总适生区扩张。苜蓿切叶蜂在全球的高适生区分布随气候变暖逐渐北移, 高适生区面积在低强迫时增加, 高强迫时减小; 在中国的高适生区随气候变暖不断增加, 主要集中于西藏和青海等地。【结论】苜蓿切叶蜂在中国的适生区较为广泛, 未来实现进一步扩繁的可能性较高, 最热季节的平均气温 bio10 可作为选择适宜扩繁地的首要考虑因素, 且在引种和本土扩繁时需加强风险评估、有害生物检疫及蜂群管理。

关键词 MaxEnt 模型; 独居蜂; 传粉; 引种; 气候变化

Potential geographical distribution of *Megachile rotundata* under climate change based on MaxEnt model

ZHU Meng-Meng^{1**} DUAN Pan² WANG Xian-Hui³ HOU Li³ ZHAO Zi-Hua^{2***}

(1. Institute of Plant Protection, Ningxia Academy of Agricultural Sciences, Yinchuan 750002, China; 2. Key Laboratory of Surveillance and Management for Plant Quarantine Pests, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Department of Plant Biosecurity, College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract 【Aim】The alfalfa leafcutter bee (*Megachile rotundata*) is one of the most efficient pollinators of alfalfa. The aim of this study was to determine its potential geographic distribution and provide scientific guidance for selecting suitable areas for its brood production and to assess the risks of its introduction. 【Methods】Based on the current global distribution of *M. rotundata*, we assessed the potential geographical distribution globally and in China under different climatic conditions and classified the dominant bioclimatic variable using the MaxEnt model. 【Results】The results showed that the average area under curve (AUC) of the MaxEnt model was 0.951, indicating reliable prediction results. The mean temperature of the warmest quarter, bio10, had the greatest impact on the distribution of *M. rotundata*, accounting for 31.4% of the total. Under historical climatic conditions, the global distribution of *M. rotundata* was concentrated in Europe and North America. The distribution in China occurred in the central and western regions, including Tibet, Qinghai, Gansu, Xinjiang, and Ningxia. Under projected future climatic conditions, habitable zones for *M. rotundata* are predicted to contract, whereas suitable areas

*资助项目 Supported projects: 宁夏回族自治区重点研发计划 (2022BBF02028); 2020 年青年拔尖人才培养工程

**第一作者 First author, E-mail: mn1979108@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhzhao@cau.edu.cn

收稿日期 Received: 2023-10-11; 接受日期 Accepted: 2024-01-15

in China are predicted to expand. As the climate warms, the most habitable areas for *M. rotundata* show a northward shift. These areas are projected to expand under the low forcing climate scenario but shrink under a high forcing climate scenario. Climate warming has resulted in an increase in the number of highly suitable areas for *M. rotundata*, particularly in regions such as Xizang and Qinghai. **[Conclusion]** *M. rotundata* has a relatively wide area of suitable habitat in China, indicating a high potential for future population expansion. The mean temperature of the warmest quarter, bio10, should be considered as the primary factor when selecting suitable areas for its reproduction. Additionally, risk assessment, pest quarantine, and bee management should be strengthened in China during its introduction and local brood production.

Key words MaxEnt model; solitary bee; pollination; introduction; climate change

苜蓿切叶蜂 *Megachile rotundata* 隶属于膜翅目 Hymenoptera 切叶蜂科 Megachilidae 切叶蜂属 *Megachile*, 是一种具有群居筑巢习性的独居蜂 (Delaplane, 2021)。苜蓿切叶蜂是苜蓿 *Medicago sativa* 的优势授粉蜂种, 其在访花过程中能主动打开苜蓿花的龙骨瓣, 使用腹部“花粉刷”粘附传播花粉, 授粉效率显著高于西方蜜蜂 *Apis mellifera* 等蜂种, 能使苜蓿种子增产 3 倍以上 (Cane, 2002; 武敏等, 2020; Renzi *et al.*, 2022)。苜蓿切叶蜂原产于欧亚大陆, 自 20 世纪 30 年代起, 逐渐被苜蓿制种者关注, 经过对生活史的观测与研究, 管理者建立了苜蓿切叶蜂独特的巢室管理系统, 对蜂群持续繁育与驯化。目前苜蓿切叶蜂在北美地区已实现商品化, 加拿大等发达国家每年会出口数十亿商品蜂, 为世界各地的苜蓿制种提供授粉服务。应用苜蓿切叶蜂授粉已成为苜蓿制种过程的必要措施 (李建平等, 2005; Pitts-Singer and Cane, 2011; Osterman *et al.*, 2021)。

我国是苜蓿生产大国, 苜蓿种植历史悠久, 近年来, 苜蓿种植面积不断扩大, 但种子单产仍远低于美国和加拿大等畜牧业发达国家, 种子产量常年无法满足需求, 对进口种子依赖程度高, 而除了苜蓿品种的差异外, 缺乏高效的传粉昆虫已成为制约苜蓿种子生产的主要因素 (李茂海等, 2008)。我国自 20 世纪 80 年代开始多次引进加拿大商业化蜂群为苜蓿和大豆授粉, 在黑龙江、吉林和新疆等地区应用苜蓿切叶蜂授粉后种子单产显著提升, 但由于缺乏高效的人工繁育技术和适宜的扩繁地, 人工管理种群仍待扩繁, 以满足苜蓿等作物的授粉需求 (刘晨曦等, 2004; 李茂海等, 2008)。

在探究气候变化背景下外来物种适生区格

局, 从而进一步对外来物种进行风险评估过程中, 最大熵模型 (Maximum entropy, MaxEnt) 被广泛使用。MaxEnt 模型是基于生态位理论, 结合多种环境因子变量构建的生态位模型, 在生态学应用中, 其假设物种在没有约束的条件下会尽最大可能扩散, 接近均匀分布 (Phillips *et al.*, 2006), 其预测准确性高, 易于操作 (王艳君等, 2021)。Qin 等 (2019) 基于 MaxEnt 模型预测了气候变化背景下全球范围内桔小实蝇 *Bactrocera dorsalis* 当前及未来的分布情况; 魏鹏等 (2022) 基于 MaxEnt 模型对不同气候条件下玉米根萤叶甲 *Diabrotica virgifera virgifera* 在我国的适生区及格局变化进行了预测。

目前, 我国对苜蓿切叶蜂的引种需求依旧很大, 且尚未制定苜蓿切叶蜂相关的检疫和管理措施, 也缺乏科学、系统选定扩繁地的流程与方法, 粗放滥放易造成无法挽回的蜂群损失。本研究旨在明确影响苜蓿切叶蜂分布的主要气候因素, 并评估我国适宜苜蓿切叶蜂生存的地区, 为开展实际的扩繁研究和开发高效人工繁育技术提供理论参考。同时, 由于苜蓿切叶蜂是外来物种, 本研究对气候变化背景下其在全球和中国的潜在地理分布情况进行分析, 在此基础上讨论其入境后可能存在的风险, 为苜蓿制种过程中应用和管理苜蓿切叶蜂提供指导, 以进一步提高有害生物的风险预警和风险管理能力。

1 材料与方法

1.1 材料

分布数据: 苜蓿切叶蜂的分布数据下载自全球生物多样性信息网络 (Global biodiversity

information facility, GBIF, <https://www.gbif.org>), 并以国内外公开发表的文献和书籍等为辅助予以校正和补充(中国生物物种名录 2023 版)。

气候数据: 气候数据下载自世界气候(WorldClim, <http://www.worldclim.org/>)网站, 共包含 19 个环境变量(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、气温季节性变化 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), 使用 $5 \text{ min} \times 5 \text{ min}$ 的分辨率, 使用的历史气候情景是 1970-2000 年, 使用的未来气候情景是 2041-2060 年。

地图数据: 使用比例为 1 : 14 000 000 的中国地图, 自自然资源部标准地图服务系统(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)下载获取底图数据; 世界地图比例为 1 : 10 000 000, 底图数据下载自 Natural Earth (<https://www.naturalearthdata.com/>), 版本为 5.1.1, 选用中国视角。

数据分析及可视化: 使用 IBM SPSS Statistics 26 进行因子分析和相关性分析, 使用 R 语言(版本 4.2.2, <https://www.r-project.org/>)进行结果可视化; 基于 MaxEnt 3.4.1 (http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/)软件进行苜蓿切叶蜂当前及未来气候条件下潜在地理分布预测, 使用 ArcGIS 10.2(中国农业大学植物保护学院植物检疫与入侵生物学实验室购买)软件对预测结果进行可视化。

1.2 方法

1.2.1 苜蓿切叶蜂分布数据处理及关键环境变量筛选 处理分布数据时, 基于收集到的原始数据, 首先使用 Excel 去重复功能删除完全相同的分布点; 之后在 ArcGIS 10.2 中导入数据, 基于 SDM Tools 工具进行空间自相关的分布点的删

除步骤; 进一步将数据转换为空间分辨率 $5 \text{ min} \times 5 \text{ min}$ 栅格格式, 将落在海里等不符合要求的分布点删除; 最后, 将上述处理完成的分布数据导入 MaxEnt 3.4.1 软件, 基于 19 个环境变量进行预运行, 进一步删除不符合要求的分布点, 作为最终使用的分布数据, 同时筛选出贡献率为 0 的环境变量。筛选关键环境变量时, 基于上述分布数据, 使用 ArcGIS 10.2 进行环境变量的采样, 经因子分析和相关性分析, 筛选出贡献率较大的相关(相关系数 ≥ 0.8)变量, 去除其中贡献率为 0 的环境变量, 作为最终参与建模的环境变量。在本研究中, 由于美国东南部的苜蓿切叶蜂大多来自商品化引种, 基于文献, 我们对相关分布数据进行了手动删除(Eves *et al.*, 1980; 徐希莲等, 2010)。

1.2.2 MaxEnt 建模及模型精度评价 在第六次国际耦合模式比较计划(Coupled model intercomparison project phase 6, CMIP6)中北京气候中心气候系统模型(Beijing climate center climate system model 2 medium resolution, BCC-CSM2-MR)的低强迫情景 SSP126 和高强迫情景 SSP585 下进行苜蓿切叶蜂潜在地理分布预测建模(辛晓歌等, 2019; 魏鹏等, 2022), 在模型设置时, 随机选择 25% 的分布点作为测试集, 75% 的分布点作为训练集, 要素类特征组合为线性、二次型、乘积型和片段化 4 种因素组合, 正则化乘数为 1, 重复次数为 10 次, 选用 Subsample 作为重复运行规则, 设置最大迭代次数为 5 000。受试者工作特征(Receiver operating characteristic, ROC)曲线下面积(Area under curve, AUC)评估模型的精度, 当 $AUC \geq 0.9$ 时认为模型预测结果优秀, $0.7 \leq AUC < 0.9$ 时认为模型预测结果良好, $0.5 \leq AUC < 0.7$ 时认为模型预测结果可接受, $AUC < 0.5$ 时认为模型预测无效(Peterson *et al.*, 2008; 徐艳玲等, 2022)。

1.2.3 适生区等级划分及面积计算 在 ArcGIS 中使用自然断点分级法对苜蓿切叶蜂的适生区进行分级和结果可视化, P 为苜蓿切叶蜂的适生分布概率, $P < 0.08$ 时为非适生区, $0.08 \leq P < 0.25$ 时为低适生区, $0.25 \leq P < 0.49$ 时为中适

生区, $0.49 \leq P \leq 1$ 时为高适生区。获得各适生区后, 基于各适生区所占的比例, 使用重分类工具对各适生区面积进行计算。

2 结果与分析

2.1 影响苜蓿切叶蜂分布的关键环境变量

因子分析和相关性分析结果表明, 共有 6 个影响苜蓿切叶蜂分布的关键环境变量, 为气温季节性变化 bio4、最湿季节的平均气温 bio8、最热季节的平均气温 bio10、最干月的降水量 bio14、

降水的季节变化 bio15 和最湿季节的降水量 bio16, 在模型中, 各变量的累积贡献率分别为 24%、13.1%、31.4%、29.1%、0.5%和 1.8%, 相关性分析如图 1 (A) 所示。对 6 个环境变量进行刀切法检验, 结果表明, 在“仅此变量”下, 最热季节的平均气温 bio10 对苜蓿切叶蜂分布预测的影响最大, 气温季节性变化 bio4 对其分布预测影响最小 (图 1: B)。在“除此变量”下, 最热季节的平均气温 bio10 的正规化训练增益值最小, 其所包含的其他变量不具备的独特信息较多 (图 1: B)。

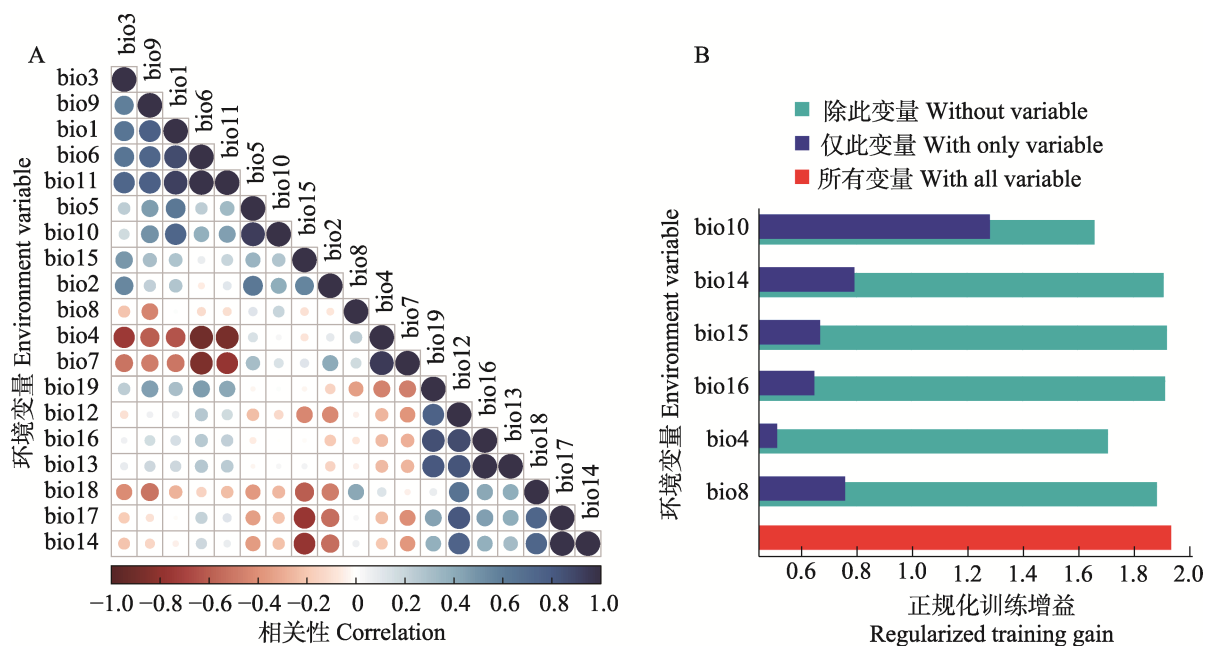


图 1 苜蓿切叶蜂环境变量筛选及贡献程度

Fig. 1 Selection and contribution of environmental variables for *Megachile rotundata*

A. 19 个环境变量的 Pearson 相关性分析; B. 刀切法检验关键环境变量对苜蓿切叶蜂分布重要程度。

A. Pearson correlation analysis among 19 environmental variables; B. Importance of the key environmental variables in predicting the distribution of *M. rotundata* by jackknife test.

bio1: 年平均气温; bio2: 月平均昼夜温差; bio3: 平均日温; bio4: 气温季节性变化; bio5: 最热月最高温; bio6: 最冷月最低温; bio7: 年气温变化范围; bio8: 最湿季节平均气温; bio9: 最干季节平均气温; bio10: 最热季节平均气温; bio11: 最冷季节平均气温; bio12: 年降水量; bio13: 最湿月降水量; bio14: 最干月降水量; bio15: 降水季节变化; bio16: 最湿季节降水量; bio17: 最干季节降水量; bio18: 最暖季节降水量; bio19: 最冷季节降水量。

bio1: Annual mean temperature; bio2: Mean diurnal range; bio3: Isothermality; bio4: Temperature seasonality; bio5: Maximum temperature of the warmest month; bio6: Minimum temperature of the coldest month; bio7: Temperature annual range; bio8: Mean temperature of the wettest quarter; bio9: Mean temperature of the driest quarter; bio10: Mean temperature of the warmest quarter; bio11: Mean temperature of the coldest quarter; bio12: Annual precipitation; bio13: Precipitation of the wettest month; bio14: Precipitation of the driest month; bio15: Precipitation seasonality; bio16: Precipitation of the wettest quarter; bio17: Precipitation of the driest quarter; bio18: Precipitation of the warmest quarter; bio19: Precipitation of the coldest quarter.

2.2 苜蓿切叶蜂潜在地理分布 MaxEnt 模型精度评价

重复 10 次模拟运行 MaxEnt 模型结果表明, ROC 曲线下的 AUC 值平均为 0.951 (图 2), 构建分布模型精度很好, 预测结果为优秀, 可以用于苜蓿切叶蜂潜在地理分布的预测。

2.3 历史气候情景下苜蓿切叶蜂在全球及在中国的潜在地理分布

当前, 苜蓿切叶蜂主要分布在欧洲、北美洲、亚洲西南部、大洋洲岛屿以及南美洲部分地区。历史气候情景下, 其在全球的适生区分布较为广泛, 主要集中在欧洲和北美洲地区, 总适生面积为 3 547.56 万 km² (表 1), 高适生区主要集中在欧洲, 如法国、德国、波兰和捷克等, 以及北美洲的美国和加拿大部分地区。其在中国的适生区主要集中在中西部, 大部分为中、低适生区,

总适生区面积为 179.14 万 km², 约占我国国土总面积的 18.61%, 高适生区面积为 1.65 万 km², 仅占我国国土总面积的 0.17% 主要集中在新疆、西藏、青海、甘肃和宁夏等地区(表 2, 图 3)。

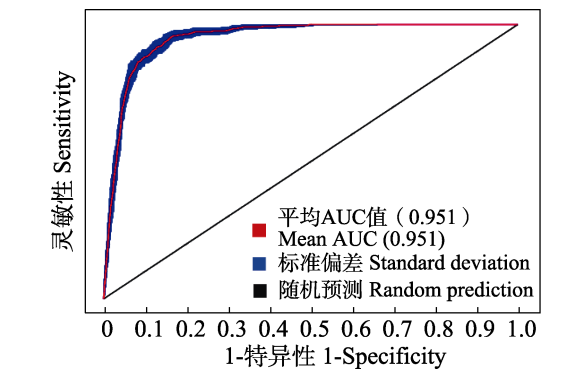


图 2 MaxEnt 模型对预测结果的 ROC 曲线及 AUC 值
Fig. 2 ROC curves and AUC values of predicted results of the MaxEnt model

ROC: 受试者工作特征曲线 Receiver operating characteristic;
AUC: 曲线下面积 Area under curve.

表 1 不同气候情景下苜蓿切叶蜂在全球的适生区面积

Table 1 The global suitable area of <i>Megachile rotundata</i> under different climate scenarios					
气候情景 Climate scenarios	非适生区面积 ($\times 10^4$ km ²) Unsuitable area ($\times 10^4$ km ²)	低适生区面积 ($\times 10^4$ km ²) Lowly suitable area ($\times 10^4$ km ²)	中适生区面积 ($\times 10^4$ km ²) Moderately suitable area ($\times 10^4$ km ²)	高适生区面积 ($\times 10^4$ km ²) Highly suitable area ($\times 10^4$ km ²)	总适生区面积 ($\times 10^4$ km ²) Total suitable area ($\times 10^4$ km ²)
1970-2000	18 467.81	1 840.49	1 002.87	704.21	3 547.56
2041-2060 SSP126	18 399.81	1 764.33	1 015.77	740.35	3 520.45
2041-2060 SSP585	18 590.8 0	1 648.06	1 008.41	672.99	3 329.46

SSP126: 低强迫情景; SSP585: 高强迫情景。下表和下图同。
SSP126: Low forcing scenario; SSP585: High forcing scenario. The same for the following table and figures.

表 2 不同气候情景下苜蓿在中国的适生区面积

Table 2 The suitable area of <i>Megachile rotundata</i> in China under different climate scenarios					
气候情景 Climate scenarios	非适生区面积 ($\times 10^4$ km ²) Unsuitable area ($\times 10^4$ km ²)	低适生区面积 ($\times 10^4$ km ²) Lowly suitable area ($\times 10^4$ km ²)	中适生区面积 ($\times 10^4$ km ²) Moderately suitable area ($\times 10^4$ km ²)	高适生区面积 ($\times 10^4$ km ²) Highly suitable area ($\times 10^4$ km ²)	总适生区面积 ($\times 10^4$ km ²) Total suitable area ($\times 10^4$ km ²)
1970-2000	783.56	120.10	57.38	1.65	179.14
2041-2060 SSP126	768.24	127.94	56.02	10.50	194.46
2041-2060 SSP585	745.74	134.48	65.01	17.47	216.97

2.4 未来 2 种气候情景下苜蓿切叶蜂在全球及在中国的潜在地理分布

未来 2 种气候情景下, 苜蓿切叶蜂在全球的

总适生区收缩, 在中国的总适生区扩张 (表 1, 2)。未来气候低强迫 SSP126 情景下, 苜蓿切叶蜂在全球的适生区主要集中在欧洲和北美洲地区, 总适生区和高适生区分布较历史气候情景下

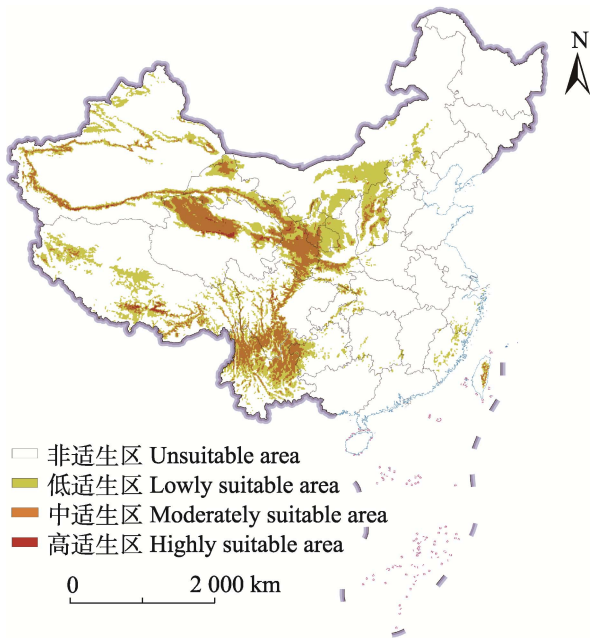


图 3 历史气候情景（1970-2000）下苜蓿切叶蜂在中国的潜在地理分布 [审图号：京审字（2024）G 第 1860 号]

Fig. 3 Potential geographical distribution in China of *Megachile rotundata* under historical climatic scenarios (1970-2000)

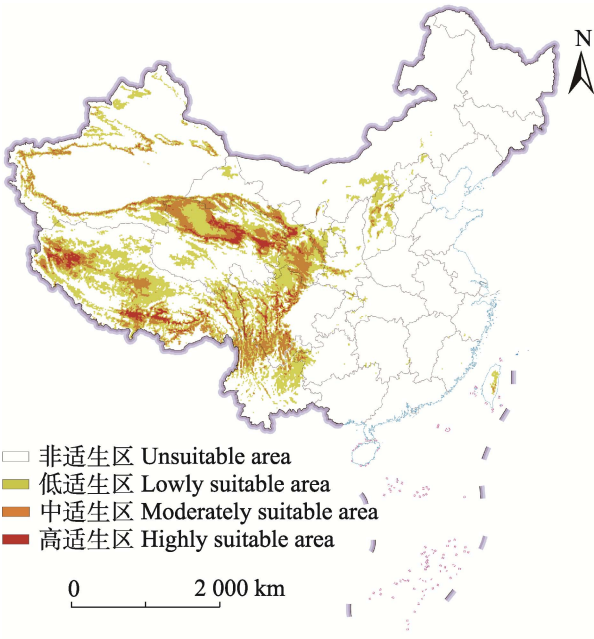


图 4 未来气候低强迫 SSP126 情景（2041-2060 SSP126）下苜蓿切叶蜂在中国的潜在地理分布 [审图号：京审字（2024）G 第 1860 号]

Fig. 4 Potential geographical distribution in China of *Megachile rotundata* under future climatic conditions of low forcing scenarios (2041-2060 SSP126)

略往北移，高适生区面积为 740.35 万 km^2 ，较历史气候情景下有所增加（表 1）；苜蓿切叶蜂在中国的适生区主要集中在中西部地区，高适生区较历史气候情景下有明显增加，面积为 10.50 万 km^2 （表 2，图 4）。未来气候高强迫 SSP585 情景下，苜蓿切叶蜂在全球的总适生区和高适生区进一步北移，较历史气候情景下面积有所减小，总适生区面积为 3 329.46 万 km^2 ，高适生区面积为 672.99 万 km^2 （表 1）；苜蓿切叶蜂在中国的适生区也进一步增加，并向西、向北转移，仍主要集中在西藏、青海、甘肃和新疆等地区，总适生区面积为 216.97 万 km^2 ，高适生区面积为 17.47 万 km^2 （表 2，图 5）。

3 讨论

本研究表明，最热季节的平均气温 bio10 是影响苜蓿切叶蜂分布的最重要因素，这可能与苜蓿切叶蜂雌蜂活动和后代发育受温度影响较大

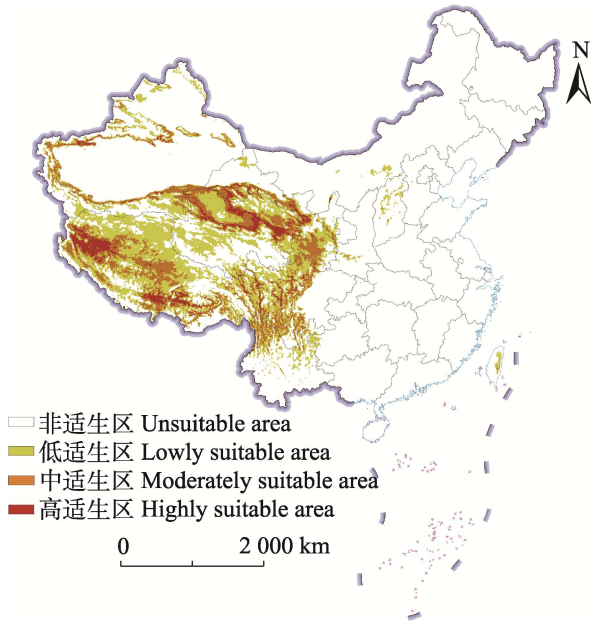


图 5 未来气候高强迫 SSP585 情景（2041-2060 SSP585）下苜蓿切叶蜂在中国的潜在地理分布 [审图号：京审字（2024）G 第 1860 号]

Fig. 5 Potential geographical distribution in China of *Megachile rotundata* under future climatic conditions of high forcing scenarios (2041-2060 SSP585)

有关。苜蓿开花和结实,及苜蓿切叶蜂繁育后代通常都在最热季节内完成,越冬的苜蓿切叶蜂滞育预蛹在升温后迅速发育为成虫并交配,在之后的 2-3 个月筑巢期内雌蜂不断筑巢并繁殖后代,最热季节的气温是限制苜蓿切叶蜂生存和繁殖的一个重要气候因子,环境温度过低或过高都不利于种群的扩繁。例如,加拿大阿尔伯塔省相对更高的温度(21-25 °C)比相对较低温度(16.5-21 °C)更利于苜蓿切叶蜂的访花(Szabo and Smith, 1972),Richards (1996)报道加拿大阿尔伯塔省较高的温度对苜蓿切叶蜂繁殖和巢室质量有显著的促进作用,但 Rossi 等(2010)报道在田间笼罩的过高温下(最高温度达 44 °C)释放苜蓿切叶蜂,雌蜂的筑巢量与平均温度显著负相关。在室内 26 和 29 °C 较高的恒温环境下,幼虫的发育速率比 18 和 22 °C 更快,死亡率更低(Kemp and Bosch, 2000),但超过 38 °C 的天气会增加花粉球和低龄幼虫死亡的巢室比例(Pitts-Singer and James, 2008),短时极端的 45 °C 处理导致蛹发育迟缓,50 °C 处理导致后代全部死亡(Undurraga and Stephen, 1980)。

在历史和未来两种气候条件下,苜蓿切叶蜂主要分布于原产地(欧洲西部和南部等地区)和集约化管理地(北美洲的加拿大及美国的西部和东部等地区),在非洲、大洋洲和南美洲南部沿海地区有部分适生区。苜蓿切叶蜂能在非原产地的北美洲广泛分布的原因可能有:其一,北美洲适生区主要气候类型为温带大陆性气候、高原山地气候和地中海气候,与欧洲主要适生区的气候类型组成较为一致,引种后能迅速适应新栖息地;其二,加拿大和美国地区建立了完善的苜蓿切叶蜂管理体系,基于自然生活史开发的孵育、释放、回收及保存等技术极大提升了蜂群的生存和繁殖能力(Pitts-Singer and Cane, 2011; Peterson and Artz, 2014)。苜蓿切叶蜂在我国的中高适生区集中在中西部地区的新疆、甘肃、西藏、宁夏和青海等地,大多数地区夏季温和、少雨,利于苜蓿切叶蜂生存和繁殖(徐希莲等, 2010)。未来气候低强迫 SSP126 情景下,苜蓿切叶蜂在全球的高适生区增加,未来气候高强迫 SSP585 情

景下,苜蓿切叶蜂在全球的高适生区北移,高适生区面积减小;而未来 2 种气候情景下,苜蓿切叶蜂在中国的高适生区和总适生区均不断增加,预测表明在气候变化背景下苜蓿切叶蜂在中国进一步扩繁的可能性较高。已有科学家在北京、吉林、内蒙古、黑龙江和宁夏等地区多次开展田间授粉和扩繁试验(陈合明等, 1995; 金洪等, 1998; 刘晨曦等, 2004; 李建平等, 2005; 王颖等, 2023),但在本研究的高适生区内尝试较少,这可能是我国人工管理种群无法实现有效增长的一个关键因素。因此,可基于本研究预测结果,优先选择在苜蓿切叶蜂高适生的地区如新疆、西藏和甘肃等地,通过排除最热季节平均气温过高和过低的地区,结合降雨量和日照时长等环境变量,选取候选地开展繁育试验,评价雌蜂筑巢和繁殖情况,进一步筛选出我国稳定高效扩繁苜蓿切叶蜂的目标地点。

我国的苜蓿切叶蜂种群主要来源于引入的加拿大和法国的商品种群,20 世纪 80 年代末至今,中国农业大学、吉林省农业科学院和宁夏农林科学院等科研单位先后引种并进行本土扩繁(李建平等, 2005; 王颖等, 2023),但总体扩繁情况还未公开,现有种群数量和分布情况尚待确定。与加拿大等成功实现商品化的国家相比,总体上我国有关苜蓿切叶蜂的应用研究起步晚,基础研究还比较薄弱,苜蓿切叶蜂种群基数低,仅在有限的人工管理体系下应用,远达不到商品化程度,但基于其具有巨大的授粉应用潜力和广阔的商品化前景,种群数量在未来可能随着引入量增加或本土繁蜂技术的完善而不断增加。此外苜蓿切叶蜂作为一种外来物种,还应警惕它可能对生态环境或其他生物生存造成威胁。例如在北美,苜蓿切叶蜂能为千屈菜属 *Lythrum* 和草木樨属 *Melilotus* 的入侵杂草高效授粉,促进杂草的扩张(Small *et al.*, 1997; O'Neill *et al.*, 2004);在授粉和繁育过程中,寄生蜂(齿腿长尾小蜂属 *Monodontomerus* spp. 和巨柄啮小蜂属 *Melittobia* spp. 等)、捕食者(蜂巢小甲虫 *Aethina tumida* 和郭公虫 *Trichodes ornatus* 等)和白垩病(病原主要为球囊菌 *Ascosphaera aggregata*)等多类别的

为害苜蓿切叶蜂的天敌和病害混合发生 (Goettel *et al.*, 1995; James and Pitts-Singer, 2013; Veereshkumar and Gupta, 2015; Gonthier *et al.*, 2019; Clements *et al.*, 2022; Anderson *et al.*, 2023), 若管理不当, 也可能对本地其他蜂种造成毁灭性危害。因此, 引入苜蓿切叶蜂前, 相关部门应进行进一步的风险评估, 并制定相关管理法规和规程, 引入过程中要加强对蜂茧、筑巢材料和繁蜂设备的检疫力度, 引入后需在蜂茧孵育室、释放场所和储存室等开展天敌诱杀和病害防治工作, 管理者也需进一步完善人工繁育技术、田间和室内管理流程和制度, 最大程度地减少大规模应用苜蓿切叶蜂对生态环境或其他本地生物造成的不利影响。

本研究基于苜蓿切叶蜂当前的分布情况, 预测了历史及未来两种气候情景下苜蓿切叶蜂的潜在地理分布, 模型预测精度优秀。由于苜蓿切叶蜂的商品化程度高, 本研究基于文献对自然分布点进行了矫正处理, 但尚无完整资料核实全部分布点的状态, 具有一定局限性。此外, 由于 MaxEnt 模型是在动态均衡的物种分布与环境需求、理想化的物种迁移能力以及相对保守的物种生态位前提下进行的预测, 因此本研究的预测结果也具有一定的局限性, 可能会受到物种本身的生物学特性和环境因子变化的影响。除生物气候学变量外, 后代的滞育情况、栖息地的土地类型、植被类型、筑巢材料、植物花期长短及花资源情况等对苜蓿切叶蜂的生存及扩散存在潜在影响, 下一步可在模型中考虑更多的变量分析其适生范围, 科学指导苜蓿切叶蜂的繁育、管理和应用。

参考文献 (References)

- Anderson AR, Ramirez RA, Creech JE, Pitts-Singer TL, 2023. Life cycle of *Melittobia acasta* (Hymenoptera: Eulophidae) using *Megachile rotundata* (Hymenoptera: Megachilidae) as a host. *Annals of the Entomological Society of America*, 116(4): 207–218.
- Cane JH, 2002. Pollinating bees (Hymenoptera: Apiformes) of US alfalfa compared for rates of pod and seed set. *Journal of Economic Entomology*, 95(1): 22–27.
- Chen HM, Li RJ, Zhang QW, Ma FT, Li YF, Yang CT, Chen J, 1995. Alfalfa leafcutter bee for pollination of alfalfa twice a year in different areas. *Acta Agrestia Sinica*, 3(4): 289–296. [陈合明, 李瑞军, 张青文, 马福田, 李艳芳, 杨成太, 陈君, 1995. 苜蓿切叶蜂一年异地两次为苜蓿授粉的研究. 草地学报, 3(4): 289–296.]
- Clements J, Haylett M, Nelson B, Shumate S, Young N, Bradford B, Walsh D, Lamour K, 2022. Multiplex polymerase chain reaction reveals unique trends in pathogen and parasitoid infestations of alfalfa leafcutting brood cells. *Journal of Insect Science*, 22(4): 8.
- Delaplane KS, 2021. Crop Pollination by Bees, Volume 1: Evolution, Ecology, Conservation, and Management. Wallingford: CABI.
- Eves JD, Mayer DF, Johansen CA, 1980. Parasites, predators, and nest destroyers of the alfalfa leafcutting bee, *Megachile rotundata*. *Western Regional Extension Publication*, 32: 1–15.
- Gonthier J, Papach A, Straub L, Campbell JW, Williams GR, Neumann P, 2019. Bees and flowers: How to feed an invasive beetle species. *Ecology and Evolution*, 9(11): 6422–6432.
- Goettel MS, Duke GM, Rank GH, 1995. Comparisons of chalkbrood susceptibility between a French-derived univoltine strain and a Canadian strain of the alfalfa leafcutter bee, *Megachile rotundata*. *Journal of Apicultural Research*, 34(3): 123–128.
- James RR, Pitts-Singer TL, 2013. Health status of alfalfa leafcutting bee larvae (Hymenoptera: Megachilidae) in United States alfalfa seed fields. *Environmental Entomology*, 42(6): 1166–1173.
- Jin H, Meng QX, Wu YF, Meng GC, 1998. Study on alfalfa leafcutter bee pollination for alfalfa in Hohhot. *Grassland of China*, 20(6): 2–7. [金洪, 孟庆霞, 吴永敷, 孟根仓, 1998. 苜蓿切叶蜂在呼和浩特市地区为苜蓿授粉的研究. 中国草地, 20(6): 2–7.]
- Kemp WP, Bosch J, 2000. Development and emergence of the alfalfa pollinator *Megachile rotundata* (Hymenoptera: Megachilidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 93(4): 904–911.
- Li JP, Yang GH, Li MH, Qu WL, Bi LC, Hou YL, 2005. A review of studies and application of alfalfa leaf-cutting bee in China. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 30(3): 9–11, 32. [李建平, 杨桂华, 李茂海, 曲文丽, 毕良臣, 侯云龙, 2005. 中国苜蓿切叶蜂的研究和应用. 吉林农业科学, 30(3): 9–11, 32.]
- Li MH, Li JP, Yang GH, Liu JW, Hou YL, Qu WL, 2008. A review of studies on alfalfa leaf-cutting bee (*Megachile rotundata* F.). *Journal of Jilin Agricultural University*, 33(2): 36–39, 65. [李茂海, 李建平, 杨桂华, 刘金文, 侯云龙, 曲文丽, 2008. 苜蓿切叶蜂 (*Megachile rotundata* F.) 研究进展. 吉林农业科学, 33(2): 36–39, 65.]
- Liu CX, Qing YC, Chen HY, Song DL, 2004. Advance on the study of *Megachile rotundata* and its application in China. *Entomological Knowledge*, 41(6): 519–522. [刘晨曦, 秦玉川, 陈红印, 宋敦伦, 2004. 苜蓿切叶蜂在我国的研究与应用现状. 昆虫知识, 41(6): 519–522.]
- O'Neill KM, O'Neill RP, Blodgett S, Fultz J, 2004. Composition of pollen loads of *Megachile rotundata* in relation to flower diversity (Hymenoptera: Megachilidae). *Journal of the Kansas*

- Entomological Society*, 77(4): 619–625.
- Osterman J, Aizen MA, Biesmeijer JC, Bosch J, Howlett BG, Inouye DW, Jung C, Martins DJ, Medel R, Pauw A, Seymour CL, Paxton RJ, 2021. Global trends in the number and diversity of managed pollinator species. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 322: 107653.
- Peterson AT, Papeş M, Soberón J, 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213(1): 63–72.
- Peterson SS, Artz DR, 2014. Production of solitary bees for pollination in the United States// Morales-Ramos JA, Rojas MG, Shapiro-Ilan DI (eds.). *Mass Production of Beneficial Organisms*. Cambridge: Academic Press. 653–681.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE, 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3/4): 231–259.
- Pitts-Singer TL, James RR, 2008. Do weather conditions correlate with findings in failed, provision-filled nest cells of *Megachile rotundata* (Hymenoptera: Megachilidae) in western North America? *Journal of Economic Entomology*, 101(3): 674–685.
- Pitts-Singer TL, Cane JH, 2011. The alfalfa leaf cutting bee, *Megachile rotundata*: The world's most intensively managed solitary bee. *Annual Review of Entomology*, 56: 221–237.
- Qin YJ, Wang C, Zhao Z, Pan X, Li ZH, 2019. Climate change impacts on the global potential geographical distribution of the agricultural invasive pest, *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae). *Climatic Change*, 155: 145–156.
- Renzi JP, Coito C, Reinoso O, Quintana M, Garcia F, Cantamutto MA, 2022. *Megachile rotundata* (Fab.) as a potential agro-environmental conservation strategy for alfalfa seed production in Argentina. *Journal of Applied Entomology*, 146(1/2): 44–55.
- Richards KW, 1996. Effect of environment and equipment on productivity of alfalfa leafcutter bees (Hymenoptera: Megachilidae) in Southern Alberta, Canada. *The Canadian Entomologist*, 128(1): 47–56.
- Rossi BH, Nonacs P, Pitts-Singer TL, 2010. Sexual harassment by males reduces female fecundity in the alfalfa leafcutting bee, *Megachile rotundata*. *Animal Behaviour*, 79(1): 165–171.
- Small E, Brookes B, Lefkovitch LP, Fairey DT, 1997. A preliminary analysis of the floral preferences of the alfalfa leafcutting bee, *Megachile rotundata*. *Canadian Field-naturalist*, 111(3): 445–453.
- Szabo TI, Smith MV, 1972. The influence of light intensity and temperature on the activity of the alfalfa leaf-cutter bee *Megachile rotundata* under field conditions. *Journal of Apicultural Research*, 11(3): 157–165.
- Undurraga J M, Stephen WP, 1980. Effect of temperature on development and survival in post-diapausing alfalfa leafcutting bee prepupae and pupae (*Megachile rotundata* (F.): Hymenoptera: Megachilidae). I. High temperatures. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 53(3): 669–676.
- Veereshkumar VV, Gupta A, 2015. Parasitisation of leaf-cutter bees (Megachilidae: Apoidea) by *Melittobia*. *Entomon*, 40(2): 105–112.
- Wang YJ, Gao Tai, Shi J, 2021. Prediction and analysis of the global suitability of *Lymantria dispar* based on MaxEnt. *Journal of Beijing Forestry University*, 43(9): 59–69. [王艳君, 高泰, 石娟, 2021. 基于 MaxEnt 模型对舞毒蛾全球适生区的预测及分析. 北京林业大学学报, 43(9): 59–69.]
- Wang Y, Zhang Y, Zhu MM, Wei SH, Zhang R, Zhao ZH, 2023. Effects of the population size of the alfalfa leafcutter bee, *Megachile rotundata*, on the pod setting rate and yield of alfalfa *Medicago sativa*. *Journal of Plant Protection*, 50(4): 1107–1108. [王颖, 张宇, 朱猛蒙, 魏淑花, 张蓉, 赵紫华, 2023. 苜蓿切叶蜂种群数量对苜蓿结荚率和产量的影响. 植物保护学报, 50(4): 1107–1108.]
- Wei P, Qin YJ, Wang ZY, Zhao SQ, Li ZH, 2022. Prediction of the potential geographical distribution of western corn rootworm *Diabrotica virgifera virgifera* in China under climate change based on MaxEnt model. *Journal of Plant Protection*, 49(5): 1400–1410. [魏鹏, 秦誉嘉, 王振营, 赵守歧, 李志红, 2022. 基于 MaxEnt 模型预测气候变化下玉米根萤叶甲在中国的潜在地理分布. 植物保护学报, 49(5): 1400–1410.]
- Wu M, Zhang XF, Zhang YY, Song HL, Wu WQ, Song JQ, Guo Y, 2020. Comparison of visiting behavior for the alfalfa between *Apis mellifera* L. and *Megachile rotundata* F. *Apiculture of China*, 71(12): 72–74. [武敏, 张旭凤, 张云毅, 宋怀磊, 武文卿, 宋佳奇, 郭媛, 2020. 意大利蜜蜂和苜蓿切叶蜂为紫花苜蓿授粉访花行为比较. 中国蜂业, 71(12): 72–74.]
- Xin XG, Wu TW, Zhang J, Zhang F, Li WP, Zhang YW, Lu YX, Fang YJ, Jie WH, Zhang L, Dong M, Shi XL, Li JL, Chu M, Liu QX, Yan JH, 2019. Introduction of BCC models and its participation in CMIP6. *Climate Change Research*, 15(5): 533–539. [辛晓歌, 吴统文, 张洁, 张芳, 李伟平, 张艳武, 路屹雄, 房永杰, 颀卫华, 张莉, 董敏, 史学丽, 李江龙, 储敏, 刘茜霞, 颜京辉, 2019. BCC 模式及其开展的 CMIP6 试验介绍. 气候变化研究进展, 15(5): 533–539.]
- Xu XL, Chen Q, Wang FH, Yang F, 2010. The application and prospect of leafcutter bee (*Megachile rotundata* F.) for pollination. *Northern Horticulture*, 2010(7): 201–203. [徐希莲, 陈强, 王凤贺, 杨甫, 2010. 苜蓿切叶蜂的授粉应用与发展前景. 北方园艺, 2010(7): 201–203.]
- Xu YL, Qin YJ, Zhang Y, Zhang Y, Fu WD, Zhang GL, Li ZH, Zhao ZH, 2022. Potential geographical distribution of alien invasive bur cucumber *Sicyos angulatus* in China based on MaxEnt model. *Journal of Plant Protection*, 49(5): 1440–1449. [徐艳玲, 秦誉嘉, 张源, 张岳, 付卫东, 张国良, 李志红, 赵紫华, 2022. 基于 MaxEnt 模型预测外来入侵植物刺果瓜在中国的潜在地理分布. 植物保护学报, 49(5): 1440–1449.]