

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.20240038

蓝胫束颈蝗在新疆的潜在分布区域及生态适宜性预测

万育欣¹, 宋占云¹, 雷子怡¹, 周成龙¹, 赵远娥¹, 潘冉冉¹, 易光平², 季荣^{1*}

¹新疆师范大学生命科学学院, 新疆特殊环境物种保护与调控生物学实验室, 中亚区域跨境有害生物联合控制国际研究中心, 新疆乌鲁木齐 830054; ²新疆阿勒泰地区蝗虫鼠害预测预报防治中心站阿勒泰地区治蝗灭鼠指挥部办公室, 新疆阿勒泰 836500

摘要:【目的】蓝胫束颈蝗作为新疆土蝗类优势物种,需对其高度适生区域加强监测、风险评估和管控的能力。本研究结果可为该虫的精准防治提供依据,对今后的防治工作具有现实指导意义。【方法】基于MaxEnt模型、ArcGIS软件和ENMTools等工具,利用蓝胫束颈蝗225个自然分布点和11个环境因子,对该蝗虫当前气候和未来气候(SSP126、SSP245、SSP585)下的潜在适生区域、主导环境因子、生态位参数和质心迁移情况进行预测和分析。【结果】(1)蓝胫束颈蝗适生分布区域集中在北疆地区以及南疆地区的克孜勒苏柯尔克孜自治州。高度适生区域为阿勒泰地区、伊犁哈萨克自治州和克孜勒苏柯尔克孜自治州;(2)与当前气候情景相比,在未来气候情景下蓝胫束颈蝗的适生区域总面积均有所减少,SSP126情景平均减少1%,SSP245情景平均减少1.68%,SSP585情景平均减少1.55%;(3)影响蓝胫束颈蝗分布的主导气候因子包括最暖月最高温(bio5)、降水差异系数(bio15)、最暖季度平均温度(bio10)。当前气候下,该物种适宜分布的生态位参数为:最暖月最高温范围为24~31℃,降水差异系数小于44.35,最暖季度平均温度范围为16.35~22.54℃;(4)未来气候情景下,蓝胫束颈蝗分布的质心位置仍在塔城地区,整体向西南方向迁移。【结论】当前及未来,蓝胫束颈蝗在阿勒泰地区高度适生面积占其总高度适生面积比例极大。有关部门可针对其适生区域情况进行实地调查,以实现早期预警,及时防治,从而减少该虫危害。**关键词:**蓝胫束颈蝗; MaxEnt模型; 适生分布区; 环境变量; 质心迁移



开放科学标识码
(OSID 码)

Potential distribution regions and ecological suitability prediction of *Sphingonotus coerulipes* in Xinjiang

WAN Yuxin¹, SONG Zhanyun¹, LEI Ziyi¹, ZHOU Chenglong¹, ZHAO Yuan'e¹,
PAN Ranran¹, YI Guangping², JI Rong^{1*}

¹College of Life Science, Xinjiang Normal University, Key Laboratory of Special Species and Regulatory Biology in Xinjiang, International Center for the Collaborative Management of Cross-Border Pests in Central Asia, Urumqi, Xinjiang 830054, China; ²Xinjiang Altay Area Locust Rodent Pest Prediction and Control Center Station Altay Area Locust Rodent Control Headquarters Office, Altay, Xinjiang 836500, China

Abstract:【Aim】As a dominant species of indigenous locusts in Xinjiang, *Sphingonotus coerulipes* Uvarov requires enhanced monitoring, risk assessment and control capabilities within its highly suitable distribution regions. The results of this research provide a solid foundation for the precise control measures of locusts, offering practical guidance for future prevention and control efforts.【Method】This study utilized MaxEnt model, ArcGIS software, and ENMTools et cetera. Based on 225 natural distribution points and 11 environmental variables of *Sphingonotus coerulipes*, it predicted and analyzed the potential suitable distribution regions, dominant environmental variables, ecological niche parameters, and centroid migration of *Sphingonotus coerulipes* in current and future climate (SSP126, SSP245, SSP585).【Result】This study found that: (1) The suitable distribution regions of *S. coerulipes* were mainly concentrated in northern Xinjiang and the Kizilsu Kirgiz Autonomous Prefecture in southern Xinjiang. Highly suitable regions include Altay Prefecture, Ili Kazakh Autonomous Prefecture, and Kizilsu Kirgiz Autonomous Prefecture. (2) Compared to the cur-

收稿日期(Received): 2024-03-14 接受日期(Accepted): 2024-04-23

基金项目: 国家重点研发项目(2022YFD1400505); 新疆重点基金(2023D01D08); 天山英才领军人才项目(TSYCLJ0016); 第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0605); 新疆草原有害生物普查项目(2021—2023)(XJCYH-01)

作者简介: 万育欣, 女, 硕士研究生。研究方向: 动物生态学。E-mail: 469843222@qq.com

* 通信作者(Author for correspondence), 季荣, E-mail: 1045644792@qq.com

rent climate scenario, suitable distribution regions of *S. coerulipes* were expected to decrease under the future climate scenario. The average reduction is 1% in the SSP126 scenario, 1.68% in the SSP245 scenario, 1.55% in the SSP585 scenario; (3) Dominant climate factors affecting the distribution of *Sphingonotus coerulipes* include the highest temperature in the warmest month (bio5), the precipitation difference coefficient (bio15), and the average temperature in the warmest quarter (bio10). Under current climate conditions, the ecological niche parameters suitable for the distribution of this species are: the highest temperature of the warmest month ranging from 24–31°C, the precipitation difference coefficient less than 44.35, and the average temperature in the warmest quarter ranging from 16.35–22.54°C; (4) In the future climate scenarios, the centroid of *S. coerulipes* distribution remains in the Tacheng area, but overall, it migrates towards the southwest. 【Conclusion】 Currently and in the future, the highly suitable regions of *S. coerulipes* in the Altay area constitutes a significant proportion of its total highly suitable regions. Relevant authorities can conduct on-site investigations of these suitable regions to achieve early warning, timely prevention and control, thereby reducing the damage caused by locusts.

Key words: *Sphingonotus coerulipes*; MaxEnt model; suitable distribution regions; environmental variables; centroid migration

新疆地处亚欧大陆腹地,草地面积位居全国第三(严杜建等,2015),夏季高温低湿为蝗虫产卵和孵化提供了理想环境(Wu *et al.*,2022),为我国重要的蝗区之一。蝗灾不仅对农业和畜牧业造成经济损失,还破坏了草原生态系统平衡(Zhang *et al.*,2019)。近年来,阿勒泰地区、塔城地区、伊犁州察布查尔锡伯自治县、哈密市巴里坤等多地发生蝗灾(巴哈尔古丽·阿布达克木,2021;达成强,2020;徐文,2018)。2018年,新疆草原全年共计发生蝗灾 $184 \times 10^4 \text{ hm}^2$,造成牧草减少约 $35 \times 10^8 \text{ kg}$,直接经济损失达7亿元(康婕,2018)。

相关研究表明,蝗虫暴发与气候条件密切相关(Stige *et al.*,2007)。全球气候变暖会加剧虫害发生,对农业生产影响巨大(王艳斌,2021)。蓝胫束颈蝗 *Sphingonotus coerulipes* Uvarov,为斑翅蝗科 Oedipodidae 束颈蝗属 *Sphingonotus*,为荒漠草地和草原草地的优势种(林俊,2017)、山前洪积倾斜平原常见种(宋占云等,2024)。在牧区,束颈蝗啃食蒿类、禾草类植物;在种植区,啃食农田庄稼。根据农田蝗虫防治指标(哈尼亚·黑拉西汗,2015),土蝗防治指标为 $5 \sim 10 \text{ 头} \cdot \text{m}^{-2}$,土蝗密度在 $20 \text{ 头} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下的中低密度发生区,应重点实施生物防治。经访谈和实地考察,阿勒泰地区部分农田蓝胫束颈蝗危害较为严重,虫口密度可达 $12 \text{ 头} \cdot \text{m}^{-2}$,严重威胁农牧业生产和草原生态环境改善。

最大熵模型(MaxEnt)由Steven等在2004年首次引入到物种分布区预测中,是目前最常用的潜在地理分布预测模型之一(Phillips *et al.*,2006),该模型预测结果可通过ArcGIS软件生成直观清晰的适生区分布图,计算适生区面积。此模型预测能力强、预测结果稳定、对样本量要求不高,对虫害预测

和防治具有重要的应用价值(张文秀等,2021)。

政府间气候委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告指出,全球气候将持续变暖,较1986—2005年,到2100年,全球气候将上升 $0.3 \sim 4.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (Alexander *et al.*,2013)。全球气候变暖可能会导致物种的适宜分布区发生变化,因此,气候变化背景下,本文基于MaxEnt模型研究气候变化情景下的蓝胫束颈蝗潜在空间分布格局,能为相关机构在可能发生蝗灾的地区加强监测,及时发布预警信息,实施科学准确的防治措施,可有效防止大规模蝗灾造成的粮食损失和草原环境破坏,为该蝗虫的科学预测防治和提高作物产量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 物种分布数据来源及筛选

2022—2023年对新疆阿勒泰地区、塔城地区、新疆东3县进行实地调查,并由有害生物普查系统获取伊犁哈萨克自治州、和田地区、阿克苏地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州、哈密地区、巴音郭楞蒙古自治州等地的分布点信息。使用ENMTools工具,自动识别分辨率,筛选栅格内冗余数据,最终确定分布点共225个。

1.2 环境数据获取处理及相关性分析

1.2.1 环境数据获取与处理 在Worldclim网站(<http://www.worldclim.org/>)下载当前和未来(2041—2060年、2061—2080年、2081—2100年)的19个气候因子及海拔因子,分辨率为 2.5 arc-minutes 。未来气候数据基于BCC-CSM2-MR全球气候系统模型数据,选择 CO_2 驱动的3个独立的社会经济模型,即SSP126、SSP245、SSP585 3种情景进

行分析(Lu *et al.*, 2021)。SSP126 的总辐射强迫在 2100 年稳定在 $2.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 对应温室气体浓度低等的气候情景; SSP245 的总辐射强迫在 2100 年稳定在 $4.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 对应温室气体浓度中等的气候情景; SSP585 的总辐射强迫在 2100 年增加到 $8.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 对应温室气体浓度高等的气候情景, 较好地反映了社会经济发展和气候情景之间的联系, 涵盖了具体的未来气候周期, 且模拟结果更接近实际观测(Kim *et al.*, 2020)。将获取的气候数据和海拔因子分别导入至 ArcGIS 中处理, 转化为 MaxEnt 模型可以使用的“ASC.”格式。

1.2.2 相关性分析 ArcGIS 软件提取气候因子, 利用 R 得出 19 个气候数据的相关性, 在 $|r| \geq 0.8$ 的气候因子中排除贡献率较小的因子; 同时, 选取贡献率较高的气候因子, 综合得出所需因子。

1.3 MaxEnt 模型优化及模型构建评估

1.3.1 MaxEnt 模型优化 “feature classes”(FC) 和 “regularization multiplier”(RM) 是 MaxEnt 模型最重要的参数, 二者的优化可显著提高 MaxEnt 模型输出的准确性(Radosavljevic & Anderson, 2014)。FC 包含 5 个基本参数: 线性(L)、二次项(Q)、交互(P)、常数分段(T)和线性分段(H)(Phillips & Dudík, 2008)。一般 RM 从 0.5~4.0 递增设置, 间隔为 0.5; FC 包括“L”“LQ”“H”“LQH”“LQHP”和“LQHPT”6 种组合(Xian *et al.*, 2023)。在 MaxEnt 模型中设置最优的 FC 和 RM 值组合。

1.3.2 模型构建及评估结果 将地理数据和气候因子导入 MaxEnt 模型中, 设置 75% 分布区数据用于模型计算, 25% 数据用于模型测试(Yan *et al.*, 2023), 运算迭代次数为 500 次, 输出格式为“Logistic”“asc.”, 重复 10 次(徐养诚等, 2021)。运行 MaxEnt 得出的预测结果导入 ArcGIS 中, 依据意大利蝗 *Caloptamus italicus* (L.)(李先培等, 2017)、西伯利亚蝗 *Gomphocerus sibiricus* (L.)(杨会枫等, 2016)、西藏飞蝗 *Locusta migratoria tibetensis* Chen(王茹淋等, 2017)的适生区等级划分, 将研究区分为非适生区(0, 0.06]、低适生区(0.06, 0.3]、中适生区(0.3, 0.5]、高适生区(0.5, 1.0]。使用 ArcGIS 栅格工具计数不同适生区域的面积(Hou *et al.*, 2023)。

曲线下面积(area under the curve, AUC)值判断模型精度: $0.9 \leq \text{AUC 值} < 1.0$, 优秀; $0.8 \leq \text{AUC 值} < 0.9$, 良好; $0.7 \leq \text{AUC 值} < 0.8$, 一般; $0.6 \leq \text{AUC 值} < 0.7$,

差; $0.5 \leq \text{AUC 值} < 0.6$, 失败(陈慈豪和韦波, 2023)。

2 结果与分析

2.1 模型优化精确度结果分析

利用相关性分析和贡献率选出环境因子共 11 个, 包括: bio1(年均温)、bio2(昼夜温差月均值)、bio4(温度季节性变化)、bio5(最暖月最高温)、bio6(最冷月最低温)、bio10(最暖季度平均温度)、bio14(最干月降水量)、bio15(降水差异系数)、bio16(最湿季度降水量)、bio18(最暖季度降水量)和 elev(海拔)。MaxEnt 模型最优参数值: RM 为“0.5”, FC 选择“L”“Q”“H”, 使用最优参数模拟, 当前(图 1)及未来预测(表 1) AUC 值均大于 0.95, 精度判断为优秀。优化后模型提高了拟合精度, 利用 MaxEnt 模型预测蓝胫束颈蝗潜在地理分布结果具有较高的可靠性。

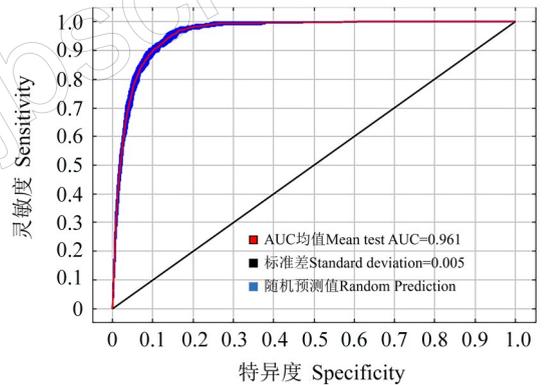


图 1 预测蓝胫束颈蝗潜在分布的 ROC 曲线

Fig.1 ROC curve for predicting the potential distribution of *S. coerulipes*

表 1 不同气候情景下的 AUC 值

Table 1 AUC values under different climate scenarios

气候变化情景 Climate change scenarios	AUC 值 AUC values
SSP126-2041-2100	0.960±0.002
SSP245-2041-2100	0.960±0.003
SSP585-2041-2100	0.963±0.001

2.2 环境因子重要性分析

贡献百分比是评价环境变量重要性的主要指标, 指标值越大, 说明环境变量重要性越高(Wang *et al.*, 2023)。MaxEnt 分析了 11 种环境数据的贡献百分率, 其中, bio5(6.7%)、bio10(18.2%)、bio14(25.8%)、bio15(23.2%)、bio18(8.2%), 贡献率累计达 80% 以上(表 2)。

刀切法分析环境因子的重要性(图 2)可知, 单独使用某种环境因子时 bio5、bio15、bio10、bio1 增

益较高;去除时, bio15、bio6、bio2、bio4 增益降低较大,因此它拥有其他变量中不存在的最多信息。综上, bio5、bio15、bio10 为影响蓝胫束颈蝗在新疆适生分布的重要环境因子。

表 2 环境因子贡献百分率

Table 2 Percentage contribution of environmental factors

环境因子 Environmental variable	贡献百分率 Percentage contribution/%
bio1 年均温 Annual mean temperature	2.9
bio2 昼夜温差月均值 Mean diurnal range	3.5
bio4 温度季节性变化 Temperature seasonality	3.2
bio5 最暖月最高温 Maximum temperature of warmest month	6.7
bio6 最冷月最低温 Min temperature of coldest month	3.9
bio10 最暖季度平均温度 mean temperature of warmest quarter	18.2
bio14 最干月降水量 Precipitation of driest month	25.8
bio15 降水季节性差异系数 Seasonal precipitation different coefficient	23.2
bio16 最湿季度降水量 Precipitation of wettest quarter	3.6
bio18 最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter	8.2
elev 海拔 Elevation	0.9



图 2 刀切法检验各环境变量重要性

Fig.2 The importance of each environment variable is tested by knife method

2.3 潜在分布预测

蓝胫束颈蝗的适生面积约为 $33.41 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占新疆总面积的 20.07%, 主要集中在北疆地区以及南疆地区的克孜勒苏柯尔克孜自治州。

高适生区面积约为 $5.24 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占比 3.15%, 包括阿勒泰大部分地区、伊犁哈萨克自治州的西北部地区和克孜勒苏柯尔克孜自治州的部分地区、博

尔塔拉蒙古自治州西部和昌吉北部的小部分地区。

中适生区面积约为 $6.26 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占比 3.76%, 大多分布在高适生区周围。包括阿勒泰西南部地区、塔城和伊犁哈萨克自治州的西北部地区、博尔塔拉蒙古自治州西部小部分地区、克孜勒苏柯尔克孜自治地区、喀什西南小部分地区、阿克苏西部零星地区。

低适生区面积约为 $21.91 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占比 13.16%, 包括阿勒泰地区、塔城地区、博尔塔拉蒙古自治州、昌吉、乌鲁木齐、哈密、吐鲁番、伊犁哈萨克自治州、阿克苏西部地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州大部分地区、喀什西部地区、和田及巴音郭楞蒙古自治州的极小部分地区。

2.4 未来气候条件下分布、适生参数变化及质心迁移

2.4.1 未来气候条件下分布情况

未来气候情景下, 蓝胫束颈蝗在新疆的分布格局与当前气候情景基本相同, 仅部分面积占比发生变化。主要分布在阿勒泰地区、塔城地区、博尔塔拉蒙古自治州、昌吉、乌鲁木齐、哈密、吐鲁番、伊犁哈萨克自治州、阿克苏西部地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州大部分地区、喀什西部地区。

在未来气候情景中, 蓝胫束颈蝗总适生区面积均小于当前气候情景面积 (表 3)。

SSP126 情景中, 蓝胫束颈蝗的适生区面积先减少后增加。低适生区面积均小于当前; 2041—2060 年和 2081—2100 年中适生区面积小于当前, 2061—2080 年中适生区面积最大, 为 $20.25 \times 10^4 \text{ km}^2$; 2061—2080 年和 2081—2100 年高适生区面积小于当前, 2041—2060 年高适生区面积最大, 为 $5.34 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

SSP245 情景中, 蓝胫束颈蝗的适生区面积先增加后减少。低适生区和中适生区面积均小于当前; 2041—2060 年和 2081—2100 年高适生区面积小于当前, 2061—2080 年面积达到最大, 为 $5.56 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

SSP585 情景中, 蓝胫束颈蝗的适生区面积逐渐减少。低适生区和高适生区面积均小于当前; 2061—2080 年和 2081—2100 年中适生区面积小于当前, 2041—2060 年达到最大, 为 $6.39 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

表 3 不同气候情景的蓝胫束颈蝗适生区面积及比例

Table 3 Area and proportion of suitable habitat area of *S. cyanotibialis* under different climate scenarios

气候情景 Climate scenarios	低适生区 Low suitability area		中适生区 Medium suitable area		高适生区 High suitability area	
	面积 Area/ $\times 10^4$ km ²	占比 Ratio/%	面积 Area/ $\times 10^4$ km ²	占比 Ratio/%	面积 Area/ $\times 10^4$ km ²	占比 Ratio/%
当前 Current	21.91	13.16	6.26	3.76	5.24	3.15
SSP126-41-60	21.31	12.80	5.98	3.59	5.34	3.21
SSP126-61-80	20.25	12.16	6.41	3.85	5.09	3.06
SSP126-81-00	20.10	12.07	5.91	3.55	4.86	2.92
SSP245-41-60	20.26	12.17	5.69	3.42	4.63	2.78
SSP245-61-80	21.78	13.08	5.66	3.40	5.56	3.34
SSP245-81-00	19.33	11.61	5.61	3.37	5.01	3.01
SSP585-41-60	20.43	12.27	6.39	3.84	4.91	2.95
SSP585-61-80	20.10	12.07	6.24	3.75	4.98	2.99
SSP585-81-00	19.73	11.85	5.11	3.07	4.61	2.77

2.4.2 生态位参数变化 当环境数据影响蓝胫束颈蝗的存在概率大于 0.5 时,便可认为蓝胫束颈蝗适宜生存。由图 3 可知,当前气候情境下 bio5 适生范围为 24~31 °C,最佳值为 28.78 °C;bio10 平均值适生范围为 16.35~22.54 °C,最佳值为 19.53 °C;bio15 低于44.35为适宜生存,最佳值为 28.53。

bio5 和 bio10 的均值和最佳值均呈现增大趋势,SSP585-61-80 的最佳适生最高,bio5 为 36.07 °C,bio10 为 26.13 °C。随着温度升高,降水量季节性变化增大,此时,蓝胫束颈蝗的生境将呈现出温度升高的趋势。SSP585-41-60 的 bio15 最佳系数增大明显,为 36.88。

由表 4 可知,与当前气候情景相比,未来气候

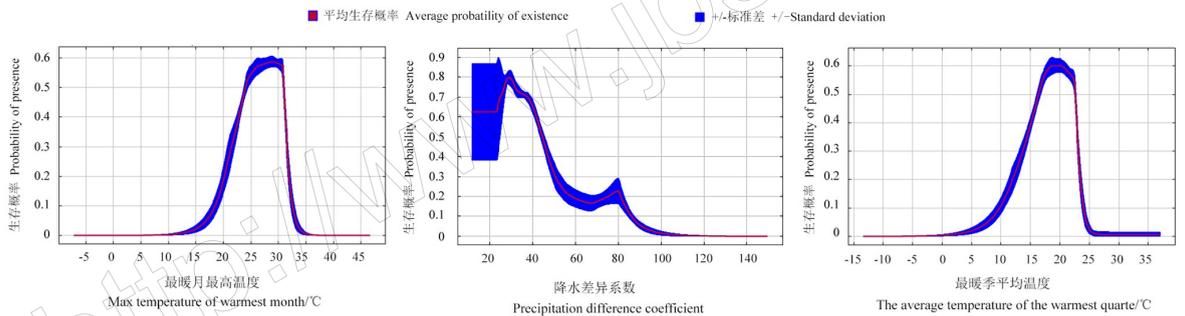


图 3 当前气候条件下蓝胫束颈蝗主导环境因子响应曲线

Fig.3 Response curve of the dominant environmental factors of *S. cyanotibialis* under current climatic conditions

表 4 不同情境下蓝胫束颈蝗适宜分布的生态位参数

Table 4 Ecological niche parameters of *S. cyanotibialis* in different situations

单位 Unit: °C

气候情景 Climate scenario	bio5	bio15	bio10	
当前 Current	变化范围 Variation range	24~31	<44.35	16.35~22.54
	最佳值 Optimum value	28.78	28.53	19.53
SSP126-41-60	变化范围 Variation range	27.12~33.25	<40.79	18.79~24.61
	最佳值 Optimum value	31.48	26.02	22.49
SSP126-61-80	变化范围 Variation range	27.66~33.67	<43.07	18.99~24.45
	最佳值 Optimum value	32.26	29.24	23.03
SSP126-81-00	变化范围 Variation range	26.73~33.35	<44.93	18.92~24.52
	最佳值 Optimum value	31.59	28.22	22.74
SSP245-41-60	变化范围 Variation range	27.91~33.86	<37.68	19.75~25.39
	最佳值 Optimum value	32.44	27.39	23.52
SSP245-61-80	变化范围 Variation range	29.22~35.57	<23.37;25.44~40.67	20.47~26.13
	最佳值 Optimum value	34.18	26.68	24.58
SSP245-81-00	变化范围 Variation range	29.01~35.39	25.75~43.19	20.52~26.52
	最佳值 Optimum value	33.57	26.17	23.89
SSP585-41-60	变化范围 Variation range	28.31~35.04	<44.15	20.01~26.09
	最佳值 Optimum value	33.11	36.88	23.77
SSP585-61-80	变化范围 Variation range	31.31~37.80	<40.13	22.71~28.45
	最佳值 Optimum value	36.07	21.49	26.13
SSP585-81-00	变化范围 Variation range	31.34~38.15	<41.65	23.37~28.99
	最佳值 Optimum value	32.94	25.30	24.68

2.4.3 适宜生境质心迁移 本研究将蓝胫束颈蝗潜在适生分布区以几何中心点来定义,以此方式模拟在不同时期气候情景下质心迁移变化(王晓帆等,2023)。与当前气候质心(85.09°E,43.89°N)相比,在 SSP126 情景下,2041—2060 年向西南方迁移 34.69 km,2061—2080 年向西南方迁移 22.08 km,

2081—2100 年向东北方迁移 9.190 km;SSP245 情境下,2041—2060 年向西北方迁移 8.07 km,2061—2080 年向西南方迁移 15.11 km,2081—2100 年向西南方迁移 25.96 km;SSP585 情景下,2041—2060 年向西南方迁移 10.53 km,2061—2080 年向西南方迁移 32.99 km,2081—2100 年向西南方迁移 21.58 km。

表 5 不同情境下蓝胫束颈蝗适宜生境质心分布

Table 5 Centroid distribution of suitable habitat for *S. cyanotibialis* in different situations

单位 Unit:(°)

经纬度 Longitude and latitude	SSP126			SSP245			SSP585		
	2041—2060	2061—2080	2081—2100	2041—2060	2061—2080	2081—2100	2041—2060	2061—2080	2081—2100
经度 Longitude	84.68	84.83	85.19	85.07	84.96	84.77	85.08	84.75	84.94
纬度 Latitude	43.77	43.81	43.91	43.95	43.78	43.86	43.78	43.71	43.72

3 讨论与结论

MaxEnt 可以构建物种响应曲线,客观分析相关生境的环境特征,且不受样本量的影响(Gebrewahid *et al.*, 2022)。早期大部分研究使用默认设置的 MaxEnt 模型,这会导致过拟合和抽样偏差,并对物种预测能力产生不利影响(Radosavljevic & Anderson, 2014)。本研究调整 MaxEnt 模型参数,防止模型过拟合导致预测出现偏差。将 RM 由“1”改为“0.5”,将 FC 由“LQHPT”改为“LQH”。优化后, AUC 增至 0.961, 预测准确性优秀。蓝胫束颈蝗的实际发生地区为阿勒泰地区、塔城地区、昌吉地区、伊犁、克孜勒苏柯尔克孜自治州、巴音郭楞蒙古自治州、哈密市、新疆东三县、乌鲁木齐市、巴里坤哈萨克自治县,与蓝胫束颈蝗潜在分布预测地理位置基本相同。当前气候情景下,蓝胫束颈蝗的高适生区主要分布在阿勒泰地区,与阿勒泰地区蝗灾严重研究结果一致(徐文, 2018)。

新疆以温带大陆性气候和温带季风气候为主,年降雨量少,辐射角大,季节性高温(Zheng *et al.*, 2021)。通过相关性分析、刀切法和贡献率对比的方法,分析出影响蓝胫束颈蝗分布的主导因子为 bio5、bio15 和 bio10,与西伯利亚蝗分析结果相似(杨会枫等, 2016)。研究表明, bio15 数值较小时,极适宜蓝胫束颈蝗生长发育,可能是此条件下的降水量有助于维持生态系统平衡,促进植被生长,更适宜的环境条件有利于蓝胫束颈蝗繁殖和生存。温度和降水是蓝胫束颈蝗适生的主要气候因素,与影响蝗虫生长发育的气候因素研究结果一致(Mario *et al.*, 2018)。其中,最暖月最高温是影响其分布的最重要因素。蝗灾发生严重的年份温度偏

高、降水量小,且产卵期温度越高,降水量越少,更利于蝗灾的发生(杨洪升, 2007)。

不同气候情景和不同时期下,蓝胫束颈蝗适生区预测值存在差异,但总体趋势一致,即适生区逐渐减少。SSP245 和 SSP585 适生面积明显减少,说明对气候变化的响应在 SSP245 和 SSP585 情景下较为敏感。而在未来气候情景下,适生区面积均减少,原因可能是气温在新疆全域内呈暖-湿化趋势(王政琪等, 2021),这种趋势不利于蝗虫生长发育。

结果表明,当前及未来气候变化情景下,塔城地区均是蓝胫束颈蝗的质心区域。在不同气候变化情景下,适宜生境区域的中心将向西迁移,仅有 SSP126-81-00 向东迁移 9.19 km。迁移最远的为 SSP126-41-60,向西迁移 34.69 km。本研究中,未来条件下蓝胫束颈蝗的质心将向西南方向迁移。可能是因为新疆地区降水和温度变化趋势在空间上不同步,存在明显差异(胡文峰等, 2020),这种差异性导致蓝胫束颈蝗的质心向其他方向迁移。

塔城作为中哈边境地区,蝗虫跨境危害问题不可忽略,与新疆毗邻的哈萨克斯坦的东哈萨克斯坦州和阿拉木图州在地理、生态和资源等方面与我国新疆均相似,是主要的境外虫源地(罗迪等, 2022)。因此,应对蓝胫束颈蝗的主要适生区应进行长期定点监测,联合攻关方是解决中国西北边境境外蝗虫跨境入侵危害的根本途径(季荣, 2020)。

物种潜在适生分布不仅与气候条件有关,种间竞争、人类活动等因素也会对其生长发育有所影响(Blois *et al.*, 2013),因此,未来的研究可结合蝗虫自身理化作用、物种之间相互作用及人为影响等做出精准预测,提高预测的精确度。

参考文献

- 巴哈尔古丽·阿布达克木, 2021. 草原蝗虫鼠害的发生及其治理策略. *农家参谋* (10): 152-153.
- 陈慈豪, 韦波, 202. 基于组合模型和 GIS 的白纹伊蚊广东省适生区预测. *生物安全学报*, 32(2): 161-167.
- 达成强, 2020. 草原蝗虫鼠害的发生及其治理策略. *区域治理* (40): 153.
- 哈尼亚·黑拉西汗, 2015. 农田蝗虫防治技术. *农业科技与信息* (19): 83.
- 胡云峰, 陈玲玲, 姚俊强, 季淑媛, 孙宁, 2020. 气候变化背景下新疆气温和降水时空演变特征分析. *阜阳师范学院学报(自然科学版)*, 37(3): 90-95.
- 季荣, 2020. 新疆蝗虫暴发机理及昆虫雷达监测技术应用. 北京: 科学出版社.
- 康婕, 2023. 新疆草原虫害监测与防治工作现状与建议. *新疆林业* (2): 43-45.
- 李培先, 林峻, 麦迪·库尔曼, 吴建国, 刘永强, 郑江华, 2017. 气候变化对新疆意大利蝗潜在分布的影响. *植物保护*, 43(3): 90-96.
- 林峻, 2017. 新疆草原优势种蝗虫区域划分研究. *新疆畜牧业* (6): 58-59.
- 罗迪, 刘孝贤, 季荣, 2022. 气候变暖背景下新疆和中哈边境亚洲飞蝗适生区预测及变化. *环境昆虫学报*, 44(4): 880-890.
- 宋占云, 万育欣, 查绪栋, 陈冉, 杨静, ROMAN JASHENKO, 季荣, 2024. 塔额盆地草原蝗虫空间生态位研究. *环境昆虫学报*: 1-12 [2024-04-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1640.Q.20240318.1436.002.html>.
- 王茹琳, 李庆, 封传红, 石朝鹏, 2017. 基于 MaxEnt 的西藏飞蝗在中国的适生区预测. *生态学报*, 37(24): 8556-8566.
- 王晓帆, 段雨萱, 金露露, 王崇云, 彭明春, 李云, 王旭红, 马云飞, 2023. 基于优化的 MaxEnt 模型预测中国高山栎组植物的历史、现状与未来分布变化. *生态学报*, 43(16): 1-15.
- 王艳斌, 2021. 气候变化对农业气象灾害和病虫害的影响以及应对措施. *农业工程技术*, 41(5): 92-93.
- 王政琪, 高学杰, 童尧, 韩振宇, 徐影, 2021. 新疆地区未来气候变化的区域气候模式集合预估. *大气科学*, 45(2): 407-423.
- 徐文, 2018. 新疆草原治蝗主要问题及措施. *中国畜禽种业*, 14(4): 22.
- 徐养诚, 刘孝贤, 王婷, 李东育, 高桂珍, 2021. 基于 MaxEnt 模型的菜豆象全球潜在适生区预测. *生物安全学报*, 30(3): 213-219.
- 严杜建, 周启武, 路浩, 吴晨晨, 赵宝玉, 曹丹丹, 马烽, 刘晓学, 2015. 新疆天然草地毒草灾害分布与防控对策. *中国农业科学*, 48(3): 565-582.
- 杨洪升, 2007. 基于 MODIS-NDVI 的新疆典型蝗区植被动态及蝗虫发生的气候背景研究. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆师范大学.
- 杨会枫, 郑江华, 吴秀兰, 穆晨, 林俊, 许仲林, 2016. 基于 MaxEnt 模型的西伯利亚蝗虫在新疆潜在分布预测研究. *新疆农业科学*, 53(1): 43-50.
- 张文秀, 张丽, 周清华, 李明刚, 刘俊峰, 2021. 采用生态位模拟预测湖北省烟区主要虫害斜纹夜蛾的潜在地理分布区. *湖北农业科学*, 60(S1): 181-183, 187.
- ALEXANDER L, ALLEN S, BINDOFF N, DAVID H, 2013. Climate change 2013: the physical science basis, in contribution of working group I (WGI) to the fifth assessment report (AR5) of the intergovernmental panel on climate change (IPCC). *Computational Geometry*. DOI: 10.1016/S0925-7721(01)00003-7.
- BLOIS L J, ZARNETSKE L P, FITZPATRICK M C, FINNEGAN S, 2013. Climate change and the past, present, and future of biotic interactions. *Science*, 341: 499-504.
- GBREWAHID Y, ABREHE S, MERESA E, EYASU G, ABAY K, GEBREAB G, KIDANEMARIAM K, ADISSU G, ABREHA G, DARCHA G, 2020. Current and future predicting potential areas of *Oxytenanthera abyssinica* (A. Richard) using MaxEnt model under climate change in Northern Ethiopia. *Ecological Processes*, 9(3/4): 476-487.
- HOU J L, XIANG J G, LI D, LIU X H, 2023. Prediction of potential suitable distribution areas of *Quasipaa spinosa* in China based on MaxEnt optimization model. *Biology*, 12(3): 366.
- KIM Y H, MIN S K, ZHANG X B, SILLMANN J, SANDSTAD M, 2020. Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices. *Weather and Climate Extremes*, 29: 100269.
- LU Y X, WU T W, LI Y B, YANG B, 2021. Mitigation of the double ITCZ syndrome in BCC-CSM2-MR through improving parameterizations of boundary-layer turbulence and shallow convection. *Copernicus Gmbh*, 8: 5183-5204.
- MARIO A P, ESAU R S, MARCELA G A, HORACIO S, ARTURO R R, 2018. Population fluctuation of *Schistocerca piceifrons piceifrons* (Orthoptera: Acrididae) in the Yucatán Peninsula and its relation with the environmental conditions. *Revista de Biología Tropical*, 66(1): 403-414.
- PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E, 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3/4): 231-259.
- PHILLIPS S J, DUDÍK M, 2008. Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive e-

- valuation. *Ecography*, 31(2): 161–175.
- RADOSAVLJEVIC A, ANDERSON R P, 2014. Making better MaxEnt models of species distributions: complexity, overfitting and evaluation. *Journal of Biogeography*, 41(4): 629–643.
- STIGE L C, CHAN S, ZHANG Z, FRANK D, STENSETH N C, 2007. Thousand-year-long Chinese time series reveals climatic forcing of decadal locust dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104: 16188–16193.
- WANG Y J, XIE L Y, ZHOU X Y, CHEN R F, ZHAO G H, ZHANG F G, 2023. Prediction of the potentially suitable areas of *Leonurus japonicus* in China based on future climate change using the optimized MaxEnt model. *Ecology and Evolution*, 13(10): 10597–10597.
- WU R, GUAN J Y, WU J G, JU X F, AN Q H, ZHENG J H, 2022. Predictions based on different climate change scenarios: the habitat of typical locust species is shrinking in Kazakhstan and Xinjiang, China. *Insects*, 13(10): 942.
- XIAN X Q, ZHAO H X, GUO J Y, ZHANG G F, LIU H, LIU W X, WAN F H, 2023. Estimation of the potential geographical distribution of a new potato pest (*Schrankia costae-strigalis*) in China under climate change. *Journal of Integrative Agriculture*, 22(8): 2441–2455.
- YAN C C, HAO H T, WANG Z, SHA S S, ZHANG Y W, WANG Q P, KANG Z S, HUANG L L, WANG L, FENG H Z, 2023. Prediction of suitable habitat distribution of *Cryptosphaeria pullmanensis* in the World and China under climate change. *Journal of Fungi (Basel, Switzerland)*, 9(7): 739.
- ZHANG L, LECOQ M, LATCHININSKY A, 2019. Locust and grasshopper management. *Annual review of entomology*, 64: 15–34.
- ZHENG S, ZHANG B, PENG D, YU L, LIN B, PA Y, XIE Q, 2021. The trend towards a warmer and wetter climate observed in arid and semi-arid areas of northwest China from 1959 to 2019. *Environmental Research Communications*, 3(11): 115011.
- (责任编辑:郭莹)
- ~~~~~
- (上接第 161 页)
- 吴益东, 陈松, 净新娟, 林祥文, 沈晋良, 2001. 棉铃虫抗药性监测方法——浸叶法敏感毒力基线的建立及其应用. *昆虫学报*, 44(1): 56–61.
- 吴益东, 沈慧雯, 张正, 王兴亮, 施雨, 武淑文, 杨亦桦, 2019. 草地贪夜蛾抗药性概况及其治理对策. *应用昆虫学报*, 56(4): 599–604.
- 肖汉祥, 袁龙宇, 高艳, 张振飞, 李振宇, 李燕芳, 2023. 广东草地贪夜蛾不同田间种群对 4 种杀虫剂的抗药性监测. *植物保护*, 49(3): 328–332.
- 徐艳玲, 李昭原, 陈杰, 李志红, 秦誉嘉, 2020. 草地贪夜蛾对我国小麦产业造成的潜在经济损失评估. *植物保护学报*, 47(4): 740–746.
- GUTIÉRREZ-MORENO R, MOTA-SANCHEZ D, BLANCO C A, WHALON M E, TERÁN-SANTOFIMIO H, RODRIGUEZ-MACIEL J C, DIFONZO C, 2019. Field-evolved resistance of the fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) to synthetic insecticides in Puerto Rico and Mexico. *Journal of Economic Entomology*, 112(2): 792–802.
- MONTEZANO D G, SPECHT A, SOSA-GÓMEZ D R, ROQUE-SPECHT V F, SOUSA-SILVA J C, PAULA-MORAES S V, PETERSON J A, HUNT T E, 2018. Host plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas. *African Entomology*, 26(2): 286–300.
- SPARKS A N, 1979. A review of the biology of the fall armyworm. *The Florida Entomologist*, 62(2): 82–87.
- SPARKS T C, NAUEN R, 2015. Mode of action classification and insecticide resistance management. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 121: 122–128.
- STORER N P, BABCOCK J M, SCHLENZ M, MEADE T, THOMPSON G D, BING J W, HUCKABA R M, 2010. Discovery and characterization of field resistance to Bt maize: *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Puerto Rico. *Journal of Economic Entomology*, 103(4): 1031–1038.
- SUN X X, HU C X, JIA H R, WU Q L, SHEN X J, ZHAO S Y, JIANG Y Y, WU K M, 2021. Case study on the first immigration of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* invading into China. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(3): 664–672.
- TODD E L, POOLE R W, 1980. Keys and illustrations for the armyworm moths of the noctuid genus *Spodoptera* Guenée from the Western Hemisphere. *Annals of the Entomological Society of America*, 73(6): 722–738.
- ZHANG D D, XIAO Y T, XU P J, YANG X M, WU Q L, WU K M, 2021. Insecticide resistance monitoring for the invasive populations of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* in China. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(3): 783–791.
- (责任编辑:郭莹)