

基于 MaxEnt 的红瘰疣螈在云南的适宜性及潜在分布分析

王素霞^{1,2}, 杨德宏¹, 冯鸿能¹

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南昆明 650031; 2. 天津城市建设管理职业技术学院, 天津 300112)

摘要 结合 70 个红瘰疣螈的地理分布数据和 28 个环境因子, 运用 MaxEnt 模型分析其适宜生境分布及主要影响因素。结果表明, 影响红瘰疣螈的主要因素为最冷季度降水量、淤泥含量、昼夜温差月均值、最冷月最低气温、年均降水量等。此外, 红瘰疣螈高适宜区主要分布在腾冲市、龙陵县、云县、麻沧拉祜族自治县、凤庆县、永德县等地区, 中适宜区主要分布在永平县、施甸县、玉龙纳西族自治县、剑川县等地区。高适宜区面积为 2.26 万 km², 中适宜区面积为 3.85 万 km², 低适宜区面积为 8.30 万 km², 非适宜区面积为 23.89 万 km²。ROC 曲线分析表明, 训练 AUC 值为 0.926, 预测结果较好。建议在高适宜区和中适宜区划定适当的保护小区, 对红瘰疣螈进行就地保护。

关键词 红瘰疣螈; MaxEnt 模型; 潜在分布; 适宜性评价; 云南

中图分类号 Q958 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)06-0073-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.06.019



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Suitability and Potential Distribution Analysis of *Tylostotriton shanjing* in Yunnan Based on MaxEnt

WANG Su-xia^{1,2}, YANG De-hong¹, FENG Hong-neng¹ (1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650031; 2. Tianjin Urban Construction Management & Vocation Technology College, Tianjin 300112)

Abstract Combined with the geographical distribution data of 70 individuals of *Tylostotriton shanjing* and 28 environmental factors, MaxEnt model was used to analyze its suitable habitat distribution and main influencing factors. The research results showed that the main influencing factors of *T. shanjing* were the precipitation in the coldest season, silt content, monthly average temperature difference between day and night, the lowest air temperature in the coldest month, average annual precipitation, etc. The highest suitable area of *T. shanjing* were Tengchong City, Longling County, Yunxian County, Langcang Lahu Autonomous County, Fengqing County, Yongde County, etc. The moderately suitable area of *T. shanjing* Yongping County, Shidian County, Yulong Naxi Autonomous County, Jianchuan County, etc. The area of the highest suitable area was 22 600 km², the area of moderately suitable area was 38 500 km², the area of the lowest suitable area was 83 000 km², the area of the unsuitable area was 238 900 km². ROC curve analysis showed that the training AUC value was 0.926, and the prediction result was good. It was recommended to delineate appropriate protection areas in the highest suitable area and the moderately suitable area, and carry out on-site protection of *T. shanjing*.

Key words *Tylostotriton shanjing*; MaxEnt model; Potential distribution; Suitability evaluation; Yunnan

红瘰疣螈(*Tylostotriton shanjing*)隶属两栖纲有尾目蝾螈科(Salamandridae)疣螈属(*Tylostotriton*)^[1], 体长 136 ~ 170 mm。红瘰疣螈生活在海拔 2 000~3 000 m 林木繁茂、杂草丛生的山区^[2]。红瘰疣螈为《濒危野生动植物种国际贸易公约》(CITES)附录 II 物种^[3], 被国际自然及自然资源保护联盟(IUCN)列为近危(NT)等级, 在我国为国家 II 级重点保护野生动物^[4]。红瘰疣螈具有一定的观赏性, 此外还具有一定的药用价值。红瘰疣螈分布在我国云南、四川、广西、海南等地区, 在我国云南主要分布在泸水、丽江、保山、腾冲、永德、龙陵、陇川、新平、建水等地区^[5], 大多分布于山区与半山区。红瘰疣螈分布区受季风气候的影响较大, 年内旱季与雨季区分较为明显, 其中春冬季为旱季, 夏秋季为雨季, 最适宜红瘰疣螈栖息及繁衍^[6]。李沂韦等^[6]认为空气温度、相对湿度、降雨量是红瘰疣螈生存的重要环境因子。该物种幼体与成体的栖息环境有所不同, 对生存环境有较苛刻的要求, 大多生存在昆虫繁多的水沟、池塘等地。王本君^[7]认为食物资源的稳定性和丰富程度影响红瘰疣螈的生长和生存。刘旭红等^[4]研究表明温度、湿度及降雨量对红瘰疣螈繁衍活动的影响较大。李红梅等^[3]通过对新平哀牢山红瘰疣螈的栖息环

境研究发现其种群数量趋于减少, 分布范围狭窄。李沂韦等^[6]记录红瘰疣螈栖息地的空气温度、空气相对湿度及降雨量, 同时记录该地区红瘰疣螈的个体数量, 结果发现环境因子对红瘰疣螈在繁衍期间的的影响较大, 其中降雨量越大, 其繁衍活动较为频繁; 空气温度越高, 繁衍活动较少。刘宇^[8]收集了当前、未来气候数据, 对红瘰疣螈的分布进行预测。在此基础上, 笔者收集了红瘰疣螈的地理分布数据及土壤类型数据, 预测其潜在分布和在云南地区的适宜性。目前我国对红瘰疣螈的潜在分布及适应性研究较少, 不能满足红瘰疣螈及其生境保护工作的需要。

随着生态环境不断遭到破坏, 红瘰疣螈的数量急剧减少, 其分布范围也逐渐缩小, 其生存遭受极大的威胁。因此, 全国各界学者应该重视红瘰疣螈物种的保护问题。目前仅有少数科研工作者对其分布、栖息地、食性及分类开展初步研究。为进一步探讨气候、地形及土壤对红瘰疣螈生境的影响, 笔者利用 MaxEnt 模型研究红瘰疣螈在云南省的潜在分布及适宜性, 旨在为红瘰疣螈的保护提供科学依据, 为今后保护区的选址、设计和建立提供有效帮助。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源 地理分布数据主要从全球生物多样性信息网站 (GBIF, <https://www.gbif.org/>) 和相关文献中获得^[9]。其中有 19 个生物气候数据, 来源于世界气候数据库 (www.worldclim.org/), 并将下载的数据用 ArcGIS 软件将数据转换

基金项目 天津市职业院校“十四五”教育教学改革研究项目(2021084); 2021 年度天津市高等职业教育教育研究会课题(2021-3226)。

作者简介 王素霞(1984—), 女, 安徽芜湖人, 讲师, 在读硕士, 从事地理信息系统及职业教育方面的研究。

收稿日期 2022-07-05; **修回日期** 2022-08-06

为.ASC格式、分辨率30 m的数据。地形数据来源于地理空间数据云(www.gscloud.cn),下载分辨率30 m的数字高程地图(DEM),从中提取坡向、坡度及海拔。土壤数据来源于北京大学城市与环境学院地理数据平台(www.geodata.pku.edu.cn)。中国地图与中国省级行政区划图(1:400万)来源于全国地理信息资源目录服务系统网站(www.webmap.cn)。

将收集的70条红瘰疣螈的地理分布数据保存为.csv格式,备用。将其地理分布数据导入ArcGIS软件中,分析并提取其分布区域。

1.2 环境数据 研究的环境数据分别从不同网站下载,主要分为3类:第一类为从DEM中提取的坡度(slope)、坡向(aspect)及海拔因子(elev),其分辨率为30 m;第二类为19个气候因子(bioclimatic),包含年均气温(bio_1)、昼夜温差月均值(bio_2)、等温性(bio_3)、温度季节性变化的标准差(bio_4)、最暖月最高气温(bio_5)、最冷月最低气温(bio_6)、年均气温变化范围(bio_7)、最湿季度均温(bio_8)、最干季度均温(bio_9)、最暖季度均温(bio_10)、最冷季度均温(bio_11)、年均降水量(bio_12)、最湿月降水量(bio_13)、最干月降水量(bio_14)、降水量变异系数(bio_15)、最湿季度降水量(bio_16)、最干季度降水量(bio_17)、最暖季度降水量(bio_18)、最冷季度降水量(bio_19);第三类为土壤数据,包含酸碱度(ph)、土壤有效含水量(awc_class)、碎石体积百分比(t_gravel)、有机碳含量(t_oc)、淤泥含量(t_silt)、黏土含量(t_clay)。将所有的28个因子统一栅格大小及地理坐标系。

1.3 研究方法 最大熵模型(maximum entropy model, MaxEnt,版本3.4.1)是由Phillips于2004年以最大熵理论为基础构建的生态位模型。该模型通过找到在可获取实际存在数据的约束下熵值最大的概率分布来预测物种的分布^[10],具有很好的预测能力,较其他生态位模型具有更高的精确度,尤其是对于样本点少且只出现点数据时被认为是预测能力最佳的算法之一^[11]。MaxEnt模型在生态领域应用广泛,该模型的优点在于它能够很好地模拟生物与环境的预测,主要包括群落内部结构的预测、群落外部结构的预测、群落内部结构与外部环境关系的预测3个方面。

王鑫等^[12]以濒危植物杪椌为研究对象,结合MaxEnt模型与ArcGIS软件,对赤水河区域的杪椌进行适宜性分析。冯鸿能等^[10]利用最大熵模型对云南省长蕊木兰的潜在分布进行预测。徐朝茜等^[13]以榆蛎盾蚧为研究对象,以未来气候与当前气候作为其影响因子,利用MaxEnt模型与ArcGIS软件对榆蛎盾蚧的潜在适生区进行预测。温平等^[14]以白水河国家级自然保护区为研究区域,以有蹄类保护动物为研究对象,通过MaxEnt模型,利用地形、植被、河流、水域等数据,分别对斑羚、鬃羚、林麝、羚牛分布进行预测。

弓晓敏^[15]以山西铁桥山自然保护区作为研究区域,结合48个华北豹分布数据与5个华北豹的影响因子,运用MaxEnt模型对华北豹的栖息地适宜性进行分析。王娟娟等^[16]利用该模型,同时结合ArcGIS的空间分析功能,对川贝母的潜在分布进行预测,并对其适宜性进行评价。齐增湘

等^[17]利用MaxEnt模型与ArcGIS软件,以秦岭山系的黑熊为研究对象,选取68个该物种的地理分布数据及34个影响因子,对其进行生境评价。徐卫华等^[18]以秦岭自然保护为研究区域,以川金丝猴为研究对象,收集了地形数据和植被覆盖度等数据,利用MaxEnt模型对川金丝猴进行生境评价。通过检索查询发现,外文期刊从1997年开始有相关文献发表,2011年出现井喷,2021年发表数量达到383篇。与外文期刊相比,中文期刊从2017年开始井喷,2021年共发表256篇相关关键词的论文。2022年5月外文期刊发表MaxEnt关键词相关论文数量达到10篇,4月发表数量15篇;中文期刊5月相关关键词的发文量为7篇,4月发表数量18篇。MaxEnt模型广受国内外学者欢迎的主要原因是其良好的算法能力对于前3种预测的有效性。

最大熵模型是通过经验分布,利用训练数据 T 进行统计,得到随机变量 x,y 的联合经验分布以及 x 的分布。

$$\tilde{P}(x,y) = \frac{\text{count}(x,y)}{N} \quad (1)$$

$$\tilde{P}(x) = \frac{\text{count}(x)}{N} \quad (2)$$

根据约束条件和贝叶斯定理,利用 $\tilde{P}(x,y)$ 求解 $\tilde{P}(x|y)$ 。当关于条件分布 $\tilde{P}(x|y)$ 的熵最大时,概率分布最均匀,预测风险最小。根据此模型,利用MaxEnt 3.4.1模型,首先将环境因子导入MaxEnt 3.4.1模型中,将地理分布点数据随机分解为训练子集和测试子集。训练子集选择75%的数据,获取建立最大熵模型的参数;测试子集用剩余的25%来验证模型的准确性^[19]。刀切法(Jackknife)可以判断每个环境因子对其分布的影响,并得到28个环境变量对红瘰疣螈潜在分布区影响的贡献率。用接受者操作特性曲线(ROC)分析法检验模型精度,用ROC曲线下的面积(AUC值)来判断模型的准确度。AUC值的评估标准如下:预测较差(AUC为0.5~0.6)、预测一般(AUC为>0.6~0.7)、预测较准确(AUC为>0.7~0.8)、预测很准确(AUC为>0.8~0.9)、预测极准确(AUC为>0.9~1.0)^[20]。

2 结果与分析

2.1 模型精度分析 如图1所示,接受者操作特性曲线(ROC曲线)评价结果显示,模型的训练AUC为0.926,测试AUC为0.942,表明MaxEnt模型对红瘰疣螈在云南地区的潜在适宜区分布的预测结果极好。

2.2 适宜分布区划分 将MaxEnt软件分析结果导入ArcGIS中,将ASC格式分析数据导入ArcGIS软件中并转为栅格格式,然后在空间分析工具中将其重分类处理,将适宜性等级分为以下4个等级:非适宜区(0~0.12)、低适宜区(>0.12~0.34)、中适宜区(>0.34~0.66)、高适宜区(>0.66~1.00)。红瘰疣螈适宜分布图如图2所示。红瘰疣螈高适宜区主要分布在腾冲市、龙陵县、云县、廊沧拉祜族自治县、凤庆县、永德县等地区,中适宜区主要分布在永平县、施甸县、玉龙纳西族自治县、剑川县等地区。对适宜区面积较大的地区进行统计,如表1所示,其中高适宜区面积为2.26万 km^2 ,占

研究区面积的5.90%;中适宜区面积为 3.85 万 km²,占研究区面积的 10.05%;低适宜区面积为 8.30 万 km²,占研究区面积的21.67%;非适宜区面积为 23.89 万 km²,占研究区面积的62.38%。高适宜区面积较大的地区为保山市(面积为 0.83 万 km²,占保山市总面积的 42.1%)、临沧市(面积为 0.53 万 km²,占临沧市总面积的 22.2%)、普洱市(面积为 0.40 万 km²,占普洱市总面积的 8.8%)、大理白族自治州(面积为 0.29 万 km²,占大理白族自治州总面积的 9.8%)。

2.3 主导因子的确立 根据 28 个环境变量对 MaxEnt 模型的贡献率来确定主导因子。28 个环境变量的贡献率较大的 8 个变量为最冷季度降水量 bio_19(31.24%)、淤泥含量 t_silt(18.19%)、昼夜温差均值 bio_2(13.64%)、最冷月最低气温

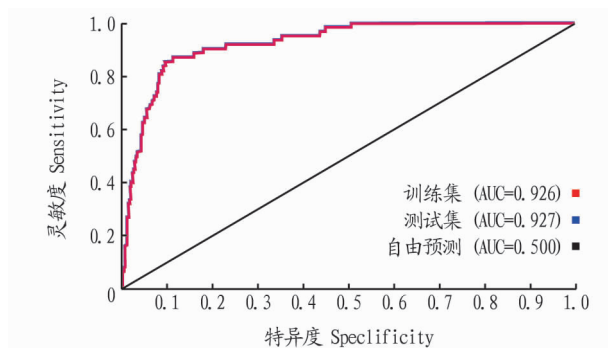


图 1 模型接受者操作特性曲线 AUC 分析

Fig.1 AUC analysis of model receiver operating characteristic curve

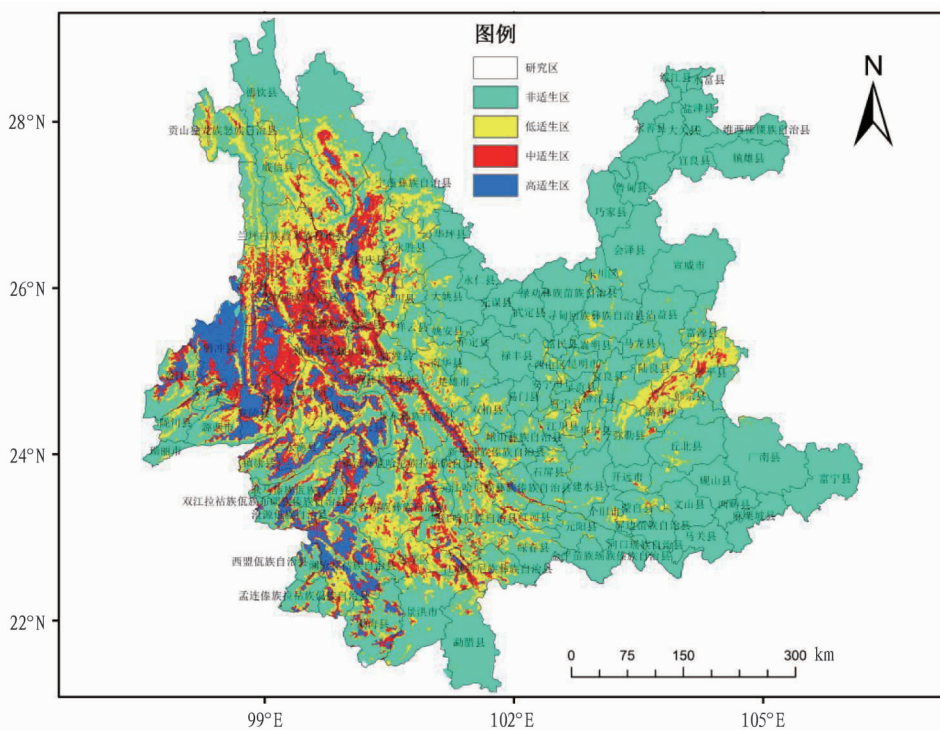


图 2 云南红瘰疣螈适宜分布区

Fig.2 The suitable areas for the distribution of *T.shanjing* in Yunnan

表 1 红瘰疣螈潜在分布主要市区适宜面积统计

Table 1 Statistics of suitable area for main urban areas with the potential distribution of *T.shanjing*

地区 Region	总面积 Total area km ²	面积 Area//km ²				适宜区面积 Suitable area	适宜区占该地区 面积的百分比 Proportion of suitable area in this region//%
		高适宜区 Highly suitable area	中适宜区 Moderately suitable area	低适宜区 Lowly suit- able area	非适宜区 Unsuitable area		
云南省 Yunnan Province	38.30	2.26	3.85	8.30	23.89	14.41	37.62
保山市 Baoshan City	1.97	0.83	0.67	0.37	0.10	1.87	94.92
大理白族自治州 Dali Bai Autonomous Prefecture	2.95	0.29	1.02	1.14	0.50	2.45	83.05
德宏傣族景颇族自治州 Dehong Dai and Jingpo Autonomous Prefecture	1.16	0.12	0.15	0.30	0.59	0.57	49.14
临沧市 Lincang City	2.39	0.53	0.46	0.66	0.74	1.65	69.04
普洱市 Pu'er City	4.55	0.40	0.71	1.68	1.76	2.79	61.32
西双版纳傣族自治州 Xishuangbanna Dai Autonomous Prefecture	1.92	0.05	0.11	0.28	1.48	0.44	22.92

bio_6(9.51%)、年均降水量 bio_12(7.20%)、等温性 bio_3(4.21%)、温度季节性变化的标准差 bio_4(3.08%)、年均气温变化范围 bio_7(2.36%)。从图3可以看出,重要性较大的

8个变量为 bio_19、bio_3、bio_9、bio_7、bio_5、awc_class、bio_18、t_silt。

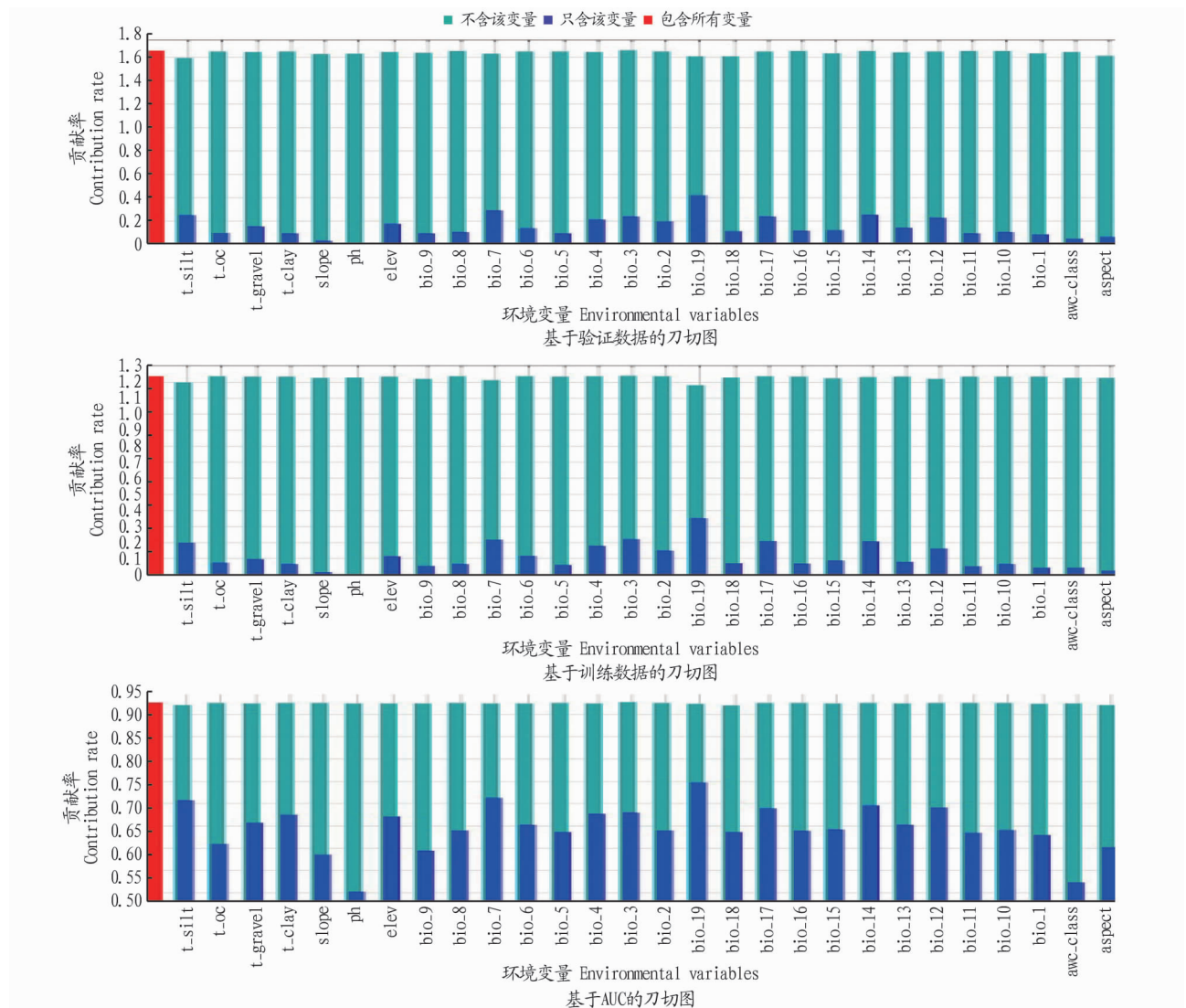


图3 红瘰疣螈环境因子分析

Fig.3 The environmental factors analysis of *T. shanjing*

2.4 主导环境变量阈值分析 对影响红瘰疣螈分布较大的8个环境变量进行分析,结果如图4所示。从图4可以看出,最冷季度降水量 bio_19(图4a)的阈值为20~140 mm,其中在60 mm时生境最佳;淤泥含量 t_silt(图4b)的阈值为0~55%,其中淤泥含量在37%时生境最佳;昼夜温差月均值 bio_2(图4c)的阈值为6~14 °C,其中在11.3 °C时生境最佳;最冷月最低气温 bio_6(图4d)的阈值为-25~15 °C,其中在0 °C时生境最佳;年均降水量 bio_12(图4e)的阈值为400~2 000 mm,其中年均降水量为1 450 mm时生境最佳;等温性 bio_3(图4f)的阈值为25~60 °C,其中在52 °C时生境最佳;温度季节性变化的标准差 bio_4(图4g)的阈值为250~750 °C,其中在360 °C时生境最佳;年均气温变化范围 bio_7(图4h)的阈值为17~30 °C,其中22 °C时生境最佳。

3 讨论

该研究利用 MaxEnt 软件对红瘰疣螈的生境适宜度进行

了分析,结果表明红瘰疣螈高适宜区主要分布在腾冲市、龙陵县、云县、廊沧拉族自治县、凤庆县、永德县等地区,中适宜区主要分布在永平县、施甸县、玉龙纳西族自治县、剑川县等地区。其中,高适宜区面积为2.26万 km²,中适宜区面积为3.85万 km²,低适宜区面积为8.30万 km²,非适宜区面积为23.89万 km²。影响红瘰疣螈潜在分布的主导环境因子有最冷季度降水量、淤泥含量、昼夜温差月均值、最冷月最低气温等,即红瘰疣螈受降水量、温度、淤泥含量的影响较大。

将该研究结果与文献、数据记载的红瘰疣螈地理分布范围进行对比,发现红瘰疣螈适宜分布区与红瘰疣螈地理分布区相对应,说明此次模拟效果较好。红瘰疣螈受海拔的影响,其最佳生境的海拔2 000~3 000 m,其海拔中位数为2 500 m,该结果与 Campos 等^[21]、Reis 等^[22]、刘宇^[8]的研究结果相一致,说明高海拔地区可能是红瘰疣螈的重要庇护所。该研究结果表明气候对红瘰疣螈的影响较大,应密切关

注气候变化,加强对红瘰疣螈的检测和管理,同时气候也对红瘰疣螈的繁衍极为重要。

目前我国对红瘰疣螈生境的研究相对较少,尚不能满足红瘰疣螈及其生境保护工作的需要。笔者利用 ArcGIS 技术,结合红瘰疣螈地理分布数据、气候数据、土壤数据、地形数据,对云南省红瘰疣螈的潜在分布进行预测,并对所在区域的适生性面积进行统计,虽然存在很多不足,但希望在此基础上做进一步研究,以获取更多影响红瘰疣螈生境的因子,例如植被类型、植被覆盖度、到农田的距离、到水塘的距离等;在条件允许的情况下,尽可能深入开展有关红瘰疣螈的实际调查工作。

根据此结果,能科学有效地获取红瘰疣螈在云南省的潜在分布,减少人类活动对其生境的影响,完善其保护机制,扩展保护范围,对红瘰疣螈高适宜地区加大管理力度。通过明确影响红瘰疣螈的主导因子,可为红瘰疣螈营造一个适宜的生长环境,为今后实现资源合理开发利用提供科学依据。此外,还需要开展更多的研究,比如如何改善红瘰疣螈的栖息地环境,排除不利因素;能否划定保护小区域进行就地保护及人工开发红瘰疣螈喜爱的生境。加强对红瘰疣螈的适生区附近小溪、小河及保护区的保护,对该物种附近的群众进行科普,以免对其误捕,同时对红瘰疣螈大量聚集的区域禁止使用农药、杀虫剂等。

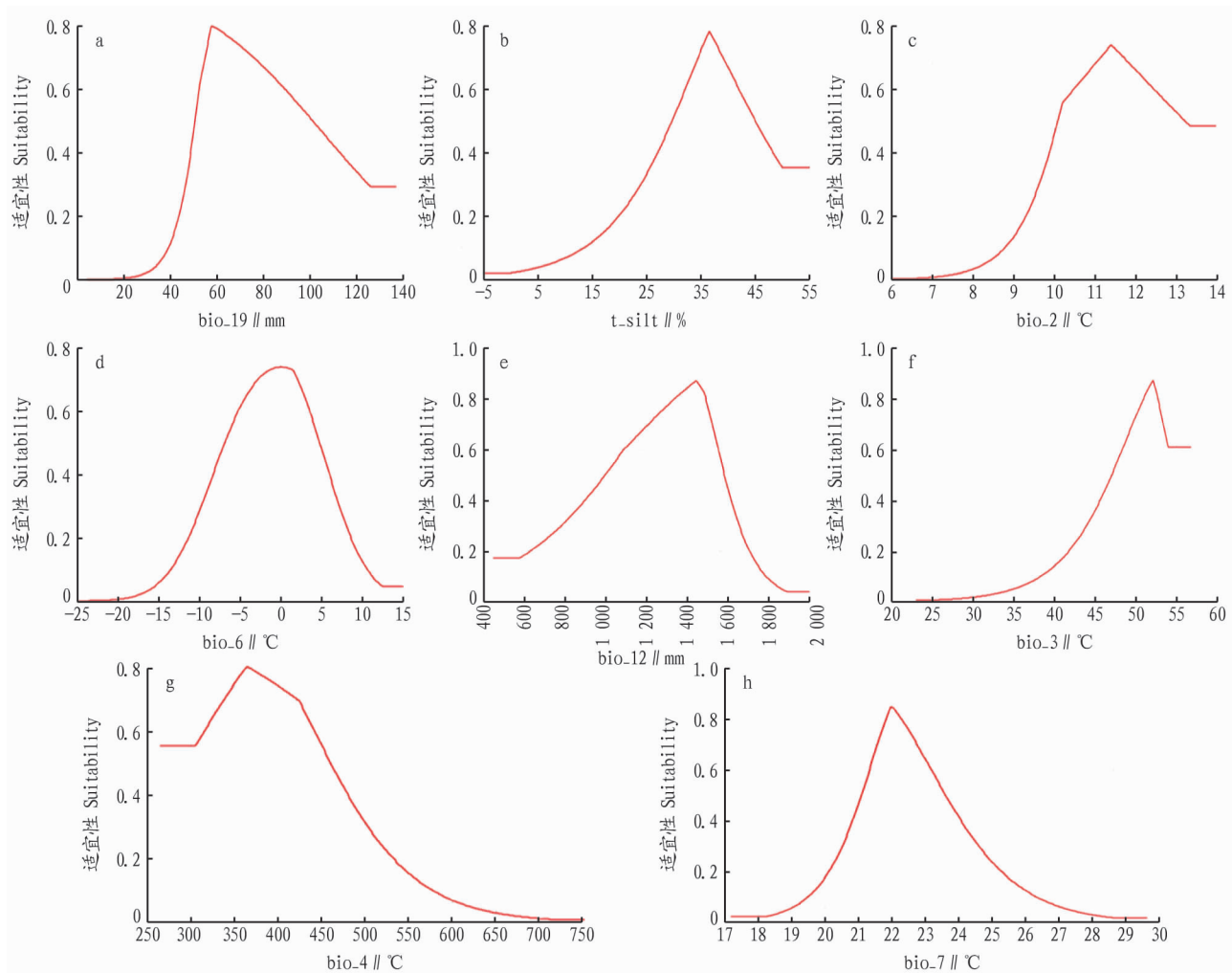


图 4 红瘰疣螈主导环境变量响应曲线

Fig.4 The response curve of the dominant environmental variables of *T.shanjiang*

参考文献

- [1] 杨国辉,杨自忠,徐吉山.红瘰疣螈繁殖习性初步研究[J].大理学院学报,2012,11(4):50-53.
- [2] 李骏,刘安柱,刘湘,等.红瘰疣螈的繁殖生态[J].动物学杂志,2012,47(2):8-15.
- [3] 李红梅,朱慧贤,王林,等.新平哀牢山红瘰疣螈的生物学特征及保护[J].重庆教育学院学报,2010,23(6):16-18.
- [4] 刘旭红,张晓翠,李骏,等.降雨决定繁殖期红瘰疣螈的活动性[J].四川动物,2013,32(6):867-872.
- [5] 肖小柳,李红梅.红瘰疣螈的研究进展[J].安徽农业科学,2014,42(36):12931-12932,12934.
- [6] 李沂书,刀正阳,李宛霖.云南镇沅无量山环境因子对红瘰疣螈繁殖期

- 活动性的影响[J].普洱学院学报,2018,34(3):1-5.
- [7] 王本君.红瘰疣螈幼体生长发育的环境影响因素研究[D].昆明:云南师范大学,2017.
- [8] 刘宇.基于气候变化的红瘰疣螈在云南的适宜分布区预测[D].昆明:云南大学,2020.
- [9] 徐新良,庄大方,贾绍凤,等.GIS 环境下基于 DEM 的中国流域自动提取方法[J].长江流域资源与环境,2004,13(4):343-348.
- [10] 冯鸿能,杨德宏,沈聪颖.基于 MaxEnt 模型的长蕊木兰在云南省的分布预测及适应性分析[J].浙江林业科技,2021,41(3):46-50.
- [11] 陈新美,雷渊才,张雄清,等.样本量对 MaxEnt 模型预测物种分布精度和稳定性的影响[J].林业科学,2012,48(1):53-59.

研究补充和丰富了新疆部分地区叶城沙蜥的基础遗传数据,可为后续合理利用及保护该地区内其他物种的种质资源奠定基础。

参考文献

- [1] LI J, GUO X G, WANG Y Z. Population genetic differentiation of *Phrynocephalus axillaris* in east of Xinjiang Uygur Autonomous Region based on sequence variation of mitochondrial ND4-tRNA^{Leu} gene [J]. Zool Res, 2010, 31(4): 361–369.
- [2] 赵尔宓, 赵肯堂, 周开亚, 等. 中国动物志: 爬行纲 第二卷 有鳞目 蜥蜴亚目 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [3] 张鹏, 袁国映. 新疆两栖爬行动物 [M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2005.
- [4] ZHANG Q, XIA L, HE J B, et al. Comparison of phylogeographic structure and population history of two *Phrynocephalus* species in the Tarim Basin and adjacent areas [J]. Mol Phylogenet Evol, 2010, 57(3): 1091–1104.
- [5] 丁新华. 基于线粒体和核基因分子标记的黑鳃鮟鱇亲缘地理研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- [6] 宋琪, 刘金龙, 郭宪光. 基于 Roche 454 GS FLX 高通量测序的叶城沙蜥基因组微卫星特征分析 [J]. 四川动物, 2019, 38(1): 62–67.
- [7] 张敏莹, 方弟安, 周彦锋, 等. 基于微卫星标记的钱塘江中下游三角鲂亲本群体和自然捕捞群体遗传多样性及遗传结构 [J]. 大连海洋大学学报, 2022, 37(5): 775–783.
- [8] 赵蒙蒙, 滕晖, 吴海花, 等. 用于番鸭亲子鉴定微卫星分子标记初步筛选 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2021(5): 1–7, 156.
- [9] 陈政昆, 韦聪聪, 朱雯, 等. 安徽白山羊保种群微卫星标记遗传多样性分析 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2020(9): 54–56, 63.
- [10] 张代臻, 唐伯平, 孙红英, 等. DNA 分子标记在虾蟹类系统地理学研究中的应用 [J]. 水产科学, 2008, 27(5): 262–265.
- [11] VASHISTHA G, DEEPIKA S, DHAKATE P M, et al. The effectiveness of microsatellite DNA as a genetic tool in crocodilian conservation [J]. Conserv Genet Resour, 2020, 12(4): 733–744.
- [12] 仲光启, 由玉岩, 徐艳春, 等. 黑鹇微卫星位点的筛选及遗传特点分析 [J]. 野生动物学报, 2019, 40(3): 729–36.
- [13] 王萌, 朱思雨, 薛茂盛, 等. 微卫星标记方法在大型猫科动物保护群遗传学研究中的应用与挑战 [J]. 野生动物学报, 2019, 40(3): 780–786.
- [14] 刘旭, 丁由中. 分子生物学技术应用于野生动物保护及扩散研究概况 [J]. 野生动物学报, 2019, 40(2): 497–501.
- [15] 鲁松松, 黄宇哲, 张梦洋. 红尾沙蜥超氧化物歧化酶适应高原的分子机制 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2022, 58(1): 69–78, 88.

(上接第 77 页)

- [12] 王鑫, 任亦钊, 黄琴, 等. 基于 GIS 和 Maxent 模型的赤水河地区濒危植物桫欏生境适宜性评价 [J]. 生态学报, 2021, 41(15): 6123–6133.
- [13] 徐朝茜, 罗恒毅, 王锦华, 等. 基于 MaxEnt 的榆麝盾蚧在中国的潜在地理分布预测 [J]. 山西农业科学, 2020, 48(5): 774–778.
- [14] 温平, 彭科, 陈旭, 等. 基于 MaxEnt 模型的白水河国家级保护区有蹄类保护动物生境适宜性评价 [J]. 四川林业科技, 2021, 42(1): 70–75.
- [15] 弓晓敏. 基于 Maxent 的山西铁桥山省级自然保护区华北豹生境适宜性分析 [J]. 山西林业科技, 2019, 48(1): 14–15, 52.
- [16] 王娟娟, 曹博, 白成科, 等. 基于 Maxent 和 ArcGIS 预测川贝母潜在分布及适宜性评价 [J]. 植物研究, 2014, 34(5): 642–649.
- [17] 齐增湘, 徐卫华, 熊兴耀, 等. 基于 MAXENT 模型的秦岭山系黑熊潜在生境评价 [J]. 生物多样性, 2011, 19(3): 343–352, 398.

(上接第 80 页)

- [18] RAMOS-MOLINA B, QUEIPO-ORTUÑO M I, LAMBERTOS A, et al. Dietary and gut microbiota polyamines in obesity and age-related diseases [J]. Frontiers in nutrition, 2019, 6: 1–15.
- [19] TANG X P, LIU H, YANG S F, et al. Epidermal growth factor and intestinal barrier function [J]. Mediators of inflammation, 2016, 2016(3): 1–9.
- [20] WANG L X, ZHU F, YANG H S, et al. Epidermal growth factor improves intestinal morphology by stimulating proliferation and differentiation of enterocytes and mTOR signaling pathway in weaning piglets [J]. Science China life sciences, 2020, 63(2): 259–268.

- [16] 谢凡. 青海沙蜥遗传和表型分化的环境相关性 [D]. 南京: 南京师范大学, 2021.
- [17] 王坤. 增温对青海沙蜥繁殖生活史及后代适合度的影响 [D]. 保定: 河北大学, 2020.
- [18] 祁玥. 新疆沙蜥分子系统地理学 [D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [19] 阿尔孜古·衣米提, 徐峰, 李俊. 塔里木盆地西南部叶城沙蜥的两性异形研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(7): 190–195.
- [20] URQUHART J, BI K, GOZDZIK A, et al. Isolation and characterization of microsatellite DNA loci in the toad-headed lizards, *Phrynocephalus przewalskii* complex [J]. Mol Ecol Notes, 2005, 5(4): 928–930.
- [21] ZHAN A B, FU J Z. Microsatellite DNA markers for three toad-headed lizard species (*Phrynocephalus vlangalii*, *P. przewalskii* and *P. guttatus*) [J]. Mol Ecol Resour, 2009, 9(2): 535–538.
- [22] HOLLAND M M, PARSON W. GeneMarker[®] HID: A reliable software tool for the analysis of forensic STR data [J]. J Forensic Sci, 2011, 56(1): 29–35.
- [23] PEAKALL R, SMOUSE P E. GenAIEx 6.5: Genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research: An update [J]. Bioinformatics, 2012, 28(19): 2537–2539.
- [24] ROUSSET F. GENEPOP^{’007}: A complete re-implementation of the genepop software for Windows and Linux [J]. Mol Ecol Resour, 2008, 8(1): 103–106.
- [25] KALINOWSKI S T, TAPER M L, MARSHALL T C. Revising how the computer program CERVUS accommodates genotyping error increases success in paternity assignment [J]. Mol Ecol, 2007, 16(5): 1099–1106.
- [26] KUMAR S, STECHER G, LI M, et al. MEGA X: Molecular evolutionary genetics analysis across computing platforms [J]. Mol Biol Evol, 2018, 35(6): 1547–1549.
- [27] 魏辅文, 马天笑, 胡义波. 中国濒危兽类保护遗传学研究进展与展望 [J]. 兽类学报, 2021, 41(5): 571–580.
- [28] 赵丹, 刘玉芬, 赵文阁, 等. 基于微卫星标记的胎生蜥蜴母本与子代的遗传多样性研究 [J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2017, 33(4): 50–53.
- [29] 骆爽. 西藏高原两种沙蜥遗传结构及三种沙蜥亲子鉴定 [D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [30] 冯一宁, 李因刚, 祁铭, 等. 基于 SSR 标记的福建省闽楠代表性群体遗传多样性分析 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2022, 46(4): 102–108.
- [31] 杨建宝, 张艳萍, 苏军虎, 等. 引进美洲红点鲑群体遗传多样性微卫星的分析 [J]. 四川动物, 2012, 31(3): 348–352.

- [18] 徐卫华, 罗琳. MAXENT 模型在秦岭川金丝猴生境评价中的应用 [J]. 森林工程, 2010, 26(2): 1–3, 26.
- [19] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHARIER R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological modelling, 2006, 190(3/4): 231–259.
- [20] ELITH J, PHILLIPS S J, HASTIE T, et al. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists [J]. Diversity & distributions, 2011, 17(1): 43–57.
- [21] CAMPOS F S, LOURENÇO-DE-MORAES R, LLORENTE G A, et al. Cost-effective conservation of amphibian ecology and evolution [J]. Science advances, 2017, 3(6): 1–9.
- [22] REIS C R, BUENO M L, ROCHA L F, et al. Climate change influencing the potential distribution of a Brazilian savanna indicator species [J]. Floresta e ambiente, 2019, 26(3): 1–9.

- [21] TOVAR-RAMÍREZ D, INFANTE J Z, CAHU C, et al. Influence of dietary live yeast on European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) larval development [J]. Aquaculture, 2004, 234(1/2/3/4): 415–427.
- [22] XU S, WANG D, ZHANG P, et al. Oral administration of *Lactococcus lactis*-expressed recombinant porcine epidermal growth factor stimulates the development and promotes the health of small intestines in early-weaned piglets [J]. Journal of applied microbiology, 2015, 119(1): 225–235.
- [23] 单春乔, 刘秋晨, 李娟, 等. 表皮生长因子对肉鸡十二指肠形态结构、消化酶活性以及表皮生长因子受体表达的影响 [J]. 动物营养学报, 2021, 33(6): 3218–3227.