



# 基于优化 MaxEnt 模型的新疆黑蜂生境适宜性评价

施如康<sup>1</sup>, 许贞魏<sup>1</sup>, 贺炯坤<sup>1</sup>, 杨允菲<sup>2</sup>, 韩大勇<sup>1\*</sup>,  
陈晨<sup>2</sup>, 李东育<sup>1</sup>

(1. 伊犁师范大学生物科学与技术学院, 新疆伊宁 835000; 2. 伊犁师范大学资源与生态研究所, 新疆伊宁 835000)

**摘要:** 气候是影响物种分布的重要因素, 了解气候变化对物种分布及其变化趋势对于物种多样性保护并制定保护计划具有重要意义。新疆黑蜂 *Apis mellifera* ssp 是分布于新疆的地方性经济蜂种, 目前面临种群数量减少、分布面积萎缩等问题, 亟需评估气候变化对新疆黑蜂分布的影响。本研究使用 MaxEnt 模型预测了不同时间、不同气候情境下新疆黑蜂潜在分布区。结果表明: 1. MaxEnt 模型的模拟精度 AUC 值为 0.994, 总体模拟水平达到“优秀”以上, 表明本研究模型模拟精度高、性能好、模拟结果认可度高。2. 影响新疆黑蜂的主要生态因子及其范围是: 年平均温度介于 1.56~4.95°C、最干旱季度平均温度介于-13.49~-11.01°C、最湿月降水量介于 38.2~46.9 mm、最干旱月降水量介于 5.51~6.88 mm。3. 在 SSP126 较低辐射强迫的气候情境下, 新疆黑蜂有较高适应能力, 分布区有大面积扩张的趋势。在 SSP585 较高辐射强迫的气候情境下分布出现较大程度的收缩。新疆黑蜂的分布受主导生态因子温度的影响, 温度的变化与人类生产活动、碳排放密切相关, 所以人类生产活动通过影响温度对新疆黑蜂分布产生影响, 在低强度碳排放下, 分布区会扩张, 高强度就会收缩。

**关键词:** 新疆黑蜂; MaxEnt 模型; 适生区预测; 生态因子

中图分类号: Q968.1

文献标识码: A

## Habitat suitability evaluation of *Apis mellifera* ssp in Xinjiang based on optimized MaxEnt model

SHI Ru-Kang<sup>1</sup>, XU Zhen-Wei<sup>1</sup>, HE Jiong-Kun<sup>1</sup>, YANG Yun-Fei<sup>2</sup>, HAN Da-Yong<sup>1\*</sup>, CHEN Chen<sup>2</sup>,

基金项目: 伊犁师范大学引进博士科研启动基金 (2018005)

作者简介: 施如康, 男, 硕士研究生, 研究方向为动物生态学, E-mail: 1668104874@qq.com

\*通讯作者 Author for correspondence: 韩大勇, 男, 博士, 教授, 主要研究方向为种群生态, E-mail: 411430667@qq.com

收稿日期 Received: 2023-12-29; 修回日期 Revision received: 2024-09-08; 接受日期 Accepted: 2024-09-10

LI Dong-Yu<sup>1</sup> (1. College of Biological Science and Technology, Yili Normal University, Yini 835000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China; 2. Institute of Resources and Ecology, Yili Normal University, Yini 835000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

**Abstract:** Climate is an important factor affecting species distribution. Understanding species distribution and its changing trend under climate change scenarios is of great significance for species diversity conservation and conservation planning. *Apis mellifera* ssp is an endemic economic bee species distributed in Xinjiang. It is urgent to assess the impact of climate change on the distribution of *A. mellifera* ssp, which is facing the problems of population reduction and shrinking distribution area. In this paper, the maximum entropy model MaxEnt was used to predict the potential distribution area of *A. mellifera* ssp under different time and climate scenarios. The results showed as follows: 1. The simulation accuracy of MaxEnt model was 0.994 AUC, and the overall simulation level reached above "excellent", indicating that the model in this study had high simulation accuracy, good performance and high recognition of simulation results. 2. The main ecological factors affecting *A. mellifera* ssp and ranged from the average annual temperature of 1.56~4.95°C, the average temperature of the driest quarter of -13.49~-11.01°C, the precipitation of the wettest month of 38.2~46.9 mm, and the precipitation of the driest month of 5.51~6.88 mm. 3. Under the climate situation of relatively low radiative forcing of SSP126, *A. mellifera* ssp had high adaptability and showed a trend of large area expansion. The distribution of *A. mellifera* ssp contracted to a large extent under the relatively high radiative forcing of SSP585. The distribution of *A. mellifera* ssp was affected by temperature. The change of temperature is closely related to human production activities and carbon emissions. Therefore, human production activities affect the distribution of *A. mellifera* ssp by influencing temperature. At low intensity carbon emissions, the distribution area will expand, while at high intensity carbon emissions, it will shrink.

**Key words:** *Apis mellifera* ssp; MaxEnt model; suitable area prediction; ecological factor

新疆黑蜂 *Apis mellifera* ssp 是 20 世纪初由俄国引入新疆的高加索蜂 *Apis mellifera caucasica*、欧洲黑蜂 *Apis mellifera mellifera* 等黑色蜜蜂经过长期混养、杂交和人工选育后逐渐形成的地方品种（葛凤晨等，2017）。具有适应性强、抗寒力强、越冬性能好、体型大、采集力强、繁殖抗病力强等优点，具有很大的优势和发展潜质（古丽娜·艾山等，2022）。2006 年中华人民共和国农业部将新疆黑蜂收录进《国家级畜禽遗传资源保护名录》，列为保护物种之一（刘刚，2007；何金明等，2022）。近年来，随着盲目引种放蜂和气候环境变

化等多种因素的影响,导致蜂种杂化,生存空间狭小,亟需开展新疆黑蜂资源分布与影响因素相关研究。

生态位模型 (Ecological Niche Models, ENMs) 利用生态因子和物种发生点相结合,模拟物种在自然环境中的潜在空间分布区和生态位,是预测物种地理分布区和生态位的高效工具 (Peterson *et al.*, 2015)。MaxEnt 模型 (Maximum Entropy Model) 依托 Java 构建的生态位模型,最大熵理论为基础 (Phillips *et al.*, 2006) 可以用来处理物种发生点与地理生态因子的背景数据点之间的相关性,从而对物种发生的潜在区域进行估计,在分布点相对较少的情况下获得较好的预测结果,是目前使用最多的物种分布模型之一。近年来已被广泛应用于物种的栖息地评价和生境分布预测 (温玄焯等, 2021; 吕彤等, 2022; 江南子英等, 2023), 包括对放牧家畜生境适宜区 (张振西等, 2023)、兴安杜鹃 *Rhododendron dauricum* 的适宜区 (吴生海等, 2023) 和白鹤 *Leucogeranus leucogeranus* 适宜区 (孙志勇等, 2023) 等。以往应用 MaxEnt 模型很少调整特征组合 (FC) 和调控倍频 (RM) 参数,模型拟合效果一般。优化参数可以避免过拟合或欠拟合现象发生,使模型更加稳定和可靠,更好地适应不同的数据集和问题场景,从而提高模型的预测能力和应用效果 (Zhang *et al.*, 2018; Cobos *et al.*, 2019)。传统的适生区分类通常只关注单一的性能指标,如准确率、敏感性或特异性,没有考虑训练数据上具有的最大敏感性和最大特异性,评估模型的性能不够全面。最大特殊敏感性加特殊性 (Maximum Training Sensitivity Plus Specificity, MTSPS) 结合了敏感性和特异性,使得模型在两个方面都能得到优化,从而更加全面、高效简单的划分适生区和非适生区 (Liu *et al.*, 2005)。

新疆黑蜂已有基因组,蜂蜜理化指标和营养成分测定等方面的研究 (石巍, 2018; 姜建辉等, 2019; 师丰丰等, 2022), 还尚未有关于适生区预测的相关报道,而适生区模拟预测将有利于揭示种群未来分布变化规律及影响其分布的主导生态因子,对养殖、核心种质纯化以及意大利蜂 *Apis mellifera* 入侵防治具有重要意义。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况以及数据

伊犁河谷位于新疆天山山脉西部,呈喇叭型向西敞开,处于我国干旱半干旱气候带的西端,年平均气温 10.4°C,极端最高气温 42.8°C,极端最低气温-51°C。年平均降水量在 417.6 mm,山区降水量稍高,可达 600 mm,气候湿润温和,属于温带大陆性气候 (崔东等, 2019)。伊犁河谷北面有北西—东南走向的科古琴山、婆罗科努山和依连哈比尔孕山组成的北天山;

南面有北东—南西走向的哈尔克他乌、那拉提山组成的南天山，中间是阿吾拉勒山横亘在中间（张军民，2006）。

研究区流域面积共计  $1.512 \times 10 \text{ km}^2$ ，该流域地势差较大。东部地区属于山区，降雨量偏多，地势更高，西部地势较低。流域的主要源头为东边的特克斯河，与喀什河、巩乃斯河等汇聚而后流入西部哈萨克斯坦（张志斌等，2022）。流域受到天山南北两侧支脉上积雪和冰川的补给，还有大西洋水域的水汽补给。

研究区海拔差极大，森林、草甸、干草原、荒漠分布在不同海拔区域。干草原、荒漠和耕地植被分布在低海拔区；草甸、森林分布在中海拔地区；苔原、高寒草甸分布在高海拔地区（刘天弋等，2023）。研究区蜜源植物种类较多，主要有苜蓿 *Medicago sativa*、益母草 *Leonurus japonicus*、蒲公英 *Taraxacum mongolicum* 等，故有“天然蜜库”之称（阿吉·买买提，2012）。

本研究使用国家测绘地理信息局标准地图服务网站的地图作为绘制底图，标准地图网站：<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>；审图号为 GS(2023)2767 号底图无修改。

## 1.2 野外调查以及物种分布数据

我国乃至国外现有的文献资料中没有新疆黑蜂地理分布的相关研究，所以本研究用的分布点数据全部源于野外调查。2002 年葛凤晨等人在伊犁地区找到了纯种新疆黑蜂；2014 年在伊犁地区设立新疆黑蜂自然交尾隔离区（葛凤晨，2017；张海峰，2018）。本研究以该隔离区为中心，辐射周边区域，进行野外调查。调查区域涵盖新源县、尼勒克县、巩留县、伊宁县、察布查尔县、特克斯县和昭苏县以及伊宁市。选取有大面积蜜源植物的区域，手持 GPS 记录经纬度信息（图 1）。经纬度的定位采用谷歌 Earth 国际通用地理坐标系 WGS84。

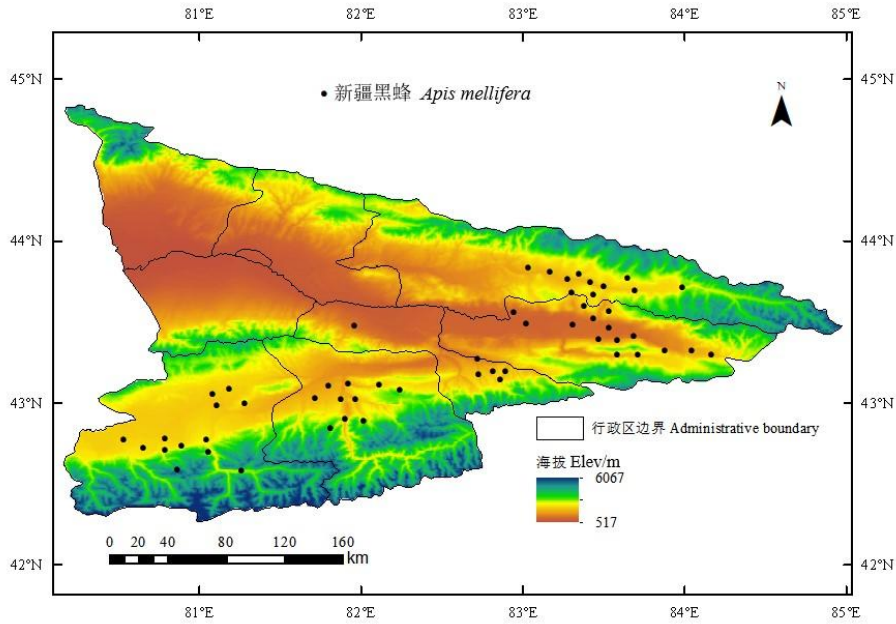


图1 新疆黑蜂分布点

Fig.1 Distribution site of *Apis mellifera* ssp.

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（2023）2767号的标准地图制作，底图无修改。

Note: This map was based on the standard map with the review number GS (2023) 2767 downloaded from the Standard Map Service website of the National Bureau of Surveying and Mapping Geographic Information. The base map had not been modified

### 1.3 数据准备以及处理

#### 1.3.1 生态因子数据

本研究所使用的 19 个气候数据从 WorldClim 数据库 (<http://www.world-clim.org/>) 下载 2.1 版本数据，该数据是全球气象点对 1970-2000 年记录的气候数据。3 个地形数据从中国科学院计算机网络信息中心和国际科学数据网站 (<http://www.gscloud.cn/>) 获取 DEM 数字高程数据，数据分辨率均为 30 s(表 1)(王艳君, 2023)。第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)中 BCC-CSM2-MR 模型的预测数据对中国区域未来气候的预测更准确，所以用该数据作为本研究的未来气候数据。下载 SSP126（可持续发展路径，较少温室气体排放）和 SSP585（化石燃料为主的发展路径，较多温室气体排放）分别预测 21 世纪中期（2050 年）和 21 世纪末期（2090 年）的适宜面积变化 (Wu *et al.*, 2019)。

表 1 首次建模使用的环境变量

Table 1 Environment variables used for the first modeling

变量 Variables	注释 Explanation
bio1	年平均温度 (°C) Annual mean temperature
bio2	平均气温日较差 (°C) Mean diurnal range
bio3	等温性 (bio2/bio7) (×100) Isothermality (bio2/bio7) (×100)
bio4	气温季节性变化 Seasonal variation of temperature

bio5	最热月份最高温度 (°C) Max Temperature of warmest month
bio6	最冷月份最低温度 (°C) Min Temperature of coldest Month
bio7	最冷月份最低温度差 (°C) Temperature annual range
bio8	最湿季度平均温度 (°C) Mean temperature of wettest quarter
bio9	最干季度平均温度 (°C) Mean Temperature of driest quarter
bio10	最暖季度平均气温 (°C) Mean Temperature of warmest quarter
bio11	最冷季度平均气温 (°C) Mean Temperature of coldest quarter
bio12	年降水量 (mm) Annual precipitation
bio13	最湿月份降水量 (mm) Precipitation of wettest month
bio14	最干月份降水量 (mm) Precipitation of driest month
bio15	降水季节性变化 Seasonal variation of precipitation
bio16	最湿季度降水量 (mm) Precipitation of wettest quarter
bio17	最干季度降水量 (mm) Precipitation of driest quarter
bio18	最暖季度降水量 (mm) Precipitation of warmest quarter
bio19	最冷季度降水量 (mm) Precipitation of coldest quarter
Elev	海拔 (m) Elevation
Slope	坡度 (°) Slope
Aspect	坡向 (°) Aspect

### 1.3.2 分布数据筛选方式优化

将物种分布数据和使用的一个气候数据共同加载至 ENMTools1.0.5 工具，利用“Trim duplicate occurrences”功能去除同一栅格内多余的分布点，减少过拟合的情况，提高模型预测准确度。经去冗杂后得到有效分布数据共计 55 条。依照 MaxEnt 3.4.4 文件输入要求，将数据整理为 csv 格式备用 (Phillips *et al.*, 2006)。

### 1.3.3 环境变量相关性分析与筛选

贡献百分率 (PC) 和置换重要性 (PI) 是 MaxEnt 模型分析生态因子对于物种分布影响的方法，贡献百分率 (PC) 是 MaxEnt 模型在运行中计算的每个生态因子对与新疆黑蜂地理分布的贡献值，贡献值越大表明该因子越重要，影响度越高；置换重要性 (PI) 是随机替换每个生态因子，而后加载至模型运行结果所得 AUC 值的受影响程度，受影响越大表明该变量越重要 (熊巧利等, 2019)。刀切法 (Jackknife) 检验因子也是分析生态因子对于物种分布影响的一种方法。主要判断“With Only Variable”条带长度，该条带的长度表示得分，长度越长说明得分越高，该变量越重要，对物种分布影响越大；“Without Variable”条带表示除了该变量以外其余变量贡献之和的得分，如果“Without Variable”得分越低，则表明该变量越重要，含有某些独特信息 (陈豪杰等, 2021)。首先结合以上两种方法，筛选相对重要生态因子。

由于 21 个生态因子之间存在一定的相关性，使用 ENMTools 软件对 21 个生态因子进行

Spearman 相关性分析（图 2），用 R 绘制环境因子相关性检验热图。如果出现任意两个生态因子的相关系数 $|r| \geq 0.9$ ，将舍去贡献百分率（PC）、置换重要性（PI）相对较低的生态因子，最终保留了 8 个生态因子导入 MaxEnt 模型。

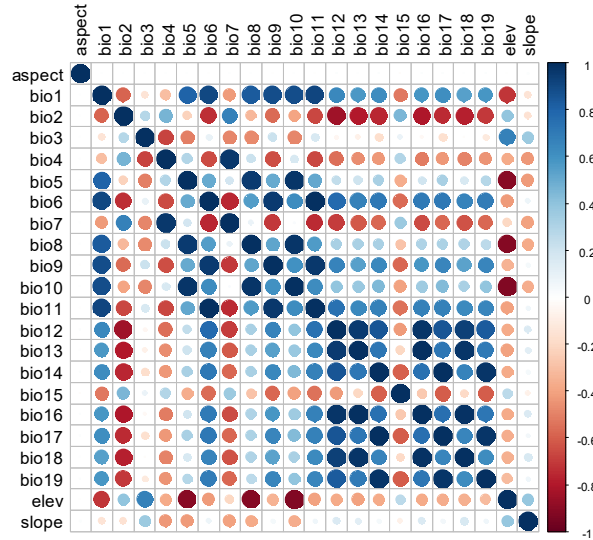


图 2 新疆黑蜂环境变量相关系数矩阵

Fig. 2 Correlation coefficient matrix of *Apis mellifera* ssp environmental variables

注：蓝色代表正相关，红色代表负相关，颜色越深相关程度越大。Note: Blue represented positive correlation, red represented negative correlation, the darker the color the greater the degree of correlation.

#### 1.4 MaxEnt 模型本地化和精度评价

##### 1.4.1 MaxEnt 模型参数设置

调整特征组合（FC）和调控倍频（RM）对于提升 MaxEnt 模型的 AUC 值有显著效果。其中 FC 有 5 种可选项，分别是二次型（Quadratic-Q）、线性（Linear-L）、乘积型（Product-P）、片段化（Hinge-H）和阈值性（Threshold-T），可产生 29 种不同组合；RM 参数一般设置为 4 以下，从 0.1~4 每间隔 0.1 设置 1 个 RM 值，共设置 40 个 RM 值（孔维尧等，2019）。使用 R 程序的“Kuenm”程序包，用 MaxEnt 进行 1 160 个不同参数模型（29 种 FC 设置与 40 个 RM 值自由组合）的预测运算（Zhang *et al.*, 2018; Cobos *et al.*, 2019）。

将分布数据和筛选出的环境变量数据导入 MaxEnt3.4.4 中，设置随机选取占比 75% 的分布点用于建立模型，25% 占比的分布点用于模型验证，设置刀切法（Jackknife）计算筛选后的生态因子对新疆黑蜂分布的影响，其余选项采用默认设定。

##### 1.4.2 模型预测精度评价

曲线下面积值 AUC (Area Under Curve) 和受试者工作特征曲线 ROC (Receiver Operating Characteristic) 分析法在物种潜在分布预测模型评价中得到了广泛的应用并且是认可度较高的诊断试验评价指标（张东方等，2017）。使用 Jackknife 中的 AUC 评价指标在模型运行中

对每个生态因子和模型效果进行检测，以此得出 AUC 值验证模拟性能和精准度。

### 1.5 新疆黑蜂气候适宜性与适应性划分

模型生成结果中, 适生性的值范围从 0 到 1, 表示新疆黑蜂发生的概率( $p$ )。使用 MTSPS (最大测试灵敏度加特异性阈值) 作为适生区和非适生区的断点 (Liu *et al.*, 2005)。模拟结果利用 SDMtool 工具计算不同时期的适生区质心和面积变化 (Brown *et al.*, 2014)。利用 ArcGIS 软件和 SDMtools 工具箱将不同时期的适生区转换为二进制文件。然后, 使用 “Distribution Changes Between Binary SDMs” 工具, 计算出的扩张面积、稳定面积和收缩面积。扩张面积为当前时期不是适生区, 未来时期是适生区的面积; 稳定面积为当前和未来时期都是适生区的面积; 收缩面积为当前是适生区, 未来不是适生区的面积。使用 “Centroid Changes (Lines)” 工具, 运行预测不同气候模式、不同时期分布的质心转移, 以此可以得到新疆黑蜂种群的总体变化方向。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型参数设置以及精度评价

首先, 应用 R 程序选出统计学上显著 (Significant models) 且遗漏率 (Omission Rates)  $\leq 5\%$  的所有模型, 然后根据赤池信息量准则 (Akaike Information Criterion, AICc) 选出 Delta AICc 值最小的特征组合模型作为推荐模型 (Warren *et al.*, 2011, 2014)。最终分析得出 1 个 Delta AICc 值最小 (等于 0) 的最佳模型, 遗漏率为 0.07 (图 3)。所以本研究的 RM 值设置为 0.2, 特征组合为线性 (L) 和二次型 (Q)。

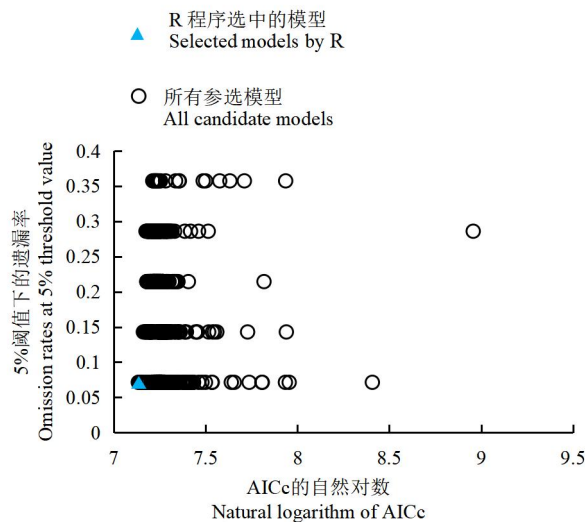


图 3 R 程序模型选择结果

Fig. 3 Selected models by R program package

AUC 值表示的是 ROC 曲线和横坐标之间所围的面积, 其范围在 0~1 之间, 评分标准为:



0.5~0.6，不及格；0.6~0.7，较差；0.7~0.8，一般；0.8~0.9，良好；0.9~1.0，优秀（朱耿平等，2013）。AUC 值越大则表示模型模拟的精度越高，预测效果越好。将模型运行 10 次，得到一个较稳定的模拟结果。由 MaxEnt 模型模拟结果可以得到分布模拟 ROC 曲线。特征曲线结果 AUC 值为 0.994，该值表明 MaxEnt 模型对的模拟结果精准度较高，评分达到“优秀”以上、性能好、模拟结果认可度高（图 4）。

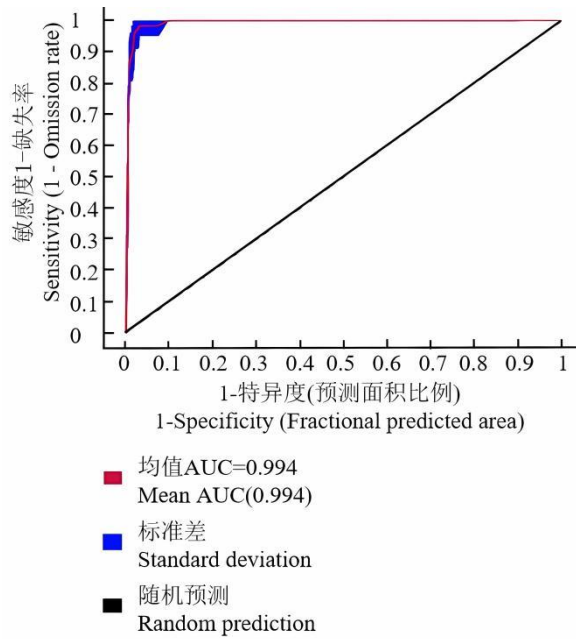


图 4 新疆黑蜂模拟结果 AUC 值

Fig. 4 AUC value of *Apis mellifera* ssp simulation results

## 2.2 影响新疆黑蜂分布的主要生态因子

最终确定 8 个环境变量加入 MaxEnt 模型运行（表 2）。bio1 年平均气温（PC=34.4%，PI=26.8%），bio9 最干旱季度平均气温（PC=15.1%，PI=46.6%），Elev 海拔（PC=14.2%，PI=0.5%），bio14 最干旱月降水量（PC=13.4%，PI=0.8%），bio4 气温季节变化（PC=11.8%，PI=22.1%）这 5 个环境因子对于模型预测新疆黑蜂分布的贡献率较高，bio1 和 bio9 的置换重要性（PI）和贡献百分率（PC）都很高，有一定的优势。刀切法生态因子得分可知，如果只观察单个生态因子 bio13、bio14、bio1、bio9 得分相对较高，bio1 和 bio9 除此因子情况之下的得分相对较低，这表明 bio1 和 bio9 这两个生态因子对于新疆黑蜂分布有相对更重要的作用（图 5）。由此分析可以得到 bio1 年平均气温、bio9 最干旱季度平均气温、bio13 最湿月降水量和 bio14 最干旱月降水量是影响新疆黑蜂分布的主要环境因子。

表 2 筛选后用于模型预测的环境变量及其重要性

Table 2 Environmental variables filtered for model prediction and their importance

变量	注释	贡献百分率 (%)	置换重要性
----	----	-----------	-------

Variables	Explanation	Percent contribution	Permutation importance
bio1	年平均温度 (°C) Annual mean temperature	34.4	26.8
bio4	气温季节性变化 Seasonal variation of temperature	11.8	22.1
bio14	最干月份降水量 (mm) Precipitation of driest month	13.4	0.8
bio9	最干季度平均温度 (°C) Mean Temperature of driest quarter	15.1	46.6
bio13	最湿月份降水量 (mm) Precipitation of wettest month	5.6	0.6
bio3	等温性 (bio2/bio7) (×100) Isothermality	0.7	1
bio15	降水季节性变化 Seasonal variation of precipitation	4.8	1.6
Elev	海拔 (m) Elevation	14.2	0.5

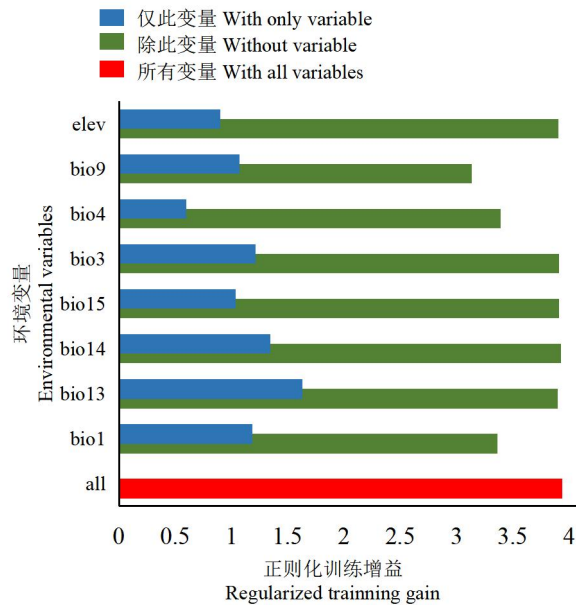


图5 筛选后环境因子刀切法检验结果

Fig. 5 After screening, the environmental factors were tested by knife method

### 2.3 新疆黑蜂对主要环境因子的响应

根据模型得出的环境因子响应曲线（图6）可知，以存在概率大于0.6作为新疆黑蜂最宜适生区的遴选条件，4个主导环境变量的值域分别为：年平均温度介于1.56~4.95°C、最干旱季度平均气温介于-13.49~11.01°C、最湿月降水量介于38.2~46.9 mm、最干旱月降水量介于5.51~6.88 mm。

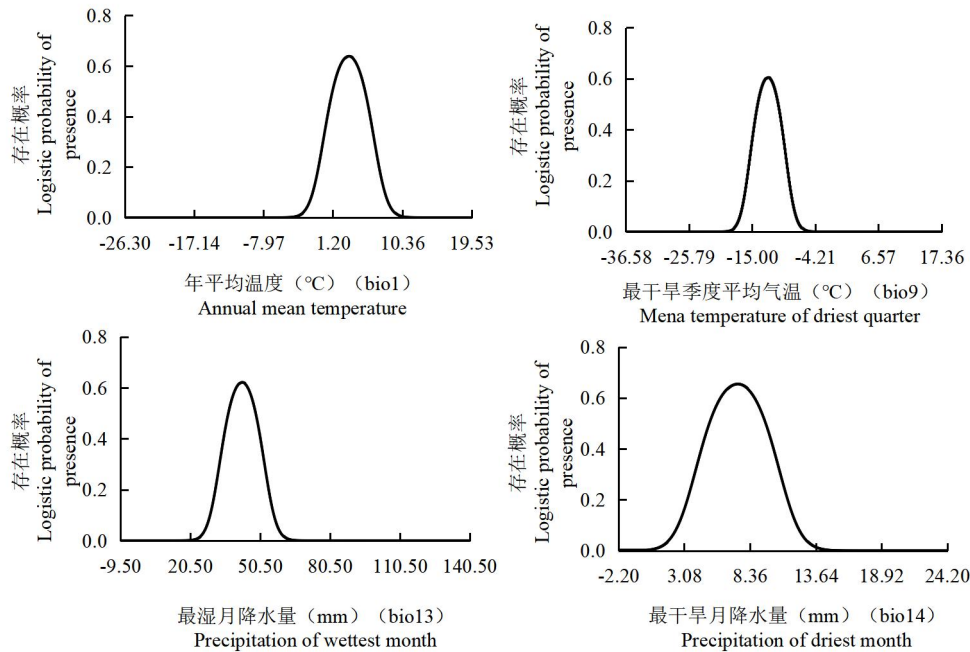


图6 新疆黑蜂存在概率与主要环境因子响应曲线

Fig. 6 Response curve of *Apis mellifera* ssp existence probability and main environmental factors

#### 2.4 当前新疆黑蜂分布区划分以及预测

MTSPS 被认为是简单有效，分离模型适宜区和非适宜区与其他更复杂的方法一样好的方法。结合分布数据和物种适宜区拟合，存在概率划分出新疆黑蜂的生境适宜性分类标为：MTSPS=0.0591，因此适生区  $p > 0.0591$ ，非适生区  $p \leq 0.0591$ 。进一步依据 IPCC 报告有关评估可能性重新分组为四类进行解释：低适宜性  $0.0591 < p \leq 0.4$ ；中适宜性  $0.4 < p \leq 0.6$ ；高适宜性  $p > 0.6$  (Mastrandrea and Field, 2010)。

将 MaxEnt 模型生成结果导入 ArcGIS 中，得到分布预测图(图7)。适生区面积为  $3.85 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，仅占新疆的 2.31%，主要集中在伊犁哈萨克自治州南部和东部。从行政区分布上来看，昭苏县、特克斯县南部有分布；巩留县、尼勒克县、新源县有大面积分布；伊宁县、察布查尔县、霍城县、伊宁市分布面积很小。塔城地区托里县、乌苏市、沙湾市，博尔塔拉地区博乐市、精河县，昌吉地区玛纳斯县、呼图壁县、昌吉市、阜康市、吉木萨尔县，乌鲁木齐地区乌鲁木齐县，哈密地区巴里坤哈萨克自治县，巴音郭楞地区博湖县，阿克苏地区乌什县、温宿县、拜城县，以上地区都有小部分适生区。从地形分布看，新疆黑蜂主要分布在中天山和南天山夹角地区，少量分布在南天山南部、中天山北部、北天山地区。高适生区、中适生区、低适生区面积分别为  $0.34 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $0.73 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $2.78 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。高适生区的核心区域在尼勒克县、新源县、巩留县交接处。

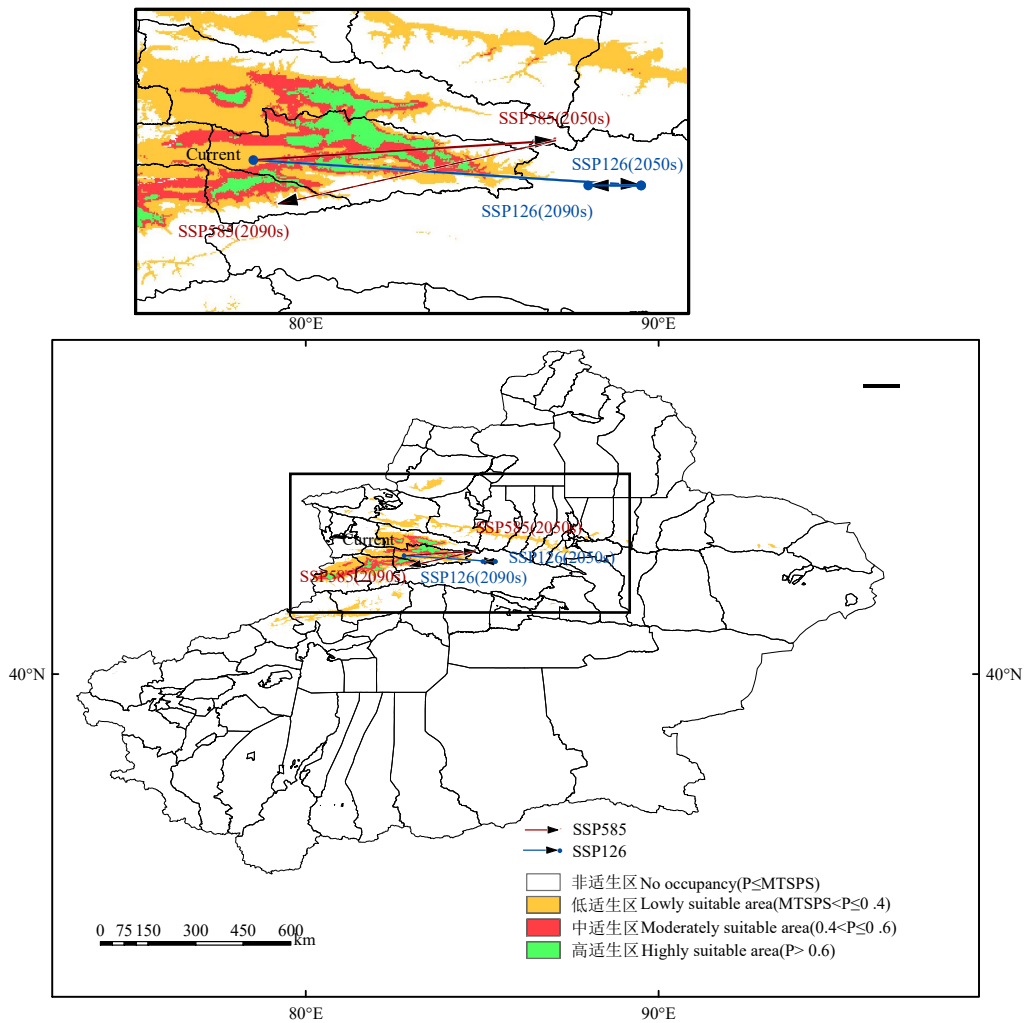


图7 当前时期新疆黑蜂适生区预测

Fig. 7 Prediction of suitable area of *Apis mellifera* ssp in current period

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（2023）2767号的标准地图制作，底图无修改。Note: This map was based on the standard map with the review number GS (2023) 2767 downloaded from the Standard Map Service website of the National Bureau of Surveying and Mapping Geographic Information. The base map had not been modified.

## 2.5 未来气候情景下新疆黑蜂分布区预测

在SSP126气候情境下,2050年比当前适生区面积扩张 $22.76 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,收缩面积 $0.08 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,合计适生区面积 $26.53 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。2090年比当前适生区面积扩张 $16.85 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,收缩面积 $0.14 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,合计适生区 $20.55 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。SSP585气候情境下,2050年比当前适生区面积扩张 $19.42 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,收缩面积 $0.08 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,合计适生区 $23.18 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。2090年比当前适生区面积扩张 $3.23 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,收缩面积 $1.20 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,合计适生区 $5.88 \times 10^4 \text{ km}^2$  (图8)。

整体来看SSP126气候情境和SSP585的2050年气候情景之下适生区在塔城、博尔塔拉、昌吉、乌鲁木齐、哈地区、巴音郭楞、阿克苏地区的小部分适生区在未来都会扩大,其中SSP126气候情境下扩张区更多。很小部分收缩区在伊犁哈萨克自治州南天山的南北两面高海拔地区。SSP585气候情境下2090年,预测塔城、博尔塔拉、昌吉、乌鲁木齐、巴音郭楞、

阿克苏地区将会大面积收缩。仅有小部分扩张区在巴音郭楞地区的和静县。

SSP126 和 SSP585 气候情境之下质心在 2050 年都会向东偏移，其中 SSP126 气候情境之下偏移的更远一点。在 2090 年质心都会向西偏移，其中 SSP585 气候情境之下偏移远大于 SSP126 气候情境。

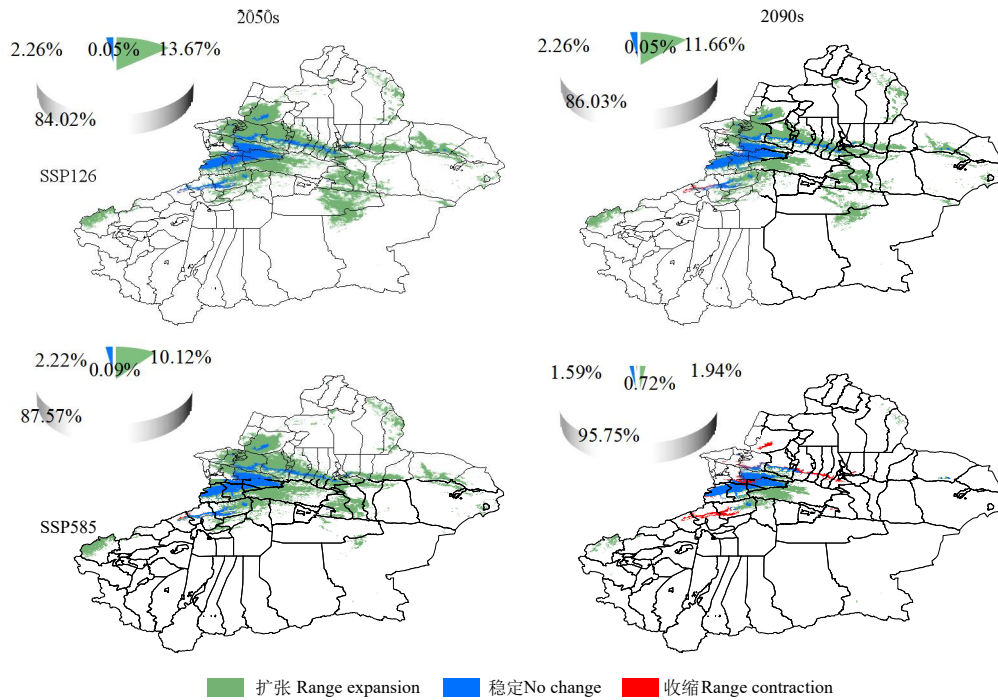


图 8 未来时期新疆黑蜂适生区变化

Fig. 8 Changes of the habitat area of black bees in the future period

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 (2023) 2767 号的标准制作，底图无修改。

Note: This map was based on the standard map with the review number GS (2023) 2767 downloaded from the Standard Map Service website of the National Bureau of Surveying and Mapping Geographic Information. The base map had not been modified

### 3 结论与讨论

#### 3.1 讨论

##### 3.1.1 模型模拟评价

ROC 特征曲线中的 AUC 值通过一个数值就能表示所有可能阈值范围内的性能评价结果，所以是认可度较高，应用较为广泛的衡量精准度指标(郭飞龙等, 2020; 郭彦龙等, 2020)。本研究使用了 R 程序“Kuenm”程序包对 MaxEnt 模型的特征组合 (FC) 和调控倍频 (RM) 参数的自动化校准和优化，从 1 160 种参数组合中筛选出最优的参数组合，进一步提高了适生区预测结果的精确度。AUC 值为 0.994 综合评估模拟结果达到“优秀”水平以上，可信度高，模拟性能好。

本研究所用的新疆黑蜂分布点全部来源于野外实际调查，调查过程中存在物种分布点过

于集中的问题。不去除冗余数据,会导致环境偏差过度拟合,进而导致模拟结果不准确。本研究利用 ENMtools 工具对分布点进行了去冗余处理,在同一栅格内只矫正保留一个分布点。这样分布点过于集中导致模型过拟合的问题就被极大的避免了。葛凤晨等(2017)前期在阿尔泰山附近并未发现新疆黑蜂的踪迹,在天山下的伊犁发现了新疆黑蜂,所以此次分布点调查重点在伊犁哈萨克自治州。新疆黑蜂虽然是适应伊犁生态条件和饲养条件的区域性的欧洲黑蜂的变种,但是同样适应伊犁地区的还有引入种意大利蜂,且很多地区已经被意大利蜂所占据,这就导致新疆黑蜂生存环境狭窄,分布点少。在后续的研究中,可结合现代适生区模拟结果和未来适生区预测,对其进行更大范围的野外调查,可能会获取更多分布点信息。

### 3.1.2 影响新疆黑蜂分布的生态因子

根据结果可以看出温度是影响新疆黑蜂分布的主要因素。现有研究大都采用全球气候模型(GCM)的 IPCC5 气候预测,包含 4 种代表性浓度路径(RCP)(郭飞龙等,2020;李安等,2020)。CMIP6 与 CMIP5 相比,CMIP6 参与的模式数量较多,数值实验的设计更复杂,所提供的模拟数据更为庞大,极端气候、气温、降水的气候态空间分布具有更好的模拟能力(何夏曼等,2022)。蜜蜂是一种个体简单的群居昆虫,但具有高度的组织适应能力,能维持相对稳定的环境温度(陶坤伶等,2022)。蜜蜂会主动扇动翅膀或者采用别的方法调节巢内的温度,使蜂群生活在最适的温度范围内。虽然蜜蜂对巢温具有一定的调节能力,但是巢温仍然会因为某些外界因素而发生骤变。已有研究表明温度过高或过低都会影响蜜蜂的生活,导致蜜蜂生长发育不良(叶善斌,2011)。新疆黑蜂本身是一个耐寒的物种,在越冬期一般在 7 个月左右(10 月至 5 月)的环境条件下,不仅安全越冬,而且在越冬后以较快的繁殖速度复壮(耿娟,2019)。在早春冰雪未完全溶化时,在室外气温 8°C 左右,就可采集花粉归巢,在大流蜜期,即使在气温较低的情况下,新疆黑蜂仍可出巢采集,而同环境的意大利蜂则停止外出采集(徐振川等,1988)。

在 SSP126 气候模式下未来的 21 世纪中期和末期适生区面积扩大  $22.76 \times 10^4 \text{ km}^2$  和  $16.85 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在 SSP585 气候模式下 21 世纪中期适生区面积扩大  $19.42 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。未来气候环境下全球温度升高导致适生区扩大,对于新疆黑蜂的生长发育、种群扩散是有利的,但是对于不耐寒的意大利蜂来说是更有利的。所以为了保证新疆黑蜂品种纯度建议严格管理保护区,在交通要道路口设点看守,堵截非种用蜂群和异种蜂群进入(张海峰,2018)。在 SSP585 气候模式下 21 世纪末期在阿克苏、乌鲁木齐、昌吉回族自治州、塔城地区、博尔塔拉蒙古自治州都有收缩的趋势可能是因为这些地区在未来温度升高,导致新疆黑蜂无法生存。

### 3.1.3 分布区划分以及预测

国内外文献中大部分使用自然间断法，划分“高适生区、中适生区、低适生区和非适生区”的4级分区法。然而新疆黑蜂已经在本地生存了近百年，具有高度的环境适应性与表型可塑性，存在较大的生存潜力。根据 SSP126 未来气候模型的预测，如果只按照 IPCC 报告有关评估可划分成高、中、低和非适生区 (Liu *et al.*, 2005)，部分中适生区和低适生区在近 20 年就会变成高适生区，非适生区可能会变成适生区。这样的划分容易导致适生区模糊不清，蜂场工作者对适生区防控意识不强。有些文章中只用到“非适生区”和“适生区”的概念也过于绝对化，不能够给出更多物种保护策略和方案。因而在本研究中我们根据新疆黑蜂的分布情况，利用 MTSPS 和 IPCC 报告有关评估可能性两种划分方法结合作为模型适生区阈值有更多的参考选择。根据 IPCC 报告有关评估可能性划分  $P > 0.6$  为高适生核心区，更直观地表明出防控重点核心区域，可以作为新疆黑蜂实验研究、品种纯化地区。用最大特殊敏感性加特殊性得出  $0.0591 < p \leq 0.6$  为适生区，可以作为普通蜂农放蜂、养蜂、工业生产蜂产品地区。根据模型预测未来气候环境下新疆黑蜂适生区扩散，种群扩散的潜力很大，除伊犁哈萨克自治州外，今后在博尔塔拉、昌吉、巴音郭楞、塔城、阿克苏地区也有巨大的发展空间。根据质心转移可以表明无论是 SSP585 还是 SSP126 气候模式，质心都会先向东偏移，再向西偏移。所以伊犁哈萨克自治州一直是新疆黑蜂保护重点区域。

新疆黑蜂种群分布扩散时，还受蜜源植物分布、种间互动、自身繁殖力、抗病毒能力等生物因素还有人为干扰的影响。已有研究表明部分蜜源植物白喉乌头、纳里橐吾、小花棘豆、苦豆子几种蜜源植物当前时期在伊犁哈萨克自治州有分布，但是在 SSP126 和 SSP245 的气候模式下未来会向东迁移 (姚政宇等, 2023)。也有研究表明如果有蜜蜂个体沾染了有害农药或者将带有农药残留的花蜜、花粉带回蜂巢，那么整个蜂巢都会被污染。如果将含有农药残留的花粉、花蜜喂食幼虫或其他成年蜂时还会再次污染蜂群，从而影响整个蜂群的健康，导致蜜蜂数量和质量下降 (张伟等, 2022)。因此，本研究也有一定局限性，在后续研究中应考虑蜜源植物等其他生物因素以及开垦农田，农药喷洒等人为干扰进行综合预测和分析。

## 3.2 结论

本研究使用优化的 MaxEnt 模型，对新疆黑蜂分布进行模拟预测，得到影响其分布的主要生态因子和两个气候模式下未来不同时期分布的预测

(1) 使用 MaxEnt 模型的模拟精度即 AUC 为 0.994 达到“优秀”以上，表明本研究模型模拟精度高、性能好、结论认可度高。

(2) 影响新疆黑蜂的主要生态因子及其最适生态因子的范围是：年平均温度介于

1.56~4.95°C、最干旱季度平均气温介于-13.49~-11.01°C、最湿月降水量介于 38.2~46.9 mm、最干旱月降水量介于 5.51~6.88 mm。

(3) 新疆黑蜂的生存分布和人类生产活动、碳排放密切相关。在 SSP126 相对较低辐射强迫的气候情境下,新疆黑蜂有较高的适应情境能力。塔城、博尔塔拉、昌吉、乌鲁木齐、哈密、巴音郭楞、阿克苏地区等地有较大程度扩散。仅在阿克苏和伊犁的部分山区有极小部分适生区收缩。在 SSP585 相对较高辐射强迫的气候情境下本世纪中叶,新疆黑蜂表现出一般的适应能力,有一定分布扩张,但是本世纪末在乌鲁木齐、阿克苏、塔城、博州地区出现较大程度的适生区收缩。所以新疆地区坚持绿色可持续发展路线是新疆黑蜂良性发展的重要基础。

### 参考文献 (References)

- Aji MMT. Investigation on main nectar source plants in Xinjiang [J]. *Apiculture of China*, 2012, 63 (3): 36-37. [阿吉·买买提. 新疆主要蜜源植物调查 [J]. 中国蜂业, 2012, 63 (3): 36-37]
- Brown JL. SDM toolbox: A python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5 (7): 694-700.
- Chen HJ, Nie Y, Liu XH, et al. Prediction of potential suitable area of *Populus euphratica* based on MaxEnt model [J]. *Agricultural Information of China*, 2021, 33 (1): 46-55. [陈豪杰, 聂艳, 刘新华, 等. 基于 MaxEnt 模型的胡杨潜在适生区预测研究 [J]. 中国农业信息, 2021, 33 (1): 46-55]
- Cobos ME, Peterson AT, Barve N, et al. Kuenm: An R package for detailed development of ecological niche models using Maxent [J]. *PeerJ*, 2019, 7: 1-12.
- Cui D, Yan JJ, Liu HJ, et al. Soil active organic carbon components and their contents in different types of wetlands in Yili River Valley [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38 (7): 2087-2093. [崔东, 闫俊杰, 刘海军, 等. 伊犁河谷不同类型湿地土壤活性有机碳组分及其含量差异 [J]. 生态学杂志, 2019, 38 (7): 2087-2093]
- Ge FC. Rescuing black bees in Xinjiang (I)-The rise and fall of black bees in Xinjiang and rescue planning [J]. *Apiculture of China*, 2017, 68 (4): 62. [葛凤晨. 抢救新疆黑蜂纪行 (一)——新疆黑蜂资源兴衰及抢救策划 [J]. 中国蜂业, 2017, 68 (4): 62]
- Ge FC. Rescuing black bees in Xinjiang (VI)-The search for black bees is still going on [J]. *Apiculture of China*, 2017, 68 (9): 60-61. [葛凤晨. 抢救新疆黑蜂纪行 (六)——寻觅黑蜂的行动还在继续进行 [J]. 中国蜂业, 2017, 68 (9): 60-61]
- Geng J. Introduction of genetic resources of black bees in Xinjiang [J]. *Xinjiang Animal Husbandry*, 2019, 34 (5): 2. [耿娟. 新疆黑蜂遗传资源介绍 [J]. 新疆畜牧业, 2019, 34 (5): 2]
- GuLiNa·AS, Zhang HF, Geng MY, et al. Conservation and utilization of genetic resources of black bees in Xinjiang [J]. *Special Economic Animal*, 2022, 25 (8): 80-82. [古丽娜·艾山, 张海峰, 耿明阳, 等. 浅谈新疆黑蜂遗传资源保护与利用 [J]. 特种经济



- 动植物, 2022, 25 (8): 80-82]
- Guo FL, Xu GB, Lu MZ, *et al.* Prediction of potential Suitable Distribution Areas for *Populus euphratica* using the MaxEnt Model [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, 56 (5): 9. [郭飞龙, 徐刚标, 卢孟柱, 等. 基于 MaxEnt 模型分析胡杨潜在适宜分布区 [J]. 林业科学, 2020, 56 (5): 9]
- Guo FL, Xu GB, Mou HL, *et al.* Simulation of potential spatiotemporal population dynamics of *Bretschneidera sinensis* hemsl based on MaxEnt mode [J]. *Plant Science Journal*, 2020, 38 (2): 185-194. [郭飞龙, 徐刚标, 牟虹霖, 等. 伯乐树潜在地理分布时空格局模拟 [J]. 植物科学学报, 2020, 38 (2): 185-194]
- Guo YL, Zhao ZF, Qiao HJ, *et al.* Challenges and development trends of species distribution models [J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35 (12): 14. [郭彦龙, 赵泽芳, 乔慧捷, 等. 物种分布模型面临的挑战与发展趋势 [J]. 地球科学进展, 2020, 35 (12): 14]
- He JM, Sun ZY, Liu YL, *et al.* Genomic selection signal analysis of black bees in Xinjiang [J]. *China Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2022, 49 (5): 1786-1795. [何金明, 孙智禹, 刘玉玲, 等. 新疆黑蜂基因组选择信号分析 [J]. 中国畜牧兽医, 2022, 49 (5): 1786-1795]
- He XM, Jiang C, Wang J, *et al.* Comparison and evaluation of temperature simulation performance of CMIP6 and CMIP5 global climate models in Northeast China [J]. *Journal of Geophysics*, 2022, 65 (11): 4194-4207. [何夏曼, 姜超, 汪君, 等. CMIP6 与 CMIP5 全球气候模式对中国东北地区气温模拟性能的比较评估 [J]. 地球物理学报, 2022, 65 (11): 4194-4207]
- Jiang JH, Zhang J, Zhao JB, *et al.* Antioxidant activity of water soluble protease hydrolysates from royal pulp of Black bee [J]. *Food Industry*, 2019, 40 (11): 133-137. [姜建辉, 张静, 赵俭波, 等. 新疆黑蜂蜂王浆水溶性蛋白酶解产物的抗氧化活性 [J]. 食品工业, 2019, 40 (11): 133-137]
- Jiang NZY, Yang HX, Li C, *et al.* Potential distribution of *Aethina tumida* Murray in China based on MaxEntModel [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2023, 45 (5): 1236-1244. [江南子英, 杨沅鑫, 李超, 等. 基于 MaxEnt 模型对蜂巢奇露尾甲在中国的潜在分布研究 [J]. 环境昆虫学报, 2023, 45 (5): 1236-1244]
- Kong WY, Li XH, Zou HF. Optimization of maximum entropy model in predicting species distribution [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30 (6): 2116-2128. [孔维尧, 李欣海, 邹红菲. 最大熵模型在物种分布预测中的优化 [J]. 应用生态学报, 2019, 30 (6): 2116-2128]
- Li A, Li LT, Gao MM, *et al.* Distribution prediction of invasive species *Flaveria bidentis* in China: based on MaxEnt model and climate change scenario [J]. *Journal of Agriculture*, 2020, 10 (1): 60-67. [李安, 李良涛, 高萌萌, 等. 基于 MaxEnt 模型和气候变化情景入侵种黄顶菊在中国的分布区预测 [J]. 农学学报, 2020, 10 (1): 60-67]
- Liu C, Berry PM, Dawson TP, *et al.* Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions [J]. *Ecography*, 2005, 28 (3): 385-393.
- Liu G. List of national protection of livestock and poultry genetic resources [J]. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 2007, 5:

42. [刘刚. 国家级畜禽遗传资源保护名录 [J]. 四川农业科技, 2007, 5: 42]
- Liu TY, Sun HL, Lu BB, *et al.* Spatial-temporal changes and driving forces of vegetation coverage in Yili Valley, Xinjiang, 1998-2018 [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2023, 51 (4): 68-74. [刘天弋, 孙慧兰, 卢宝宝, 等. 1998-2018 年新疆伊犁河谷植被覆盖度时空变化及驱动力 [J]. 东北林业大学学报, 2023, 51 (4): 68-74]
- Lv T, Guo Q, Ding YX, *et al.* Predicting potential suitable planting area of rice in China under future climate change scenarios using the MaxEnt model [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2022, 43 (4): 262-275. [吕彤, 郭倩, 丁永霞, 等. 基于 MaxEnt 模型预测未来气候变化情景下中国区域水稻潜在适生区的变化 [J]. 中国农业气象, 2022, 43 (4): 262-275]
- Mastrandrea M, Field C. Guidance note for lead authors of the IPCC fifth assessment report on consistent treatment of uncertainties [J]. *Heart Development*, 2010, 28 (4): 307-329.
- Peterson AT, Pape M, Soberón, *et al.* Mechanistic and correlative models of ecological niches [J]. *European Journal of Ecology*, 2015, 1 (2): 28-38.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190 (3/4): 231-259.
- Shi FF, Liu TT, Sun LP. Mineral content dataset of Xinjiang black bee honey from Nilek County [J]. *Scientific Data in China*, 2022, 7 (3): 171-177. [师丰丰, 刘婷婷, 孙丽萍. 尼勒克县新疆黑蜂蜂蜜矿物质含量数据集 [J]. 中国科学数据, 2022, 7 (3): 171-177]
- Shi FF, Yi X, Zhang HF, *et al.* Determination and analysis of free amino acids in honey of Xinjiang Black bee [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43 (11): 276-283. [师丰丰, 尹欣, 张海峰, 等. 尼勒克县新疆黑蜂蜂蜜游离氨基酸的测定及分析 [J]. 食品工业科技, 2022, 43 (11): 276-283]
- Shi W. The Legendary story of the Black bee in the Western region: The forgotten Western bee in China [J]. *Apiculture of China*, 2018, 69 (6): 15-16. [石巍. 西域黑蜂的传奇故事——被人类遗忘的中国本土西方蜜蜂 [J]. 中国蜂业, 2018, 69 (6): 15-16]
- Sun ZY, Kong FQ, Miao LJ, *et al.* Habitat suitability evaluation of *Leucogeranus leucogeranus* in Poyang Lake based on MaxEnt model [J]. *Southern Forestry Science*, 2023, 51 (4): 70-74. [孙志勇, 孔凡前, 缪沪君, 等. 基于 MaxEnt 模型的鄱阳湖白鹤生境适宜性评价 [J]. 南方林业科学, 2023, 51 (4): 70-74]
- Tao KL, Zhou JY, Zhang XY. Research progress on effects of temperature stress on physiological behavior of honeybees [J]. *Chinese Journal of Honeybees*, 2022, 42 (12): 6-12. [陶坤伶, 周建阳, 张小燕. 温度胁迫对蜜蜂生理行为影响研究进展 [J]. 蜜蜂杂志, 2022, 42 (12): 6-12]
- Wang YJ. Study on Climate Regionalization of Wine Grapes in Greater Shangri-La Area [D]. Xianyang: Northwest Agriculture and Forestry University Doctoral Thesis, 2023. [王艳君. 大香格里拉地区酿酒葡萄气候区划研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学博士论文, 2023]
- Warren DL, Seifert SN. Ecological niche modeling in MaxEnt the importance of model complexity and the performance of model

- selection criteria [J]. *Ecological Applications*, 2011, 21 (2): 335-342.
- Warren DL, Wright AN, Seifert SN, *et al.* Incorporating model complexity and spatial sampling bias into ecological niche models of climate change risks faced by 90 California vertebrate species of concern [J]. *Diversity and Distributions*, 2014, 20 (3): 334-343.
- Wen HY, Wang Y, Jiang P, *et al.* Potential distribution prediction of yellow spined bamboo locust (*Ceracris kiangsu*) in China based on maxent model [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2021, 43 (6): 1427-1434. [温玄焯, 王越, 姜璠, 等. 基于 MaxEnt 模型预测黄脊竹蝗在中国的适生区 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (6): 1427-1434]
- Wu SH, Lan XH, Wang YY, *et al.* Prediction of potential suitable areas of *Rhododendron dauricum* in Northeast China based on MaxEnt model [J]. *Journal of Beihua University (Natural Science Edition)*, 2023, 24 (5): 585-590. [吴生海, 兰雪涵, 王玉莹, 等. 基于 MaxEnt 模型的兴安杜鹃在我国东北地区潜在适生区预测 [J]. 北华大学学报 (自然科学版), 2023, 24 (5): 585-590]
- Wu T, Lu Y, Fang Y, *et al.* The Beijing climate center climate system Model (BCC-CSM): The main progress from CMIP5 to CMIP6 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2019, 12 (4): 1573-1600.
- Xiong QL, He YL, Deng FY, *et al.* Response assessment of alpine vegetation to climate change in southwest China based on MaxEnt model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (24): 9033-9043. [熊巧利, 何云玲, 邓福英, 等. 基于 MaxEnt 模型西南地区高山植被对气候变化的响应评估 [J]. 生态学报, 2019, 39 (24): 9033-9043]
- Xu ZC, Zhang XL, Zhu XY, *et al.* Research on black bee in Yili [J]. *Xinjiang Agricultural Science and Technology*, 1988, 4: 28-33. [徐振川, 张西磊, 朱新玉, 等. 伊犁黑蜂研究 [J]. 新疆农业科技, 1988, 4: 28-33]
- Yao ZY, Han QF, Lin B. Distribution prediction of major noxious weeds in Xinjiang based on maximum entropy model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43 (12): 5096-5109. [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 [J]. 生态学报, 2023, 43 (12): 5096-5109]
- Ye SB. Effects of High Temperature 40°C on The Development of Fertilized Eggs of Honeybees [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University Master Thesis, 2011. [叶善斌. 高温 40°C 对蜜蜂受精卵发育的影响 [D]. 福州: 福建农林大学硕士论文, 2011]
- Zhang DF, Zhang Q, Guo J, *et al.* Research on the global ecological suitability and characteristics of regions with *Angelica sinensis* based on the MaxEnt model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (15): 5111-5120. [张东方, 张琴, 郭杰, 等. 基于 MaxEnt 模型的当归全球生态适宜区和生态特征研究 [J]. 生态学报, 2017, 37 (15): 5111-5120]
- Zhang HF. Protection measures of black bees in Xinjiang [J]. *Journal of Bee*, 2018, 38 (1): 9. [张海峰. 新疆黑蜂的保护措施 [J]. 蜜蜂杂志, 2018, 38 (1): 9]
- Zhang JM. Study on geological structure and topographic features of Yili River Basin [J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2006, 4: 442-445. [张军民. 伊犁河流域地质构造及其地形地貌特点的研究 [J]. 石河子大学学报 (自然科学版), 2006, 4: 442-445]

- Zhang K, Yao L, Meng J, *et al.* Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 1326-1334.
- Zhang W, Qi SZ, Xue XF, *et al.* Effects of pesticides on honeybees and their toxicological mechanisms [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2022, 24 (5): 1125-1138. [张伟, 齐素贞, 薛晓锋, 等. 农药对蜜蜂的影响及毒理学机制研究进展 [J]. 农药学报, 2022, 24 (5): 1125-1138]
- Zhang ZB. Analysis of hydrological and ecological effects of water resources development and utilization in Ili River Basin [J]. *Energy and Energy Conservation*, 2022, 7: 68-70. [张志斌. 伊犁河流域水资源开发利用的水文及生态效应分析 [J]. 能源与节能, 2022, 7: 68-70]
- Zhang ZX, Lin ZXJC, Gao TZ, *et al.* Estimation of suitable habitat area for grazing livestock in Tianjun County based on MaxEnt model [J]. *China Herbivore Science*, 2023, 43 (2): 16-22. [张振西, 林扎西尖措, 高太侦, 等. 基于 MaxEnt 模型的天峻县放牧家畜生境适宜区估计 [J]. 中国草食动物科学, 2023, 43 (2): 16-22]
- Zhu GP, Liu GQ, Bu WJ, *et al.* Basic principles of niche model and its application in biodiversity conservation [J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21 (1): 9. [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): 9]