

DOI: 10.5846/stxb202009152403

塔旗, 李言阔, 范文青, 单继红, 涂晓斌, 应钦, 缪泸君, 邵瑞清, 申锦. 基于最大熵生态位模型的中华穿山甲潜在适宜生境预测. 生态学报, 2021, 41(24): 9941-9952.

Ta Q, Li Y K, Fan W Q, Shan J H, Tu X B, Ying Q, Miao L J, Shao R Q, Shen J. Predicting the potential distribution of Chinese pangolin using the MaxEnt model. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24): 9941-9952.

基于最大熵生态位模型的中华穿山甲潜在适宜生境预测

塔 旗¹, 李言阔^{1,*}, 范文青¹, 单继红², 涂晓斌², 应 钦³, 缪泸君⁴, 邵瑞清¹, 申 锦¹

1 江西师范大学生命科学学院, 南昌 330022

2 江西省野生动植物保护管理局, 南昌 330046

3 江西农业大学, 南昌 330045

4 江西省林业科学院, 南昌 330032

摘要: 中华穿山甲 (*Manis pentadactyla*) 属于全球极度濒危物种, 也是我国一级保护动物。对中华穿山甲的非法捕杀曾导致其种群数量锐减。但是, 近年来相关研究报道较少, 穿山甲分布状况不明, 极大地制约了对该物种的有效保护。搜集了近年来国内中华穿山甲的救护记录和救护新闻, 甄别出 67 个记录分布点, 利用最大熵模型软件 (MaxEnt) 进行因子筛选, 结果表明最冷季度降水量、人口密度、年降水量、坡度、坡向、海拔等 6 个环境变量是与中华穿山甲分布显著相关的影响因子。基于 6 个主导环境变量构建的 MaxEnt 模型 AUC 平均值为 0.961 ± 0.014 , 预测结果达到极好标准。刀切法 (Jackknife) 表明, 其中最冷季度降水量、年降水量、人口密度和海拔是影响中华穿山甲分布的主要因素。中华穿山甲适宜生境 (出现概率大于 0.498) 具有以下特点: 最冷季度降水量 141.22—439.46 mm, 年降水量 1471.67—2386.56 mm, 人口密度 ≥ 390 人/km², 海拔 < 316.98 m。该模型预测中华穿山甲在我国的潜在分布适宜区主要位于我国长江以南地区, 总面积约为 74.27×10^4 km², 占国土面积的 7.73%, 主要集中在江西、广东、湖南和广西省, 面积分别占该区域的 97.58%, 89.65%, 76.90% 和 73.08%; 其次是浙江、福建、台湾和安徽省。湖北、江苏、四川、云南、贵州等省份也有中华穿山甲的零星分布。湖北东南部、江苏南部、浙江西南部和福建西北部等与江西接壤的区域也是中华穿山甲的重要潜在分布适宜区。明确中华穿山甲的潜在分布适宜区, 可为该物种的种群保护和栖息地管理提供科技支撑。

关键词: 中华穿山甲; 最大熵模型; 影响因子; 适宜生境

Predicting the potential distribution of Chinese pangolin using the MaxEnt model

TA Qi¹, LI Yankuo^{1,*}, FAN Wenqing¹, SHAN Jihong², TU Xiaobin², YING Qin³, MIAO Lujun⁴, SHAO Ruiqing¹, SHEN Jin¹

1 College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

2 Jiangxi Wildlife Service, Nanchang 330046, China

3 Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

4 Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032, China

Abstract: The Chinese pangolin (*Manis pentadactyla*) has been listed as a critically endangered species on the International Union for Conservation of Nature's (IUCN) Red List of Threatened Species, as well as a first-class national

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31660618, 31460107)

收稿日期: 2020-09-15; 网络出版日期: 2021-08-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liyankuo@126.com

protected animal in China. Its population has suffered a sharp decline because of reckless illegal hunting in the past decades. Nevertheless, there has been little relevant research on this species, and the current distribution of the Chinese pangolins is still unknown; this greatly restricts the effective protection of this species. Therefore, we collected rescue records and news about the Chinese pangolins in China in recent years and identified 67 distribution points of the Chinese pangolins. In this study, the maximum entropy model software (MaxEnt) was used to select potentially important environmental variables. Six environmental variables, including the precipitation of the coldest quarter, population density, annual precipitation, altitude, slope, and aspect were significantly correlated with the distribution of the Chinese pangolins. The average values of the area under the receiver operator characteristic curve (AUC) of the MaxEnt models based on these six variables was 0.961 ± 0.014 , indicating that the accuracy of the MaxEnt model for predicting the areas of potential distribution of the Chinese pangolins was accurate. Jackknife showed that precipitation of the coldest quarter, annual precipitation, population density, and altitude were the most important factors affecting the distribution of the Chinese pangolins. Among them, precipitation-related factor was the most important environmental variables affecting the suitable habitat areas of the Chinese Pangolins. Population density was another important predictor. The most suitable habitat (probability of presence > 0.498) was characterized by precipitation of the coldest quarter of 141.22—439.46 mm, annual precipitation of 1471.67—2386.56 mm, population density of ≥ 390 people/km², and altitudes < 316.98 m. Furthermore, the model predicted that the potentially suitable distribution areas of the Chinese pangolin were 74.27×10^4 km², accounting for 7.73% of the total area of China, mainly at the south of the Yangtze River, particularly in Jiangxi, Guangdong, Hunan, and Guangxi provinces, accounting for 97.58%, 89.65%, 76.90%, and 73.08% of these provinces, respectively; followed by Zhejiang, Fujian, Taiwan, and Anhui provinces. In addition, Hubei, Jiangsu, Sichuan, Yunnan, Guizhou, and other provinces also have scattered distribution of Chinese pangolins. Neighboring regions of Jiangxi, such as southeastern Hubei, southern Jiangsu, southwestern Zhejiang, and northwestern Fujian, are also important potentially suitable areas for the distribution of Chinese pangolins. Understanding the potentially suitable distribution areas of the Chinese pangolin can provide useful information and instructive reference to the Chinese pangolin population conservation and habitat management.

Key Words: Chinese pangolin; MaxEnt; potential influence; suitable habitat

穿山甲是哺乳动物中一个较小的类群,隶属于哺乳纲(Mammalia)、鳞甲目(Pholidota)、鲛鲤科(Manidae)、穿山甲属(*Manis*)^[1]。目前,全世界现有 8 种穿山甲:中华穿山甲(*Manis pentadactyla*)、印度穿山甲(*M. crassicaudata*)、马来穿山甲(*M. javanica*)、大穿山甲(*M. gigantea*)、树穿山甲(*M. tricuspis*)、南非穿山甲(*M. temminckii*)、长尾穿山甲(*M. teyradactyla*)和巴拉望穿山甲(*M. culionensis*)。我国分布的穿山甲主要是中华穿山甲^[2-4]。该物种 2014 年被 IUCN 红色名录(Red List)列为“极危”(CR)^[5];2017 年被列入 CITES 附录 I (www.cites.org);2020 年 6 月 5 日,我国将其从国家二级保护动物提升为国家一级保护动物。在过去几十年间,滥捕滥猎和非法贸易使中华穿山甲种群数量急速下降;据估计,其国内种群数量已减少 90%以上^[6-7]。尽管中华穿山甲的濒危程度不断提高,但近年来我国一直没有开展过全国性的野生中华穿山甲专项调查,也未见相关报道,其种群现状尚不明显,分布位置尚不清晰,在很大程度上限制了对该物种的有针对性的保护管理。因此,基于已知中华穿山甲的分布位点预测其潜在适宜区对于其种群保护和栖息地管理具有十分重要的意义。

掌握濒危物种的种群状况和生态需求是开展物种保护的基础^[8]。掌握目标物种的空间分布和生境需求是濒危物种保护的一项重要工作,但是有限的野外数据有时会限制对濒危物种分布区的掌握。生态位模型通过目标物种的地理分布数据和物种所在地环境数据,在物种已知的地理分布区域内进行测量或估算,进而预测该区域内哪些区域满足该物种生态位的要求,从而成为该物种潜在分布区的一部分^[9]。主流的生态位

模型有 GARP、ENFA、DOMAIN、BIOCLIM 和 MaxEnt。其中,最大熵模型(the maximum entropy model software, MaxEnt)预测的结果精确度更高^[10];即使在目标物种分布点比较少少的情况下,MaxEnt 模型也可以获得较准确的预测结果^[11-14]。自 Phillips 提出该模型以来,MaxEnt 在外来物种入侵^[15-17]、动植物保护^[18-20]和全球气候变化对物种分布的影响等方面得到广泛应用^[21-23]。

在此背景下,本研究对近年来我国各省市有关中华穿山甲的救护记录、救助新闻进行了整理,收集了 67 个中华穿山甲分布数据,选取地形地貌、地表类型、土地覆被、气候变量、生物学变量和人类影响变量等 25 个全球尺度的环境变量,结合地理信息系统(GIS)、统计分析软件 SPSS 和最大熵模型等软件预测了中华穿山甲在我国的潜在适宜分布区,以期能够为全国中华穿山甲种群专项调查和种群保护管理提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 数据收集与处理

利用 MaxEnt 模型预测物种适宜分布区需要物种的分布数据和环境数据。中华穿山甲的分布数据主要来源于互联网信息与各地的救护记录。我们通过百度搜索引擎查找关键词“中华穿山甲+省份”搜寻近十年来我国关于中华穿山甲的救护新闻,筛选出有关中华穿山甲的救护报道,提取位置信息,借助百度地图输入分布点地理位置信息,确定其十进制格式的经纬度。将上述途径所得到的分布点进行仔细筛选、整理,获取分布点共 67 个(表 1)。

表 1 中华穿山甲地理分布位点

Table 1 Geographic distribution points of the Chinese pangolin in China

编号 No.	省 Province	市(州) District	县 County	地点 Location
1	江西省	南昌市	湾里区	太平镇狮子峰
2	江西省	上饶市	鄱阳县	田畈街镇后芬村
3	江西省	赣州市	瑞金市	锦江名城峰景
4	江西省	赣州市	于都县	于盘公路
5	江西省	赣州市	安远县	双荒村
6	江西省	九江市	修水县	信华修江新天地小区
7	江西省	九江市	修水县	太阳坳
8	江西省	上饶市	信州区	琅琊山森林公园
9	江西省	上饶市	玉山县	横街镇张村
10	江西省	上饶市	玉山县	三清乡上西坑村
11	江西省	九江市	庐山市	通远村
12	江西省	九江市	庐山市	庐山国家级自然保护区
13	江西省	南昌市	东湖区	贤士二路
14	江西省	景德镇市	浮梁县	三龙镇杨家店村
15	江西省	赣州市	于都县	罗坳镇
16	江西省	九江市	武宁县	鲁溪镇梅颜村
17	广东省	惠州市	惠东县	乌禽嶂
18	广东省	惠州市	惠城区	横沥镇新荣村
19	广东省	汕头市	金平区	梅园
20	广东省	肇庆市	鼎湖区	鼎湖山国家级自然保护区
21	广东省	东莞市	/	厚街镇凤山公园
22	广东省	肇庆市	高要区	烂柯山省级自然保护区
23	广东省	佛山市	南海区	西樵山
24	广东省	佛山市	南海区	江浦西路
25	广东省	中山市	/	东区街道

续表

编号 No.	省 Province	市(州) District	县 County	地点 Location
26	广东省	潮州市	湘桥区	芦庄村
27	广东省	河源市	紫金县	龙窝镇
28	福建省	泉州市	德化县	大铭乡
29	福建省	三明市	将乐县	白莲中学
30	福建省	福州市	平潭县	牛寨山
31	福建省	福州市	鼓楼区	七星井新村
32	福建省	泉州市	德化县	戴云山国家级自然保护区
33	福建省	厦门市	思明区	厦门大学
34	福建省	漳州市	龙文区	东浦头中心小学
35	浙江省	温州市	瑞安市	湖岭镇鹿木乡村
36	浙江省	衢州市	开化县	华埠镇叶溪村
37	浙江省	丽水市	青田县	船寮镇戈溪村
38	浙江省	杭州市	富阳区	场口镇乌畴溪新村
39	浙江省	杭州市	淳安县	大墅镇
40	浙江省	杭州市	淳安县	汾口镇
41	浙江省	台州市	仙居县	括苍山省级自然保护区
42	浙江省	丽水市	莲都区	正达阳光城
43	浙江省	丽水市	龙泉市	百山祖国家公园
44	浙江省	丽水市	缙云县	仙都街道
45	浙江省	丽水市	松阳县	叶村乡花田垅村
46	浙江省	丽水市	遂昌县	新路湾镇小马埠村
47	浙江省	丽水市	云和县	凤凰山街道梅垄村
48	浙江省	丽水市	云和县	浮云街道局村
49	浙江省	丽水市	遂昌县	妙高街道下杭村
50	浙江省	衢州市	江山市	贺村镇石后村
51	浙江省	衢州市	开化县	古田山国家级自然保护区
52	浙江省	台州市	临海市	小芝镇
53	浙江省	温州市	鹿城区	水心住宅区竹组团
54	浙江省	杭州市	临安区	清凉峰国家级自然保护区
55	安徽省	宣城市	绩溪县	伏岭镇
56	安徽省	黄山市	歙县	雄村镇
57	安徽省	黄山市	祁门县	历口镇埔岭村
58	安徽省	黄山市	祁门县	历口镇埔岭村
59	安徽省	黄山市	祁门县	历口镇埔岭村
60	安徽省	黄山市	黄山区	太平湖
61	安徽省	宣城市	宁国市	长虹村
62	云南省	怒江州	泸水县	高黎贡山国家级自然保护区
63	云南省	德宏州	陇川县	城子镇项姐村
64	云南省	德宏州	盈江县	铜壁关省级自然保护区
65	云南省	普洱市	孟连县	娜允镇
66	海南省	海口市	龙华区	龙昆南路
67	台湾省	/	台东县	海岸山脉

使用 ArcGIS 软件邻域分析中的缓冲区模块对分布数据点进行剔除,保证每个栅格仅有一个分布点,避免人为因素导致分布点过多而出现过度拟合现象。本研究所用环境数据空间分辨率为 2.5 arc-minutes (约 4.5 km),设置缓冲直径为 3 km,当两个分布点之间的距离小于 3 km 时,缓冲区面积会重叠,此时只保留其中一个

分布点^[24],最后保留有效分布点 65 个(图 1)。分布数据按 species, longitude 和 latitude 格式依次输入 Excel 单元格,并最终保存为 MaxEnt 模型支持的 CSV 格式文件用于后续分析。

本研究选取的环境数据包括 1.地形地貌变量:海拔、坡度和坡向;2.地表类型变量:土地覆被类型;3.气候变量:19 个气温和降水因子,如年平均气温、最冷月最低温度和最冷季度降水量等;4.生物学变量:归一化植被指数(NDVI);5.人类影响变量:人口密度。这些数据来源及生物学意义详见表 2。使用 ArcGIS 软件将上述 25 个全球尺度的环境变量掩膜提取出中国区域的环境数据,并重采样统一精度 2.5 arc-minutes,通过栅格转换工具将栅格数据转换为 *.ASCII 格式数据以进行 MaxEnt 模型运算。

19 个气候变量是以温度和降水量为基础数据计算得出,因此它们之间不可避免地存在自相关和多重共线性等问题,在模型运行时带入冗余信息,导致输出的 AUC 值偏高^[24]。为此,我们对所选的 25 个环境变量进行了主成分分析,以剔除贡献率低的环境变量,仅保留贡献率大于 1.0%的环境变量^[25]。同时,使用 SPSS 软件对所有环境变量进行 Spearman 相关性分析(附录),如果两个环境变量之间的相关系数绝对值大于 0.8,说明两个变量间存在显著相关性,剔除两者中对物种影响较小的环境变量^[26-28]。最终,我们选择了 6 个环境变量对中华穿山甲进行适宜分布区预测,包括最冷季度降水量(Bio_19)、人口密度(PD)、年降水量(Bio_12)、坡度(Slope)、坡面(Aspect)、海拔(Alt)。

1.2 模型运算与评价

将处理好的分布数据与环境数据导入 MaxEnt 模型软件,创建响应曲线并设置 75%的分布点作为训练集(training data),25%为随机测试集(Random test percentage);勾选“Random seed”选项,重复次数(Replicates)设为 10 次^[29-30];高级设置中勾选“Write plot data”选项,方便后期制图与数据统计,其他选项保持默认,进行模型运算。根据最大训练敏感度和特异度法^[31-33](Maximum Training Sensitivity Plus Specificity, MaxSS)确定阈值为 0.166,然后通过重分类,将物种适宜区划分为 4 个等级:适生值<0.166 为非适宜区、0.166—0.332 为低适宜区、0.332—0.498 为中适宜区、适生值>0.498 为高适宜区,接着计算 4 个适宜区在中国的分布面积。

采用刀切法(Do jackknife)来评价各变量对模型的重要性,使用受试者工作特征曲线(ROC, Receiver Operating Characteristic Curve)与横坐标围成的面积即(Area Under Curve, AUC)来评价模型预测结果的准确性。AUC 值在 0—1 之间:0.5—0.6 表现为失败,0.6—0.7 表现为较差,0.7—0.8 表现为一般,0.8—0.9 表现为好,0.9—1 表现为极好;值越接近 1 表示模型预测准确度越高。

2 结果与分析

2.1 主导环境因子贡献率

通过 MaxEnt 模型分析了 6 种环境变量对中华穿山甲分布的贡献率,结果表明气候变量中的降水因子是限制中华穿山甲分布的主导因素,累计贡献率达 85.4%;其中,最冷季度降水量单因子贡献率高达 68.9%。人类影响因子和海拔因子的累计贡献率达 14.2%,坡面和坡度的贡献率相对较小,两者累计仅为 0.4%(图 2)。

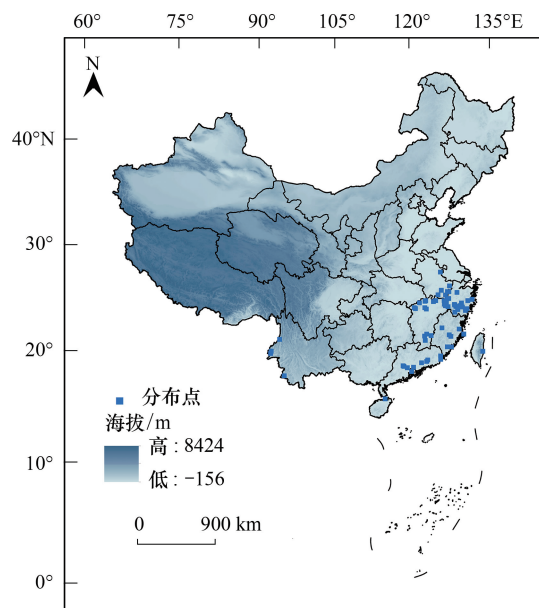


图 1 中华穿山甲救护记录的空间分布图

Fig.1 The spatial distribution map of rescued Chinese pangolin in China

表 2 中华穿山甲分布预测所使用的环境变量

Table 2 Environmental variables used to model the potential distribution of the Chinese pangolin

变量 Variables	描述 Description	来源 Source
Bio_1	年平均气温 Annual Mean Temperature(℃ * 10)	WorldClim database Version 1.4
Bio_2	平均日较差 Mean Diurnal Range(℃ * 10)	WorldClim database Version 1.4
Bio_3	等温性 Isothermality (Bio_2 /Bio_7) (×100)	WorldClim database Version 1.4
Bio_4	温度季节性变化标准差 Temperature Seasonality(CofV)	WorldClim database Version 1.4
Bio_5	最暖月最高温度 Max Temperature of Warmest Month(℃ * 10)	WorldClim database Version 1.4
Bio_6	最冷月最低温度 Min Temperature of Coldest Month(℃ * 10)	WorldClim database Version 1.4
Bio_7	年均温变化范围 Temperature Annual Range(℃ * 10)	WorldClim database Version 1.4
Bio_8	最湿季度平均温度 Mean Temperature of Wettest Quarter(℃ * 10)	WorldClim database Version 1.4
Bio_9	最干季度平均温度 Mean Temperature of Driest Quarter(℃ * 10)	WorldClim database Version 1.4
Bio_10	最暖季度平均温度 Mean Temperature of Warmest Quarter(℃ * 10)	WorldClim database Version 1.4
Bio_11	最冷季度平均温度 Mean Temperature of Coldest Quarter(℃ * 10)	WorldClim database Version 1.4
Bio_12	年降水量 Annual Precipitation(mm)	WorldClim database Version 1.4
Bio_13	最湿月降水量 Precipitation of Wettest Month(mm)	WorldClim database Version 1.4
Bio_14	最干月降水量 Precipitation of Driest Month(mm)	WorldClim database Version 1.4
Bio_15	降水量变异系数 Precipitation Seasonality(Coefficient of Variation)	WorldClim database Version 1.4
Bio_16	最湿季度降水量 Precipitation of Wettest Quarter(mm)	WorldClim database Version 1.4
Bio_17	最干季度降水量 Precipitation of Driest Quarter(mm)	WorldClim database Version 1.4
Bio_18	最暖季度降水量 Precipitation of Warmest Quarter(mm)	WorldClim database Version 1.4
Bio_19	最冷季度降水量 Precipitation of Coldest Quarter(mm)	WorldClim database Version 1.4
Alt	海拔 Altitude(m)	WorldClim database Version 1.4
Slope	坡度 Slope(°)	ArcGIS 软件表面分析工具提取
Aspect	坡向 Aspect	ArcGIS 软件表面分析工具提取
LCT	土地覆盖类型 Land Cover Type	USGS 土地覆盖研究所(LCI)
NDVI	归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index	中国科学院资源环境科学数据中心
PD	人口密度 Population Density(人/km ²)	NASA 社会经济数据和应用中心

2.2 刀切法分析单一环境变量的重要程度

我们用刀切法进一步分析了单一环境变量对中华穿山甲分布结果的影响率(图3)。蓝色表示当仅用此环境变量用于 MaxEnt 模型建模时,该变量对模型的增益效果;绿色表示除此变量,其他变量对模型的总体增益效果;红色表示所有环境变量应用模型所产生的增益效果。结果表明最冷季度降水量和年降水量对中华穿山甲的分布起主导作用,训练增益分别为 1.85 和 1.83;人口密度和海拔是影响中华穿山甲分布的次要因素,训练增益分别为 0.86 和 0.71;影响最小的是坡面和坡度,训练增益不超过 0.10。这与相对贡献率分析的结果是一致的,表明所选的环境变量能够较好地反映中华穿山甲真实的生活环境^[25]。

2.3 主要环境变量的响应分析

中华穿山甲的分布与主要的环境变量之间具有较强的响应关系(图4),当存在概率大于 0.498 时,可以认为此环境变量值最适合中华穿山甲生存。其中,最冷季度降水量、年降水量、人口密度、海拔四个主要环境

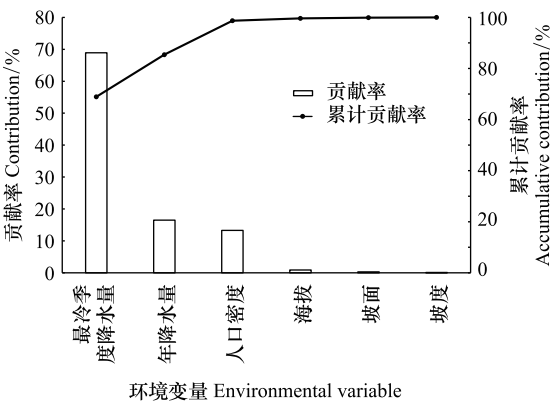


图 2 影响中华穿山甲分布的环境变量贡献率与累积贡献率

Fig. 2 The accumulated contribution of each environmental variable to the potential distribution of Chinese pangolin in China

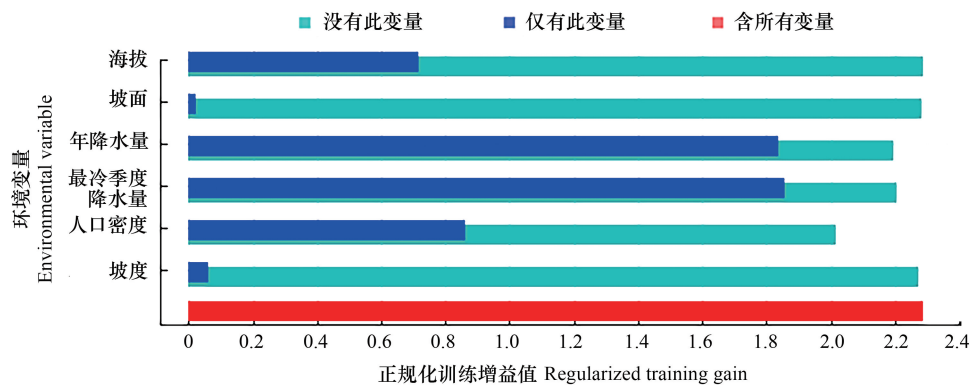


图 3 刀切法分析主要环境变量对中华穿山甲在中国的分布影响程度

Fig.3 Analysis of the impact of major environmental variables on the distribution of Chinese pangolin in China by Jackknife test

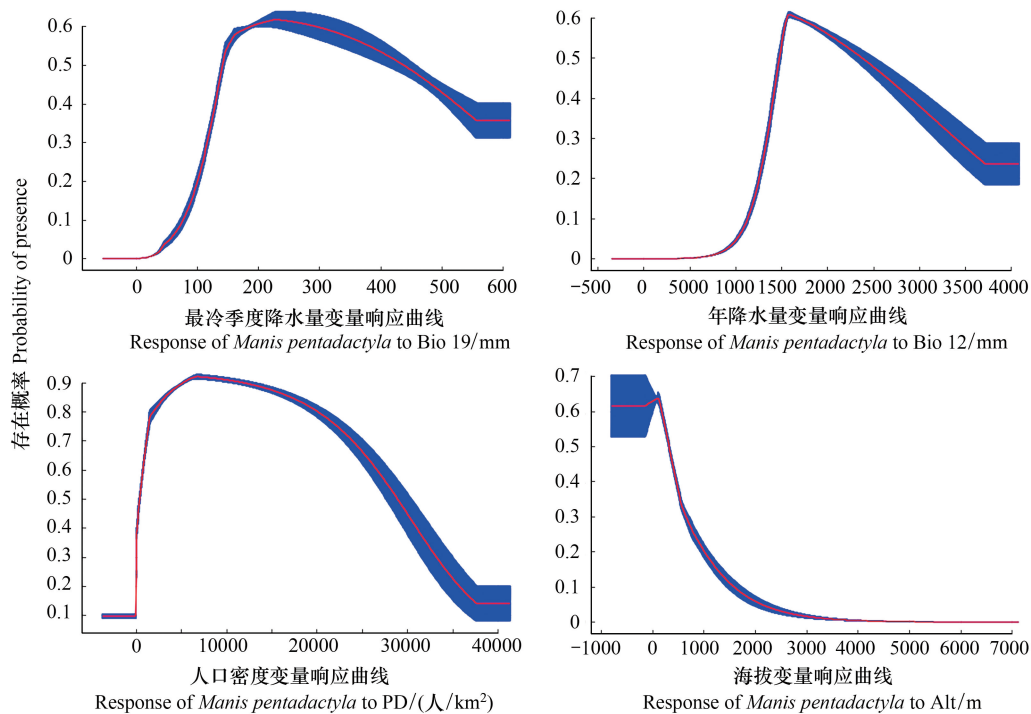


图 4 中华穿山甲对 4 个主要环境因子的响应曲线

Fig.4 Response of the Chinese pangolin to 4 major environmental factors

Bio_19: 最冷季度降水量 Precipitation of coldest quarter; PD: 人口密度 Population density; Bio_12: 年降水量 Annual precipitation

变量对中华穿山甲分布的最适宜范围分别为: 最冷季度降水量 141.22—439.46 mm、年降水量 1471.67—2386.56 mm、人口密度 390—28894 人/km²、海拔 <316.98 m。

最冷季度降水量小于 29.80 mm 时, 中华穿山甲的存在概率几乎为零; 小于 93.85 mm 时, 中华穿山甲的存在概率小于 0.166, 为非适宜区; 93.85—120.54 mm 时, 存在概率大于 0.166 且小于 0.332, 为低适宜区; 120.54—141.22 mm 或大于 439.46 mm 时, 存在概率大于 0.332 且小于 0.498, 为中适宜区; 141.22—439.46 mm 时, 存在概率大于 0.498, 为高适宜区。

年降水量小于 1218.53 mm 时, 为非适宜区; 1218.53—1365.09 mm 或大于 3234.83 mm 时, 为低适宜区; 1365.09—1471.67 mm 或 2386.56—3234.83 mm 时, 为中适宜区; 1471.67—2386.56 mm 时, 为高适宜区, 且在

1560.50—1675.97 mm 之间时,中华穿山甲的存在概率达到峰值。

人口密度在 30—6795 人/km² 时,存在概率随人口密度的增加而增加,在 6795—36742 人/km² 时,存在概率随人口密度增加而减少。低适宜区范围:0—30 人/km²;中适宜区范围:30—390 人/km² 或 28894—32457 人/km²;高适宜区范围:390—28894 人/km²。

海拔范围大于 3351.13 m 时,中华穿山甲存在概率为零。随着海拔的降低,中华穿山甲的分布概率增加。海拔范围在 602.92—1166.86 m 时,为低适宜区;在 324.92—563.20 m,为中适宜区;海拔<316.98 m,为高适宜区。

2.4 中华穿山甲在中国的适宜区预测

MaxEnt 模型运行十次后,筛选 AUC 值最高的模型作为最优模型。按照重分类标准将中华穿山甲适宜性指数重分类成四类(图 5)。结果表明,中华穿山甲适宜分布区总面积约为 74.27×10⁴ km²,占中国国土面积的 7.73%,其中低、中、高适宜区面积分别为 32.53×10⁴ km²、26.86×10⁴ km²和 14.88×10⁴ km²,占总适宜区面积的 43.80%、36.16%和 20.04%。中华穿山甲在江西省和湖南省的高适宜区面积最大,分别为 6.87×10⁴ km²和 3.13×10⁴ km²,占该省面积的 44.96%和 16.14%;其次是广东省和广西省,面积分别为 2.96×10⁴ km²和 2.07×10⁴ km²,占该省面积的 19.15%和 9.91%,具体各适宜区在各省(市、自治区)所占的面积及比例见表 3。

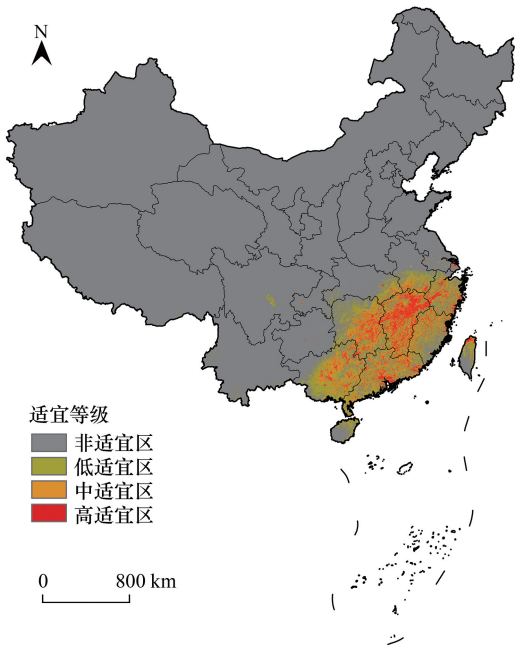


图 5 中华穿山甲在中国的适宜区分布
Fig.5 Potential distribution of the Chinese pangolin in China

表 3 中华穿山甲适宜分布区主要覆盖地区数据

地区 Region	非适宜区 Non-suitable areas		低适宜区 Low-suitable areas		中适宜区 Mid-suitable areas		高适宜区 High-suitable areas	
	预测面积 Predicted area/ ×10 ⁴ km ²	占该地区 面积比例/% Account for the Proportion of the region	预测面积 Predicted area/ ×10 ⁴ km ²	占该地区 面积比例/% Account for the Proportion of the region	预测面积 Predicted area/ ×10 ⁴ km ²	占该地区 面积比例/% Account for the Proportion of the region	预测面积 Predicted area/ ×10 ⁴ km ²	占该地区 面积比例/% Account for the Proportion of the region
河南	16.09	99.72	0.03	0.21	0.01	0.05	0	0
安徽	8.71	65.24	2.62	19.63	1.47	11.01	0.55	4.12
江苏	9.37	96.36	0.22	2.27	0.07	0.73	0.06	0.64
上海	0.46	78.71	0.02	3.86	0.02	3.75	0.08	13.69
浙江	1.60	17.09	3.72	39.74	2.28	24.36	1.76	18.80
福建	2.07	19.04	4.28	39.37	2.94	27.05	1.58	14.54
江西	0.37	2.42	3.04	19.90	5.00	32.72	6.87	44.96
湖北	13.93	79.33	2.44	13.90	0.89	5.07	0.30	1.71
湖南	4.48	23.10	6.61	34.09	5.17	26.66	3.13	16.14
重庆	7.23	93.77	0.45	5.84	0.02	0.26	0.01	0.13
西藏	113.93	99.82	0.20	0.18	0	0	0	0
四川	44.75	98.27	0.70	1.54	0.07	0.15	0.02	0.04
云南	33.02	96.53	1.13	3.30	0.05	0.15	0.01	0.02
贵州	15.58	97.53	0.35	2.19	0.02	0.10	0.03	0.18

续表

地区 Region	非适宜区 Non-suitable areas		低适宜区 Low-suitable areas		中适宜区 Mid-suitable areas		高适宜区 High-suitable areas	
	预测面积 Predicted area/ ×10 ⁴ km ²	占该地区 面积比例/% Account for the Proportion of the region	预测面积 Predicted area/ ×10 ⁴ km ²	占该地区 面积比例/% Account for the Proportion of the region	预测面积 Predicted area/ ×10 ⁴ km ²	占该地区 面积比例/% Account for the Proportion of the region	预测面积 Predicted area/ ×10 ⁴ km ²	占该地区 面积比例/% Account for the Proportion of the region
广西	5.62	26.92	7.41	35.49	5.78	27.68	2.07	9.91
广东	1.60	10.35	5.48	35.45	5.42	35.06	2.96	19.15
海南	1.27	44.08	1.23	42.73	0.33	11.45	0.05	1.74
台湾	1.21	38.66	1.01	32.27	0.52	16.61	0.39	12.46
香港	0.03	46.50	0.04	52.71	0	0	0	0

2.5 ROC 曲线和 AUC 值对模型预测的准确性检验

基于所有环境变量与主导环境变量构建 MaxEnt 模型获得 ROC 曲线和 AUC 值(图 6),获得的训练集 AUC 值为别为 0.982 和 0.961(误差范围±0.014),模型预测结果达到极好标准,表明该模型对中华穿山甲在中国的潜在适宜区的预测结果非常好,可信度比较高。

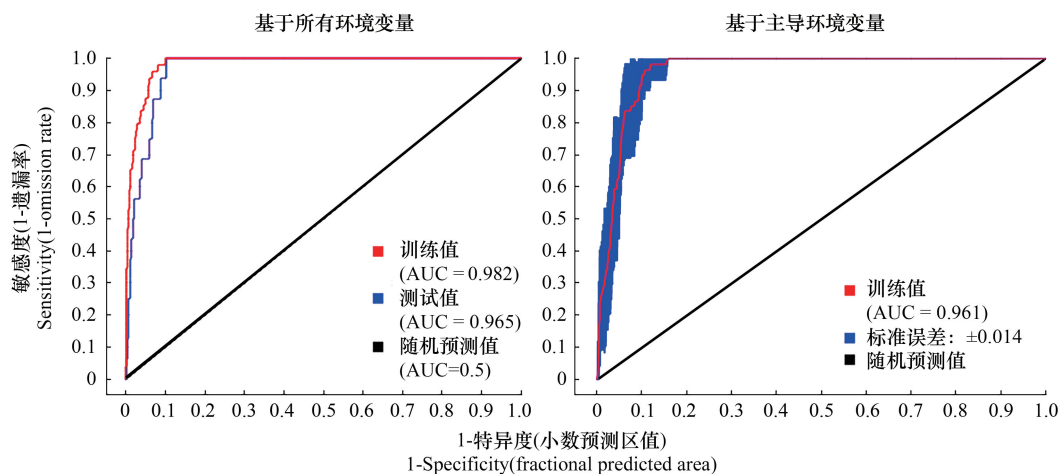


图 6 MaxEnt 模型预测结果的 ROC 曲线

Fig.6 ROC curve of distribution of the Chinese pangolin predicted by MaxEnt model

3 讨论

为了更有效地保护濒危野生动物,首先要明确的是该物种的分布情况,还要确定该物种的生境需求与所处环境之间的关系,从而为该物种提供最合理、最有效、最具体的保护方案^[34]。本研究基于近年来我国中华穿山甲救护记录,利用 MaxEnt 模型对其潜在适宜分布区进行了预测。研究结果揭示了中华穿山甲在中国的适宜分布区主要在我国长江以南地区,主要集中在江西、广东、湖南和浙江省,预测值与观测值高度吻合,预测结果与中国兽类野外手册^[35]比较吻合,预测结果比较准确,预测结果可为我国中华穿山甲的种群保护和栖息地管理提供有力的科技支撑。

分布数据和环境数据的过度拟合通常会导致模型输出的 AUC 值偏高(图 6)。为了最大限度地避免数据点的偏差和模型的过度拟合,我们对已获取的分布数据点进行了筛选和剔除,保证每个栅格里只保留一个数据分布点。同时,对所有的环境变量进行了相关性分析来确保选取的环境数据与中华穿山甲的分布密切相

关,以此减少冗余信息对模型结果的影响,使模型输出后的 AUC 值更加真实。MaxEnt 模型输出的 AUC 平均值 0.961,表明该模型的预测结果具有较高的可信度。

我们也分析了影响中华穿山甲空间分布的关键环境因子。结果表明,气候变量中的降水因子是限制中华穿山甲分布的主要因素,原因可能是降水因子与中华穿山甲的食物——白蚁的地理分布密切相关。1 只中华穿山甲每年能吃 700 万只蚂蚁和白蚁,这些蚁类在我国的活动分布主要在淮河以南的广大地区(热带、亚热带等温暖多湿地区),向北逐渐稀少,向南逐渐递增。在这些地区,白蚁的分布与雨量关系极为密切,尤其是江西及江西周围省份温度适宜、雨量充沛且白蚁种类繁多,这为中华穿山甲提供了很好的食物来源。同时,白蚁的分布区也与本研究预测的中华穿山甲潜在适宜区高度吻合^[36]。

物种与环境的关系是研究物种生态学需求和空间分布的重要方面。本研究认为,虽然中华穿山甲的栖息地和食物来源会受到气候变化的影响,但物种变化的过程是一个极其缓慢的过程^[37-38],物种的生态位压缩主要还是由人类影响所驱动。栾晓峰等研究发现短时间内的气候变化对于物种分布呈现中性的效果,或在某种情况下甚至可能是积极的,人类活动干扰是影响中华穿山甲分布变化的最大因素^[39]。国家林业局 1998 年前后开展的中国重点陆生野生动物资源调查结果表明,我国野生穿山甲的数量约为 64000 只^[3]。到 2008 年,张立等人认为中国野生穿山甲的数量在 25100—49450 只之间,即 10 年内其种群就减少了约 1/2 的数量^[3]。虽然中华穿山甲的濒危等级不断提高,但近十年来我国一直没有开展全国性的野生穿山甲专项调查,也未见相关报道,在很大程度上限制了对该物种有效保护。穿山甲是地球上最古老的物种之一,在地球上至少已延续了 5000 年。因其进化程度低、对新的环境适应能力差、繁殖力低下、人工难于驯养等原因,一旦遭到大量捕杀导致种群数量下降后就难以恢复^[6]。如若不及时开展对中华穿山甲的生物学研究,潜在的灭绝危险将进一步增加。

MaxEnt 模型在物种分布数据很少的情况下预测结果也比较准确,但是不充分的分布信息也会导致模型预测产生偏差^[40]。在避免过拟合的情况下,物种的分布数据越多越好。因此,基于更多野外活动点的中华穿山甲分布区研究仍然有待深入。本研究所获得的部分物种分布数据是通过百度地图提取其救助地点所获取的,少数新闻救助点的具体位置只能精确到镇或乡。因此,该救助地点的环境状况无法完全反应物种实际分布点的环境状况,导致结果会有一定偏差。譬如,救护地点大多接近人类聚集区,周边人口密度较高,可能会导致模型分析过高估计穿山甲适宜生境中的人口密度;本研究中 MaxEnt 模型预测穿山甲适宜生境的人口密度为 390—28894 人/km²,虽然在一定程度上反映出穿山甲适宜生境距离人类活动区较近,但可能过高地估计了穿山甲适宜生境中的人口密度。另外,虽然本研究选取的土地覆被类型和植被归一化指数有助于精确模拟物种适宜生长的微环境,但是两者对于模型的贡献度过小,使得我们无法从区域或微生境尺度分析环境因子对其分布的作用关系,只能从较大的空间尺度预测其潜在分布区。因此,多尺度和高精度上的中华穿山甲生境利用和空间分布适宜性预测有待进一步开展。

参考文献(References):

- [1] 蒋志刚,江建平,王跃招,张鹂,张雁云,李立立,谢锋,蔡波,曹亮,郑光美,董路,张正旺,丁平,罗振华,丁长青,马志军,汤宋华,曹文宣,李春旺,胡慧建,马勇,吴毅,王应祥,周开亚,刘少英,陈跃英,李家堂,冯祚建,王燕,王斌,李成,宋雪琳,蔡蕾,臧春鑫,曾岩,孟智斌,方红霞,平晓鸽. 中国脊椎动物红色名录. 生物多样性, 2016, 24(5): 500-551.
- [2] 胡锦矗,吴毅. 脊椎动物资源及保护. 成都: 四川科学技术出版社, 1998.
- [3] 张立,李麒麟,孙戈,罗述金. 穿山甲种群概况及保护. 生物学通报, 2010, 45(9): 1-4.
- [4] 吴诗宝. 中国穿山甲(*Manis pentadactyla*)保护生物学研究//第五届广东、湖南、江西、湖北四省动物学学术研讨会论文摘要汇编. 广州: 湖北省科学技术协会, 2008: 84-85.
- [5] 黄飘逸,彭建军,高红梅,邓亚平,彭杰,廖国宇. 西南地区野生穿山甲资源现状及药材贸易市场调查. 林业科技通讯, 2019, (10): 34-36.
- [6] 吴诗宝,马广智,唐玫,陈海,刘迺发. 中国穿山甲资源现状及保护对策. 自然资源学报, 2002, 17(2): 174-180.
- [7] 吴诗宝,刘迺发,张迎梅,马广智. 中国穿山甲受危状况评估. 应用与环境生物学报, 2004, 10(4): 456-461.
- [8] Phillips S J, Dudik M, Schapire R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling//Proceedings of the 21st International Conference on Machine Learning. Banff, Alberta, Canada: Association for Computing Machinery, 2004.

- [9] Anderson R P, Martínez-Meyer E. Modeling species' geographic distributions for preliminary conservation assessments: an implementation with the spiny pocket mice (*Heteromys*) of Ecuador. *Biological Conservation*, 2004, 116(2): 167-179.
- [10] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 肖启明, 戴良英. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用. *生物多样性*, 2007, 15(4): 365-372.
- [11] 陈新美, 雷渊才, 张雄清, 贾宏炎. 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*, 2012, 48(1): 53-59.
- [12] Guisan A, Graham C H, Elith J, Huettmann E, the NCEAS Species Distribution Modelling Group. Sensitivity of predictive species distribution models to change in grain size. *Diversity and Distributions*, 2007, 13(3): 332-340.
- [13] Elith J, Graham C H, Anderson R P, Dudík M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans R J, Huettmann F, Leathwick J R, Lehmann A, Li J, Lohmann L G, Loiselle B A, Manion G, Moritz C, Nakamura M, Nakazawa Y, Overton J M M, Peterson A T, Phillips S J, Richardson K, Scachetti-Pereira R, Schapire R E, Soberón J, Williams S, Wisz M S, Zimmermann N E. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 2006, 29(2): 129-151.
- [14] Wisz M S, Hijmans R J, Li J, Peterson A T, Graham C H, Guisan A, NCEAS Predicting Species Distributions Working Group. Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions*, 2008, 14(5): 763-773.
- [15] 李丽鹤, 刘会玉, 林振山, 贾俊鹤, 刘翔. 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*, 2017, 37(9): 3124-3132.
- [16] McCune J L. Species distribution models predict rare species occurrences despite significant effects of landscape context. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 53(6): 1871-1879.
- [17] Wan J Z, Wang C J, Yu F H. Effects of occurrence record number, environmental variable number, and spatial scales on MaxEnt distribution modelling for invasive plants. *Biologia*, 2019, 74(7): 757-766.
- [18] 武晓宇, 董世魁, 刘世梁, 刘全儒, 韩雨晖, 张晓蕾, 苏旭坤, 赵海迪, 冯憬. 基于 MaxEnt 模型的三江源区草地濒危保护植物热点区识别. *生物多样性*, 2018, 26(2): 138-148.
- [19] 艾科拜尔·木哈塔尔, 热木图拉·阿卜杜克热木, 马合木提·哈力克. 基于生态位模型的艾比湖国家级自然保护区马鹿生境评价. *生态学报*, 2017, 37(11): 3919-3925.
- [20] Zhang J J, Jiang F, Li G Y, Qin W, Li S Q, Gao H M, Cai Z Y, Lin G H, Zhang T Z. Maxent modeling for predicting the spatial distribution of three raptors in the Sanjiangyuan National Park, China. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(11): 6643-6654.
- [21] 高文强, 王小菲, 江泽平, 刘建锋. 气候变化下栓皮栎潜在地理分布格局及其主导气候因子. *生态学报*, 2016, 36(14): 4475-4484.
- [22] 廖剑锋, 易自力, 李世成, 肖亮. 基于 Maxent 模型的双药芒不同时期潜在分布研究. *生态学报*, 2020, 40(22): 8297-8305.
- [23] 王百竹, 朱媛君, 刘艳书, 马风云, 张晓, 时忠杰, 杨晓晖. 典型草原建群种长芒草 (*Stipa bungeana*) 在中国的潜在分布范围预测及主要影响因子分析. *草业学报*, 2019, 28(7): 3-13.
- [24] 王茹琳, 李庆, 封传红, 石朝鹏. 基于 MaxEnt 的西藏飞蝗在中国的适生区预测. *生态学报*, 2017, 37(24): 8556-8566.
- [25] 郭燕青, 史梦竹, 李建宇, 傅建伟, 吴梅香. 基于 Maxent 模型的假臭草潜在分布区预测. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27(3): 250-260.
- [26] 林伟, 徐森锋, 权永兵, 廖力, 高磊. 基于 MaxEnt 模型的草地贪夜蛾适生性分析. *植物检疫*, 2019, 33(4): 69-73.
- [27] Wang R L, Yang H, Luo W, Wang M T, Lu X L, Huang T T, Zhao J P, Li Q. Predicting the potential distribution of the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* (Kuwayama), in China using the MaxEnt model. *Biodiversity and Conservation*, 2019, 7: e7323.
- [28] 余吉, 付明霞, 宋心强, 高飞, 杨彪, 李生强. 基于 MaxEnt 模型的四川大相岭保护区藏酋猴 (*Macaca thibetana*) 生境适宜性评价. *四川林业科技*, 2020, 41(3): 45-50.
- [29] 谢登峰, 童芬, 杨丽娟, 何兴金. MaxEnt 模型下的外来入侵种香丝草在中国的潜在分布区预测. *四川大学学报: 自然科学版*, 2017, 54(2): 423-428.
- [30] 罗集丰, 洪纯丹, 方怡然, 杨培新, 李琦琦, 林伟. 橙带蓝尺蛾在中国的潜在分布预测研究. *西部林业科学*, 2020, 49(6): 107-111.
- [31] Liu C R, White M, Newell G. Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. *Journal of Biogeography*, 2013, 40(4): 778-789.
- [32] 柳晓燕, 赵彩云, 李飞飞, 朱金方, 高珂晓, 胡妍玢. 基于 MaxEnt 模型预测红火蚁在中国的适生区. *植物检疫*, 2019, 33(6): 70-76.
- [33] 崔绍朋, 罗晓, 李春旺, 胡慧建, 蒋志刚. 基于 MaxEnt 模型预测白唇鹿的潜在分布区. *生物多样性*, 2018, 26(2): 171-176.
- [34] 苏比奴尔·艾力, 热木图拉·阿卜杜克热木, 于苏云江·吗米提敏, 塔依尔江·麦麦提, 佐日古丽·伊斯马伊力, 马合木提·哈力克. 基于 MaxEnt 模型的新疆鹅喉羚生境适宜性评价. *野生动物学报*, 2019, 40(1): 27-32.
- [35] 史密斯, 解焱. 中国兽类野外手册. 长沙: 湖南教育出版社, 2009.
- [36] 蔡邦华, 陈宁生. 中国白蚁分类和区系问题. *昆虫学报*, 1964, 13(1): 25-37.
- [37] Bao F Y, Wu S B, Su C, Yang L, Zhang F H, Ma G Z. Air temperature changes in a burrow of Chinese pangolin, *Manis pentadactyla*, in winter. *Folia Zoologica*, 2013, 62(1): 42-47.
- [38] Mahmood T, Jabeen K, Hussain I, Kayani A R. Plant species association, burrow characteristics and the diet of the Indian pangolin, *Manis crassicaudata*, in the Potohar Plateau, Pakistan. *Pakistan Journal of Zoology*, 2013, 45(6): 1533-1539.
- [39] Yang L, Chen M H, Challender D W S, Waterman C, Zhang C, Huo Z M, Liu H W, Luan X F. Historical data for conservation: reconstructing range changes of Chinese pangolin (*Manis pentadactyla*) in eastern China (1970-2016). *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2018, 285(1885): 20181084.
- [40] 庄鸿飞, 秦浩, 王伟, 张殷波. 基于 MaxEnt 模型的云南红豆杉潜在适宜分布预测. *山西大学学报: 自然科学版*, 2018, 41(1): 233-240.

附录 25 个环境因子的相关性分析

Appendix The Pearson correlation coefficients among 25 initial environmental variables. Environmental variable meanings are shown in

	Bio_1	Bio_2	Bio_3	Bio_4	Bio_5	Bio_6	Bio_7	Bio_8	Bio_9	Bio_10	Bio_11	Bio_12	Bio_13	Bio_14	Bio_15	Bio_16	Bio_17	Bio_18	Bio_19	Alt	Slope	Aspect	LCT	NDVI	PD
Bio_1	1																								
Bio_2	-0.291	1																							
Bio_3	0.507	0.418	1																						
Bio_4	-0.750	0.079	-0.863	1																					
Bio_5	0.142	-0.093	-0.564	0.520	1																				
Bio_6	0.947	-0.424	0.555	-0.863	-0.107	1																			
Bio_7	-0.779	0.338	-0.708	0.962	0.482	-0.923	1																		
Bio_8	0.808	-0.294	0.338	-0.551	0.177	0.750	-0.593	1																	
Bio_9	0.905	-0.247	0.564	-0.788	-0.034	0.900	-0.806	0.701	1																
Bio_10	0.403	-0.371	-0.491	0.301	0.920	0.189	0.191	0.400	0.218	1															
Bio_11	0.946	-0.224	0.706	-0.922	-0.170	0.976	-0.926	0.735	0.914	0.091	1														
Bio_12	0.259	-0.210	0.173	-0.311	-0.176	0.295	-0.328	0.035	0.208	-0.060	0.292	1													
Bio_13	0.167	0.068	0.298	-0.287	-0.249	0.167	-0.244	-0.075	0.174	-0.182	0.224	0.878	1												
Bio_14	-0.292	-0.406	-0.593	0.435	0.223	-0.267	0.322	-0.294	-0.287	0.214	-0.376	0.443	0.182	1											
Bio_15	0.509	0.265	0.804	-0.733	-0.436	0.525	-0.632	0.326	0.556	-0.320	0.641	0.254	0.513	-0.627	1										
Bio_16	0.327	0.032	0.425	-0.445	-0.278	0.332	-0.400	0.072	0.311	-0.171	0.391	0.892	0.955	0.141	0.607	1									
Bio_17	-0.434	-0.248	-0.645	0.580	0.290	-0.442	0.502	-0.434	-0.457	0.203	-0.532	0.390	0.174	0.945	-0.689	0.102	1								
Bio_18	0.458	-0.030	0.647	-0.705	-0.514	0.534	-0.669	0.347	0.423	-0.331	0.596	0.722	0.741	-0.156	0.688	0.808	-0.254	1							
Bio_19	-0.423	-0.185	-0.683	0.633	0.382	-0.473	0.565	-0.470	-0.417	0.281	-0.551	0.340	0.182	0.890	-0.657	0.083	0.947	-0.353	1						
Alt	-0.130	0.413	0.695	-0.516	-0.874	0.046	-0.379	-0.204	0.013	-0.919	0.167	0.126	0.274	-0.353	0.576	0.333	-0.358	0.464	-0.416	1					
Slope	-0.254	0.051	0.002	0.045	-0.250	-0.175	0.057	-0.290	-0.234	-0.300	-0.172	0.050	0.077	-0.066	0.011	0.044	0.021	0.058	-0.026	0.214	1				
Aspect	-0.094	-0.061	-0.188	0.165	0.144	-0.101	0.145	0.075	-0.090	0.105	-0.130	-0.244	-0.302	-0.073	-0.201	-0.308	-0.066	-0.224	-0.034	-0.194	0.113	1			
LCT	0.279	0.094	0.134	-0.091	0.247	0.190	-0.072	0.346	0.223	0.274	0.209	-0.358	-0.293	-0.338	0.102	-0.250	-0.351	-0.117	-0.344	-0.188	-0.410	0.175	1		
NDVI	1.000	-0.291	0.507	-0.750	0.142	0.947	-0.779	0.808	0.905	0.403	0.946	0.259	0.167	-0.292	0.509	0.327	-0.434	0.458	-0.423	-0.130	-0.254	-0.094	0.279	1	
PD	0.448	-0.238	0.064	-0.209	0.253	0.413	-0.266	0.514	0.320	0.366	0.366	-0.214	-0.238	-0.286	0.152	-0.162	-0.346	-0.024	-0.350	-0.222	-0.580	0.127	0.498	0.448	1

环境变量含义见表 2