



应用与环境生物学报

Chinese Journal of Applied and Environmental Biology

ISSN 1006-687X, CN 51-1482/Q

《应用与环境生物学报》网络首发论文

题目：高望界保护区小灵猫活动节律及栖息地
作者：毛静，王婧，鲁云，陈思柔，瞿琪，王珩臻，黄杰，张自亮，张佑祥，吴涛
DOI：10.19675/j.cnki.1006-687x.2024.10004
收稿日期：2024-10-08
网络首发日期：2025-04-16
引用格式：毛静，王婧，鲁云，陈思柔，瞿琪，王珩臻，黄杰，张自亮，张佑祥，吴涛. 高望界保护区小灵猫活动节律及栖息地[J/OL]. 应用与环境生物学报.
<https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2024.10004>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

高望界保护区小灵猫活动节律及栖息地

毛静¹ 王婧¹ 鲁云^{1,2} 陈思柔¹ 瞿琪¹ 王珩臻¹ 黄杰¹ 张自亮³
张佑祥¹ 吴涛^{1**}

¹ 吉首大学生物资源与环境科学学院 吉首 416000

² 湖南省湘西土家族苗族自治州吉首市第一中学 吉首 416000

³ 湖南高望界国家级自然保护区管理局 古丈 416300

摘要 小灵猫(*Viverricula indica*) 是国家一级重点保护野生动物, 曾广泛分布于我国长江流域以南地区, 然而, 近年来分布范围不断缩小, 种群数量急剧下降。因此, 开展其活动节律及栖息地适宜性研究对制定科学的保护计划至关重要。于 2021 年 1 月至 2023 年 12 月期间, 在高望界保护区布设红外相机, 获得 52 个小灵猫有效分布位点, 累计 42 769 个相机工作日, 记录到小灵猫独立有效照片 415 张。基于红外相机数据, 结合 R 软件和最大熵 (Maxent) 模型, 对高望界保护区内小灵猫的活动节律与栖息地潜在适生区进行了研究。结果显示: (1) 小灵猫的日常活动节律具有明显的夜行性, 呈“双峰型”, 活动高峰在凌晨 2:00-4:00 和夜晚 20:00-22:00。四季中, 夏季活动频率最高。(2) Maxent 模型的训练集 AUC 值为 0.810, 具有较高的精确性, 其中, 海拔、bio3、bio16 和 bio15 是影响小灵猫适生区分布的重要环境因素。(3) 保护区内小灵猫的潜在适宜区面积为 126.80 km², 占保护区总面积的 73.85%, 其中, 高适宜区面积为 31.76 km², 占保护区总面积的 18.50%。本研究表明高望界保护区为小灵猫提供了适宜的栖息地环境, 海拔对栖息地适宜性存在显著的影响, 建议加强小灵猫的现有栖息地的保护, 特别是海拔 600 m 以上的植被保护, 减少人类活动对小灵猫适宜栖息地的干扰。

关键词 小灵猫; 红外相机技术; 活动节律; Maxent 模型

Activity rhythms and habitat of small Indian civet (*Viverricula indica*) in the Gaowangjie Reserve

MAO Jing¹, WANG Jing¹, LU Yun^{1,2}, CHEN Sirou¹, QU Qi¹, WANG Hengzhen¹, HUANG Jie¹, ZHANG Ziliang³, ZHANG Youxiang¹ & WU Tao¹

¹ College of Biological Resources and Environmental Science, Jishou University, Jishou 416000, China

² The No. 1 Middle School of Jishou, Xiangxi Tujia and Miao Autonomous Prefecture, Hunan Province, Jishou 416000, China

³ Hunan Gaowangjie National Nature Reserve Administration, Guzhang 416300, China

Abstract Small Indian civet (*Viverricula indica*) is a national first-class key protected wild animal, which was once widely distributed in the south of the Yangtze River Basin in China, but in recent years, its distribution has been shrinking and its population has declined sharply. Therefore, conducting research on their activity rhythms and habitat suitability is essential for developing scientific conservation programs. In this study, infrared cameras were deployed in the Gaowangjie Reserve from January 2021 to December 2023, and 52 effective distribution sites of small Indian civet were obtained, with a total of 42 769 camera working days, and 415 independent and effective photographs of small Indian civet were recorded. Based on the infrared camera data, we combined the R software and the maximum entropy (Maxent) model to study the activity rhythms and habitat potential of small Indian civet in the Gaowangjie Reserve. The results

收稿日期 Received: 2024-10-08 接受日期 Accepted: 2025-03-05

古丈县小灵猫的监测与保护项目(湘财预(2024)347号2110499—502)和湖南高望界国家级自然保护区陆生脊椎动物调查暨小灵猫种群监测与研究项目(2023)资助 Supported by the Monitoring and Protection of Small Indian Civet in Guzhang County (Xiang Finance (2024) No. 347 2110499-502) and Project of Investigation of Terrestrial Vertebrates and Population Monitoring And Research of Small Indian Civet in Gaowangjie National Nature Reserve, Hunan Province, China (2023)

**通信作者 Corresponding author (E-mail: 623725242@qq.com)

showed that: (1) The daily activity rhythm of kittens has obvious nocturnal behavior, which is “bimodal”, with peaks of activity in the morning from 2: 00-4: 00 a.m and in the night from 20: 00-22: 00 p.m. (2) The AUC value of the training set of the Maxent model was 0.810, with high accuracy, in which, elevation, bio3, bio16 and bio15 were the important environmental factors affecting the distribution of small Indian civet in the habitable zone. (3) The potential suitable area of small Indian civet in the protected area was 126.80 km², accounting for 73.85% of the total area of the protected area, of which, the highly suitable area was 31.76 km², accounting for 18.50% of the total area of the protected area. This study shows that the Gaowangjie Reserve provides a suitable habitat environment for small Indian civet, and there is a significant effect of altitude on habitat suitability. It is recommended to strengthen the protection of the existing habitat of small Indian civet, especially the protection of the vegetation above 600m above sea level, and to minimize the disturbance of the suitable habitat for the little lingcats caused by human activities.

Keywords small Indian civet; infrared camera technology; activity rhythms; Maxent modeling

小灵猫 (*Viverricula indica*) 隶属于食肉目灵猫科小灵猫属 (*Viverricula*)，是国家一级重点保护野生动物^[1]。其分泌的灵猫香是四大名贵动物香料 (麝香、灵猫香、龙涎香、海狸香) 之一，因而被视为名贵香料，同时也是名贵中药材，其毛皮还具有很高的经济价值^[2]，致使其遭到严重的人为猎杀。据文献统计，1969 年全国共收购小灵猫皮 10 万余张，其中，云南的最高收购量达 10 325 张^[3]。近年来，过度的森林砍伐和土地开垦导致其栖息地破碎化和丧失，使得小灵猫的种群数量急剧减少，分布区域快速缩减，部分区域已难寻踪迹。因此，开展对小灵猫野生种群的保护工作已迫在眉睫。作为亚热带生境中重要的次级消费者，小灵猫所受到的关注明显低于同属猫型亚目的其他动物^[4]，《中国物种红色名录》评估为易危等级，《中国生物多样性红色名录·脊椎动物卷》评估为近危等级。目前，关于小灵猫的研究主要集中在人工饲养^[5]、摄食行为^[6]及灵猫香^[7]等方面，针对其野外生态学研究，尤其是活动节律及栖息地方面的研究仍存在不足。

动物的活动节律指动物在不同时间、季节和地点的活动强度及变化规律，是动物长期适应环境变化的结果^[8]。探讨野生动物的活动节律是开展保护管理的重要内容之一，有利于了解野生动物的生活策略和生态功能，从而制定相应的保护策略。红外相机技术是野生动物活动节律监测的重要手段。与传统调查方法相比，红外相机技术具有明显优势，监测时触发速度快 (当动物进入红外相机监测区域时，0.5 s 内相机会被触发)，可以探测到小型动物 (体重大于 50 g)，隐蔽性强，对野生动物干扰小，不会对其造成伤害，同时具有对恶劣环境的耐受性能强、效率高、影像质量高和可全天候工作数月的特点^[9]。目前已被应用到其他灵猫科物种的活动节律的研究中^[10-11]，但关于对小灵猫活动节律的研究相对较少。

野生动物及其栖息地保护是生物多样性保护的重要组成部分^[12]。栖息地是动物生存的空间，包括一切影响到动物生存的环境因子的总和^[13]。栖息地不仅为野生动物提供生存所需的资源，也是其繁衍生息的基础^[14]。栖息地的破碎化和丧失对生物多样性具有巨大而持续的负面影响，可以减少食物链的长度，改变野生动物间的相互作用^[15]。同时会影响其基因流，栖息地破碎化后，野生动物种群会分化成许多孤立的小种群，这些种群的遗传变异程度将降低，而种群间的遗传分化程度将升高，破碎化的栖息地会使得野生动物在分布、觅食、交配、迁徙时面临更多的障碍，从而使物种的扩散以及群落的建立受到限制，最终导致种群数量下降和遗传多样性的丧失^[16]，甚至造成野生动物灭绝。明确野生动物的栖息地分布是展开物种保护工作的前提，因此，为有效保护小灵猫，必须从栖息地入手，掌握其空间分布及与环境变量之间的关系，开展栖息地适宜性研究，明确小灵猫栖息地的需求，预测适宜栖息地的潜在分布，从而识别关键栖息地和优先保护区域，以便为制定科学有效的保护策略提供理论依据。

目前，已有近 10 种模型被应用于预测物种适宜栖息地分布，其中以生态位模型、机理模型和回归模型为主。Maxent 模型是目前广泛使用且精确度较高的生态位模型之一，其基于最大熵理论，使用物种分布点信息和环境变量来构建模型，以模拟潜在分布与现实分布之间的物种分布^[17]。Maxent 模型可通过相应的软件直接应用，操作性强。在物种分布点数据较少的情况下，依然能通过靠物种分布点数据和环境变量进行高精度的物种分布模拟^[18]，且随着物种分布点和环境变量的增加，其预测精度将进一步提高。此外，Maxent 模型能够自动生成受试者工作特征曲线 (ROC 曲线) 进行自检，ROC 曲线下面积 (AUC) 值可用于评估 Maxent 模型的精度^[19]。因此，Maxent 模型被广泛用于珍稀濒危物种如大熊猫^[20]、雪豹^[21]、岩羊^[22]、马麝^[23]等的栖息地适宜性评价。本研究参考 Maxent 应用研究领域的最新进展，优化软件参数，以精准预测小灵猫在高望界国家级自然保护区 (以下简称保护区) 的潜在分布。

1 研究区域

1.1 研究区域概况

高望界国家级自然保护区地处湖南省西北部，位于古丈县东北隅，总面积 17 169.8 公顷，地理坐标为 110°00'29"~110°14'26"E，28°38'00"~28°45'35"N。属亚热带山地季风湿润性气候，年平均气温约为 15.9℃，年降水量 1 440-1 640 mm，无霜期约 275 d，为多种植物生长提供了适宜的环境。保护区北与永顺小溪国家级自然保护区相接，东与怀化借母溪国家级自然保护区毗邻，因未受到第四纪冰川的侵袭，保护内生物多样性丰富，生态系统复杂，被评为具有国际意义的生物多样性关键区^[24]和全球重要生态区^[25]。

2 研究方法

2.1 红外相机数据获取

根据保护区的地形、植被类型和兽类活动路径等多种因素，并结合实地考察，除去村庄、农耕田、水域和交通等区域，在保护区布设红外相机 105 台。通常将红外相机安装在距离地面 20-80 cm 的树干上，相机设置 24 h 拍摄模式，并采用“照片+视频（2 拍照 + 1 视频）”的模式，拍照的时间间隔为 1s。相机安装完成后，记录相机放置的日期、经纬度、海拔、坡度、坡向、植被等生境数据。每 3 个月进行一次数据拷贝，并根据拍摄的照片及视频数据统计小灵猫活动节律的相关数据。

红外相机数据从野外收回后，使用 Bio-Photo V2.1 软件提取拍摄日期、时间、位点、气温等信息。根据照片及视频中动物的体型、体表斑点、背部纵纹、尾部环纹及尾基部斑纹排列形状等特征，依据《中国兽类图鉴》和《中国兽类野外手册》进行物种鉴定，并确定物种的独立有效照片。独立有效照片定义为：相同物种或不同物种的不同个体的连续照片；间隔时间超过 0.5 小时拍摄的相同物种个体的连续照片；相同物种个体的非连续照片^[26]。每张独立有效照片视为一次有效探测。

2.2 相对多度指数

相对多度指数 ((relative abundance index, RAI) 是衡量单位空间内动物数量多少的相对指标。用一个相机工作日 (24 h) 拍摄到的目标物种的独立有效照片数量来衡量^[27]，计算时一般以 100 个相机工作日为单位，即每 100 个相机工作日所拍摄到的目标物种的独立有效照片数，用以表示动物种群的相对数量^[28]。公式如下： $RAI=A/N \times 100$

2.3 夜行性分析

夜间相对丰富度指数 (night-time relative abundance index, INRA) 用来分析物种的昼夜习性。一般以 18:00-6:00 为夜间时间段。若 INRA 数值接近 13/24 (约为 0.54)，表明其活动没有明显的昼夜差别；若 $INRA > 13/24$ ，表明其活动以夜行性为主； $INRA < 13/24$ ，则表明其活动以昼行性为主^[29]。公式如下： $INRA=M/A$

2.4 日活动节律

日活动节律是指动物一天中活动强度随时间发生的周期性变化，是动物在昼夜环境变化的长期过程中形成的。目前，多用基于 R 软件的核密度估计方法来分析物种的日活动节律^[30]。将每次探测数据作为连续的日活动分布中的随机样本，描述目标物种在某个特定的时间段被发现的概率，横轴为时间，纵轴为该时间点上物种被发现到的概率，即核密度。运行过程中需要使用到 R 软件的“overlap”包，同时使用 densityPlot 函数绘制小灵猫核密度曲线图。

2.5 年活动节律

月相对丰富度指数 (monthly relative abundance index, MRI) 可反映小灵猫的年活动节律^[31]。公式如下： $MRI=M_i/A \times 100$ 。

A：观察期间保护区内小灵猫的独立有效照片总数；N：观察期间保护区内红外相机累计的总相机工作日；M：观察期间保护区内小灵猫在夜间时间段的独立有效照片数； M_i ：观察期间保护区 i 月小灵猫出现的独立有效照片数。

2.6 小灵猫分布点

为避免模型过度拟合，将所有的小灵猫分布点导入 Arcgis V10.8 软件中，利用缓冲区分析法进行筛选，以 0.5 km 作为缓冲半径，除去空间自相关的分布点^[32]。最终筛选出 52 个位点 (图 1)。

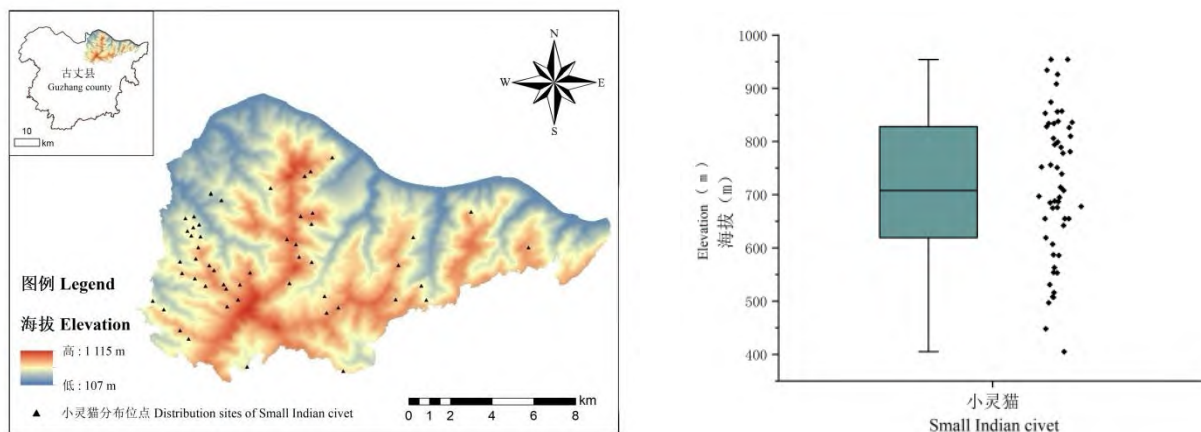


图 1 研究区示意图及小灵猫分布点的海拔范围

Fig. 1 Schematic map of the study area and elevation range of the distribution points of small Indian civet

2.7 环境变量的获取与筛选

有研究表明,小灵猫的分布记录对植被类型的选择性不强^[33],因此本研究选取以下 22 个环境变量(表 1):包括 bio1-bio19 等 19 个气候变量,从世界气候数据库 (<https://worldclim.org>) 下载 30 s 的生物气候数据,须在 Arcgis V10.8 软件中处理;地形变量从地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn>) 下载分辨率为 30 m×30 m 的数字高程模型 (DEM) 数据,在 Arcgis V10.8 软件中利用“表面分析”工具提取出海拔、坡度、坡向。

为保证模型的正常运行,需要在 Arcgis V10.8 中将所有环境变量的图层进行处理,使所有图层的栅格大小、像元行列数、栅格范围、要素类型、像元输出大小 (25 m) 及坐标系保持一致 (坐标系为 WGS_1984_UTM_Zone_49N)。

由于环境变量之间的相关性会使模型的精确度降低,因此需使用 Arcgis V10.8 软件将 52 个分布点和 22 个环境因子进行多值提取到点,并在 SPSS V26.0 软件中对 22 个环境变量进行 Pearson 相关性分析 (图 2),并结合 Maxent 初次模拟所得的各环境变量的贡献值进行筛选。如果两个变量之间的 Pearson 相关系数绝对值大于 0.8,则仅保留其在初次模拟中贡献率较大的变量^[34],同时剔除初次模拟结果中对模型贡献率为 0 的变量,最终筛选出 6 个主要环境变量用于评价高望界小灵猫的潜在生境适宜性,分别为海拔、bio3、bio16、bio15、坡向、bio13。

表 1 影响小灵猫分布的环境变量

Table 1 Environmental variables affecting the distribution of small Indian civet

环境变量 Environmental variables	单位 Unit	是否用于小灵猫建模 Weather to use small Indian civet for modeling	贡献值 Percent contribution	重要性 Permutation importance
Bio1 年平均气温 Annual mean temperature	℃	否 No	/	/
Bio2 平均气温日较差 Mean diurnal range	℃	否 No	/	/
Bio3 等温性 Isothermality	℃	是 Yes	29.2	27.8
Bio4 温度季节性变化 Temperature seasonality	/	否 No	/	/
Bio5 最暖月最高温度 Max temperature of warmest month	/	否 No	/	/
Bio6 最冷月最低温度 Min teperature of coldest month	℃	否 No	/	/
Bio7 年均温度变化范围 Temperature annual range	℃	否 No	/	/

Bio8 最湿季度平均温	Mean temperature of wettest quarter	℃	否 No	/	/
Bio9 最干季度平均温度	Mean temperature of driest quarter	℃	否 No	/	/
Bio10 最暖季度平均温度	Mean tmperature of warmest quarter	℃	否 No	/	/
Bio11 最冷季度平均温度	Mean temperature of coldest quarter	℃	否 No	/	/
Bio12 年均降水量	Annual precipitation	mm	否 No	/	/
Bio13 最湿月降水量	Precipitation of wettest month	mm	是 Yes	0.9	0.1
Bio14 最干月降水量	Precipition of driest month	mm	否 No	/	/
Bio15 降水量季节性系数	Precipitation seasonality	/	是 Yes	9.9	7.3
Bio16 最湿季度降水量	Precipitation of wettest quarter	mm	是 Yes	12.4	20.7
Bio17 最干季度降水量	Precipition of driest quarter	mm	否 No	/	/
Bio18 最暖季度降水量	Precipitation of warmest quarter	mm	否 No	/	/
Bio19 最冷季度降水量	Precipitation of coldest quarter	mm	否 No	/	/
坡向	Aspect	°	是 Yes	4.2	2.6
坡度	Slope	°	否 No	/	/
海拔	Elevation	m	是 Yes	43.4	41.5

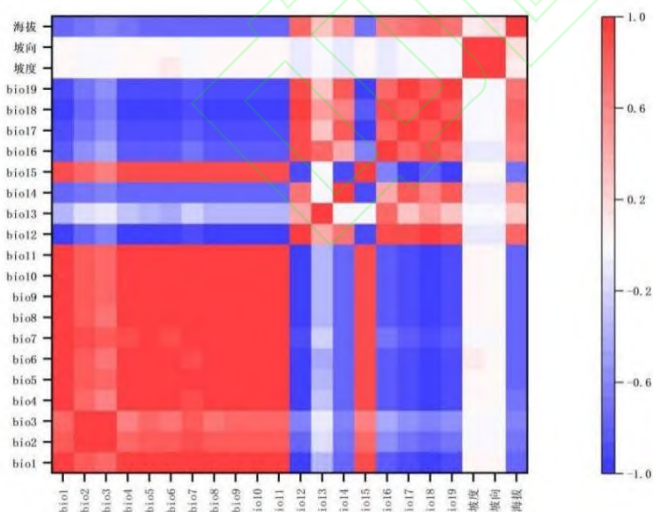


图 2 22 个环境变量的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of 22 environmental variables

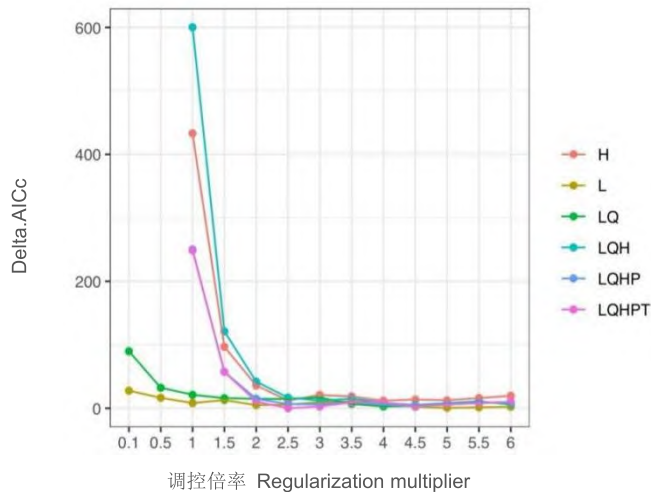


图3 ENMeval 数据包优化结果

Fig. 3 ENMeval Packet optimization results

2.8 Maxent 模型参数优化

每个物种都有其独特的生态适应能力,如果都使用模型的默认参数进行栖息地的预测,会使模型对采样偏差敏感,容易产生过度拟合,导致预测结果存在问题。调控倍率 (RM) 和特征组合 (FC) 是影响 Maxent 模型复杂度和预测精度的重要因素, RM 值决定了模型的复杂度, FC 决定了边际响应曲线的潜在形状^[35]。

为了提升 Maxent 模型的预测精度,本研究使用 R 语言的 ENMeval 数据包来调整模型的调控倍率 (RM) 和特征组合 (FC) 参数,通过测试不同参数条件下模型修正的 AIC 值 (AICc) 来评价模型的复杂度,选取最低复杂度的模型参数建模^[36-37]。

模型默认设置 RM = 1, 一般情况下, L (线性) 会一直在运行, Q (二次型) 在物种分布点大于 10 时选择, H (片段化) 在分布点大于 15 时选择, T (阈值型) 和 P (乘积型) 在分布点大于 80 时选择^[38]。本研究将 RM 设置为 0.5-4, 梯度间隔为 0.5, 采用 6 个特征组合 (FC), 即: H, L, LQ, LQH, LQHP 和 LQHPT。

根据 R 运行的结果,调整优化后的模型参数,在运行模型时,将 Maxent 的运行参数设置为 RM = 2.5, FC 为 LQHPT (图 3)。

2.9 模型训练与精度评估

采用 Jackknife 刀切法评估各环境变量对小灵猫分布影响的重要性和贡献率,使用“Create response curves”功能创建各环境变量的响应曲线以评估其对模型预测结果的影响。把 52 个小灵猫分布位点和 6 个主要环境因子数据导入 Maxent 软件中, FC 和 RM 按照优化后的参数设置,随机选取 25% 的分布点用于模型验证,其余 75% 分布点用于模型构建^[39]。为保证模型稳定性,对模型进行 10 次自举法 (bootstrap) 重复,使用 10 次模拟结果的平均值作为最终结果。

通过受试者工作特征曲线 (Relative Operating Characteristic, ROC 曲线) 判断模型预测结果的准确性,其中 ROC 曲线下的面积,即 AUC 值的大小代表模型预测结果的精确度^[40]。AUC 值取值范围为 0-1,评估标准为:当 $0 < AUC \leq 0.6$, 预测结果失败; $0.6 < AUC \leq 0.7$ 时,预测结果为较差;当 $0.7 < AUC \leq 0.8$ 时,预测结果为一般; $0.8 < AUC \leq 0.9$ 时,预测结果为较好;当 $0.9 < AUC \leq 1.0$ 时,预测结果为非常好^[41]。

2.10 潜在分布

为了确定适宜栖息地的面积和分布情况,在 Arcgis V10.8 软件采用自然间断点分级法将 10 次模型平均预测的结果进行重分类^[42],将小灵猫适宜栖息地预测结果划分为四类,即不适宜区、低适宜区、中适宜区、高适宜区,并得到小灵猫在保护区的潜在分布图。同时,利用 Arcgis V10.8 的空间统计功能,计算不同等级潜在分布区的面积及比例

3 结果

3.1 小灵猫的活动节律

2021 年至 2023 年,利用红外相机对保护区进行监测,累计 42 769 个相机工作日,小灵猫独立有效照片为 415 张。

结果显示,小灵猫的相对多度指数为 0.89,夜间相对丰富度指数为 0.96,表明其的活动具有明显的夜行性特征。一天

中，小灵猫的活动主要集中在傍晚到凌晨这一时间段，先后有两个活动高峰。日落之后，活动频率迅速增加，在 20:00-22:00 达到第一个高峰，之后活动频率开始降低，在凌晨 2:00-4:00 达到第二个小高峰，尽管在白天也有出现，但概率极低（图 4）。此外，小灵猫在春、夏、秋、冬等四个季节的日活动节律高峰时间基本一致。小灵猫的年活动规律存在季节性差异（图 5），其活动频率在夏季时最为频繁，其次是秋季，春季次之，冬季最少，12 月、1 月和 2 月活动频率为全年最低，在 3 月份逐渐上升，6 月份达到全年活动的峰值，之后开始逐渐降低。

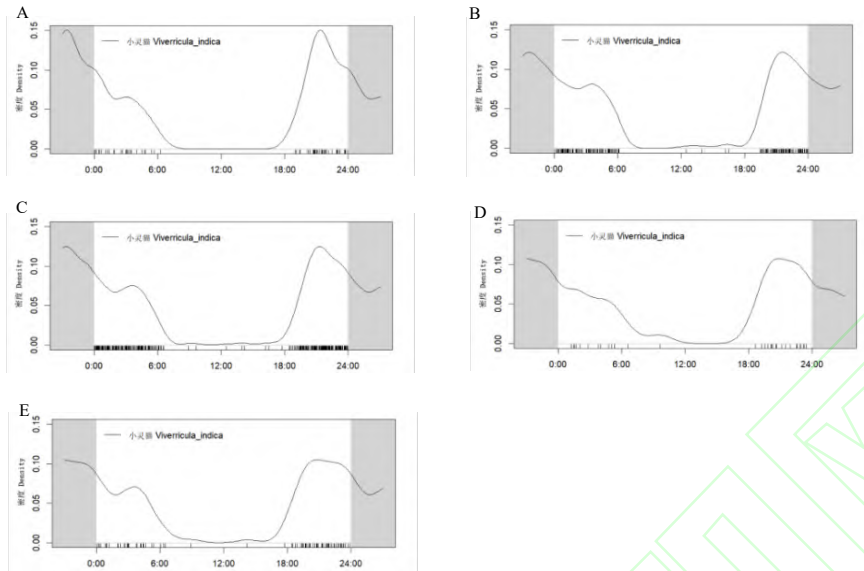


图 4 小灵猫在春季 (A)、夏季 (B)、秋季 (C)、冬季 (D) 和全年 (E) 的日活动节律

Fig. 4 Daily activity rhythms of small Indian civet in spring (A), summer (B), autumn (C), winter (D) and throughout the year (E)

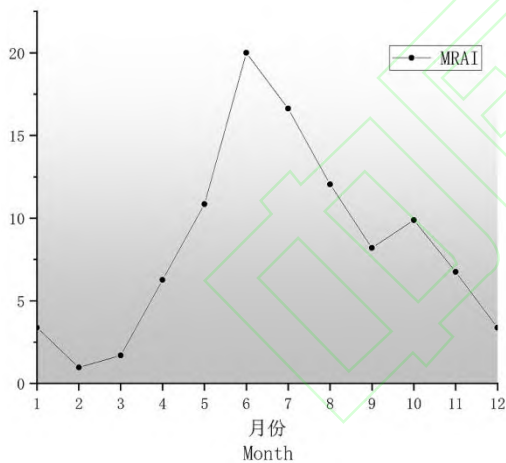


图 5 小灵猫的年活动节律

Fig. 5 Annual activity rhythms of small Indian civet

3.2 Maxent 模型结果检验

ROC 曲线检验结果表明（图 6），在自然因素条件下，重复 10 次运行结果得到的 AUC 值为 0.810 ± 0.039 ，表明 Maxent 模型预测结果较好，对小灵猫的潜在分布预测较准确。

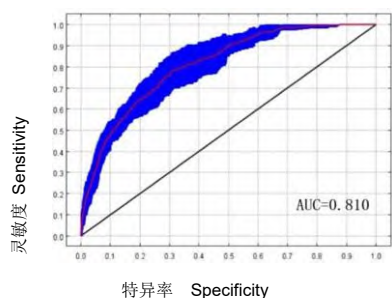


图6 Maxent 模型对小灵猫预测结果的 ROC 曲线

Fig. 6 ROC curve of Maxent model for prediction results of small Indian civet

3.3 环境变量重要性及响应曲线分析

根据各环境因子对 Maxent 模型的贡献率 (表 1), 海拔 (43.4%) 是小灵猫栖息地适宜性评价模型贡献率最大的环境变量, 其次是 bio3 (29.2%)、bio16 (12.4%) 和 bio15 (9.9%), 这四个变量累计贡献值达 94.9%。其中, 海拔对模型的相对贡献率最高(超过 40%), 表明海拔与小灵猫适宜栖息地分布之间存在较强的耦合关系, 对小灵猫栖息地选择的影响最大。

根据刀切法的结果 (图 7), 在使用单个环境变量建模时 (仅此变量), 海拔、bio3 和 bio15 对模型的增益效果显著, 表明这三个环境变量对高望界小灵猫潜在栖息地的影响较大。相对而言, 其他三个环境变量对模型的增益效果较小, 说明它们对高望界小灵猫潜在栖息地的影响有限。此外, 在去掉单个变量进行建模时 (除此变量), 海拔仍然是对模型预测效果影响最大的变量, 进一步证明了海拔在小灵猫潜在栖息地选择中的重要性。

对这 4 个重要影响变量进行响应曲线分析 (图 8), 在响应曲线中, 当物种分布概率大于 0.5 时, 其对应的环境因子变量适合物种的生长, 物种存在的可能性很高。结果显示, 海拔大于 600m 时, 随着海拔增高, 小灵猫出现概率越高; 小灵猫的栖息地适宜性响应在 bio15 (降水量季节性系数) 有一个峰值, 在一定范围内小灵猫出现概率随变量的升高而升高, 达到峰值后, 出现概率开始降低; bio16 (最湿季降水量) 与小灵猫出现概率呈负相关, 当 bio16 越高时, 小灵猫的出现概率越低; bio3 (等温性) 也与小灵猫出现概率呈负相关。

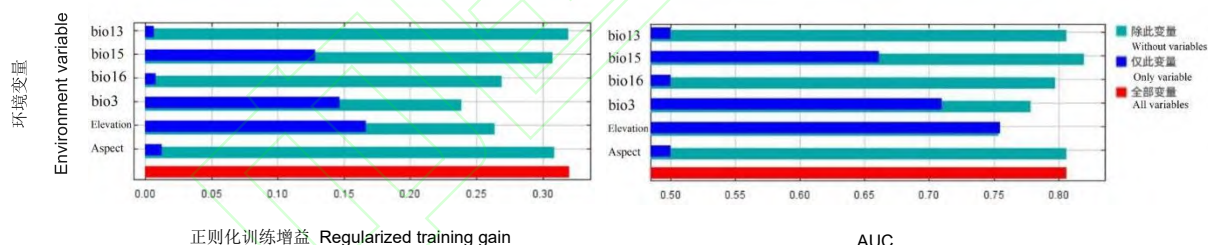


图7 环境因子刀切法检验结果

Fig. 7 The Jackknife test results of environmental factors

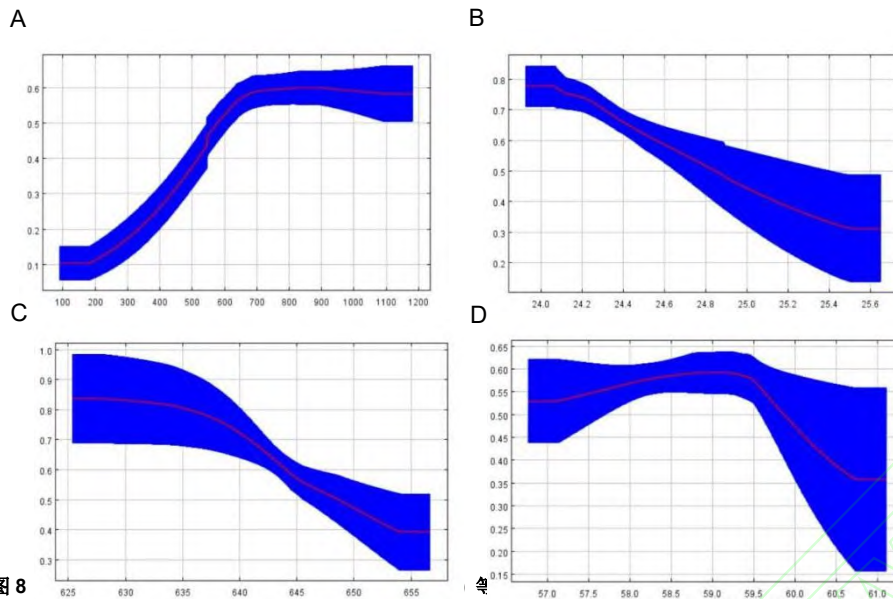


图 8 Response curve of four important environmental variables such as Elevation(A), bio3 (B), bio16 (C), and bio15 (D) to the distribution probability of small Indian civet

3.4 高望界保护区小灵猫的潜在分布

根据自然间断点分级法，栖息地划分如下：非适宜区 (<0.21)、低适宜区 ($0.21-0.37$)、中适宜区 ($0.37-0.52$)、高适宜区 (>0.52)。通过空间统计分析，得出高望界国家级自然保护区内小灵猫的潜在适宜区 (图 9) 面积为 126.80 km^2 ，占总面积的 73.85% 。其中，高适宜区 31.76 km^2 ，占总面积的 18.50% ；中适宜区 53.14 km^2 ，占总面积的 30.95% ；低适宜区 41.90 km^2 ，占总面积的 24.40% ，适宜栖息地主要分布在保护区内的核心区和部分缓冲区。

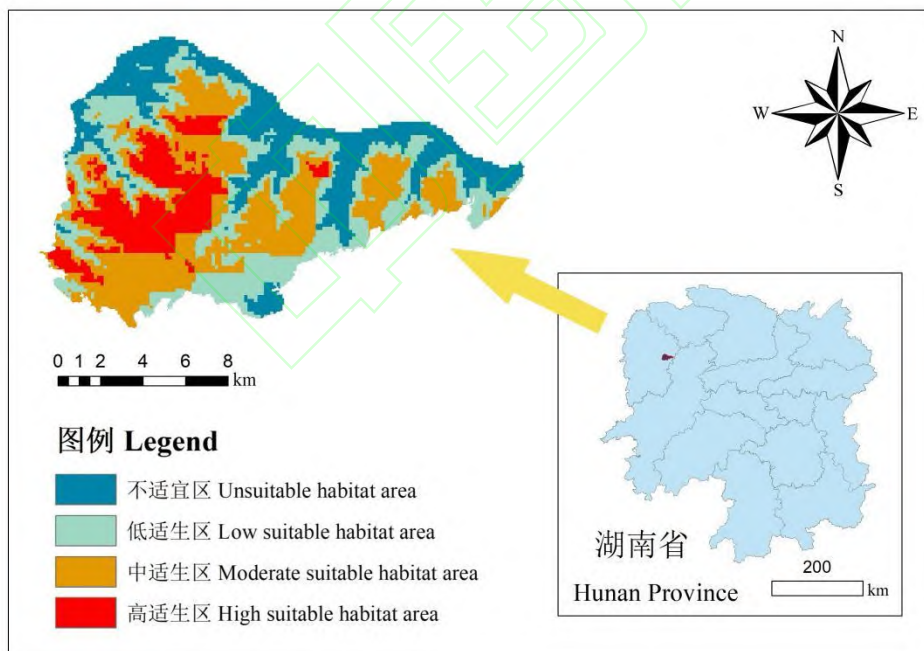


图 9 小灵猫在高望界保护区的潜在栖息地分布

Fig.9 Distribution of potential habitat of small Indian civet in Gaowangjie Reserve

4 讨论

自然保护区被公认为是濒危野生动物就地保护最有效的方式之一,保护区内的栖息地的质量是濒危野生动物种群增长的关键因素,可以从侧面反映保护区对于野生动物的保护成效^[43]。因此,栖息地的适宜性与小灵猫种群的生存与繁衍密切相关。本研究利用红外相机和 Maxent 模型对保护区内小灵猫的适宜栖息地进行了预测,结果显示 AUC 为 0.810,表明预测结果较好,能够较准确地反映小灵猫在该区域的适生区分布,并全面覆盖其在野外的经常出现的区域。

研究表明,在该保护区内,小灵猫表现出明显的夜行性活动习性,这与上海市区小灵猫活动节律的调查结果一致^[44]。小灵猫的夜间活动呈双峰型,主要集中在 2:00-4:00 和 20:00-22:00,而上海的小灵猫的活动高峰则出现在夜晚 21:00 和凌晨 2:00。相比于上海市区,高望界保护区地处山区,人口稀少,日落后人类活动强度较低,因此对小灵猫的活动影响较小,导致其活动高峰出现更早。小灵猫在夜间的活动以摄食为主,捕捉小型啮齿动物、蛙类、蛇类、昆虫等动物性食物,这类动物大多数都是夜间出现或活跃,小灵猫也会觅食果实、树根等植物性食物。此外,研究还发现小灵猫在不同季节的日活动高峰持续时长存在差异,其中冬季持续时间最长,这可能与食物丰富度有关,冬季气温低,且在高望界保护区下雪时部分地区会有积雪,食物被雪覆盖,需花费更多的时间觅食。有研究显示,小灵猫在 18:00-24:00 期间有摄食活动,其中 19:00-21:00 为摄食高峰期,而在 24:00-16:00 期间很少摄食或几乎不摄食^[45],这与高望界保护区小灵猫的日活动节律相符,表明其日活动节律高峰与摄食活动紧密相关。此外,小灵猫的年活动节律也显示出季节性差异,在夏季活动频率最高,这与其繁殖季节相吻合(小灵猫多在 5-6 月份产仔),需寻找食物抚育后代,活动频率明显高于其他季节。

本研究中,海拔、bio3、bio16 和 bio15 对小灵猫的栖息地选择有较大影响,说明是影响其生存的重要环境变量。结果显示,海拔是对小灵猫栖息地选择影响最大的环境变量,并且小灵猫更倾向于选择海拔 600 m 以上的地方,在保护区内该海拔段主要为阔叶林,植被丰富,食物和水资源充沛,为小灵猫的生存与繁衍提供了良好的环境;500 m 以下区域居住人口密集,活动频繁,干扰较大,对小灵猫造成一定的影响。同时,小灵猫主要栖于稀树灌丛、浓密的草丛、石洞、树洞等地方,高海拔地势可防止雨水和地下水侵入或淹没小灵猫的栖息的洞口。bio3 和 bio16 与小灵猫的出现概率呈负相关。bio3(等温性)的响应曲线显示,随着 bio3 增大,栖息地的适宜性下降,bio3 在 24-24.8 之间,环境的适宜性较高,适合小灵猫的生存.bio16(最湿季度降水量)也是影响小灵猫分布的重要因子,推断潮湿是影响小灵猫生存的限制性环境变量。有研究表明,小灵猫的摄食活动与湿度密切相关,该研究结果发现,小灵猫摄食的最适湿度在 75%左右,湿度过大时摄食量会降低,表明小灵猫适宜于较干燥的生活环境^[46],过多的降水会减少小灵猫的外出觅食活动,不利于小灵猫的生存繁衍.bio15(降水量季节性系数)也是影响保护区小灵猫分布的重要环境变量.bio15 有一个峰值,低于或高于这一区间小灵猫出现概率降低,说明不适合小灵猫的生存,小灵猫会回避降水量季节性系数过高或过低的环境,最适宜其生存的降水量变异系数范围为 58.0-59.5。

预测结果表明,适宜栖息地主要分布在保护区内的核心区和部分缓冲区。核心区位于高望界保护区的中心地带,人类活动干扰小,同时,这里保存着原生性森林植被和完整的季风常绿阔叶林生态系统,海拔较高,大部分区域海拔在 600 m 及以上,有研究表明在高海拔处(>800 m)拍摄到的鸟兽物种数达到 31 种,是许多珍稀动植物集中分布的地方^[47],这些区域可为小灵猫提供丰富的食物来源。相比之下,实验区存在村庄、农耕和道路,放牧、砍柴、采摘等人为活动频繁,小灵猫对这些人为干扰的适应性低,因为野生动物会主动回避人类活动,人类活动越频繁,野生动物的回避行为就越明显,并且小型食肉动物更容易受到人类活动的影响^[48]。同时,居民会投放鼠药、农药等,会杀死居民区的鼠类和农田、菜园里的昆虫,减少了这些区域小灵猫的食物来源,在一定程度上影响了小灵猫适宜栖息地的分布。

综合研究结果,提出以下建议:(1)小灵猫喜爱海拔较高、干燥、食物丰富的地方,根据预测结果,应加强核心区和缓冲区适宜栖息地的动植物种群保护,同时需控制和减少人类活动,如放牧、挖药、砍伐等,避免人类过度干扰造成非适宜栖息地面积的扩张,制定计划进行非适宜区的生境恢复和植被保育,有利于进行小灵猫栖息地的修复与种群保护。(2)在布设和回收红外相机时,发现一些不法偷猎分子在保护区内放置夹子、套绳等工具捕捉野生动物,严重地威胁到了保护区内各种野生动物的安全,需定期开展保护区的巡逻工作,坚决打击偷猎行为,对偷猎行为实施严厉惩罚,但是要避开小灵猫的活动高峰,以防小灵猫出现回避行为,影响小灵猫的正常活动。(3)保护区的居民遇到过小灵猫捕食家禽的情况,但是部分居民并不认识小灵猫,说明小灵猫和人类存在较高的冲突风险,需加强对保护区居民的宣传教育,开展公益宣传和知识讲座,提高居民对野生动物保护的意识,有利于小灵猫种群的保护。

5 结论

基于红外相机技术的活动节律研究结果表明,小灵猫相对多度指数为 0.89,夜间相对丰富度指数为 0.96,夜间活动呈双峰型,先后有两个活动高峰,分别在夜晚 20:00-22:00 和凌晨 2:00-4:00。此外,小灵猫的年活动规律存在季节性差

异,在夏季时最为频繁,6月份达到全年活动的峰值。基于 Maxent 模型预测高望界保护区小灵猫的栖息地研究结果表明,影响小灵猫分布的主导因子为海拔、等温性 (bio3)、最湿季度降水量 (bio16) 和降水量季节性系数 (bio15)。适宜栖息地主要分布在保护区内的核心区和部分缓冲区,这些区域从海拔高度、食物资源丰富度和干燥度等方面满足小灵猫的生态习性,为更好地保护小灵猫种群,需加强核心区和缓冲区高适生区的植被保护。

本研究明确了高望界保护区小灵猫的活动节律和影响小灵猫分布的重要环境变量,预测了其在高望界保护区的高适宜区适宜栖息地。但是局限于数据的可获得性,本研究仅考虑了气候和地形等 22 个环境变量,距道路距离、距河流距离、距居民点距离等未用于建模。后续研究将考虑更加全面的环境变量和生物因素如同域分布物种的影响,进一步调查小灵猫在高望界保护区内高、中、低适生区的分布规律,为小灵猫种群保护及完善保护区管理制度提供理论依据。

参考文献 [References]

- 1 国家林业和草原局. 国家重点保护野生动物名录, 2021[National Forestry and Grassland Administration. List of National Key Protected Wild Animals, 2021]
- 2 刘福荣. 谈中药灵猫香的研究[J]. 中药材, 1991 (4): 13-15[Liu FR. Talking about the research of Chinese medicine Civet[J]. *J Chin Med Mate*, 1991 (4): 13-15]
- 3 钟福生. 小灵猫的资源、开发利用现状与分布[J]. 湖南生态科学学报, 2001 (2): 24-26[Zhong FS. Resources, Exploitation and Utilization Status and Distribution of small Indian civets[J]. *J Hunan Ecol Sci*, 2001 (2): 24-26]
- 4 白小节, 肖文宏, 张廷跃, 刘邦友, 肖治术, 刘伟. 赤水桫欏自然保护区小灵猫及其潜在啮齿类猎物活动节律的季节适应格局[J]. 兽类学报, 2024, 44(3): 309-320[Bai XJ, Xiao WH, Zhang YY, Liu BY, Xiao ZS, Liu W. Seasonal variation patterns of daily activity rhythm of small Indian civets (*Viverricula indica*) and their potential rodent prey in Guizhou Chishui Alsophila National Nature Reserve, China[J]. *Acta Theriol Sin*, 2024, 44(3): 309-320]
- 5 徐如意. 小灵猫的人工养殖技术[J]. 农村实用技术, 2002 (6): 4-35[Xu RY. Captive Breeding Techniques for small Indian civets[J]. *J rural pract technol*, 2002 (6): 34-35]
- 6 杨东湘. 小灵猫摄食行为研究[J]. 中国新技术新产品, 2009 (18): 233-234[Yang XD. A study on the feeding behavior of small Indian civets[J]. *N Technol N Prod China*, 2009 (18): 233-234]
- 7 宾冬梅, 钟福生, 曾雷. 灵猫香的采取及开发利用[J]. 中国林副特产, 2001 (4): 34-36[Bin DM, Zhong FS, Zeng L. Adoption and Exploitation of Civet[J]. *For Prod Special China*, 2001 (4): 34-36]
- 8 Seri H, Chammem M, Ferreira LM, Kechnebou M, Khorchani T, Silva SR. Effects of seasonal variation, group size and sex on the activity budget and diet composition of the addax antelope[J]. *Afr J Range For Sci*, 2018, 35(2): 89- 100
- 9 肖治术, 肖文宏, 王天明, 李晟, 连新明, 宋大昭, 邓雪琴, 周岐海. 中国野生动物红外相机监测与研究: 现状及未来[J]. 生物多样性, 2022, 30(10): 234-259[Xiao ZS, Xiao WH, Wang TM, Li S, Lian XM, Song DZ, Deng XQ, Zhou QH. Wildlife monitoring and research using camera-trapping technology across China: The current status and future issues[J]. *Biodivers Sci*, 2022, 30(10): 234-259]
- 10 段升伟, 金吉辉, 张德祥, 于岱含, 金朝光, 杨士剑. 基于红外相机的云岭山脉南部地区花面狸的分布和活动节律研究[J]. 野生动物学报, 2024, 45(1): 8-15[Duan SW, Jin JH, Zhang DX, Yu DH, Jin CG, Yang SJ. Study on the Distribution and Activity Rhythm of Masked Palm Civets in Southern Yunling Mountains Based on Infrared Camera[J]. *Chin J Wildl*, 2024, 45(1): 8-15]
- 11 林炜明, 翁悦, 阿家, 王敏, 王琦, 王放. 四川八月林自然保护区大灵猫日活动节律、栖息地利用及其对人类活动响应的初步研究[J]. 兽类学报, 2023, 43(4): 364 - 377[Lin WM, Weng Y, A J, Wang M, Wang Q, Wang F. Preliminary research on daily activity rhythm, habitat use and response to human activity of large Indian civet (*Viverra zibetha*) in Bayuelin Nature Reserve, Sichuan Province[J]. *Acta Theriol Sin*, 2023, 43(4): 364-377]
- 12 Huang ZD, Bai Y, Alatalo JM, Yang ZQ. Mapping biodiversity conservation priorities for protected areas: a case study in Xishuangbanna Tropical Area, China[J]. *Biol Conserv*, 2020, 249: 108741
- 13 钟明, 侍昊, 安树青, 冷欣, 李宁. 中国野生动物生境适宜性评价和生境破碎化研究[J]. 生态科学, 2016, 35(4): 205-209[Zhong M, Shi H, An SQ, Leng X, Li N. The studies of wildlife habitat suitability assessment and habitat fragmentation in China[J]. *Ecol Sci*, 2016, 35(4): 205-209]
- 14 姜广顺, 李京芝. 中国濒危兽类栖息地评估与保护研究进展与展望[J]. 兽类学报, 2021, 41(5): 604-613[Jiang GS, Li JZ. Research advances and prepectives on habitat assessment and protection of endangered mammals of China[J]. *Acta Theriol Sin*, 2021, 41(5): 604-613]
- 15 Fahrig L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity[J]. *Annu Rev Ecol, Evol, and Syst*, 2023, 34: 487-515
- 16 程宏毅, 鲍毅新, 葛宝明, 郑祥, 胡一中. 栖息地片断化对动物种群间基因流的影响及其测定方法[J]. 生态学杂志, 2006 (7): 863-868[Cheng HY,

- Bao YX, Ge BM, Zheng X, Hu YZ. Effects of habitat fragmentation on gene flow among animal populations and their measuring methods[J]. *Chin J Ecol*, 2006 (7): 863-868]
- 17 Jiménez-Valverde A, Peterson AT, Soberón J, Overton JM, Aragón P, Lobo JM. Use of niche models in invasive species risk assessments[J]. *Biol Invasions*, 2011, **13**: 2785-2797
- 18 Hernandez PA, Graham CH, Master LL, Albert DL. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods[J]. *Ecography*, 2006, **29**: 773-785
- 19 Hanley JA, Mcneil BJ. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve[J]. *Radiology*, 1982, **143**: 29
- 20 罗言云, 胡泽南, 王倩娜, 谭小昱. 气候变化背景下大熊猫生境适宜性的时空演变——以大熊猫国家公园岷山片区为例[J]. *生态学报*, 2024, **44**(18): 8165-8174[Luo YY, Hu ZN, Wang QN, Tan XY. Spatio-temporal evolution of giant panda habitat suitability in climate change scenarios: a case study of Min Mountains area of the Giant Panda National Park[J]. *Acta Ecol Sin*, 2024, **44**(18): 8165-8174]
- 21 李芳菲, 李丽, 吴巩胜, 袁磊, 孟春林, 国洪艳, 周跃, 马存新, 高雅月, 薛亚东, 李迪强, 代云川. 基于最大熵模型的青海祁连山雪豹生境适宜性评价[J]. *生态学报*, 2023, **43**(6): 2202-2209[Li FF, Li L, Wu GS, Yuan L, Meng CL, Guo HY, Zhou Y, Ma CX, Gao YY, Xue YD, Li DQ, Dai YC. Habitat suitability assessment of *Panthera uncia* in Qilian Mountains of Qinghai based on MAXENT modeling[J]. *Acta Ecol Sin*, 2023, **43**(6): 2202-2209]
- 22 刘振生, 高惠, 滕丽微, 苏云, 王晓勤, 孔芳毅. 基于 MAXENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价[J]. *生态学报*, 2013, **33**(22): 7243-7249[Liu ZS, Gao H, Ten LW, Su Y, Wang XQ, Kong YF. Habitat suitability assessment of blue sheep in Helan Mountain based on MAXENT modeling[J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(22): 7243-7249]
- 23 林宏东, 郑启泽, 申立泉, 王功, 刘瑞, 张学炎, 祁军, 张爱萍, 孟秀祥. 基于 MaxEnt 模型的兴隆山保护区野生马麝秋季生境适宜性评价[J]. *生态学杂志*, 2024, **43**(1): 299-304[Lin HD, Zheng QZ, Shen LQ, Wang G, Liu R, Zhang YJ, Qi J, Zhang AP, Meng XX. Assessment of habitat suitability in autumn for wild alpine musk deer in Xinglongshan National Nature Reserve with MaxEnt model[J]. *Chin J Ecol*, 2024, **43**(1): 299-304]
- 24 《中国生物多样性国情研究报告》编写组. 中国生物多样性国情研究报告, 北京: 中国环境科学出版社, 1998[Compilation Group of China's Biodiversity: A country Study, China's Biodiversity: A country Study[M], Beijing: China Environmental Science Press, 1998]
- 25 Olson D, Dinerstein E. The Global 200: A representation approach to conserving the Earth's most biologically valuable ecoregions[J]. *Conserv Biol*, 1998, **12**: 502-515
- 26 O'Brien TG, Kinnaird MF, Wibisono HT. Crouching tigers, hidden prey: Sumatran tiger and prey populations in a tropical forest landscape[J]. *Anim Conserv*, 2023, **6**: 131-139
- 27 陈立军, 肖文宏, 肖治术. 物种相对多度指数在红外相机数据分析中的应用及局限[J]. *生物多样性*, 2019, **27**(3): 243-248[Chen LJ, Xiao WH, Xiao ZS. Limitations of relative abundance indices calculated from camera-trapping data[J]. *Biodivers Sci*, 2019, **27**(3): 243-248]
- 28 Azlan JM, Sharma DSK. The diversity and activity patterns of wild felids in a secondary forest in Peninsular Malaysia[J]. *Oryx*, 2006, **40**: 36-41
- 29 贾晓东, 刘雪华, 杨兴中, 武鹏峰, Melissa Songer, 蔡琼, 何祥博, 朱云. 利用红外相机技术分析秦岭有蹄类动物活动节律的季节性差异[J]. *生物多样性*, 2014, **22**(6): 737-745[Jia XD, Liu XH, Yang XZ, Wu PF, Melissa S, Cai Q, He XB, Zhu Y. Seasonal activity patterns of ungulates in Qinling Mountains based on camera-trap data[J]. *Biodivers Sci*, 2014, **22**(6): 737-745]
- 30 陈立军, 束祖飞, 肖治术. 应用红外相机数据研究动物活动节律——以广东车八岭保护区鸡形目鸟类为例[J]. *生物多样性*, 2019, **27**(3): 266-272[Chen LJ, Shu ZF, Xiao ZS. Application of camera-trapping data to study daily activity patterns of Galliformes in Guangdong Chebaling National Nature Reserve[J]. *Biodivers Sci*, 2019, **27**(3): 266-272]
- 31 Wen XY, Cheng XT, Dong YQ, Wang QS, Lin X. Analysis of the activity rhythms of the great gerbil (*Rhombomys opimus*) and its predators and their correlations based on infrared camera technology[J]. *Global Ecol Conserv*, 2020, **24**: e01337
- 32 王秋生, 温璐, 苏旭坤. 气候变化背景下青藏高原藏羚羊生境时空格局演变[J]. *生态学报*, 2022, **42**(22): 8985-8993[Wang QS, Wen L, Su XK. Spatial-temporal pattern changes of Tibetan antelope's habitats on the Qinghai-Tibetan Plateau under climate change scenarios[J]. *Acta Ecol Sin*, 2022, **42**(22): 8985-8993]
- 33 Jennings AP, Veron G. Predicted distributions and ecological niches of 8 civet and mongoose species in Southeast Asia[J]. *J Mammal*, 2011, **92**, 316-327
- 34 Yang XQ, Kushwaha SPS, Saran S, Xu JC, Roy PS. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills[J]. *Ecol Eng*, 2013, **51**: 83-87
- 35 刘晶晶, 张舟, 张权, 姜琳琳, 杨朝辉. 基于参数优化 Maxent 模型的气候变化下青头潜鸭(*Aythya baeri*)在长江流域的潜在适生区预测[J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 1-18[Liu JJ, Zhang Z, Zhang Q, Jiang LL, Yang ZH. Predicting the Potential Suitable Areas of *Aythya baeri* in the Yangtze

River Basin under the Climate Change Scenario Based on Parameter Optimization Maxent Model[J]. *J Ecol Rural Environ*, 2024, 1-18]

36 Muscarella R, Galante PJ, Soley-Guardia M, Boria RA, Kass JM, Uriarte M, Anderson RP, McPherson, Jana. ENMeval: An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for MAXENT ecological niche models[J]. *Methods Ecol Evol*, 2014, **5**: 1198-1205

37 朱耿平, 乔慧捷. Maxent 模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响[J]. 生物多样性, 2016, **24**(10): 1189-1196[Zhu GP, Qiao HJ. Effect of the Maxent model's complexity on the prediction of species potential distributions[J]. *Biodivers Sci*, 2016, **24**(10): 1189-1196]

38 Elith J, Phillips SJ, Hastie T, Dudík M, Chee YE, Yates CJ. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists[J]. *Divers Distrib*, 2014, **17**: 43-57

39 高浩翔, 申立泉, 刘瑞, 王功, 张爱萍. 基于最大熵模型的野生马麝夏季生境适宜性研究[J]. 生态学报, 2023, **43** (1): 441-448[Gao HX, Shen LQ, Liu R, Wang G, Zhang AP, Chen L, Zhang YZ, Zhang XY, Qi J, Wang CL, Geng S, Zhou X, Lv QX, Wu JY, Meng XX. Summer habitat suitability of wild alpine musk deer based on MaxEnt model[J]. *Acta Ecol Sin*, 2023, **43** (1): 441-448]

40 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法[J]. 生态学报, 2015, **35**(2): 557-567[Xu ZL, Peng HH, Peng SZ. The development and evaluation of species distribution models[J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(2): 557-567]

41 Shcheglovitova M, Anderson R P. Estimating optimal complexity for ecological niche models: a jackknife approach for species with small sample sizes[J]. *Ecol Modell*, 2013, **269**: 9-17

42 刘轲, 刘炎林, 李晟. 欧亚猞猁在中国的分布现状与适宜栖息地预测[J]. 兽类学报, 2023, **43**(6): 652-663[Liu K, Liu YL, Li S. The current distribution and prediction of suitable habitat of Eurasian lynx(Lynx lynx) in China[J]. *Acta Theriol Sin*, 2023, **43**(6): 652-663]

43 关博, 崔国发, 朴正吉. 自然保护区野生动物保护成效评价研究综述[J]. 世界林业研究, 2012, **25**(6): 40-45[Guan B, Cui GF, Piao ZJ. A Review of Assessment of Wildlife Conservation Effectiveness in Nature Reserve[J]. *World For Res*, 2012, **25**(6): 40-45]

44 王怡涵, 赵倩倩, 刁奕欣, 顾伯健, 翁悦, 张卓锦, 陈泳滨, 王放. 基于红外相机调查上海市区小灵猫的活动节律、栖息地利用及其对人类活动的响应[J]. 生物多样性, 2023, **31**(2): 222-294[Wang YH, Zhao QQ, Diao YX, Gu BJ, Weng Y, Zhang ZJ, Chen YB, Wang F. Diel activity, habitat utilization, and response to anthropogenic interference of small Indian civets (*Viverricula indica*) in Shanghai urban areas based on camera-trapping[J]. *Biodivers Sci*, 2023, **31**(2): 222-294]

45 罗冬梅. 我国小灵猫的生物学特性及驯化研究现状[J]. 湖南生态科学学报, 2007 (4): 4-7[Luo DM. Advance in Biological Characteristics and Domestication of *Viverrula Indica* Desmarest in China[J]. *J Hunan Ecol Sci*, 2007 (4): 4-7]

46 钟福生, 刘振湘. 温湿度对小灵猫摄食活动及摄食量的影响[J]. 兽类学报, 2002 (3): 233-236[Zhong FS, Liu ZS. Effect of temperature and humidity on feeding activities and quantities in small Indian civets[J]. *Acta Theriol Sin*, 2002 (3): 233-236]

47 刘芳, 宿秀江, 李迪强, 王本忠, 张自亮. 利用红外相机调查湖南高望界国家级自然保护区鸟兽多样性[J]. 生物多样性, 2014, **22**(6): 779-784[Liu F, Su XJ, Li DQ, Wang BZ, Zhang ZL. Using camera trap to investigate animal diversity in Hunan Gaowangjie National Nature Reserve[J]. *Biodivers Sci*, 2014, **22**(6): 779-784]

48 上官周怡, 冯超凡, 王佳宁, 万冬梅, 张雷. 基于 MaxEnt 模型的辽西地区亚洲狗獾生境适宜性分析[J]. 兽类学报, 2024, **44**(5): 611-621[Shangguan ZY, Feng CF, Wang JN, Wan DM, Zhang L. Habitat suitability analysis of Asian badgers (*Meles leucurus*) in the western Liaoning Province based on MaxEnt model[J]. *Acta Theriol Sin*, 2024, **44**(5): 611-621]