

DOI: 10.20103/j.stxb.202301010005

刘艳华, 刘磊, 陈红, 刘小慧, 王启蕃, 刘鑫鑫, 张子栋, 张宇, 周绍春. 基于 MaxEnt 模型的北极村国家级自然保护区紫貂栖息地适宜性评价. 生态学报, 2024, 44(2): 559-569.

Liu Y H, Liu L, Chen H, Liu X H, Wang Q F, Liu X X, Zhang Z D, Zhang Y, Zhou S C. Habitat suitability evaluation of sable (*Martes zibellina*) based on MAXENT model in Beijicun National Nature Reserve, Heilongjiang Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2): 559-569.

基于 MaxEnt 模型的北极村国家级自然保护区紫貂栖息地适宜性评价

刘艳华¹, 刘磊¹, 陈红², 刘小慧², 王启蕃¹, 刘鑫鑫¹, 张子栋³, 张宇⁴, 周绍春^{3,*}

1 东北林业大学野生动物与自然保护地学院, 哈尔滨 150040

2 牡丹江师范学院生命科学与技术学院, 牡丹江 157011

3 黑龙江省野生动物研究所, 哈尔滨 150081

4 沈阳市辉山学校, 沈阳 110164

摘要:在人类支配的景观中, 生境退化已经导致多个物种种群数量不断减少, 分布范围不断缩减。紫貂 (*Martes zibellina*) 为国家 I 级重点保护动物, 种群数量稀少, 开展栖息地适宜性研究工作对制定科学的栖息地保护计划至关重要。于 2021 年 1 月—2022 年 8 月在黑龙江省北极村国家级自然保护区采用样线调查法、足迹链跟踪、远红外相机监测综合收集到紫貂和猎物 (雪兔) 活动点信息。利用最大熵 (MaxEnt) 栖息地建模分析方法, 首次在多个分辨率尺度背景下对紫貂种群的栖息地适宜性进行评价, 研究表明: (1) 利用 ArcGIS 10.4 重采样后在 6 个分辨率尺度 (30m、60m、120m、240m、480m、960m) 进行栖息地建模分析, 基于主要栖息地变量因子对模型的贡献率及稳定性影响, 并综合考虑研究区域面积, 最终选定 30m 分辨率尺度作为紫貂栖息地最佳分析建模尺度, 在 30m 分辨率尺度栖息地预测模型的曲线下面积 (AUC) 值为 0.881; (2) 研究发现猎物资源、植被类型和地形变量是影响紫貂栖息地适宜性的主要变量因子: 雪兔出现概率较高、距草地与河流较近、海拔约 400—600m、距常绿针叶林 1.5km、距落叶针叶林约 200m、坡向为 50—250° 的区域为紫貂的适宜栖息地; (3) 栖息地适宜性分析表明, 北极村国家级自然保护区紫貂适宜栖息地和次适宜栖息地面积共计 23.66km², 约占保护区的 17.2%, 主要集中在保护区中部, 而东部和西北部区域, 栖息地破碎化较严重。基于模型结果与野外调查, 提出了三条建议: (1) 应严格控制人为活动, 避免因人类干扰造成不适宜栖息地面积的持续扩大; (2) 建立生态廊道促进保护区西部与中部紫貂种群进行个体交流, 降低紫貂种群局部区域灭绝概率; (3) 对东部地区破碎化的栖息地进行修复, 扩大东部适宜栖息地面积, 使破碎化的栖息地连接为整体。为分布于我国最北端的紫貂种群恢复创造条件, 这对于构建该地区相对稳定的生物多样性保护空间格局有着重要意义。

关键词:紫貂; 最大熵模型; 最优分辨率尺度; 栖息地适宜性

Habitat suitability evaluation of sable (*Martes zibellina*) based on MaxEnt model in Beijicun National Nature Reserve, Heilongjiang Province, China

LIU Yanhua¹, LIU Lei¹, CHEN Hong², LIU Xiaohui², WANG Qifan¹, LIU Xinxin¹, ZHANG Zidong³, ZHANG Yu⁴, ZHOU Shaochun^{3,*}

1 College of Wildlife and Nature Reserves, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 College of Life Science and Technology, Mudanjiang Normal University, Mudanjiang 157011, China

3 Wildlife Research Institute of Heilongjiang Province, Harbin 150081, China

4 Shenyang Huishan School, Shenyang 110164, China

基金项目:大兴安岭东北虎潜在栖息地及迁移生态廊道研究项目 (CZKYF2020-02)

收稿日期:2023-01-01; **网络出版日期:**2023-10-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Zhoushaochun2003@163.com

Abstract: In human-dominated landscapes, habitat degradation has led to population and range declines for many species. The sable (*Martes zibellina*) is a first-class national protected animal in China with an endangered population; therefore, a priority for the conservation management of this species is to carry out habitat suitability research for the development of scientific habitat conservation plans. In this study, activity data for the sable and its prey (*Lepus timidus*) were collected in Beijicun National Nature Reserve, Heilongjiang Province, from January 2021 to the end of August 2022 by conducting line transect surveys, footprint tracking, and infrared camera monitoring. MaxEnt habitat modeling analysis was used to evaluate the habitat suitability for the sable populations at six resolution scales (30m, 60m, 120m, 240m, 480m, and 960m) after resampling using ArcGIS 10.4. Based on the contribution rate of the main habitat variables to the model and their stability effect, and considering the study area comprehensively, we selected a 30 m resolution scale as the optimal scale for the sable habitat analysis; the area under the curve value of the 30m resolution scale habitat prediction model was 0.881. We found that prey resources, vegetation types, and terrain variables were the main variables affecting habitat suitability for the sable. Suitable habitat for the sable was in areas with a high probability of snow rabbits, close to grassland and rivers, approximately 200—400m above sea level, 1.5km from evergreen coniferous forest, approximately 200m from deciduous coniferous forest, and with a slope angle of 50° to 250°. The habitat suitability analysis showed that the area of suitable habitat and semi-suitable habitat for the sable in Beijicun National Nature Reserve was 23.66km, accounting for 17.2% of the reserve. Habitat fragmentation was considerable, and was mainly concentrated in the central, eastern, and northwestern parts of the reserve. Based on our results, we suggest that (1) human activities should be strictly controlled to avoid the continuous expansion of the area of unsuitable habitat caused by human interference; (2) ecological corridors should be established to promote migration of individuals between the western and central populations of the sable in the reserve, so as to reduce the probability of local extinction of the sable populations; (3) fragmented habitat in the eastern region should be restored and the area of suitable habitat in this region should be expanded, and fragmented habitat as a whole should be reconnected. Creating conditions for the recovery of the sable population in the northernmost part of China is of great importance for biodiversity conservation in this region.

Key Words: *Martes zibellina*; MaxEnt model; optimal resolution scale; habitat suitability

栖息地作为野生动物活动和繁衍的场所,对野生动物种群的生存繁衍具有重要意义^[1]。但随着人类社会的不断发展,森林采伐、农田开垦、道路建设等活动导致野生动物的栖息地遭到严重破坏,栖息地质量下降,面积不断缩减^[2]。栖息地退化已经导致如东北虎、东北豹、紫貂等珍稀濒危物种种群数量下降,甚至在部分区域濒临灭绝^[3-4]。适宜栖息地的保护和修复已经成为保护和恢复珍稀濒危物种的关键,通过研究了解栖息地的分布范围与特征,分析不同生态因子对目标物种栖息地适宜性的影响,对实现物种栖息地保护和恢复具有重要意义^[5]。

目前,应用于预测物种适宜栖息地分布的模型包括机理模型、回归模型、生态位模型为主的近 10 种模型^[6],而作为生态位模型的代表,最大熵模型因其具有所需样本量少、预测准确性高等优点^[7],已被广泛应用于岩羊^[8]、亚洲象^[9]、亚洲黑熊^[10]、雪豹^[11]、大熊猫^[12]等珍稀濒危物种的栖息地适宜性评价中。但在以往的动物栖息地最大熵建模时,研究人员总倾向于通过个人的主观推断或依据易获取变量数据的分辨率来进行物种栖息地建模,并未考虑栖息地建模的背景数据分辨率尺度是否符合该物种栖息地适宜性分析。在不同分辨率尺度下,较大分辨率尺度内囊括的环境资源范围更广,分析的全面性较高,而精细分辨率尺度下则能够更细化的描述研究对象的生境适宜性情况,大分辨率尺度上的非相关因子很可能成为细分分辨率尺度上的重要影响因素^[13]。选择分辨率尺度的不同将导致被研究物种适宜性评价结果的差异^[14-17]。Frazier 在 2021 年对纳米比亚黑猩猩栖息地适宜性的研究结果中表明,在选用的 6 个背景数据分辨率尺度中,120m 尺度为预测该地区黑猩猩栖息地适宜性的最佳尺度,太大或太小的分辨率都会对预测结果产生负面影响,从而影响对该地区物

种适宜性评价的准确性^[18]。Sun 等在 8 个尺度上对分布在邛崃山区大熊猫的栖息地适宜性进行了研究,结果表明相较于单尺度,多分辨率尺度的预测结果更加准确,并发现<2000m 尺度时为该地区此物种的最优建模尺度,在此分辨率下进行建模,能够全面的描述出该物种对于栖息地的适应情况^[19]。因此,在进行物种栖息地建模分析时,明确某一地区所研究物种的栖息地背景最优分辨率尺度,对于客观、准确进行栖息地评价具有重要意义。

紫貂(*Martes zibellina*)曾广泛分布于亚欧大陆及其附近岛屿,中国的紫貂分布区位于该物种分布范围的最南端。紫貂在全球分布有 18 个亚种,中国分布有阿尔泰亚种(*M. z. averini*)、大兴安岭亚种(*M. z. princeps*)、小兴安岭亚种(*M. z. linkouensis*)以及长白山亚种(*M. z. hamgyenensis*)这 4 个亚种^[20]。至今,我国对紫貂的数量分布^[21-22]、栖息地选择^[23-24]、栖息地适宜性^[25-26]等方面的研究主要集中在大兴安岭新林、双河,长白山支脉的大海林等林区,且在研究中均未考虑栖息地建模时所用背景资料的最优分辨率尺度问题。为了科学探究栖息地因子对紫貂生存的影响,明确最优分辨率尺度下紫貂适宜栖息地分布情况,本研究在我国气候最寒冷,紫貂分布最北端的北极村国家级自然保护区开展基于不同空间分辨率背景资料下紫貂栖息地适宜性评价研究,这将为(1)确定分析该保护区紫貂栖息地的背景资料最适空间分辨率,为今后其他区域开展紫貂栖息地适宜性分析提供尺度选择参考;(2)探究影响紫貂栖息地分布的环境因子;(3)掌握保护区内紫貂的栖息地适宜性及空间分布,为栖息地保护、修复提供指导。本研究成果将对构建该地区相对稳定的生物多样性保护空间格局及完善野生动物栖息地保护、修复体系等总体目标奠定基础^[27]。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

北极村国家级自然保护区(图 1)位于中国北部边疆大兴安岭山地北部(53°11'30"—53°33'03"N,121°40'00"—123°16'00"E),北与俄罗斯隔黑龙江相望,总面积 137.553km²。保护区属于寒温带大陆性气候,年平均气温 -5℃左右,年平均降水量为 460.8mm,降水主要集中于 7、8 月份,占全年降水量的 24%左右;平均无霜期 86.2d,海拔范围为 191—848m 之间。保护区森林资源丰富,树种以兴安落叶松、樟子松、白桦为主,针叶林占绝对优势,独特的气候条件和植被资源形成了典型的水域、沼泽、草甸、灌丛和原始森林植被。丰富的植物资源孕育了多种珍稀野生动物资源。这里分布有东北虎(*Panthera tigris*)、紫貂(*Martes zibellina*)、貂熊(*Gulo gulo*)、原麝(*Moschus moschiferus*)、黑熊(*Selenarctos thibetanus*)、棕熊(*Ursus arctos*)、猞猁(*Lynx lynx*)、马鹿



图 1 北极村自然保护区研究区域示意图

Fig.1 Study area diagram of Arctic village nature reserve

(*Cervus elaphus*)等兽类,东方白鹳(*Ciconia boyciana*)、花尾榛鸡(*Tetrastes bonasia*)等鸟类。

1.2 数据收集与处理

1.2.1 紫貂及其猎物(雪兔)数据收集

数据收集采用样线调查与红外相机监测两种方法(图 2)

(1)样线调查:利用卫星遥感影像图片识别森林覆盖区域,然后在保护区内随机布设样线 35 条,每条样线长 5km,样线间距大于 2km,样线覆盖保护区的核心区、缓冲区和试验区。于积雪覆盖期(2021 年 11 月至 2022 年 2 月末)开展样线调查工作,在调查过程中,每条样线由 2 名技术人员负责,若发现紫貂足迹根据发现时雪壳的硬度对其足迹新鲜程度进行判别,并对新鲜的紫貂足迹链进行跟踪,沿足迹链间隔大于 100m 处记录 1 个紫貂活动点,用以收集紫貂足迹位点信息。在紫貂活动点处设置 1 个 10m×10m 的植被调查样方(包括林型、乔木种类、乔木胸径、密度等)调查植被组成,并记录紫貂活动点坐标及其他栖息地因子。

(2)相机监测技术:2021 年 1 月—2022 年 8 月期间共布设 120 台红外相机用于监测收集紫貂、雪兔影像资料。首先将保护区划分为 1km×1km 的栅格,然后随机选择 120 个栅格作为相机布设的粗略位置区域,在野外安装相机的过程中,每个相机位点布设 1 台相机,相机位点之间距离至少大于 1km。相机设置于有明显动物活动痕迹,如粪便、兽道旁的大型乔木上,距地面约 30—40cm,数据每年收集 3 次,详细记录相机布设点的地理坐标、海拔、植被类型等。

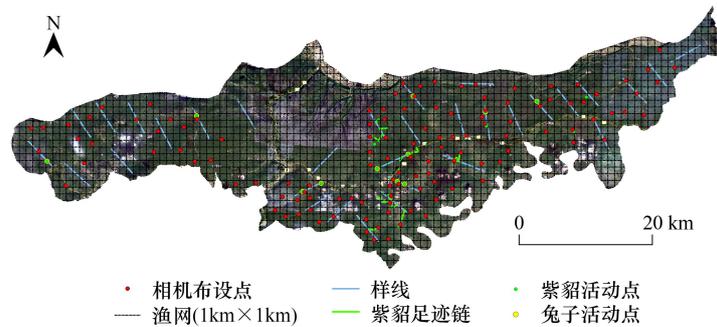


图 2 样线、足迹链跟踪、相机监测布设示意图

Fig.2 Locations of the line transect, footprint chain tracking and camera trap for *martes zibellina* in Arctic village nature reserve

1.2.2 环境变量数据的获取及处理

变量因子分为 5 类共计 34 个,包括:

(1)猎物:通过样线调查、红外相机监测收集。

(2)植被:于 2021 年 1 月—2022 年 1 月间通过地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)下载的 30m 分辨率 Landseat8 TIRS 云覆盖低于 5%遥感影像解译获得,植被分为:林间湿地、常绿针叶林、落叶针叶林、针阔混交林、落叶阔叶林、农田和草地。

(3)人为干扰因子:(居民区、公路、林间小路)居民区由地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)中下载的 30m 分辨率 Landseat8 TIRS 云覆盖低于 5%遥感影像解译获得、公路和林间小路利用 2008 年调整后北极村保护区 30m 分辨率林相图在 ArcGIS 10.4 软件中矢量化获得。

(4)地形因子:海拔、坡度和坡向利用 ArcGIS10.4 软件的空间分析模块对 30m 分辨率的数字高程模型(DEM)进行掩膜提取获得;河流利用林相图在 ArcGIS 10.4 软件中矢量化获得。

此外,为避免相关性强的环境变量对 MaxEnt 模型预测效果带来的负面影响,建模前利用 SPSS 19.0 对其进行 Spearman 相关性分析,若两个环境变量之间显著相关,则比较单个环境变量构建模型的曲线下面积(AUC)值,选择剔除相关性分析结果绝对值>0.8 的环境变量中 AUC 值较小的变量。最终保留猎物变量(雪兔),地形变量(河流、坡向、坡度、海拔),植被变量(草地、落叶针叶林、常绿针叶林、针阔混交林)和人为干扰

变量(林间小路、居民区)。为了进行最优分辨率尺度紫貂栖息地建模分析,将保留变量进行重采样统一为 30m 分辨率用于后续的栖息地建模分析。

2 紫貂栖息地适宜性模型构建

2.1 基于 MaxEnt 模型分析的各分辨率尺度建模及最优分辨率尺度的模型选择

利用选取的猎物资源、地形、植被和人为干扰 4 类变量 11 个变量因子分别在 6 个尺度上建立紫貂栖息地适宜性评价模型,并通过模型中各变量因子贡献率与重要性的排序在多个尺度中的变化情况筛选出用于建模的最佳尺度^[18]。首先,利用 ArcGIS 10.4 将所选环境变量数据进行重采样转化为分辨率(30m×30m)栅格,然后将这些栅格数据以 2 的倍数生成其他 5 个(60m、120m、240m、480m、960m)更大的分辨率尺度,并在 6 个栅格尺度背景下提取 6 套环境变量数据用于后续分析研究(图 3)。

随后利用筛选后保留的紫貂活动点与 6 组环境变量,通过 MaxEnt 3.4.4 软件分别开展栖息地适宜性分析。在进行最大熵栖息地分析建模时,随机选取 75% 的紫貂活动点(48 个)作为模型训练集,其余 25% (16 个)作为测试集。

在进行模型参数选择时,为保证模型稳定性,采用自举法(Bootstrap)为运行类别,最大迭代数为 5000 次,重复 10 次计算,以 10 次计算后的平均栖息地适宜性指数作为最终模型结果,最后以 Cloglog 格式输出结果^[28-29]。模型预测结果的准确性通过受试者工作特征曲线(ROC 曲线)判断^[30],其中 AUC 值大小代表模型预测结果的准确程度^[9]。ROC 曲线的评价标准为:AUC 值在 0.5—0.6,不及格;0.6—0.7 较差;0.7—0.8,一般;0.8—0.9,良好;0.9—1.0,优秀^[8]。表 1 为各分辨率尺度下模型的 AUC 值情况。



图 3 各分辨率尺度示意图

Fig.3 Schematic diagram of each resolution scale
30、60、120、240、480、960 共 6 个分辨率尺度(/m)

表 1 各分辨率尺度下的特征曲线下面积(AUC)值情况

Table 1 Area under the curve (AUC) values at 6 resolution scales

分辨率/m Resolution	特征曲线下面积(AUC) ¹ Area under the curve (AUC)	分辨率/m Resolution	特征曲线下面积(AUC) ¹ Area under the curve (AUC)
30	0.881	240	0.887
60	0.882	480	0.879
120	0.884	960	0.905

¹在 6 组分辨率尺度背景下建模,各尺度模型建模时的 AUC 值,每组以 10 次模型重复后的平均值展示;AUC:曲线下面积 Area under the curve

模型运行结果表明 6 个空间分辨率尺度下模型的 AUC 值均在 0.8 以上(表 1),达到良好水平,说明模型预测结果比较可靠,可以进行后续的最优分辨率尺度选择和栖息地适宜性的预测分析。

6 个尺度下分析的 11 个环境变量对模型的贡献率进行排序(图 4),结果表明从 30—960m 不同分辨率下变量的重要性排序发生显著的变化。猎物资源(雪兔)是 6 个尺度下重要性排序第一的变量,也是贡献率占比最多的变量。30—120m 分辨率尺度下雪兔、草地、河流、海拔、常绿针叶林、落叶针叶林、坡向等 7 个变量为贡献率排序前几名的变量,排序则呈不变或小范围波动趋势,3 个尺度下 7 个变量对模型的累积贡献率均大于 80%,表明在这个尺度之间建模,变量对物种的影响程度较稳定。当分辨率尺度大于 120m(240—960m)时,模型中变量重要性排序发生无序改变,这 3 个尺度下 7 个变量的累计贡献率小于 65%。基于变量因子对

模型的贡献率和重要性排序的稳定,以及研究区域范围大小、景观格局组成、模型计算效率和对所研究物种的具体化适宜性描述等原因^[31],本研究最终选用 30 米分辨率尺度用于紫貂适宜栖息地评价中。

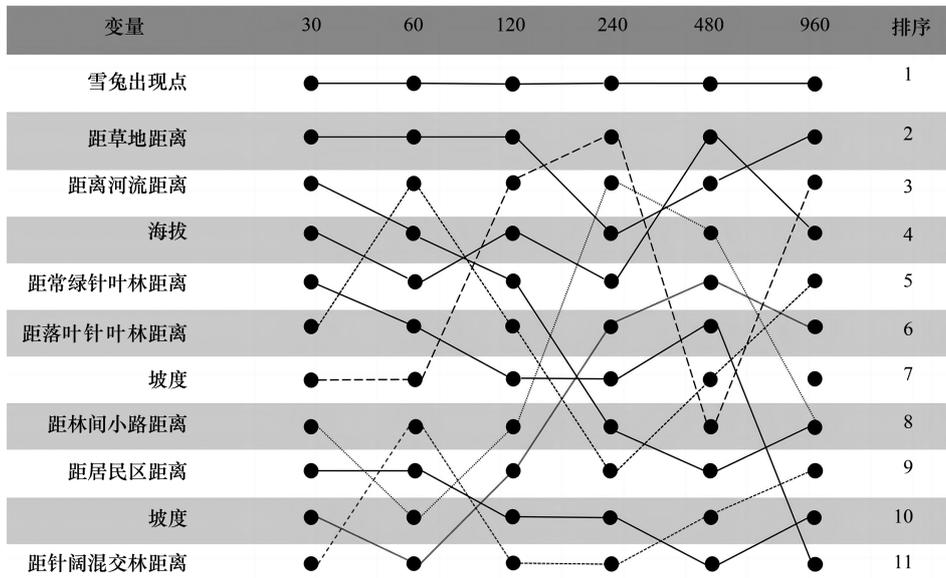


图 4 6 个各分辨率尺度下 11 种影响因子贡献率排序

Fig.4 MaxEnt ranks based on the percent contribution of the 11 variables at the six resolutions

变量在最左侧的排序是基于 30m 分辨率建模的重要性贡献率排序

2.2 最优分辨率尺度下紫貂栖息地适宜性分析

本研究利用 Arcgis 10.4 软件,采用相等间隔法对紫貂栖息地适宜图进行重分类,将紫貂栖息地划分为 4 个等级标准:0—0.25 为不适宜栖息地,0.25—0.5 为一般适宜栖息地,0.5—0.75 为次适宜栖息地,0.75—1 为适宜栖息地^[32]。

3 结果与分析

3.1 最优分辨率尺度下最大熵结果

选择 30m×30m 分辨率的栅格尺度为最优建模尺度进行模型分析,根据 MaxEnt 中 ROC 曲线的评价结果可知,在 30m 分辨率尺度下,模型的 AUC 值为 0.881 ± 0.020 ,预测结果可靠(图 5)。

3.2 栖息地影响因子

Jackknife 检验结果显示(图 6),雪兔是对紫貂栖息地适宜性评价模型预测增益最大的环境因子。通过 MaxEnt 模型的重要性分析显示,有 7 个变量因子的贡献率达到 5% 以上,累计贡献率为 88%,其中猎物(雪兔)为最主要影响变量,占比为 23.5%,随后分别为:1.草地(15.4%)、2.河流(14.2%)、3.海拔(13.2%)、4.常绿针叶林(7.7%)、5.落叶针叶林(7.2%)、6.坡向(6.8%)。

3.3 变量对紫貂活动的影响

根据 Jackknife 检验和环境变量对模型的贡献率结

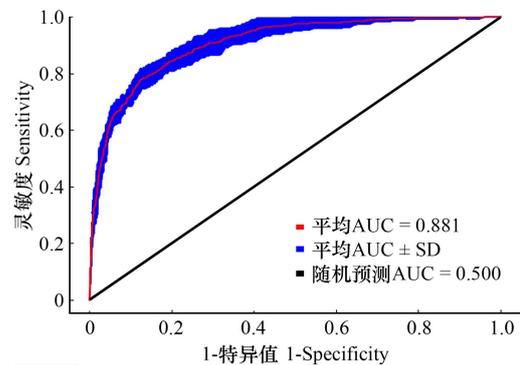


图 5 紫貂栖息地评价结果的 ROC 曲线验证

Fig.5 ROC curve verification for habitat suitability evaluation of *Martes zibellina*

ROC 曲线:受试者工作特征曲线 Receiver operating characteristic curve; AUC: ROC 曲线下的面积 Area under ROC curve; SD: 标准差 Standard Deviation

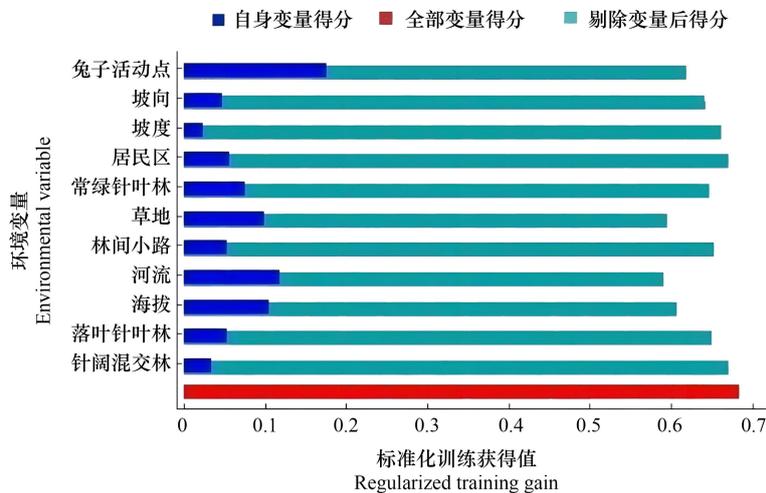


图 6 Jackknife 检验环境变量的重要性

Fig.6 Jackknife test of environmental variable importance

果综合分析了这 7 种主要变量因子对紫貂适宜性的影响。对于猎物资源,当雪兔的出现概率大于 0.4 后,紫貂的出现概率达到最高,随着雪兔出现概率的增加,紫貂的出现概率随之上升,随后趋于不变;其他变量中,紫貂在距离草地约 200m 时出现概率最高,距离草地越远时紫貂出现概率逐渐下降。紫貂的出现概率与距离河流距离表现为负相关,距河流距离越近紫貂的出现概率越高。紫貂偏爱分布海拔 400—600m 的中海拔地区,海拔高于 600m 后紫貂的出现概率开始逐渐下降。在距常绿针叶林 1.5km 时为紫貂出现概率的最高点,随着距常绿针叶林距离的增加,其出现概率也在逐渐降低。该地区的紫貂出现概率与距落叶针叶林的距离表现为负相关,随着距落叶针叶林距离的增加,紫貂的出现概率也在明显下降。50°—250°的坡向为紫貂偏爱分布的坡向,该范围主要以南、西、西南等阳坡为主,在此坡向的紫貂出现概率较高(图 7)。

3.4 栖息地适宜性评价

栖息地适宜性分析表明(图 8),北极村国家级自然保护区紫貂的适宜栖息地、次适宜栖息地、一般适宜栖息地、不适宜栖息地面积分别 3.85km²、19.81km²、50.76km²和 63.133km²占研究区域总面积的 2.8%、14.4%、36.9%和 45.9%;其中适宜栖息地主要分布于保护区中部和西南部的河东林场、前哨林场,东部河湾林场和西北部金沟林场区域栖息地破碎化较严重,适宜栖息地面积较少,并存在严重的斑块化问题。

4 讨论

4.1 数据收集方法

已有的研究表明选用多种方法收集动物活动点数据综合用于栖息地适宜性评价研究,获得的研究结果能更加真实、全面反映目标物种分布区栖息地的实际情况^[33]。本研究采用相机监测、样线调查并跟踪新鲜足迹链,两种方法综合收集紫貂和雪兔活动点用于紫貂栖息地适宜性研究中。相机监测从 2021 年开始至 2022 年 10 月结束,累计相机捕获日达 3840 个。已有研究表明,当相机监测野生动物达 250—300 个相机捕获日时,野生动物出现点的监测数据较为真实准确^[34],且相机监测收集的动物活动点用于栖息地评价时具有较好的效果^[35];样线布设范围覆盖保护区 85%以上,包括核心区、缓冲区和试验区,总长度 175km。由于紫貂体型较小且种群数量相对较少,活动点较难收集,因此在进行样线调查时对其足迹链进行了跟踪:(1)沿紫貂足迹链每间隔 100m 定位收集相关数据,保证用于栖息地建模数据在空间上的独立性,减少了空间自相关带来的负面影响;(2)增加了紫貂活动点数据,提高了模型预测的准确性。样线调查与足迹链跟踪方法均通过专业调查人员对目标动物足迹信息进行收集,可以快捷准确的收集到动物活动过程中的信息数据^[36],提高了潜在适

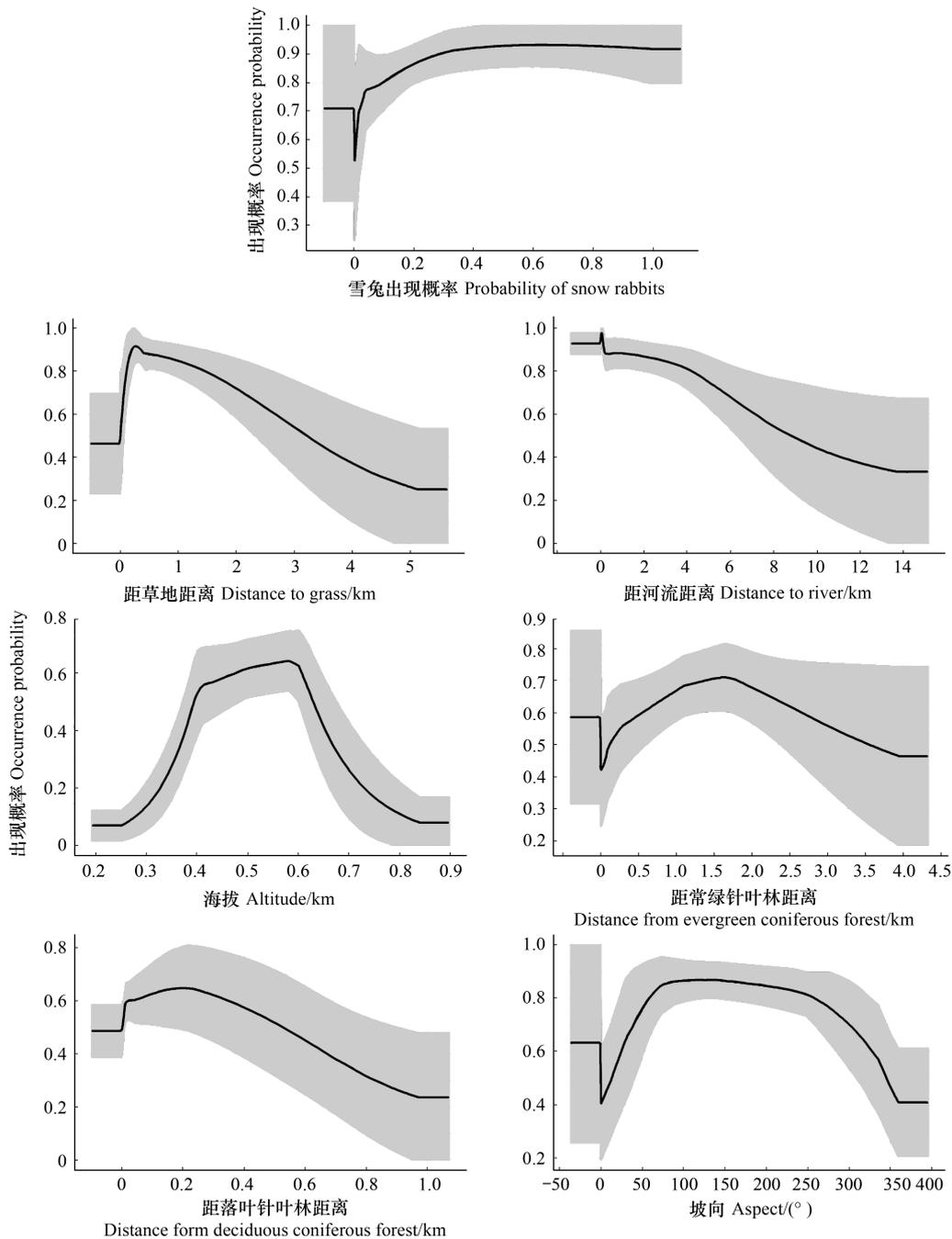


图7 主要变量因子响应曲线

Fig.7 Response curve of dominant variables

灰色阴影部分:平均响应 \pm 标准差

宜栖息地评估时的准确性。

4.2 最优 MaxEnt 建模尺度的选择

随着野生动物保护的不断发展,越来越多的模型被开发用于野生动物适宜栖息地分布的评价研究中^[6], MaxEnt 模型自 2004 年开发以来广泛应用于亚洲象^[9]、亚洲黑熊^[10]、雪豹^[11]、大熊猫^[12]等珍稀濒危物种适宜栖息地评价研究,是目前预测物种栖息地适宜性空间分布的最佳建模方法之一^[37],但这些研究均未考虑背景资料空间分辨率问题。已有研究表明在不同的分辨率尺度利用相同的动物出现点进行模型预测获得的结果

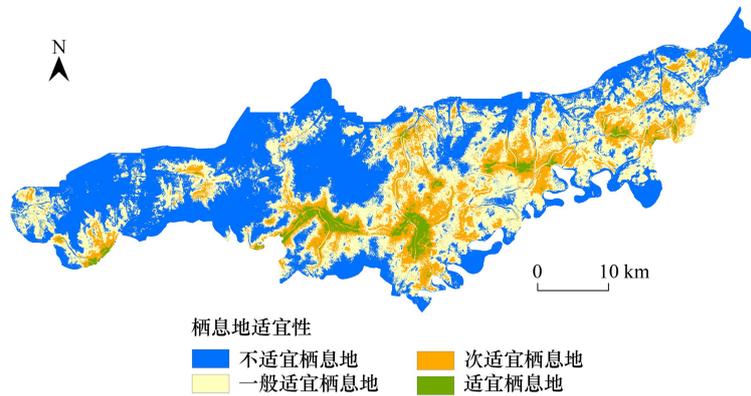


图 8 北极村保护区适宜栖息地分布图

Fig.8 The habitat suitable distribution map of *Martes zibellina*

存在差异^[18]。不同分辨率对模型的预测结果会产生重要影响^[19]。通过多尺度分析发现,物种-环境的关系间存在尺度依赖性,环境变量对预测结果的解释能力在 6 个尺度上存在差异,这可能因为不同分辨率尺度下景观影响的规模大小发生了变化,导致变量因子的贡献率产生差异。研究认为 30—120m 的 3 个不同尺度下 7 种主要变量能够为该地区紫貂适宜性建模最佳尺度范围研究提供证据,在三个尺度中 7 种变量的累计贡献率均在 80% 以上,且重要性排序也较为接近(图 4),表明物种-生境间的关系在这些尺度上无太大差异。虽然 6 个尺度的 AUC 值(0.881—0.905)均满足后续预测需求,但 30—120m 尺度范围建模无疑是更优选择。最后我们结合实际情况,考虑到研究区域面积相对较小,较细尺度对于所研究物种的描述更为细化等因素,最终选定在 30m 分辨率尺度上进行建模研究。

研究以 30m 和 240m 分辨率尺度下紫貂的适宜栖息地预测结果为例(图 9),作为小型哺乳动物,紫貂在 240m 分辨率尺度下建模,红色区域内几乎无适宜或次适宜栖息地出现,但在实际样线调查中发现该区域内人为干扰较少,且分布有河流、草地等紫貂适宜性主要影响因子,显然这一尺度下的预测结果将为紫貂保护规划带来错误性的数据支持;而同区域 30m 分辨率尺度下的预测结果,则存在部分紫貂一般适宜或次适宜栖息地分布。研究认为,通过多尺度分析选择最佳分辨率建模尺度,可以提高该地区所研究物种栖息地适宜性预测的准确性。

4.3 紫貂栖息地适宜性评价

研究表明猎物资源——雪兔为影响保护区内紫貂栖息地适宜性最主要的因素。本研究所在的北极村保

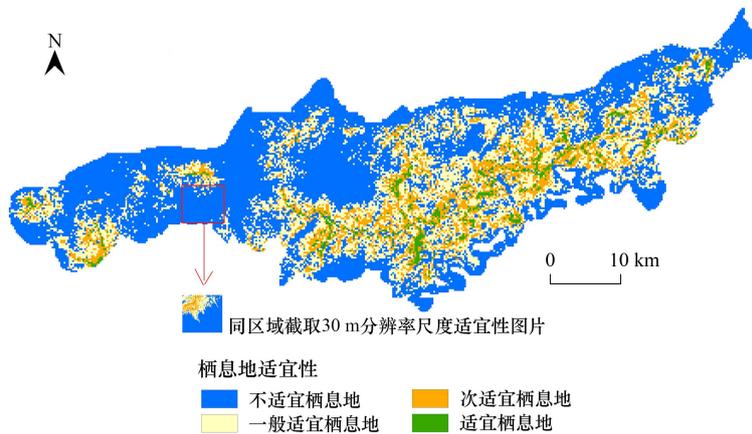


图 9 240m 分辨率尺度下适宜栖息地分布图

Fig.9 The habitat suitable distribution map at 480m resolution scale

保护区位于我国的最北端,地处北纬 53°带,该地区冬季漫长且寒冷,通过实地调查后发现,该区域仅有雪兔一种兔类,无其他兔类分布,因此作为紫貂的猎物资源之一^[38],在食物匮乏的冬季,雪兔对于该区域紫貂适宜栖息地的分布具有重大影响,在 0—0.3 范围内随着雪兔出现概率的增加,紫貂的出现概率也在明显上升,但在 0.3 以后其相关性减弱。草地是紫貂理想的觅食场所,在有着丰富植物种子和浆果的同时,也为雪兔提供了易于隐蔽的微场所^[38],因此距离草地较近的区域为紫貂出现频率较高的区域;河流作为较稳定水源地的同时,也能为紫貂提供丰富的食物,因此紫貂偏好选择距离河流较近的栖息地,这与大兴安岭双河^[24]和盘古林场^[26]的紫貂栖息地研究结果类似,表明水源对于紫貂的栖息地选择具有重要影响;北极村自然保护区的紫貂主要栖息于中海拔地区,这与朱洪强在黄泥河保护区^[39],张洪海在大兴安岭北岸林场^[40]对紫貂的生境选择研究结果类似,与金光耀在大兴安岭双河自然保护区^[24]紫貂偏爱栖息于高海拔地区的研究结果有所不同。由于地理区域的不同,与海拔相关的环境因子也具有明显差异^[39],因此造成了紫貂不同海拔栖息地选择上的差异。北极村国家级自然保护区作为我国最北端的保护区,属于典型的寒温带大陆性气候,在这里,针叶林占据主导地位,紫貂主要选择距离常绿针叶林 1.5km 且距落叶针叶林较近的区域活动,而该地区针阔混交林面积较少,不能作为影响该地区紫貂栖息地选择的主要环境变量,这也与金光耀等^[24]紫貂偏爱在针阔混交林中活动的结果有所不同。坡向为影响该地区紫貂适宜性的主要地形变量,紫貂偏爱分布于 50—250°的坡向,而此为南、西和西南等阳坡,阳坡为适宜紫貂栖息的坡向这与盛琪等人研究类似^[26],其因为阳坡由于具有更好的光照强度,更有利于紫貂对于食物的获取。

本次研究结果表明研究区域的适宜、次适宜栖息地面积仅占整个研究区域的 17.2%,主要分布在保护区中部的河东林场和西南部前哨林场,而西北部金沟林场、东部河湾林场区域分布较少,西北部呈现出栖息地孤立化,东部则表现出破碎化、连通性差等问题;不适宜栖息地为 45.9%,集中分布于保护区西部和北部边缘地区,由于这里建有北极村国家森林公园,公路分布及旅游旺季时游客车辆进出公园较多,人为干扰严重致使不适宜栖息地的出现。北部边缘为黑龙江,冬季江面结冰,且江边分布有灌溉农田,致使隐蔽物较少,食物资源匮乏,因此不适宜紫貂生存。本研究认为在保持现有紫貂栖息地的同时,也应严格控制人类的干扰活动,避免因人类干扰造成不适宜栖息地面积的扩张,可以建立生态廊道促进保护区西部紫貂与中部紫貂进行个体交流降低种群局部灭绝的风险;对东部地区破碎化的栖息地进行保护,扩大东部适宜栖息地面积,使破碎化的栖息地连接为整体,为分布于我国最北端的紫貂种群栖息地恢复创造条件,从而维持北极村国家级自然保护区的生物多样性和生态平衡。

参考文献 (References):

- [1] 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. 兽类学报, 2021, 41(5): 604-613.
- [2] Ramirez-Delgado J P, Di Marco M, Watson J E M, Johnson C J, Rondinini C, Corredor Llano X, Arias M, Venter O. Matrix condition mediates the effects of habitat fragmentation on species extinction risk. Nature Communications, 2022, 13(1): 1-10.
- [3] She W, Gu J Y, Holyoak M, Yan C, Qi J Z, Wan X R, Liu S Y, Xu L, Roberts N J, Zhang Z B, Jiang G S. Impacts of top predators and humans on the mammal communities of recovering temperate forest regions. Science of the Total Environment, 2023, 862: 160812.
- [4] Zhang R, Yang L, Ai L, Yang Q Y, Chen M H, Li J X, Yang L, Luan X F. Geographic characteristics of sable (*Martes zibellina*) distribution over time in Northeast China. Ecology and Evolution, 2017, 7(11): 4016-4023.
- [5] 杨楠, 马东源, 钟雪, 杨孔, 周志强, 周华龙, 周材权, 王彬. 基于 MaxEnt 模型的四川王朗国家级自然保护区蓝马鸡栖息地适宜性评价. 生态学报, 2020, 40(19): 7064-7072.
- [6] Norberg A, Abrego N, Blanchet F, Adler F, Anderson B, Anttila J V, Araújo M, Dallas T, Dunson D, Elith J, Foster S, Fox R, Franklin J, Godsoe W, Guisan A, O'Hara B, Hill N, Holt R, Hui F, Husby M, Kålås J, Lehtikoinen A, Luoto M, Mod H K, Newell G, Renner I, Roslin T, Soininen J, Thuiller W, Vanhatalo J, Warton D, White M, Zimmermann N, Gravel D, Ovaskainen O. A comprehensive evaluation of predictive performance of 33 species distribution models at species and community levels. Ecol Monogr, 2019, 89(3): e01370.
- [7] Ranjith Layola M R, Semwal M, Rana T S, Nair N. Predicting potential suitable habitat for *Ensete glaucum* (Roxb.) Cheesman using MaxEnt modelling. Flora, 2022, 287: 152007.
- [8] 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. 生态学报, 2013, 33(22): 7243-7249.
- [9] 姜志诚. 气候背景下中国野生亚洲象适宜生境的最大熵模型(MaxEnt)预测[D]. 昆明: 云南大学, 2019.

- [10] Su H Y, Bista M, Li M S. Mapping habitat suitability for Asiatic black bear and red panda in Makalu Barun National Park of Nepal from Maxent and GARP models. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1-14.
- [11] Holt C D S, Nevin O T, Smith D, Convery I. Environmental niche overlap between snow leopard and four prey species in Kazakhstan. *Ecological Informatics*, 2018, 48: 97-103.
- [12] 戎战磊, 周宏, 韦伟, 张晋东, 谌利民, 张泽钧. 基于 MAXENT 模型的唐家河自然保护区大熊猫生境适宜性评价. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2017, 53(2): 269-273, 278.
- [13] Henderson A F, Santoro J A, Kremer P. Impacts of spatial scale and resolution on species distribution models of American chestnut (*Castanea dentata*) in Pennsylvania, USA. *Forest Ecology and Management*, 2023, 529: 120741.
- [14] 白伊露, 李艳红, 郑维超, 陈万里, 谌利民, 黎大勇, 胡杰. 唐家河国家级自然保护区川金丝猴生境适宜性评价. *生态学报*, 2021, 41(11): 4460-4468.
- [15] 朱宇静, 李沂韦, 俞丹莉, 孙治宇, 金贵祥, 夏万才, 黎大勇. 基于 MaxEnt 模型的川金丝猴栖息地评价——以白河国家级自然保护区为例. *普洱学院学报*, 2020, 36(6): 1-4.
- [16] 刘策, 张日, 杜海荣, 孙悦, 袁子奥, 于晶晶, 张明海. 气候变化对中国梅花鹿潜在栖息地影响. *野生动物学报*, 2021, 42(2): 329-340.
- [17] 袁智文, 徐爱春, 俞平新, 郭瑞, 李春林. 浙江清凉峰国家级自然保护区华南梅花鹿栖息地适宜性评价. *生态学报*, 2020, 40(18): 6672-6677.
- [18] Frazier A E, Honzák M, Hudson C, Perlin R, Tohtsonie A, Gaddis K D, Sousa C, Larsen T H, Junker J, Nyandwi S, Trgovac A B. Connectivity and conservation of Western Chimpanzee (*Pan troglodytes Verus*) habitat in Liberia. *Diversity and Distributions*, 2021, 27(7): 1235-1250.
- [19] Sun X, Long Z X, Jia J B. A multi-scale Maxent approach to model habitat suitability for the giant pandas in the Qionglai Mountain, China. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 30: e01766.
- [20] 马逸清, 吴家炎. 我国紫貂种下分类的研究——包括一新亚种. *动物学报*, 1981, 27(2): 189-196.
- [21] 张睿. 基于历史资料中国五种濒危动物历史分布变化(1950—2010) [D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [22] 杨蕾, 杨立, 李婧昕, 张超, 霍兆敏, 栾晓峰. 东北地区 5 个物种潜在栖息地变化与优化保护规划. *生态学报*, 2019, 39(3): 1082-1094.
- [23] Zhang H H. Spring habitat selection of sables in Daxing'an Mountains. *Journal of Forestry Research*, 1999, 10(2): 111-114.
- [24] 金光耀, 张明海, 姜广顺, 周绍春. 大兴安岭双河国家级自然保护区大兴安岭紫貂亚种冬季生境选择及生境适宜性研究. 第十三届全国野生动物生态与资源保护学术研讨会暨第六届中国西部动物学学术研讨会论文摘要集. 成都, 2017: 154.
- [25] 李海军, 朱世兵, 张士芳, 赵雪东, 陈鹏. 大兴安岭北部地区紫貂冬季生境评价. *国土与自然资源研究*, 2016(5): 71-75.
- [26] 盛琪, 董灵波, 刘兆刚. 应用 GIS 对野生动物生境适宜性的评价——以大兴安岭盘古林场紫貂为例. *东北林业大学学报*, 2020, 48(6): 157-162.
- [27] 中共中央办公厅国务院印发《关于进一步加强生物多样性保护的意见》. *中华人民共和国国务院公报*, 2021, 31: 39-43.
- [28] Phillips S J, Anderson R P, Dudík M, Schapire R E, Blair M E. Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*, 2017, 40(7): 887-893.
- [29] 龚旭, 付强, 王磊, 杨彪, 张全建, 张远彬. 四川鞍子河保护地水鹿和羚牛栖息地适宜性评价与重叠性分析. *生态学报*, 2020, 40(14): 4842-4851.
- [30] 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.
- [31] Alvarenga G C, Chiaverini L, Cushman S A, Dröge E, MacDonald D W, Kantek D L Z, Morato R G, Thompson J J, Oscar R B L M, Abade L, de Azevedo F C C, Ramalho E E, Kaszta Ž. Multi-scale path-level analysis of jaguar habitat use in the Pantanal ecosystem. *Biological Conservation*, 2021, 253: 108900.
- [32] 田新民, 陈红, 钟林强, 黄海娇, 刘小慧, 张子栋, 杨孟平, 周绍春. 黑龙江省老爷岭南部穆稜林区马鹿种群分布数量及生境适宜性评价. *生态学报*, 2022, 42(14): 5980-5989.
- [33] Zhou S C, Zhang M H. An integrated analysis into the causes of ungulate mortality in the Wanda Mountains (Heilongjiang Province, China) and an evaluation of habitat quality. *Biological Conservation*, 2011, 144(10): 2517-2523.
- [34] Rovero F, Marshall A R. Camera trapping photographic rate as an index of density in forest ungulates. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 46(5): 1011-1017.
- [35] Gilbert N A, Pease B S, Anhalt-Depies C M, Clare J D J, Stenglein J L, Townsend P A, Van Deelen T R, Zuckerberg B. Integrating harvest and camera trap data in species distribution models. *Biological Conservation*, 2021, 258: 109147.
- [36] 刘辉, 姜广顺, 李惠. 北方冬季有蹄类动物 4 种数量调查方法的比较. *生态学报*, 2015, 35(9): 3076-3086.
- [37] 李龙, 王亮, 温阿敏, 闫世伟, 姚晓军. 基于 MaxEnt 模型的甘肃安西极旱荒漠国家级自然保护区北山羊生境评估. *生态学报*, 2021, 41(24): 9932-9940.
- [38] 包新康, 马建章, 张迎梅. 大兴安岭紫貂食物组成分析. *兽类学报*, 2003, 23(3): 203-207.
- [39] 朱洪强, 朴敏娟, 兰佳宇, 李灵贝, 刘佳琪, 朱文字, 阎庚华, 程龙. 黄泥河保护区三种鼬科动物冬季生境选择研究. *野生动物学报*, 2019, 40(1): 75-82.
- [40] 张洪海, 马建章. 紫貂冬季生境的偏好. *动物学研究*, 1999, 20(5): 355-359.