

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0096

万雅琼, 李佳琦, 徐海根, 等. 贵州梵净山和赤水桫欏国家级自然保护区 4 种大中型兽类空间占域研究[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(12): 1609-1615.

WAN Ya-qiong, LI Jia-qi, XU Hai-gen *et al.* Study on the Spatial Occupancy Behavior of Four Kinds of Large and Medium-Sized Mammals in the Fanjingshan and Chishui *Alsophila* National Nature Reserves, Guizhou, China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(12): 1609-1615.

贵州梵净山和赤水桫欏国家级自然保护区 4 种大中型兽类空间占域研究

万雅琼¹, 李佳琦¹*, 徐海根¹, 李 晟², 张明明³, 刘 伟⁴ (1. 生态环境部南京环境科学研究所/国家环境保护生物安全重点实验室, 江苏 南京 210042; 2. 北京大学生命科学学院, 北京 100871; 3. 贵州大学林学院/生物多样性与自然保护研究中心, 贵州 贵阳 550025; 4. 中国科学院动物研究所农业虫鼠害综合治理研究国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 占域模型可用于大中型兽类的红外相机研究, 主要目的是了解某个物种占据研究区域或适宜栖息地的比例、空间分布, 同时可以评估环境因素对物种占域状态的影响。2019 年 4 月至 2019 年 7 月, 在梵净山国家级自然保护区和赤水桫欏国家级自然保护区分别布设红外相机 40 台, 其中梵净山拍摄到 4 目 12 科 22 种兽类, 赤水拍摄到 4 目 10 科 19 种兽类。2 个保护区的大中型兽类中相对多度指数较高的物种均为藏酋猴(*Macaca thibetana*)、野猪(*Sus scrofa*)、小麂(*Muntiacus reevesi*)和毛冠鹿(*Elaphodus cephalopus*)。对以上 4 个物种进行占域模型分析, 了解物种占域状况及其影响因素。结果显示, 藏酋猴、野猪、小麂和毛冠鹿占域率分别为 0.67、0.53、0.37、0.58, 探测率分别为 0.20、0.21、0.31、0.27。藏酋猴的占域受海拔和坡度的负向影响, 受灌木盖度的正向影响; 野猪的占域与灌木盖度和坡度呈负相关, 与海拔高度呈正相关, 但相关性较小; 小麂的占域与海拔和灌木盖度呈负相关, 其中海拔影响较小, 坡度对其占域有一定正向影响; 毛冠鹿的占域与灌木盖度呈正相关, 与坡度呈负相关。最后笔者进一步总结了占域模型的应用范围及研究中存在的问题, 以期将该方法应用于更广泛的研究区域。

关键词: 大中型兽类; 红外相机; 占域模型; 占域率; 探测率; 生境使用

中图分类号: X36 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2021)12-1609-07

Study on the Spatial Occupancy Behavior of Four Kinds of Large and Medium-Sized Mammals in the Fanjingshan and Chishui *Alsophila* National Nature Reserves, Guizhou, China. WAN Ya-qiong¹, LI Jia-qi¹*, XU Hai-gen¹, LI Sheng², ZHANG Ming-ming³, LIU Wei⁴ (1. Nanjing Institute of Environmental Sciences/ National Key Laboratory of Biosafety, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 2. School of Life Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. College of Forestry, Research Center of Biodiversity and Nature Conservation in Guizhou University, Guiyang 550025, China; 4. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodent, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The occupancy model can be used for infrared camera research on large and medium-sized mammals. The model is aimed to understand the proportion and spatial distribution of the area occupied by a species or its suitable habitat, and to assess the impact of environmental factors on the species occupancy. In this study, 40 infrared cameras were deployed for monitoring in Fanjingshan and Chishui *Alsophila* National Nature Reserves from April to July 2019, respectively. Subsequently, 22 mammal species within 4 orders and 12 families, and 19 mammal species within 4 orders and 10 families were captured in the two nature reserves, respectively. The survey show that the relative abundance index of large and medium-sized mammals in both the two reserves was higher in the Tibetan macaque (*Macaca thibetana*), wild boar

收稿日期: 2021-02-21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0507206); 生态环境部南京环境科学研究所基本科研业务专项(GYZX200302); 生态环境部生物多样性调查、观测和评估项目

*通信作者 E-mail: lijiaqihao@163.com

(*Sus scrofa*), Reeves' muntjac (*Muntiacus reevesi*) and tufted deer (*Elaphodus cephalophus*). Furthermore, the occupancy status and influencing factors of the above four species were analyzed by using the occupancy model. The results show that the occupancy rates of the four species were 0.67, 0.53, 0.37, 0.58, and the detection probabilities were 0.20, 0.21, 0.31, 0.27, respectively. The occupancy of Tibetan macaque was negatively affected by elevation and slope, and positively affected by shrub coverage. The wild boar was negatively affected by shrub coverage and slope, but positively affected by elevation. The Reeves' muntjac was negatively correlated with shrub coverage, and slightly with nelevation, but positively affected by slope in some extent. The tufted deer was positively affected by shrub coverage, and negatively affected by slope. Finally, the author further summarized the application scope of the occupancy model and the existing problems in the researches, and it is expected that this method could be widely applied in the future researches.

Key words: large and medium-sized mammals; camera-trapping; occupancy models; occupancy rate; detection probability; habitat use

红外相机技术是一种调查大中型兽类多样性的有效方法,特别是对行踪诡秘、数量稀少、外形易于识别的地栖大中型兽类非常有效^[1]。因此,红外相机被广泛应用于野生动物自然分布状况、种群密度、相对多度和活动节律等方面的调查与研究^[2]。但对于哺乳动物红外相机观测来说,最关键的问题之一是如何进行数据分析,以计算出科学、可靠的指标用于动物种群或群落动态的评估。占域模型(site occupancy model)是近年来逐步得到广泛应用的一种新的模型方法,该模型最早由 MACKENZIE 等^[3]提出,可以在“不完美探测”(即探测概率 <1)的情况下,根据物种调查中的出现/未出现数据,对目标物种的空间占有率及其动态变化进行估算。占域研究的主要目的是了解某个物种占据研究区域或适宜栖息地的比例、空间分布,同时可以评估环境因素对物种占域状态的影响。模型中的主要评估参数是占域率(occupancy rate)和探测率(detection probability),占域率可作为对目标物种空间分布及扩散模式估计的参考^[4]。近年,占域模型广泛应用于生物多样性观测数据分析^[5-6]。在我国,占域模型主要用于大中型兽类的红外相机研究^[7-8]。

梵净山国家级自然保护区(以下简称“梵净山保护区”)海拔为 500~2 570 m,分布着低中山、低山和丘陵等各种地貌类型^[9]。保护区已记录脊椎动物 32 目 100 科 281 属 450 种,其中兽类 24 科 57 属 80 种^[10],是黔金丝猴(*Rhinopithecus brelichi*)在全球的唯一栖息地,并拥有藏酋猴(*Macaca thibetana*)、黑熊(*Ursus thibetanus*)、毛冠鹿(*Elaphodus cephalophus*)等珍稀物种^[11]。赤水桫欏国家级自然保护区(以下简称“赤水保护区”)地处贵州高原向四川盆地的过渡地带,为独特的丹霞地貌,海拔为 290~1 730 m。保护区自 1984 年建立以来,共记录到陆生脊椎动物 28 目 81 科 211 属 296 种,其中兽类 8

目 21 科 45 属 60 种^[12]。近些年,随着我国各大自然保护区对红外相机的广泛应用,获得了大量的保护区生物多样性本底数据。已有研究对梵净山和赤水保护区内红外相机调查的兽类物种编目进行了报道^[13-14],但是对物种分布状况及其与环境的关系并未进行更深入的研究和分析。

2 个保护区均位于西南喀斯特丹霞地貌的北部区域,涵盖较为多样的海拔生境类型、植被类型等微生境,其中大中型兽类物种组成极为相似。因此,笔者以梵净山和赤水保护区为例,对该区域内分布较多的藏酋猴、野猪(*Sus scrofa*)、小麂(*Muntiacus reevesi*)、毛冠鹿 4 种大中型兽类物种进行占域模型的分析,了解物种分布、占域状况及其影响因素,以期将该方法应用于更广泛的研究区域。

1 研究方法

1.1 数据采集

于 2019 年 4 月至 2019 年 7 月,在梵净山保护区和赤水保护区分别布设 40 台红外相机(图 1)。利用 ArcGIS 10.0 软件将研究区域划分成若干个 1 km×1 km 的网格,结合不同生境、地形地貌、工作人员安装与维护红外相机的通行可达性、野生动物活动痕迹等因素,选择人为干扰较小、野生动物活动痕迹较多的林间开阔地所在网格布设红外相机。在选定的每个网格中心位置安装 1 台红外相机,并保证相邻相机之间的距离不少于 500 m^[15]。相机安装点位覆盖了主要生境类型,其中常绿阔叶林 31 台,常绿落叶阔叶混交林 27 台,落叶阔叶林 3 台,针阔混交林 14 台,竹林 4 台,灌丛 1 台。相机安装处海拔最低 396 m,最高 2 260 m,海拔 <500 m 区域 5 台,500~1 000 m 49 台, $>1 000$ ~1 500 m 22 台, $>1 500$ ~2 000 m 2 台, $>2 000$ m 2 台。

相机选用猎科 LTL6210MC 和东方红鹰 E1B 型号,设置为照片模式,每次触发连拍 3 张,触发时间间

隔为 1 s, 灵敏度设置为“中”。每台相机配置 12 节南孚碱性电池和 1 张 32 G 存储卡, 相机安装后 2~3 个月检查 1 次, 更换相机电池和存储卡, 监测期间共收集 2 次数据。

1.2 数据整理

对收集的照片数据进行分类整理, 筛选有效照片, 并鉴定拍摄到的兽类物种。物种鉴定主要参照文献 [16-17], 物种分类系统主要参照文献 [18], 物种保护等级参考《国家重点保护野生动物名录》〔国家林业和草原局、农业农村部公告(2021 年第 3 号)〕,

<http://www.forestry.gov.cn/>〕, IUCN 红色名录级别参考 IUCN 物种红色名录数据库 (<http://www.iucnredlist.org/>)。

以每台相机在野外持续工作 24 h 作为 1 个有效相机工作日 (camera day, CD), 将单个位点上 30 min 内拍摄到的同一物种的多张照片合并记为该物种的 1 次有效探测。在统计各物种有效探测数的基础上, 计算相对多度指数 (relative abundance index, RAI, I_{RA}) [19]。单个物种 RAI 值的计算方法为 $I_{RA} = \text{有效探测数} / \text{总有效相机工作日} \times 1000$ 。

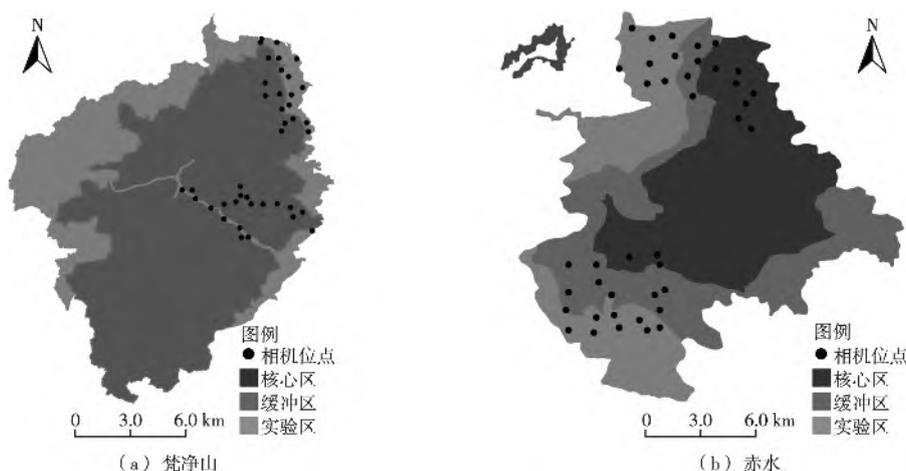


图 1 梵净山保护区和赤水保护区红外相机布设

Fig. 1 Distribution of infrared cameras in Fanjingshan National Nature Reserve and Chishui National Nature Reserve

1.3 占域模型分析

应用 PRESENCE 软件开展占域研究 [3]。选择 2019 年 4—7 月数据建立每个位点的探测历史。以 10 d 作为 1 次重复调查, 重复采样次数为 12 次。将以上照片数据转化为以采样单元 (即每台相机) 为行名、以重复调查次数为列名的“0”和“1”格式的数据, “0”代表未探测到目标物种, “1”代表探测到目标物种, 生成各物种的探测历史矩阵 (detection history matrix) [20]。

以海拔 (elevation, ELE)、生境类型 (habitat type, HAB)、植被类型 (vegetation type, VEG)、灌木盖度 (shrub coverage, COV)、坡度 (slope, SLO) 和到水源地距离 (distance to the source of water, WAT) 作为位点协变量, 以海拔、灌木盖度、坡度和调查时间 (survey time, DAY) 作为探测协变量, 分别建立各物种的单物种单季节占域模型。所有位点协变量数据均在布设红外相机时记录。在建立模型之前, 将连续变量进行 Z 转化处理, 从而压缩变量、减少离散 [21-22]。所有变量均符合正态分布, 运用 Pearson 相关分析检验变量

间的相关性, 然后将不显著相关的变量随机组合建立候选模型。基于赤池信息准则 (AIC) 值对候选模型进行排序, 选择 $\Delta AIC \leq 2$ 的模型作为最优模型 [23]。如果最优模型多于 1 个, 则采用模型加权平均的方法对结果进行综合分析 [24], 同时选择 $\Delta AIC \leq 2$ 的模型进行模型平均, 得到协变量估计值 [25]。

2 研究结果

2.1 调查结果

80 台相机共累计获得 6 213 个有效相机工作日数据, 共拍摄鉴定出兽类物种 4 目 12 科 27 种, 包括灵长目 1 科 3 种、食肉目 5 科 12 种、偶蹄目 3 科 5 种、啮齿目 3 科 7 种。梵净山保护区拍摄到 4 目 12 科 22 种兽类, 其中拍摄到的黔金丝猴为国家 I 级重点保护野生动物, 也是梵净山保护区的特有种; 国家 II 级重点保护野生动物有 7 种, 分别为藏酋猴、猕猴 (*Macaca mulatta*)、黑熊、斑林狸 (*Prionodon pardicolor*)、豹猫 (*Prionailurus bengalensis*)、中华鬃羚 (*Capricornis milneedwardsii*) 和毛冠鹿。在 IUCN 物种红色名录中, 被

评为濒危(EN)级别的1种,即黔金丝猴;被评为易危(VU)级别的1种,即黑熊;被评为近危(NT)级别的有3种,即藏酋猴、中华鬃羚和毛冠鹿。梵净山保护区记录的22种兽类物种中,相对多度指数排前6位的依次为藏酋猴(RAI值57.74)、野猪(RAI值40.10)、小麂(RAI值30.86)、黔金丝猴(RAI值19.95)、毛冠鹿(RAI值13.65)、中国豪猪(*Hystrix hodgsoni*)(RAI值10.29)。

赤水保护区拍摄到兽类物种4目10科19种,其中,国家II级重点保护野生动物有6种,分别为藏酋猴、猕猴、小灵猫(*Viverricula indica*)、豹猫、中华鬃羚和毛冠鹿。在IUCN物种红色名录中,被评为近危(NT)级别的有4种,即藏酋猴、中华鬃羚、毛冠鹿和复齿鼯鼠(*Trogopterus xanthipes*)。赤水保护区记录的19种兽类物种中,相对多度指数排前6位的依次为毛冠鹿(RAI值100.30)、小麂(RAI值78.68)、藏酋猴(RAI值69.22)、赤腹松鼠(*Callosciurus erythraeus*)(RAI值49.73)、鼬獾(*Melogale moschata*)(RAI值44.64)、野猪(RAI值28.25)。

2.2 模型分析结果

对藏酋猴、野猪、小麂和毛冠鹿4种大中型兽类进行占域模型分析。2019年4—7月有79台相机正常工作(梵净山保护区40台、赤水保护区39台),其中,共有49个相机位点拍摄到藏酋猴,39个位点拍摄到野猪,25个位点拍摄到小麂,46个位点拍摄到毛冠鹿,网格实际占域率分别为0.62、0.49、0.32、0.58。协变量相关性检验结果显示,海拔高度和到水源地距离存在显著相关性(表1),因此去掉1个变量,将剩余变量用于模型构建与分析。

表1 连续变量间的相关性检验结果

Table 1 Correlation coefficients of continuous variables for the four mammal species

变量	相关系数 <i>r</i>		
	海拔	灌木盖度	坡度
灌木盖度	0.196		
坡度	-0.146	-0.074	
到水源地距离	0.452**	-0.035	-0.106

**表示在0.01水平(双侧检验)上显著相关。

通过模型选择,藏酋猴最优模型共7个。模型平均结果显示,藏酋猴的占域率 ψ 为0.67(标准误(SE值)为0.10),探测率 p 为0.20(SE值为0.06)。累积模型权重大于0.5的占域率协变量分别为海拔和灌木盖度(表2),累积权重大于0.5的探测率协变量为海拔以及调查时间的异质性。占域率影响因子分析结果显示,藏酋猴的占域率受海拔($\beta=-0.07$)和坡度

($\beta=-0.11$)的负向影响,而灌木盖度对其占域有正向影响(表3)。结合变量权重,在海拔越低、灌木盖度越大的区域,藏酋猴的占域率越高。探测率影响因子显示,海拔、灌木盖度和坡度均对其探测率有负向影响。

野猪的占域分析选出14个模型作为最优模型(附录1),模型平均结果显示,野猪占域率为0.53(SE值为0.08),探测率为0.21(SE值为0.07)。累积模型权重大于0.5的占域率协变量分别为植被类型和坡度(表2),此外生境权重为0.49。累积权重大于0.5的探测率协变量为调查时间的异质性。占域率影响因子分析显示,野猪的占域率与灌木盖度和坡度呈现相关,其中灌木盖度影响较小,与海拔高度呈正相关,但相关性较小(表3)。探测率的影响因子分析结果显示,海拔和坡度对其探测率有一定的负向影响,而灌木盖度对其有正向影响。

小麂有11个模型均为最优模型,模型平均结果显示,其占域率为0.37(SE值为0.07),探测率为0.31(SE值为0.09)。占域率协变量的累积模型权重均小于0.5,其中灌木盖度对其占域率影响较大,累积权重为0.31(表2)。探测率协变量的累积模型权重均小于0.5,其中海拔和调查时间的异质性累积权重较大,均为0.46。小麂的占域率与海拔、灌木盖度呈负相关,其中海拔的影响较小,而坡度对其占域有一定正向影响(表3)。探测率的影响因子分析结果显示,海拔和坡度对其探测率均有负向影响。

表2 4个物种各参数协变量的模型权重

Table 2 AIC weight of each covariate for the four mammal species

协变量	各参数累积权重			
	藏酋猴	野猪	小麂	毛冠鹿
占域率				
海拔	0.714	0.042	0.074	0
生境类型	0.182	0.486	0.032	0.180
植被类型	0.070	0.528	0.144	0.211
灌木盖度	0.714	0.036	0.314	0.246
坡度	0.071	0.538	0.117	0.495
探测率				
海拔	0.714	0.434	0.458	0.796
灌木盖度	0.301	0.231	0.339	0.606
坡度	0.089	0.294	0.339	0.296
调查时间	0.714	0.728	0.458	0.796

毛冠鹿有20个模型作为最优模型(附录1),模型平均结果显示,毛冠鹿占域率为0.58(SE值为0.06),探测率为0.27(SE值为0.07)。占域率协变量的累积模型权重均小于0.5,其中坡度对其占域率

影响最大, 累积权重为 0.50, 海拔的累积权重为 0(表 2)。累积权重大于 0.5 的探测率协变量为海拔、灌木盖度和调查时间的异质性。毛冠鹿的占域率与灌木

盖度呈正相关, 与坡度呈负相关(表 3)。探测率受海拔高度的负向影响, 受灌木盖度和坡度的正向影响。

表 3 影响各物种占域率和探测率的协变量估计值和标准误

Table 3 β -coefficients and associated standard errors of covariates influencing the occupancy and detectability of the four mammal species

协变量	藏酋猴		野猪		小麂		毛冠鹿	
	估计值	标准误	估计值	标准误	估计值	标准误	估计值	标准误
占域率								
海拔	-0.07	0.07	0.07	0.13	-0.07	0.07		
灌木盖度	0.60	0.27	-0.03	0.28	-0.34	0.18	0.20	0.14
坡度	-0.11	0.32	-0.45	0.29	0.43	0.31	-0.42	0.28
探测率								
海拔	-0.08	0.03	-0.08	0.04	-0.21	0.04	-0.10	0.03
灌木盖度	-0.20	0.17	0.17	0.15	0.002	0.19	0.23	0.13
坡度	-0.15	0.13	-0.25	0.15	-0.35	0.16	0.17	0.12

3 讨论

此次红外相机调查在梵净山和赤水保护区分别记录到兽类 22 和 19 种, 表明该保护区内兽类资源较为丰富。其中, 梵净山保护区内相对多度指数最高的是藏酋猴, 其次为野猪和小麂, 而在赤水保护区相对多度指数最高的是毛冠鹿和小麂, 藏酋猴次之。2 个保护区兽类物种组成较为相似。笔者通过占域模型分析, 评估了贵州梵净山与赤水保护区内藏酋猴、野猪、小麂和毛冠鹿的占域率。结果显示, 模型估算的占域率均高于调查得到的实际占域率, 单轮调查的探测率均小于 1, 表明各物种的红外相机监测中均存在“不完美探测”的情况^[26]。其中, 藏酋猴的占域率及相对多度指数均较高, 说明其在该地区分布较广且种群规模较大。同时, 还拍摄到猕猴分布于 2 个保护区, 但拍摄率极低, 可能是因两者存在同域竞争的关系。野猪和毛冠鹿占域率均大于 0.5, 但野猪的相对多度指数相对于其他 3 个物种较低, 说明野猪在该区域的分布范围较广、较分散, 但种群数量相对较少。小麂则与其他物种相反, 占域率较低但相对多度较高, 说明其分布相对集中。

该区域生境主要为常绿阔叶林和常绿落叶阔叶混交林, 植物资源比较丰富, 为有蹄类的食草动物提供了丰富的食物资源, 且林下灌丛植物为其提供了较好的隐蔽场所, 是比较适合于有蹄类动物生存的环境^[27]。由占域模型估算的各个物种探测率均较低, 这可能与物种本身的习性有关。藏酋猴具有半地栖性的特征, 除了在林下地上活动外, 还喜欢活动在悬崖峭壁的山坡地带^[28], 而红外相机的布设范围未能

覆盖类似区域。野猪、小麂等有蹄类动物常活动在林下灌木丛中, 可能因灌丛遮挡错过红外相机镜头的捕捉, 进而影响其探测率。另外, 也可能与相机布设位置、相机参数设置以及调查人员专业技术水平等有关。

物种的生境使用受多种环境因素的影响, 如海拔、生境类型、植被、捕食者以及人为干扰等的相互作用。占域模型结果显示, 海拔和坡度对藏酋猴呈负向影响, 灌木盖度对其呈正向影响, 这与藏酋猴常在中低海拔(2 000 m 以下)的原生性常绿阔叶林带和常绿落叶阔叶混交林带活动相吻合, 其多选择在坡度较缓的地面上行走和取食, 且偏好灌木层盖度较好的森林, 可为其提供良好的隐蔽条件^[28-30]。海拔对野猪表现为正向影响, 相对于中低海拔的阔叶林, 野猪更偏好于针阔混交林, 但对海拔的选择性并不强, 具有一定的随机性; 灌木盖度和坡度对其表现为负向影响, 春夏季野猪偏爱在下坡和中坡进行觅食等活动, 而对灌木盖度的选择性不强^[31]。海拔、灌木盖度和坡度对小麂和毛冠鹿呈相反的影响关系, 海拔和灌木盖度对小麂呈负向影响, 坡度对其表现为正向影响, 而对毛冠鹿的影响则相反。小麂和毛冠鹿的生境选择有一定的相似性, 但时间、空间和食性的错位也是减少同域分布物种之间竞争的重要手段^[22]。模型参数权重表明, 小麂对海拔和坡度的选择性不强, 毛冠鹿对海拔和生境类型的选择性不强, 可能会根据季节变化以及食物资源的丰富度来选择合适的生境。

研究者可根据具体研究目标对占域模型进行改进, 使其更广泛地应用于多个不同对象和不同尺度。在我国, 占域模型主要用于大中型兽类的红外相机调

查研究,该模型将研究区域平均划分成多个大小相同的网格,针对每个网格开展红外相机调查,基于占域模型分析目标物种的分布状况及其生境选择因素等^[8,32]。笔者采用的占域模型是假设每个网格里每个物种的占域状态保持不变,且每个网格的探测都独立于其他网格,所选网格粗略等同于种群。但在实际情况中,网格和种群的关系可变量且未知,所以占域趋势不能简单等同于种群密度趋势^[33]。虽然占域率可能只是实际种群大小的粗略替代参数,但在大规模、多物种的调查和监测项目中,或者是在分层随机抽样调查中,对于因植被结构、地形特征等因素难以到达的网格,占域模型可作为一种便捷高效的替代方法供研究者们选择。同时,占域模型能很好地适用于大中型兽类红外相机观测数据的大尺度分析,研究目标物种在大尺度上的空间分布状况及其动态变化,揭示影响其动态变化的环境变量,评估现有保护措施和政策的有效性,提出针对生物多样性保护的指导性对策和建议。

致谢:感谢贵州大学、中国科学院动物研究所、贵州梵净山国家级自然保护区管理局、贵州赤水桫欏国家级自然保护区管理局在野外调查和数据采集工作中提供的大力支持和帮助。

参考文献:

- [1] 李晟,王大军,肖治术,等.红外相机技术在我国野生动物研究与保护中的应用与前景[J].生物多样性,2014,22(6):685-695. [LI Sheng, WANG Da-jun, XIAO Zhi-shu, et al. Camera-Trapping in Wildlife Research and Conservation in China: Review and Outlook [J]. Biodiversity Science, 2014, 22(6): 685-695.]
- [2] 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 Li-jun, SHU Zu-fei, XIAO Zhi-shu. Application of Camera-Trapping Data to Study Daily Activity Patterns of Galliformes in Guangdong Chebaling National Nature Reserve [J]. Biodiversity Science, 2019, 27(3): 266-272.]
- [3] MACKENZIE D I, NICHOLS J D, LACHMAN G B, et al. Estimating Site Occupancy Rates When Detection Probabilities Are Less Than One [J]. Ecology, 2002, 83(8): 2248-2255.
- [4] NICHOLS J D, O'CONNELL A F, KARANTH K U. Camera Traps in Animal Ecology and Conservation: What's Next? [M] // Camera Traps in Animal Ecology. Tokyo: Springer Japan, 2011: 253-263.
- [5] ROYLE J A, LINK W A. Generalized Site Occupancy Models Allowing for False Positive and False Negative Errors [J]. Ecology, 2006, 87(4): 835-841.
- [6] LI S, MCSHEA W J, WANG D J, et al. Gauging the Impact of Management Expertise on the Distribution of Large Mammals across Protected Areas [J]. Diversity and Distributions, 2012, 18(12): 1166-1176.
- [7] BU H, WANG F, MCSHEA W J, et al. Spatial Co-Occurrence and Activity Patterns of Mesocarnivores in the Temperate Forests of Southwest China [J]. PLoS One, 2016, 11(10): e0164271.
- [8] WANG T M, ANDREW R J, SMITH J L D, et al. Living on the Edge: Opportunities for Amur Tiger Recovery in China [J]. Biological Conservation, 2018, 217: 269-279.
- [9] 李相楹,张维勇,刘峰,等.不同海拔高度下梵净山土壤碳、氮、磷分布特征[J].水土保持研究,2016,23(3):19-24. [LI Xiang-yong, ZHANG Wei-yong, LIU Feng, et al. The Distribution Characteristics of Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus at Different Altitudes in Fanjingshan Mountain [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(3): 19-24.]
- [10] 王鹏举.梵净山脊椎动物多样性全球对比分析与世界遗产价值研究[D].贵阳:贵州师范大学,2017. [WANG Peng-ju. Global Comparative Analysis and the World Heritage Values on Vertebrate Animal Diversity of Fanjing Mountain [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2017.]
- [11] 潘有福,赵彦禹,郑翔,等.黔金丝猴研究进展[J].生物学杂志,2018,35(2):92-96. [PAN You-fu, ZHAO Yan-yu, ZHENG Xiang, et al. The Research Progress of *Rhinopithecus brelichi* [J]. Journal of Biology, 2018, 35(2): 92-96.]
- [12] 王丞,周大庆,梁盛,等.贵州赤水桫欏国家级自然保护区鸟兽多样性红外相机初步监测[J].生物多样性,2019,27(10):1147-1152. [WANG Cheng, ZHOU Da-qing, LIANG Sheng, et al. Camera-trapping Survey on Mammals and Birds in Guizhou Chishui *Alsophila* National Nature Reserve [J]. Biodiversity Science, 2019, 27(10): 1147-1152.]
- [13] 张明明,杨朝辉,王丞,等.贵州梵净山国家级自然保护区鸟兽红外相机监测[J].生物多样性,2019,27(7):813-818. [ZHANG Ming-ming, Yang Zhao-hui, WANG Cheng, et al. Camera-Trapping Survey on Mammals and Birds in Fanjingshan National Nature Reserve, Guizhou, China [J]. Biodiversity Science, 2019, 27(7): 813-818.]
- [14] 刘邦友,张廷跃,梁盛,等.贵州赤水桫欏国家级自然保护区及其周边区域鸟兽多样性红外相机监测对比[J].兽类学报,2020,40(5):503-519. [LIU Bang-you, ZHANG Ting-yue, LIANG Sheng, et al. Comparison of Birds' and Mammals' Diversities Using Camera-Trapping Survey in Guizhou Chishui *Alsophila* National Nature Reserve and Its Surrounding Areas [J]. Acta Theriologica Sinica, 2020, 40(5): 503-519.]
- [15] 李佳琦,徐海根,万雅琼,等.全国哺乳动物多样性观测网络(China BON-Mammals)建设进展[J].生态与农村环境学报,2018,34(1):12-19. [LI Jia-qi, XU Hai-gen, WAN Ya-qiong, et al. Progress in Construction of China Mammal Diversity Observation Network (China BON-Mammals) [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(1): 12-19.]
- [16] SMITH A T. 解焱.中国兽类野外手册[M].长沙:湖南教育出版社,2009:1-508. [SMITH A T, XIE Yan. A Guide to the Mammals of China [M]. Changsha: Hunan Education Press, 2009: 1-508.]
- [17] 刘少英,吴毅.中国兽类图鉴[M].福州:海峡书局,2019:89-484.
- [18] 蒋志刚,刘少英,吴毅,等.中国哺乳动物多样性(第2版)[J].生物多样性,2017,25(8):886-895. [JIANG Zhi-gang, LIU Shao-yong, WU Yi, et al. China's Mammal Diversity (2nd Edition) [J].

- Biodiversity Science 2017 25(8): 886–895.]
- [19] 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 Li-jun, XIAO Wen-hong, XIAO Zhi-shu, *et al.* Limitations of Relative Abundance Indices Calculated from Camera-Trapping Data [J]. Biodiversity Science 2019 27(3): 243–248.]
- [20] MACKENZIE D I, BAILEY L L. Assessing the Fit of Site-Occupancy Models [J]. Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics 2004 9(3): 300–318.
- [21] COOCH E, WHITE G. Using MARK: A Gentle Introduction [D]. Ithaca, USA: Cornell University 2001.
- [22] 赵国静, 宫一男, 杨海涛, 等. 东北虎豹国家公园东部的野猪生境利用和活动节律初步研究[J]. 兽类学报, 2019, 39(4): 431–441. [ZHAO Guo-jing, GONG Yi-nan, YANG Hai-tao, *et al.* Study on Habitat Use and Activity Rhythms of Wild Boar in Eastern Region of Northeast Tiger and Leopard National Park [J]. Acta Theriologica Sinica 2019, 39(4): 431–441.]
- [23] 肖文宏, 康祖飞, 陈立军, 等. 占域模型的原理及在野生动物红外相机研究中的应用案例[J]. 生物多样性, 2019, 27(3): 249–256. [XIAO Wen-hong, SHU Zu-fei, CHEN Li-jun, *et al.* Using Occupancy Models in Wildlife Camera-Trapping Monitoring and the Study Case [J]. Biodiversity Science 2019 27(3): 249–256.]
- [24] BURNHAM K P, ANDERSON D R. Model Selection and Multi-model Inference: A Practical Information-Theoretic Approach [M]. 2nd ed. New York, USA: Springer 2004: 13–19.
- [25] TANG K W, ROCHA D G, CLEMENTS G R, *et al.* Habitat Use and Predicted Range for the Mainland Clouded Leopard *Neofelis nebulosa* in Peninsular Malaysia [J]. Biological Conservation, 2017, 206: 65–74.
- [26] BAILEY L L, HINES J E, NICHOLS J D, *et al.* Sampling Design trade-offs in Occupancy Studies with Imperfect Detection: Examples and Software [J]. Ecological Applications 2007, 17(1): 281–290.
- [27] 吴玥. 2003—2005 年冬季吉林珲春保护区有蹄类动物数量调查及生境利用分析[D]. 上海: 华东师范大学 2005. [WU Yue. Ungulates Survey in Hunchun Nature Reserve, China, in the Winters of 2003–2005 [D]. Shanghai: East China Normal University 2005.]
- [28] 张强, 兰盛军, 胡大明, 等. 四川白水河国家级自然保护区野外藏酋猴活动初步调查[J]. 四川动物, 2008, 27(1): 131–134. [ZHANG Qiang, LAN Sheng-jun, HU Da-ming, *et al.* Activities of Tibetan Macaque in Baishuihe National Nature Reserve, Sichuan Province [J]. Sichuan Journal of Zoology 2008 27(1): 131–134.]
- [29] 黎大勇. 唐家河国家级自然保护区藏酋猴 (*Macaca thibetana*) 的生境选择[J]. 四川林业科技, 2015, 36(4): 28–32. [LI Da-yong. Habitat Selection of *Macaca thibetana* in Tangjiahe National Nature Reserve [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2015 36(4): 28–32.]
- [30] 李生强, 汪国海, 施泽攀, 等. 广西藏酋猴种群数量、分布及威胁因素的分析[J]. 广西师范大学学报(自然科学版) 2017, 35(2): 126–132. [LI Sheng-qiang, WANG Guo-hai, SHI Ze-pan, *et al.* Survey on Population, Distribution and Threatening Factors of Tibetan Macaques (*Macaca thibetana*) in Guangxi, China [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2017 35(2): 126–132.]
- [31] 张静. 小兴安岭南坡野猪栖息地选择及对农田危害的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学 2008. [ZHANG Jing. Habitat Selection and Crop Raiding Patterns of Wild Boar in Xiaoxing'an Mountains [D]. Haerbin: Northeast Forestry University 2008.]
- [32] WANG F, MCSHEAW J, WANG D J, *et al.* Shared Resources between Giant Panda and Sympatric Wild and Domestic Mammals [J]. Biological Conservation 2015, 186: 319–325.
- [33] BAILEY L, SIMONS T R, POLLOCK K H. Spatial and Temporal Variation in Detection Probability of *Plethodon salamanders* Using the Robust Capture-Recapture Design [J]. The Journal of Wildlife Management 2004 68(1): 14–24.

作者简介: 万雅琼(1992—) 女, 湖北宜昌人, 助理研究员, 硕士, 主要研究方向为生物多样性保护。E-mail: wanyaqiong0229@163.com

(责任编辑: 许素)

附录

附录 1 4 个物种的占域模型选择结果

Appendix 1 Model selection results of 4 species

http://www.ere.ac.cn/attached/file/20211012/20211012134215_239.pdf