DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2024.04.010

基于 MaxEnt 和 ArcGIS 预测蛇鳄龟在中国的 潜在适生区域及其对未来气候变化的响应

庄晓纯¹, 王 成¹, 洪 维¹, 高养春^{2,3}, 魏玉峰^{2,3*}

¹广东省龙眼洞林场,广东广州 510520;²广东省科学院动物研究所,广东广州 510260; ³广东省动物保护与资源利用重点实验室/广东省野生动物保护与利用公共实验室,广东广州 510260

摘要:【目的】蛇鳄龟原产于加拿大和美国,现已在亚洲、欧洲和美洲的多个国家广泛分布,对我国生物多样性和人类健康造成严重威胁,亟需预测蛇鳄龟在我国的潜在分布范围,为其入侵风险评估和防治策略制定提供重要科学依据。【方法】基于蛇鳄龟在中国的76个分布点位和19个生物气候变量,利用 Max-Ent 模型和 ArcGIS 预测当前和未来气候条件下蛇鳄龟在中国的潜在分布范围和变化趋势,分析影响其分布的重要生物气候变量。【结果】最干月份降水量、最冷月份最低温和最湿季度平均温度是 MaxEnt 模型 中贡献率排名前3的生物气候变量,可能是影响蛇鳄龟分布的重要自然因素;当前气候条件下,蛇鳄龟高



适生区域主要集中于华南、华中和华东的大部分地区,华北和西南地区存在少部分高适生区域,东北和西北的大部分地区 无高适生区域分布;未来气候条件下,蛇鳄龟高适生区域面积增加,扩张区域主要集中于湖北北部、河南、陕西南部及江西、 湖南、四川等局部地区,收缩区域主要集中于河北南部、山东西北部、江苏北部及广西、四川等局部地区,导致高适生区域质 心分布向西南和西北方向移动。【结论】蛇鳄龟在我国华南、华中和华东地区入侵风险较高,未来入侵风险将持续增加。今 后,应加强对高入侵风险区域的监管力度,积极开展外来入侵物种的监测与调查,防止其进一步入侵和扩散。 关键词:外来入侵物种;蛇鳄龟;气候变化;适生区域

Potential suitable habitats of *Chelydra serpentina* Linnaeus in China under future climate projection, based on MaxEnt and ArcGIS

ZHUANG Xiaochun¹, WANG Cheng¹, HONG Wei¹, GAO Yangchun^{2,3}, WEI Yufeng^{2,3*}

¹Guangdong Longyandong Forest Farm, Guangzhou, Guangdong 510520, China; ²Institute of Zoology, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510260, China; ³Guangdong Key Laboratory of Animal Conservation and Resource Utilization/Guangdong Public Laboratory of Wild Animal Conservation and Utilization,

Guangzhou, Guangdong 510260, China

Abstract: [Aim] The common snapping turtle (*Chelydra serpentina* Linnaeus) is native to the Canada and the United States but has been widely distributed in many countries in Asia, Europe and the Americas, posing serious threats to both local biodiversity and public health in China. Therefore, it is crucial to predict the potential distribution of *C. serpentina* in China in order to provide a significant scientific basis for assessing invasion risks and formulating effective control strategies. [Method] In this study, a total of 76 distribution points of *C. serpentina* and 19 bioclimatic variables were used to predict the potential distribution in China under both current and future climate conditions using the MaxEnt model and ArcGIS. The most important bioclimatic variables influencing its distribution were analyzed. [Result] The top three bioclimatic variables affecting the distribution of *C. serpentina* are the precipitation of driest month, the min temperature of coldest month, and mean temperature of wettest quarter. These variables might be the most important natural factor affecting the occurrence and distribution of *C. serpentina*. Under current climatic conditions, the high suitability areas for *C. serpentina* are mainly concentrated in South China, Central China, and East China, with a few in North China and Southwest China. There is almost no invasion risk in most of the northeast and northwest provinces of China. However, the

收稿日期(Received): 2023-09-25 接受日期(Accepted): 2023-12-18 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32371753); 广东省科学院科技发展专项(2022GDASZH-2022010106); 广州市科技计划项目 (2023A04J0844); 广东林业外来入侵动物物种普查项目; 广东省龙眼洞林场两栖爬行动物资源本底调查研究项目 作者简介: 庄晓纯, 女,园林工程师。研究方向: 生态学。E-mail: hailin7059@163.com * 通信作者(Author for correspondence), 魏玉峰, E-mail: wyf6123@126.com high suitability areas are projected to increase in the future, particularly in the north Hubei, Henan, south Shaanxi, as well as localized areas in Jiangxi, Hunan, and Sichuan provinces. On the other hand, the high suitability areas are expected to decrease in the south Hebei, northwest Shandong, north Jiangsu, and localized areas in Guangxi and Sichuan provinces. With climate warming, the centroid distribution of high suitability areas for *C. serpentina* is shifting towards the southwest and northwest. [Conclusion] The *C. serpentina* has a high invasion risk in southern, central, and eastern China, and this risk is expected to increase in the future. Therefore, it is necessary to strengthen monitoring and regulation efforts in high-risk areas and actively conduct monitoring and investigations of invasive species to prevent further invasion and spread.

Key words: invasive alien species; Chelydra serpentina; climate change; suitable habitats

外来物种入侵对生物多样性、人类健康及社会 经济的影响日益严重,已成为全球共同关注的重要 生态环境问题(Chen et al.,2023; Haubrock et al., 2022; Zhu et al.,2019)。中国是受外来入侵物种危 害最为严重的国家之一,《2020年中国生态环境状 况公报》(中华人民共和国生态环境部,2021)显示, 截至2020年12月,我国记录外来入侵物种 660多 种,每年造成直接经济损失超2000亿元(赵添羽 等,2022)。外来物种入侵早期的风险评估比成功 入侵后的清除治理更加重要,潜在分布范围预测是 评估入侵风险的重要前提,准确预测潜在分布范围 不仅有助于阻止入侵物种的进一步扩散,还可有效 降低入侵后的治理成本(Fournier et al.,2019; Leung et al.,2002)。

入侵物种分布范围受多种生物(如物种迁移能 力、种间相互作用等)和非生物(如气候、土壤、水文、 地形地貌等)因素影响,其中温度是最重要的影响因 素之一(O'Connor et al., 2020)。据联合国政府间气 候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)报道显示,过去 100 年间全球地 表平均温度上升了 0.85 ℃. 目未来地表温度将持续 上升(IPCC, 2014; Li et al., 2019)。到本世纪末, 我 国平均温度将升高 1.6~5.0 ℃(江志红等,2008)。但 目前气候变暖对入侵物种分布范围的影响尚无统一 结论。一些研究表明,持续气候变暖将会导致入侵 物种分布范围逐渐扩张(Puchałka et al., 2021; Shrestha et al., 2018); 但也有研究认为, 入侵物种分布范 围将会收缩(Bezeng et al., 2017; Manzoor et al., 2018)。因此,亟需在外来入侵物种中开展气候变暖 对潜在分布范围影响的研究,以加深对全球气候变 暖背景下物种分布格局变化规律的认识。

物种分布模型(species distribution models, SDMs)又叫生态位模型,主要利用物种已知分布点 位和环境变量数据,依据特定计算方法估计物种生 态位,再投影到景观中预测物种在目标区域出现的

概率 (Anibaba et al., 2022; Kearney & Porter, 2009)。常用物种分布模型主要包括最大熵模型 (maximum entropy modeling, MaxEnt)、生物气候分 析系统(bioclimate analysis and prediction system, BIOCLIM)、生态位因素分析模型(ecological niche factor analysis, ENFA)、遗传算法模型(genetic algorithm for rule-set production, GARP)、广义线性模型 (generalized linear model, GLM) 与广义相加模型 (generalized additive model, GAM)等(吴艳等, 2022)。其中, MaxEnt 模型因具操作简单、运行时 间短、预测精度高、结果稳定等特点被广泛用于预 测外来入侵物种的潜在分布范围(Jing et al., 2023; Merow et al., 2013; Wang et al., 2023)。 MaxEnt 模 型不仅能有效处理分布不规则的点位数据和较小 定位误差,还能基于少量点位数据预测物种在未来 气候条件下的分布范围(Kramer-schadt et al., 2013; Waldock et al., 2022; Wang et al., 2023), 已在生态、 进化、生物安全、入侵物种管理等多个领域广泛应 用(Phillips et al., 2006)。

蛇鳄龟 Chelydra serpentina Linnaeus 又名小鳄 龟、拟鳄龟、隶属于龟鳖目 Testudines 鳄龟科 Chelvdridae 鳄龟属 Chelydra,原产于加拿大和美国,现已被 引种到亚洲、欧洲、美洲的多个国家(Esposito et al., 2022; Rhodin et al., 2021)。蛇鳄龟生性凶猛, 食性杂 且广,还携带可感染人类的致病菌,对本土生物多样 性和人类健康造成严重威胁(赵虎等,2021; Esposito et al., 2022)。已有研究发现, 蛇鳄龟在我国陕西、河 南及长江中下游平原等地区具较高的入侵风险(陈 晓璠等,2017)。然而,影响蛇鳄龟潜在分布范围的 环境因子及其在未来气候条件下分布范围的变化规 律尚不清楚。故本研究利用 MaxEnt 模型、ArcGIS 软 件和蛇鳄龟分布数据筛选影响其潜在分布范围的重 要环境因子,分析当前和未来气候条件下蛇鳄龟在 中国潜在分布范围的变化规律,以期为蛇鳄龟入侵 的监测、预警及防控提供重要理论依据。

1 材料与方法

1.1 分布数据获取与筛选

本研究共获得 89 条蛇鳄龟在中国的分布数 据,分布信息来源于以下2个途径:(1)利用 Web of Science、Google 学术、广东省科技图书馆数据库、百 度等工具检索相关数据,关键词使用蛇鳄龟(中文 名)、Chelydra serpentina (拉丁名)、The common snapping turtle (英文名),以及俗名鳄龟、鳄鱼龟、 小鳄龟、拟鳄龟。其中,一些非学术期刊的新闻报 道根据其文字描述和配图判断是否为蛇鳄龟。本 研究检索 2023 年 8 月 8 日之前发表的文献及新闻 报道,共获得77个分布点位信息。(2)利用全球生 物多样性信息平台(https://www.gbif.org)获取蛇鳄 龟分布的 12 个经纬度信息 (https://doi.org/10. 15468/dl.rksk9w)。数据筛选首先需要排除错误和 重复的记录,然后每10km 仅保留一个坐标来降低 空间自相关。最后,保留76个坐标,另存为*.csv格 式,用于模型分析。

1.2 环境变量获取与筛选

本研究使用物种分布模型中常用的 19 个生物 气候变量(表1)预测蛇鳄龟在中国的潜在分布范围 (Gong et al.,2023; Qin et al.,2020)。所有变量均来 自于 WorldClim 环境数据库(https://www.worldclim. org),空间分辨率为 2.5 min (Fick & Hijmans,2017)。 当前气候变量采用 1970—2000 年气候数据的平均 值,未来气候变量选择 CMIP6 计划中北京气候中心 预测数据的平均值(BCC-CSM2-MR),包括 4 个时期 (2021—2040、2041—2060、2061—2080 和 2081—2100 年)和 4 个共享社会经济路径(SSP126、SSP245、 SSP370 和 SSP585)。所有数据经 ArcGIS 10.7 软件 转换为 ASCII格式用于进一步模型分析。

生物气候变量之间相关性过高会导致模型过 度拟合,影响模型预测准确性(Liu et al., 2023)。 为了避免多重共线性对预测结果产生的不良影响, 本研究通过以下步骤进行变量筛选:(1)利用 Max-Ent 模型中的刀切法评估各变量的贡献率,去除贡 献率<1%的变量(李丽鹤等,2017);(2)利用皮尔 森相关系数检验剩余变量之间的多重共线性,保留 Pearson's |r|<0.8 的变量,当Pearson's |r|>0.8 时. 保留刀切法中贡献率更高的变量(Gong et al., 2023; Huang et al., 2020)。最后,保留等温性 (Bio3)、最冷月份最低温(Bio6)、最湿季度平均温 度(Bio8)、最热季度平均温度(Bio10)、最湿月份降 水量(Bio13)和最干月份降水量(Bio14)等6个生 物气候变量(表1和图1)预测蛇鳄龟在当前气候 条件下在中国的潜在分布范围及其在未来气候条 件下潜在分布范围的变化规律。

编码 Codo	生物气候变量描述 Description of bioclimatic variable	贡献率 Percent contribution/%	是否用于建模 Whather to use for modeling	
Code		Tercent contribution/ %	whether to use for modering	
Bio1	年半均温度 Annual mean temperature/℃	0	否 No	
Bio2	平均温度日较差 Mean daily temperature range /℃	5.9	否 No	
Bio3	等温性 Isothermality	6.7	是 Yes	
Bio4	温度季节性变动系数 Coefficient of seasonal temperature variation/℃	3.8	否 No	
Bio5	最热月份最高温 Max temperature of warmest month/℃	0.1	否 No	
Bio6	最冷月份最低温 Min temperature of coldest month/℃	17.0	是 Yes	
Bio7	温度年较差 Temperature annual range /℃	0.4	否 No	
Bio8	最湿季度平均温度 Mean temperature of wettest quarter/℃	10.4	是 Yes	
Bio9	最干季度平均温度 Mean temperature of driest quarter/℃	1.6	否 No	
Bio10	最热季度平均温度 Mean temperature of warmest quarter/℃	12.2	是 Yes	
Bio11	最冷季度平均温度 Mean temperature of coldest quarter/℃	1.5	否 No	
Bio12	年降水量 Annual precipitation/mm	6.8	否 No	
Bio13	最湿月份降水量 Precipitation of wettest month/mm	6.3	是 Yes	
Bio14	最干月份降水量 Precipitation of driest month/mm	26.4	是 Yes	
Bio15	降水量季节性变动系数 Seasonal variation coefficient of precipitation	0	否 No	
Bio16	最湿季度降水量 Precipitation of wettest quarter/mm	0	否 No	
Bio17	最干季度降水量 Precipitation of driest quarter/mm	0	否 No	
Bio18	最热季度降水量 Precipitation of warmest quarter/mm	0	否 No	
Bio19	最冷季度降水量 Precipitation of coldest quarter/mm	1.1	否 No	

表 1 本研究使用的 19 个生物气候变量及其在模型中的贡献度 Table 1 The 19 bioclimatic variables used in this study and their percent contribution in the model



图 1 6 个生物气候变量的相关系数矩阵(Pearson)热图 Fig.1 Pearson correlation matrix heat map of six bioclimatic variables

1.3 物种分布模型构建与评估

利用 MaxEnt 模型预测蛇鳄龟在不同气候条件 下的潜在分布范围及其变化规律,模型运行前进行 以下 5 个设置:(1)选择构建响应曲线;(2)选择刀 切法评估变量重要性;(3)设置测试集为 25%,训练 集为 75%进行模拟分析;(4)最多迭代次数设置为 1000;(5)运行次数设置为 10。其他参数采用默认 设置(Phillips,2008)。

利用受试者工作特征 (receiver operator characteristic, ROC)曲线评估模型的预测性能。ROC 曲线下面积 (area under curve, AUC)不受临界值 的影响,常用于评价预测模型的准确性(杨冬琼 等,2023; Wei *et al.*,2018)。AUC 取值范围为 0~1,AUC<0.5表明模型预测失败, $0.5 \leq AUC <$ 0.7表明模型准确性较差, $0.7 \leq AUC < 0.8$ 表明模 型较为准确, $0.8 \leq AUC < 0.9$ 表明模型很准确, AUC ≥ 0.9 表明模型极为准确(Mamun *et al.*, 2018; Phillips *et al.*,2006)。

1.4 潜在适生区域划分

在 MaxEnt 模型运行 10 次结果中选取 AUC 值 最大的一次作为最终结果(方铧等,2023; 宦智群 等,2023),将模型输出的 ASC II 文件加载到 AreGIS 10.7 软件中,利用"自然间断点分级法(Jenks' natural break)"将蛇鳄龟的适生区域划分为 4 个等级: 非适生区域(P < 0.2)、低适生区域($0.2 \le P < 0.4$)、 中适生区域($0.4 \le P < 0.6$)及高适生区域($P \ge 0.6$), 并计算各适生区域的面积(Qin et al.,2020)。

1.5 适生区变化及质心转移分析

利用 SDM Toolbox v2.4(http://www.sdmtool-

box.org/)分析未来各时期和情境条件下适生区的 变化情况(唐杨欣等,2023)。首先,将 SDM Toolbox v2.4 加载到 ArcGIS 10.7 软件中,利用 SDM Tools 将 MaxEnt 模型输出的 ASC II 文件转换为栅格文件,再 对文件进行"快速重分类(quick reclassify)"处理, 最后比较适生区的变化范围。

利用 ArcGIS 10.7 软件计算未来各时期和情境 条件下适生区质心转移距离(梁键明等,2023)。先 将 ASC II 文件加载到 ArcGIS 10.7 软件中,利用空 间统计工具计算质心位置,再利用地理处理工具将 各文件进行合并,最后计算质心偏移距离。

2 结果与分析

2.1 模型准确性评价

基于 76 个分布数据和 6 个生物气候变量(图 1)的 MaxEnt 模型预测结果显示, ROC 曲线在当前 (1970—2000 年)时期的 AUC 值为 0.930(图 2), AUC 值大于 0.9,表明模型具有极好的预测性能,能 有效反应蛇鳄龟在当前和未来气候条件下在中国 的潜在分布范围及其变化趋势。







2.2 影响蛇鳄龟分布的重要生物气候变量

基于筛选后生物气候变量的 MaxEnt 模型预测 结果显示,6个生物气候变量中贡献率排名前三的 依次为最干月份降水量(Bio14)、最冷月份最低温 (Bio6)和最湿季度平均温度(Bio8),贡献率分别为 34.2%、22.1%和17.4%,贡献率之和大于70%;其他 生物气候变量贡献率从高到低依次为最湿月份降 水量(Bio13,10.7%)、等温性(Bio3,8.3%)和最热 季度平均温度(Bio10,7.2%)。

选取最干月份降水量(Bio14)、最冷月份最低 温(Bio6)和最湿季度平均温度(Bio8)进行生物气 候变量响应曲线分析,探讨各变量与蛇鳄龟分布的 关系(图3)。最干月份降水量(Bio14)在0.14~ 57.35 mm 时存在概率大于0.5,随着降水量增加蛇 鳄龟存在概率逐渐下降,降水量在0.14 mm 时蛇鳄 龟的存在概率最高;最冷月份最低温(Bio6)在 -3.55~22.64 ℃时存在概率大于0.5,随着温度升高 蛇鳄龟存在概率逐渐上升,温度在17.22~22.64 ℃ 时蛇鳄龟的存在概率最高;最湿季度平均温度 (Bio8)在23.68~37.64 ℃时存在概率大于0.5,随 着平均温度升高蛇鳄龟存在概率逐渐上升,平均温 度在32.95~37.64 ℃时蛇鳄龟的存在概率最高。





2.3 当前气候条件下蛇鳄龟潜在分布范围预测 由图4可知,在当前气候条件下,蛇鳄龟的非 适生区域、低适生区域、中适生区域和高适生区域 面积分别为 7319050.44、706341.26、596597.79 和 865631.01 km²。高适生区域主要集中于华南、华中 和华东的大部分地区,在华北和西南地区存在少部 分高适生区域,东北和西北的大部分地区无高适生 区域分布,几乎没有入侵风险。



图 4 当前气候条件下蛇鳄龟在中国的潜在分布区[审图号 GS(2024)0645 号] Fig.4 The potential distribution of *C. serpentina* in China under current climatic conditions

2.4 未来气候条件下蛇鳄龟潜在高适生区域的变 化趋势 2061—2080 和 2081—2100 年) 和 4 个共享社会经 济路径(SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585)条件 下,蛇鳄龟高适生区域分布位置与当前气候条件下

在未来4个时期(2021-2040、2041-2060、

的预测结果相似。与当前气候相比,未来气候条件 下蛇鳄龟在中国的高适生区域面积均增加:在 SSP126、SSP245 和 SSP370 气候情境下,随着预测 时期的递增,高适生区域面积呈先升后降的趋势; 与此相反,在SSP585气候情境下,高适生区域面积 随预测时期递增呈先降后升的趋势;在 2041— 2060、2061-2080 和 2081-2100 年 3 个时期,随着 SSP 等级的提升,预测高适生区域面积呈先升后降 的趋势,在2021-2040年,预测高适生区域面积随 着 SSP 等级的提升呈波动变化(表 2)。尽管高适 生区域变化规律存在一定差异,但扩张区域均主要 集中于湖北北部、河南、陕西南部及江西、湖南、四 川等局部地区,收缩区域均主要集中于河北南部、 山东西北部、江苏北部及广西、四川等局部地区 (图5),使得蛇鳄龟高适生区域的质心分布向西南 和西北方向移动(图6)。

表 2 当前和未来气候条件下蛇鳄龟 在中国高适生区域的面积

Table 2 The size of high suitability areasof *C. serpentina* in China under current and future climatic conditions

情景	时期/年	高适生区域面积 The size	
Scenarios	Period	of high suitability areas/km ²	
当前 Current	1970—2000	0 865631.01	
SSP126	2021-2040	958783.25	
	2041-2060	978539.80	
	2061 - 2080	957544.58	
	2081-2100	943346.45	
SSP245	2021-2040	986565.44	
	2041-2060	1058882.56	
	2061 - 2080	1183950.32	
	2081-2100	1021712.54	
SSP370	2021-2040	958638.74	
	2041-2060	1123645.42	
	2061 - 2080	1059078.03	
	2081-2100	1241963.26	
SSP585	2021-2040	1096622.29	
	2041-2060	1060430.74	
	2061-2080	997200.46	
	2081-2100	1067417.35	





图 6 未来气候条件下蛇鳄龟高适生区域质心分布的变化 Fig.6 Highly suitable area centroid distributional shifts under climate change for *C. serpentina*

3 讨论

3.1 MaxEnt 模型预测结果准确性分析

本研究发现,蛇鳄龟高适生区域主要集中于华 南、华中和华东的大部分地区,在华北和西南也存 在少部分高适生区域。前人基于 MaxEnt 模型和蛇 鳄龟原产地分布信息预测其在中国潜在分布范围 的研究发现,蛇鳄龟高适生区域主要集中于湖南、 江西、安徽、浙江、江苏等地(陈晓璠等,2017)。与 本研究相比,海南、广东、广西、重庆、四川、湖北等 地未被预测为高适生区域。相似的研究结果在红 耳龟 Trachemys scripta elegans Wied 中也有发现, Rödder et al. (2009) 基于全世界分布信息(绝大多数 点位均分布于其原产地及其周边地区)的研究发 现,红耳龟在中国的高适生区域主要集中于华中、 华东和华北部分地区;而 Gong et al. (2023) 仅基于 中国境内分布点位研究发现,红耳龟高适生区域主 要集中于华南、华中和华东的大部分地区,华北和 西南存在少部分高适生区域。这种差异与研究区 域内分布点位数量有关,通常情况下,在目标区域 内随着分布点位数量的增加,模型预测结果准确性 越来越高(陈新美等,2012; Wisz et al.,2008)。蛇 鳄龟在我国自然环境中的传播扩散主要依赖于养

殖逃逸、宠物弃养和宗教放生等途径,且前人研究 发现蛇鳄龟的养殖和贸易主要集中于华南、华中和 华东地区(Liu et al.,2021; Shi et al.,2008),与本研 究预测的高适生区域基本一致。

3.2 影响蛇鳄龟分布的重要生物气候变量

本研究发现,最干月份降水量、最冷月份最低 温和最湿季度平均温度是影响蛇鳄龟潜在分布范 围的重要生物气候变量。与前人发现降水量和温 度对蛇鳄龟潜在分布范围预测有显著影响的研究 结果相似(陈晓璠等,2017)。蛇鳄龟属变温动物, 活动节律和分布范围均受环境温度条件制约,温度 低于17.2℃时停止进食,活动减少,开始冬眠;在22 ~32 ℃范围内可正常生长活动,30 ℃左右为其最佳 生长活动温度(Bury et al., 2000; Strain et al., 2012)。本研究发现,最冷月份最低温在 17.22 ℃以 上时蛇鳄龟的存在概率最高,该结果与前人研究蛇 鳄龟的冬眠临界温度一致(Strain et al., 2012)。此 外,随着最干月份降水量增加蛇鳄龟出现概率呈逐 渐下降趋势(图 3A)。这也与温度变化相关,我国 最干月份通常为冬季,随着降水量增加温度将逐渐 下降,将直接影响蛇鳄龟的活动。我国最湿季度通 常为夏季,平均温度在32.95 ℃以上时蛇鳄龟的存 在概率最高,该结果与前人研究蛇鳄龟的最佳生长活动温度相似(刘坚红,2012; Bury et al.,2000)。

3.3 蛇鳄龟潜在高适生区域的变化趋势

未来气候条件下蛇鳄龟潜在高适生区域与当前气候条件下的分布范围相似,主要集中于华南、华中和华东的大部分地区,在华北和西南存在少部分高适生区。分析潜在高适生区域变化趋势发现, 未来蛇鳄龟高适生区域质心向西北和西南方向偏移,由江西省迁移至湖北省和湖南省。一项关于水 生生物河蚬 Corbicula fluminea Müller的研究发现类 似结果,他们认为这是由于潜在适生区域的北部和 西部在未来会变化为更适合其生存的气候条件,为 其提供了更适宜的栖息环境(唐杨欣等,2023)。

随着全球气候的变化,蛇鳄龟潜在高适生区域 范围在各时期和情境下均增加,这将对我国本土水 生生物多样性带来更大的挑战。因此,对潜在高适 生区域需加强外来入侵生物蛇鳄龟的监测和预防, 防止其进一步入侵和扩散。此外,对于蛇鳄龟的主 要养殖和贸易地区需加强管理,防止养殖逃逸、宠 物弃养和乱放生等现象的发生,从源头降低蛇鳄龟 入侵我国自然环境的机率。

参考文献

- 陈晓璠,陆宇燕,李丕鹏,2017.基于 Maxent 模型的小鳄龟 潜在地理分布预测.野生动物学报,38(3):467-472.
- 陈新美, 雷渊才, 张雄清, 贾宏炎, 2012. 样本量对 MaxEnt 模型预测物种分布精度和稳定性的影响. 林业科学, 48(1): 53-59.
- 方铧, 陈星形, 刘明月, 张永彬, 苗正红, 满卫东, 张清文, 寇财垚, 李想, 2023. 基于 Maxent 模型的互花米草潜在生 境适宜性分析. 草地学报, 31 (11): 3514-3524.
- 宦智群,徐小蓉,朱冬梅,耿兴敏,唐明,圣倩倩,祝遵凌, 2023. 应用最大熵模型预测不同气候变化情景下西康玉 兰潜在地理分布.东北林业大学学报,51(5):98-105.
- 江志红,张霞,王冀,2008. IPCC-AR4 模式对中国 21 世纪 气候变化的情景预估. 地理研究,27(4):787-799.
- 梁键明,蒋庆莲,姜垒,张铭,吴玉芬,杨锦昌,杨沅志,蓝 扬辉,唐光大,2023. 基于 MaxEnt 模型预测气候变化下 厚叶木莲在中国的潜在地理分布. 广西科学,30(6): 1133-1143.
- 李丽鹤, 刘会玉, 林振山, 贾俊鹤, 刘翔, 2017. 基于 MAXENT和 ZONATION 的加拿大一枝黄花入侵重点监控 区确定. 生态学报, 37(9): 3124-3132.

- 刘坚红, 2012. 鳄龟稚龟越冬养殖试验. 中国水产 (9): 67-69.
- 唐杨欣,皮杰,刘新华,向建国,曾聪,李德亮,2023.基于 最大熵模型预测气候变化下河蚬在中国的潜在分布. 生态学报,43(10):4250-4259.
- 吴艳,王洪峰,穆立蔷,2022. 物种分布模型的研究进展与 展望. 高师理科学刊,42(5):66-70.
- 杨冬琼,陈可薇,刘明,张国防,刘宝,陈世品,阮少宁, 2023. 气候变化对全球马缨丹分布影响的空间模拟. 生物 安全学报,32(4):362-373.
- 赵虎,王启军,邓捷,姜维,马红英,张晗,张红星,孔飞, 2021. 陕西渭河流域龟鳖类外来物种调查及风险分析. 野 生动物学报,42(4):1202-1205.
- 赵添羽,何蕊,华玉涛,2022. 我国"十三五"时期重要外来 物种入侵防控科技进展与展望. 生物安全学报,31(2): 95-102.
- 中华人民共和国生态环境部,2021.2020年中国生态环境状况公报(摘录).环境保护,49(11):47-68.
- ANIBABA Q A, DYDERSKI M K, JAGODZINSKI A M, 2022.
 Predicted range shifts of invasive giant hogweed (*Heracleum* mantegazzianum) in Europe. Science of the Total Environment, 825: 154053.
- BEZENG B S, MORALES-CASTILLA I, VAN DER BANK M, YESSOUFOU K, DARU B H, DAVIES T J, 2017. Climate change may reduce the spread of non-native species. *Ecosphere*, 8(3): e01694.
- BURY R B, NEBEKER A V, ADAMS M J, 2000. Response of hatchling and yearling turtles to thermal gradients: comparison of *Chelydra serpentina* and *Trachemys scripta*. Journal of *Thermal Biology*, 25(3): 221-225.
- CHEN X, JÄHNIG S C, JESCHKE J M, EVANS T G, HE F Z, 2023. Do alien species affect native freshwater megafauna? *Freshwater Biology*, 68(6): 903-914.
- ESPOSITO G, DI TIZIO L, PREARO M, DONDO A, ERCO-LINI C, NIEDDU G, FERRARI A, PASTORINO P, 2022. Non-native turtles (Chelydridae) in freshwater ecosystems in Italy: a threat to biodiversity and human health? *Animals*, 12(16): 2057.
- FICK S E, HIJMANS R J, 2017. WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Inter*national Journal of Climatology, 37(12): 4302–4315.
- FOURNIER A, PENONE C, PENNINO M G, COURCHAMP F, 2019. Predicting future invaders and future invasions. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 116(16): 7905-7910.

GONG S P, GAO Y C, DUAN H R, GE Y, WEI Y F, 2023.

Incorporating physiological data into species distribution models to predict the potential distribution range of the redeared slider in China. *Ecological Indicators*, 154: 110749.

- HAUBROCK P J, CUTHBERT R N, HUDGINS E J, CRYSTAL-ORNELAS R, KOURANTIDOU M, MOODLEY D, LIU C L, TURBELIN A J, LEROY B, COURCHAMP F, 2022. Geographic and taxonomic trends of rising biological invasion costs. Science of the Total Environment, 817: 152948.
- HUANG X T, MA L, CHEN C B, ZHOU H K, YAO B Q, MA Z, 2020. Predicting the suitable geographical distribution of *Sinadoxa corydalifolia* under different climate change scenarios in the three-river region using the MaxEnt model. *Plants*, 9(8): 1015.
- JING K T, LI M, ZHAO H X, GUO J Y, YANG N W, YANG M, XIAN X Q, LIU W X, 2023. Estimating the global geographical distribution patterns of the invasive crop pest *Diuraphis noxia* kurdjumov under current and future climatic scenarios. *Insects*, 14(5): 425.
- KEARNEY M, PORTER W, 2009. Mechanistic niche modelling: combining physiological and spatial data to predict species' ranges. *Ecology Letters*, 12(4): 334–350.
- KRAMER-SCHADT S, NIEDBALLA J, PILGRIM J D, SCHRÖDER B, LINDENBORN J, REINFELDER V, STILL-FRIED M, HECKMANN I, SCHARF A K, AUGERI D M, CHEYNE S M, HEARN A J, ROSS J, MACDONALD D W, MATHAI J, EATON J, MARSHALL A J, SEMIADI G, RUS-TAM R, BERNARD H, ALFRED R, SAMEJIMA H, DUCK-WORTH J W, BREITENMOSER-WUERSTEN C, BELANT J L, HOFER H, WILTING A, 2013. The importance of correcting for sampling bias in MaxEnt species distribution models. *Diversity and Distributions*, 19(11): 1366–1379.
- IPCC, 2014. Climate change 2013: the physical science basis. working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press.
- LEUNG B, LODGE D M, FINNOFF D, SHOGREN J F, LEW-IS M A, LAMBERTI G, 2002. An ounce of prevention or a pound of cure: bioeconomic risk analysis of invasive species. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 269: 2407-2413.
- LI J Y, CHANG H, LIU T, ZHANG C, 2019. The potential geographical distribution of *Haloxylon* across Central Asia under climate change in the 21st century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 275: 243–254.
- LIU S, NEWMAN C, BUESCHING C D, MACDONALD D W, ZHANG Y, ZHANG K J, LI F, ZHOU Z M, 2021.

E-commerce promotes trade in invasive turtles in China. *Oryx*, 55 (3): 352–355.

- LIU T, LIU H Y, WANG Y J, YANG Y X, 2023. Climate change impacts on the potential distribution pattern of *Osphya* (Coleoptera: Melandryidae), an old but small beetle group distributed in the northern hemisphere. *Insects*, 14(5): 476.
- MAMUN M, KIM S, AN K G, 2018. Distribution pattern prediction of an invasive alien species largemouth bass using a maximum entropy model (MaxEnt) in the Korean peninsula. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 11(4): 516–524.
- MANZOOR S A, GRIFFITHS G, IIZUKA K, LUKAC M, 2018. Land cover and climate change may limit invasiveness of *Rhododendron ponticum* in Wales. *Frontiers in Plant Science*, 9: 664.
- MEROW C, SMITH M J, SILANDER J A, 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36 (10): 1058-1069.
- O'CONNOR B, BOJINSKI S, RÖSLI C, SCHAEPMAN M E,
 2020. Monitoring global changes in biodiversity and climate essential as ecological crisis intensifies. *Ecological Informatics*, 55: 101033.
- PHILLIPS S J, 2008. Transferability, sample selection bias and background data in presence-only modelling: a response to Peterson et al. (2007). *Ecography*, 31: 272–278.
- PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E, 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231-259.
- PUCHAŁKA R, DYDERSKI M K, VÍTKOVÁ M, SÁDLO J, KLISZ M, NETSVETOV M, PROKOPUK Y, MATISONS R, MIONSKOWSKI M, WOJDA T, KOPROWSKI M, JAGODZIŃSKI A M, 2021. Black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) range contraction and expansion in Europe under changing climate. *Global Change Biology*, 27(8): 1587–1600.
- QIN A L, JIN K, BATSAIKHAN M E, NYAMJAV J, LI G L, LI J, XUE Y D, SUN G, WU L J, INDREE T, SHI Z M, XI-AO W F, 2020. Predicting the current and future suitable habitats of the main dietary plants of the Gobi Bear using MaxEnt modeling. *Global Ecology and Conservation*, 22: e01032.
- RHODIN A G J, IVERSON J B, BOUR R, FRITZ U, GEORG-ES A, SHAFFER H B, VAN DIJK PP, 2021. Turtles of the world: annotated checklist and atlas of taxonomy, synonymy, distribution, and conservation status, 9th ed. USA: Chelonian Research Foundation and Turtle Conservancy.

XING K, ZHU L, MA G, YANG H P, RUDOLF V H W, 2021. Climate warming promotes pesticide resistance through expanding overwintering range of a global pest. *Nature Communication*, 12: 5351.

- PALAKA B K, LLAVARASI A V, SAPAM T D, KOTAPATI K V, NALLALA V S, KHAN M B, AMPASALA D R, 2019. Molecular cloning, gene expression analysis, and in silico characterization of UDP-N-acetylglucosamine pyrophosphorylase from *Bombyx mori*. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 66(5): 880–899.
- YOU M S, YUE Z, HE W Y, YANG X H, YANG G, XIE M, ZHAN D L, BAXER S W, VASSEUR L, GURR G M, DOUGLAS C J, BAI J L, WANG P, CUI K, HUANG S G, LI X C, ZHOU Q, WU Z Y, CHEN Q L, LIU C H, WANG B, LI X J, XU X F, LU C X, HU M, DAVEY J W, SMITH S M, CHEN M S, XIA X F, TANG W Q, KE F S, ZHENG D D, HU Y L, SONG F Q, YOU Y C, MA X L, PENG L, ZHENG Y K, LIANG Y, CHEN Y Q, YU L Y, ZHANG Y N, LIU Y Y, LI G Q, FANG L, LI J X,

(上接第401页)

- RÖDDER D, SCHMIDTLEIN S, VEITH M, LÖTTERS S, 2009. Alien invasive slider turtle in unpredicted habitat: a matter of niche shift or of predictors studied? *PLoS ONE*, 4(11): e7843.
- SHI H T, PARHAM J F, FAN Z Y, HONG M L, YIN F, 2008. Evidence for the massive scale of turtle farming in China. Oryx, 42(1): 147–150.
- SHRESTHA U B, SHARMA K P, DEVKOTA A, SIWAKOTI M, SHRESTHA B B, 2018. Potential impact of climate change on the distribution of six invasive alien plants in Nepal. *Ecological Indicators*, 95: 99-107.
- STRAIN G F, ANDERSON J T, MICHAEL E D, TURK P J, 2012. Hibernacula use and hibernation phenology in the common snapping turtle (*Chelydra serpentina*) in Canaan Valley, West Virginia. *Journal of Herpetology*, 46 (2): 269-274.
- WALDOCK C, STUART-SMITH R D, ALBOUY C, CHEUNG WW L, EDGAR G J, MOUILLOT D, TJIPUTRA J, PELLISSIER L, 2022. A quantitative review of abundance-

ZHOU X, LUO Y D, GOU C Y, WANG J Y, WANG J, YANG H M, WANG J, 2013. A heterozygous moth genome provides insights into herbivory and detoxification. *Nature Genetics*, 45(2): 220–225.

- ZHANG J H, LI H Y, ZHOU X, TIAN J F, SERGERS A, XIA L Q, FRANCIS F, 2023. Silencing an aphid-specific gene SmDSR33 for aphid control through plant-mediated RNAi in wheat. Frontiers in Plant Science, 13: 1100394.
- ZHOU Y J, DU J, LI S W, SHAKEEL M, MENG X G, 2021. Cloning, characterization, and RNA interference effect of the UDP-N-Acetylglucosamine pyrophosphorylase gene in *Cnaphalocrocis medinalis. Genes*, 12(4): 464.
- ZHU B, SHAN J Q, LI R, LIANG P, GAO X W, 2019. Identification and RNAi-based function analysis of chitinase family genes in diamondback moth, *Plutella xylostella*. Pest Management Science, 75(7): 1951–1961.

(责任编辑:郭莹)

based species distribution models. *Ecography*: e05694. DOI: 10.1111/ecog.05694.

- WANG Z L, XU D P, LIAO W K, XU Y, ZHUO Z H, 2023. Predicting the current and future distributions of *Fran-kliniella occidentalis* (Pergande) based on the MaxEnt species distribution model. *Insects*, 14: 458.
- WEI B, WANG R L, HOU K, WANG X Y, WU W, 2018. Predicting the current and future cultivation regions of *Carthamus tinctorius* L. using MaxEnt model under climate change in China. *Global Ecology and Conservation*, 16: e00477.
- WISZ M S, HIJMANS R J, LI J, PETERSON A T, GRAHAM C H, GUISAN A, 2008. Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions*, 14(5): 763–773.
- ZHU G L, TANG Y Y, LIMPANONT Y, WU Z D, LI J, LÜ Z Y, 2019. Zoonotic parasites carried by invasive alien species in China. *Infectious Diseases of Poverty*, 8(1): 1–17.

(责任编辑:郑姗姗)