

DOI: 10.5846/stxb202009062314

刘红彩, 赵纳勋, 庄钰琪, 杨梅玲, 赵惠茹, 叶新平. 基于 MaxEnt 模型的秦岭山地斑羚生境适宜性评价. 生态学报, 2022, 42(10): 4181-4188.

Liu H C, Zhao N X, Zhuang Y Q, Yang M L, Zhao H R, Ye X P. Assessment of habitat suitability for *Naemorhedus griseus* in the Qinling Mountains with MaxEnt model. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 4181-4188.

基于 MaxEnt 模型的秦岭山地斑羚生境适宜性评价

刘红彩¹, 赵纳勋², 庄钰琪³, 杨梅玲³, 赵惠茹³, 叶新平^{3,*}

1 陕西佛坪国家级自然保护区管理局, 汉中 723400

2 陕西长青国家级自然保护区管理局, 汉中 723000

3 陕西师范大学生命科学学院, 西安 710062

摘要: 生境适宜性评价对野生动物的保护与管理具有重要意义。为了解陕西秦岭地区斑羚 (*Naemorhedus griseus*) 的生境状况, 利用 2011—2013 年间在秦岭地区采集的斑羚分布点数据, 通过 MaxEnt 模型对陕西秦岭地区的斑羚生境进行适宜性评价。结果表明, 陕西秦岭地区的斑羚适宜生境面积约为 9800 km², 占秦岭山地面积的 17%, 主要位于秦岭中西部区域; 次适宜生境面积约为 6940 km², 占秦岭面积的 12%, 主要位于适宜生境的周边区域。海拔、月均昼夜温差和年降雨量是影响陕西秦岭地区斑羚生境适宜性的主要环境变量, 而人类干扰对生境适宜性的影响较小。陕西秦岭地区的斑羚偏好于选择 1800—3000 m 的中高海拔区间, 年降水量为 750—850 mm、月均昼夜温差 8℃ 左右的环境。明确了斑羚适宜生境在秦岭的分布状况及关键环境影响因子, 可为下一步制定濒危动物保护和生境管理提供理论依据。

关键词: 斑羚; 生境适宜性; 最大熵模型; 秦岭

Assessment of habitat suitability for *Naemorhedus griseus* in the Qinling Mountains with MaxEnt model

LIU Hongcai¹, ZHAO Naxun², ZHUANG Yuqi³, YANG Meiling³, ZHAO Huiru³, YE Xinping^{3,*}

1 Administration Bureau of Foping National Nature Reserve, Hanzhong 723400, China

2 Administration Bureau of Changqing National Nature Reserve, Hanzhong 723000, China

3 College of Life Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China

Abstract: Habitat assessment is of great importance for effective wildlife conservation and management. Presence-only species distribution models (SDMs), such as the Maximum Entropy (MaxEnt) model, are widely used in ecology and conservation to estimate species-environment relationships and spatial distributions. The Chinese goral (*Naemorhedus griseus*) is an endangered species and its habitats are fragmented largely caused by human activities. To understand the habitat status of the Chinese goral in the Qinling Mountains of Shaanxi Province, this study evaluated the habitat suitability for the Chinese goral using the MaxEnt with 210 occurrence records and 9 environmental variables. The species occurrences were collected from field investigations carried out in 2011—2013. The environmental variables used for constructing the SDM were elevation, slope, aspect, normalized difference vegetation index, distance to nearest residential area, distance to nearest roads, mean diurnal temperature range, annual precipitation, and precipitation of driest month. The results showed that the areas of suitable habitats and marginal habitats for the Chinese goral were about 9800 km² and 6940 km² in the Qinling Mountains, which accounted for 17% and 12% of the total area, respectively. The suitable habitats for the Chinese gorals were mainly located in the central and western parts of the Qinling Mountains, while the marginal habitats were in the surrounding areas of the suitable habitats. The mean diurnal temperature range, elevation and annual precipitation were the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31672310); 世界自然基金会保护项目 (10002980)

收稿日期: 2020-09-06; 网络出版日期: 2022-01-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yexinping@snnu.edu.cn

three environmental variables with the highest contribution rates, which were 41.2%, 38.5% and 14.1% respectively, while the cumulative contribution rate is 93.8%, indicating that they were the main environmental variables affecting the suitability of the goral's habitats in the Qinling Mountains. The Jackknife test indicated that elevation and mean diurnal temperature range were the dominant environmental factors affecting habitat suitability, whereas the human disturbances had less effects on it. The Chinese gorals preferred to choose living at high elevation regions (1800—3000 m) in that the annual precipitation is about 750—850 mm and the average diurnal temperature is about 8 °C. The results provide baseline information for future biodiversity conservation planning and landscape management in the Qinling Mountains. The suitable habitat area of gorals in the southwest of Qinling Mountains is seriously fragmented and strongly disturbed by human activities. Therefore, it is necessary to strengthen the systematic monitoring of wildlife and human activities, and establish wildlife corridors in this area to improve the habitat connectivity for Chinese gorals and other species at-risk, so as to promote the long-term survival of wildlife in the Qinling Mountains.

Key Words: *Naemorhedus griseus*; habitat suitability; MaxEnt; the Qinling Mountains

生境是物种生存、繁衍及种群发展的关键资源,生境的质量可显著影响物种分布、种群密度、繁殖成功率及存活率^[1]。因此,物种保护不仅需要维持其种群数量,更需要保护其赖以生存的生境^[2]。制定科学的区域物种保护对策,首先需要了解区域内目标物种的生境分布及质量^[3]。生境适宜性评价可从宏观尺度了解适宜物种生存的空间及其生境质量,评估与筛选影响物种的关键环境因子,对物种的有效保护和栖息地管理具有重要意义^[2-4]。生境适宜性评价一般选用生态位模型进行研究,其中最大熵模型(Maximum Entropy Models, MaxEnt)是最具代表性且最常用的生态位模型之一^[5-6]。MaxEnt模型的显著优点是该模型仅需要物种的实际分布点数据就可对物种的栖息环境进行评估和预测,特别是在物种分布数据不全或很少的情况下,MaxEnt模型也能取得良好的预测结果^[7-9],因而被广泛应用于物种的生境评价、潜在分布空间预测、气候变化对物种分布的影响等多方面研究^[9-12]。

中华斑羚(*Naemorhedus griseus*)简称斑羚,属偶蹄目(Artiodactyla)、牛科(Bovidae)、斑羚属(*Naemorhedus*),是我国II级重点保护野生动物,在《世界自然保护联盟(IUNC)濒危物种红色名录》中被列入易危级物种^[13-14]。斑羚属于典型林栖兽类,主要分布于中国东北、华北、西北、华南及西南诸省区,常见于山地针叶林、针阔混交林和常绿阔叶林中,是豹(*Panthera pardus*)和金猫(*Catopuma temminckii*)等大中型食肉动物的主要食物来源,亦是大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)同域分布的主要伴生动物之一^[15]。陕西秦岭地区是中华斑羚的核心分布区之一,但由于历史上大规模的森林砍伐,导致适宜斑羚生活的栖息地不断丧失及破碎化,生境质量明显下降^[16-19]。根据第一次全国陆生野生动物资源调查,陕西秦岭山区斑羚种群数量约为5—6万只,分布面积约30000 km²^[16]。由于疥螨病传播,秦岭地区的斑羚自2008年开始出现大量死亡,其中死亡高峰期为2010—2015年,导致斑羚种群数量急剧下降^[19]。目前有关陕西秦岭地区的斑羚及其生境研究开展相对较少,仅有零星报道^[16]。鉴于斑羚在维持秦岭地区生物多样性及生态系统稳定中具有重要作用,有必要对陕西秦岭地区斑羚的生境适宜性进行评价,充分了解其生境质量状况及关键影响因子。本文基于MaxEnt生态位模型和3S技术对陕西秦岭山地斑羚潜在生境适宜性进行评价,分析了地形、气候、植被和人为干扰等环境因素对斑羚生境质量的潜在影响,以期对陕西秦岭地区的斑羚种群及其栖息地保护与恢复提供参考。

1 研究区域概况

研究区为位于陕西省境内的秦岭山地(图1),地理区间为105°30'—110°05'E, 32°40'—34°35'N,东接伏牛山,西至岷山,北临渭河平原,南至汉江北岸,东西长400—500 km,南北宽150—200 km,总面积约57620 km²。秦岭山势起伏,区内相对高差3000 m以上,是中国南北地理分界线与气候分界线,也是中国中部地区生态环境的过渡地带及敏感区^[11-12]。受大陆性气候和季风性气候的双重影响,秦岭地区的气候及植被垂直分异明显,海拔2200 m以下为落叶阔叶林带,2200—2600 m为针阔叶混交林带,2400—3000 m为常绿针叶林

带,2700—3400 m 为落叶针叶林带,3300—3765 m 为高山灌丛草甸^[20-21]。秦岭地区分布有哺乳动物 87 种,占中国大陆兽类总数的 20%;鸟类 338 种,占中国鸟类总数的 30%;其中最为著名的是被誉为“秦岭四宝”的大熊猫、金丝猴(*Rhinopithecus roxellanae*)、羚牛(*Budorcas taxicolor*)和朱鹮(*Nipponia nippon*)等国家重点保护动物^[22]。

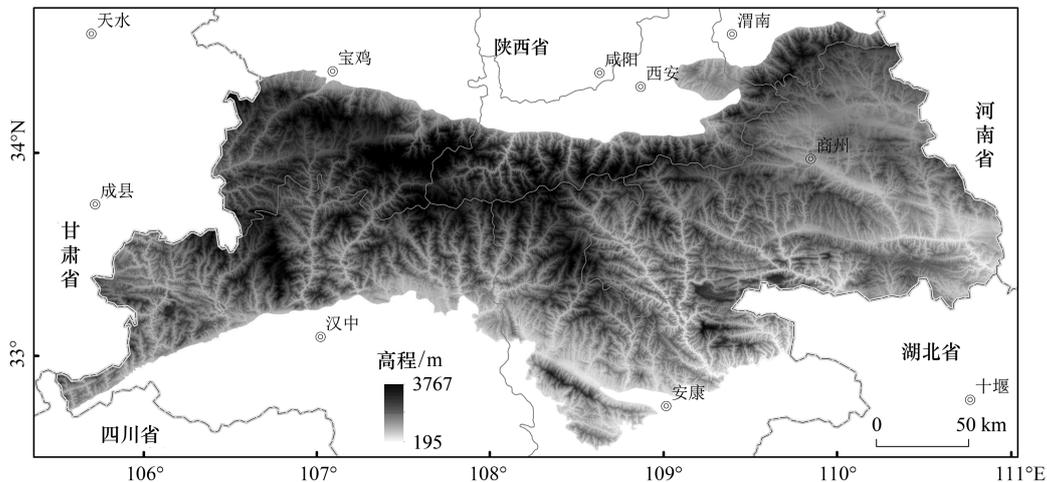


图 1 陕西秦岭山区数字高程模型 (DEM) 示意图

Fig.1 The digital elevation model (DEM) of the Qinling Mountains in Shaanxi Province, China

2 研究方法

2.1 模型简介

MaxEnt 模型是由 Phillips 等^[5]于 2004 年开发的一种基于最大熵原理的生态位模型。该模型利用物种的实际分布点数据,通过分析物种分布位点的各种环境变量特征(如气候、地形)的约束条件,探寻在该约束条件下最大熵的可能分布,以此得到物种生境的空间分布和适宜程度^[5-6]。该模型操作简单快速且具有良好的预测能力,在建模时只需要大于 5 个物种出现位点数据,同时模型带有自检验功能^[5-6],可以生成 ROC 曲线下面积(AUC)来评价模型的模拟精度和不同环境变量的重要性,因此被广泛用于物种的生境评价、适宜和潜在空间分布预测、生物入侵、气候变化对物种分布的潜在影响等研究^[9-12]。特别是在野生动物的“未出现点”数据(Absence data)难以准确采集的情况下,MaxEnt 模型在动物生境模拟和评估中具有更大的优势^[6-7,21]。

2.2 物种分布数据

斑羚实际分布点数据来源于陕西省第四次大熊猫调查中同步开展的同域分布野生动物调查(2011—2013)^[23]。根据秦岭山地的地形地貌及植被特点,按“用最短距离穿越最多生境类型”原则布设了 2400 条调查样线,在冬春季节对样线开展徒步调查,记录样线上发现的野生动物实体及新鲜粪便等所处的经纬度以及海拔、植被等生境特征^[23]。为减少物种分布数据空间自相关性的影响,利用 ArcGIS 插件“SDM Toolbox”^[24]中的 Spatially Rarely Occurrence Data for SDMs 工具,对 2479 个斑羚原始分布点进行 2 km 间距空间稀释,共筛选出 210 个分布点用于 MaxEnt 模型分析,如图 2 所示。

2.3 环境变量数据

本研究选择地形因素(海拔、坡度、坡向)、气候因素(19 个生物气候变量)、植被因素(归一化植被指数)、人为干扰因素(距道路距离、距居民点距离)共 4 类 25 个环境因子作为斑羚生境适宜性评价的影响因子^[25-26]。地形因子数据基于中国科学院科学数据库 30 m 分辨率的数字高程模型(Digital elevation model, DEM)计算提取得到;归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)来自地理空间数据云网

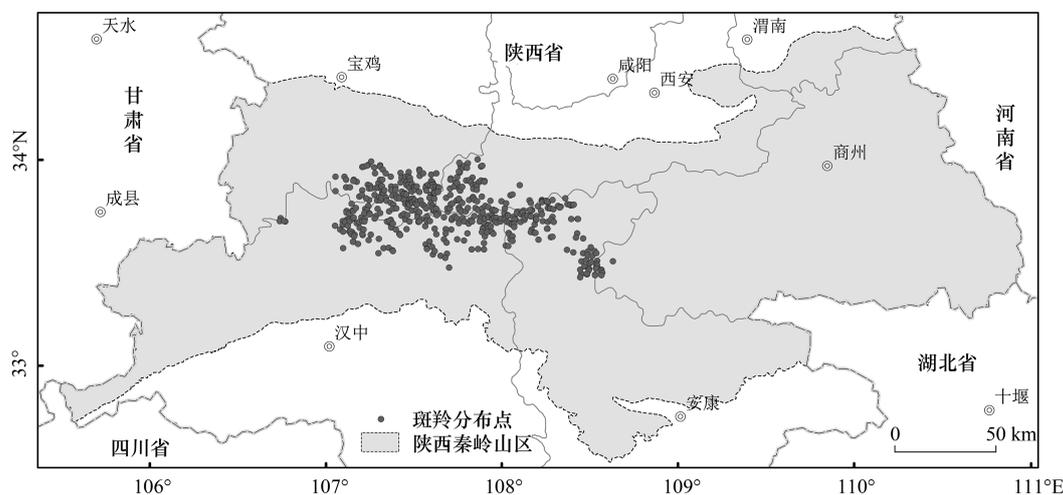


图2 陕西秦岭山区中华斑羚分布点示意图

Fig.2 The occurrence records of Chinese goral in the Qinling Mountains

站 (<http://www.gscloud.cn>) 的 2012 年 MYD13Q1 16 天合成产品 (空间分辨率 250 m); 气候数据来自世界气候数据库 WorldClim 网站 (<https://www.worldclim.org/>) 的 19 个生物气候变量^[27], 空间分辨率为 30 弧秒; 道路和居民点数据来源于国家基础地理信息中心的 2010 年 1:100 万地理矢量数据, 并通过 ArcGIS 10.2 中的欧式距离计算, 分别得到研究区域各个像元距道路距离和距居民点距离的栅格图层。所有环境变量均通过重采样 (Resampling) 转化为 100 m 分辨率的 ASCII 栅格数据, 并统一为 WGS_1984_UTM_Zone_48N 投影坐标系。

为了减少上述环境变量间的空间相关性对模型预测精度的潜在影响, 首先利用 SDM 工具包中的 Raster Correlations and Summary Statistics 工具, 剔除空间相关性过高 ($|r| \geq 0.75$) 的环境变量^[28], 最终筛选出 9 个环境变量用于构建斑羚生态位模型: 坡向、坡度、海拔、NDVI、距公路距离、距居民点距离、月均昼夜温差、年降水量和最干月降水量。

2.4 MaxEnt 模型分析

将斑羚分布位点和上述 9 个环境变量导入 MaxEnt 模型^[5], 随机选取 75% 的斑羚分布数据用于模型训练, 剩余 25% 的分布数据用于模型验证, 选取自举法 (Bootstrap) 为重复运行类别, 重复数设为 10, 随机背景点数量设定为 10000, 其他参数为模型默认值。模型预测效果采用受试者工作特征 (ROC) 曲线下的面积 (AUC) 值进行检验。采用刀切法 (Jackknife) 检验环境变量对模型预测的重要性和贡献值, 并通过环境因子的反应曲线分析关键环境变量的影响^[11-12]。MaxEnt 模型输出结果为 Logistic 格式 (0—1) 的连续栅格数据, 每个栅格数值代表了该栅格的生境适宜度指数 (habitat suitability index, HSI)。

2.5 生境适宜性划分

选择模型最大训练敏感性和特异性 (maximum training sensitivity plus specificity, MTSS) 以及平衡训练遗漏率、预测面积及阈值 (balance training omission, predicted area and threshold value, TPT) 分别作为适宜生境和次适宜生境的分类阈值对 MaxEnt 模型输出结果进行重分类, 将秦岭山地斑羚潜在生境质量划分为 3 个等级: 适宜生境、次适宜生境和不适宜生境^[29-30], 统计各生境类型生境面积并制图。生境适宜性重分类及面积统计和制图均在 ArcGIS 10.2 软件中完成。

3 结果与分析

3.1 MaxEnt 模型评价

陕西秦岭地区的斑羚生境预测模型的平均训练集 AUC 值为 0.923, 验证集 AUC 值为 0.916, 表明 MaxEnt

模型的预测结果精确度达到优秀水平,适合用于评估陕西秦岭地区斑羚的生境适宜性。

3.2 环境因子对斑羚生境的影响

环境变量贡献性分析结果(表 1)表明,月均昼夜温差、海拔和年降雨量是贡献率最高的 3 个环境变量,其贡献率分别为 41.2%、38.5%和 14.1%,而累计贡献率则达到 93.8%,说明它们是影响秦岭山地斑羚生境适宜性的主要环境变量;最干月降雨量和距居民点距离的贡献率分别为 2.6%和 1.6%,是影响斑羚生境质量的次要变量;而坡向、距道路距离、NDVI 和坡度的贡献率均小于 1%,说明对斑羚生境适宜性的影响很小。AUC 值刀切法检验结果(图 3)亦显示海拔和月均昼夜温差对模型预测结果的影响最大,但距居民点距离、距道路距离、年降雨量和最干月降雨量的影响次之,而 NDVI、坡度和坡向对模型结果的影响较小。

通过斑羚生境适宜性对主要环境变量的响应曲线可以发现,斑羚偏好于月均昼夜温差中等偏低的环境,其生境适宜性在 8℃ 昼夜温差左右为最好,昼夜温差太大的区域则不适宜于斑羚分布。斑羚多倾向于选择 1800—3000 m 的中高海拔区间,海拔太高或太低则限制了斑羚的分布。斑羚亦回避降水量过高或过低的区域,其最适宜的年降水量区间为 750—850 mm(图 4)。

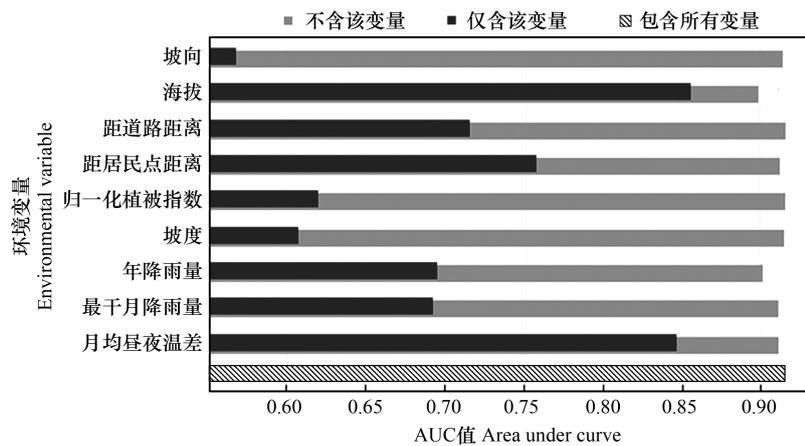


图 3 刀切法检验各环境变量的重要性

Fig.3 The importance of environmental variables evaluated by Jackknife testing

AUC: 曲线下面积

表 1 各环境变量对 MAXENT 模型的贡献率

Table 1 Contributions of the environmental variables to the MaxEnt model

变量 Variable	贡献率/% Contribution	变量 Variable	贡献率/% Contribution
月均昼夜温差 Mean diurnal temperature range	41.2	坡向 Aspect	0.8
海拔 Elevation	38.5	距道路距离 Distance to nearest roads	0.5
年降雨量 Annual precipitation	14.1	归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	0.4
最干月降雨量 Precipitation of driest month	2.6	坡度 Slope	0.2
距居民点距离 Distance to nearest residential area	1.6		

3.3 秦岭地区斑羚潜在适宜生境分布

MaxEnt 模型的 MTSS 和 TPT 值分别为 0.35 和 0.06。因此,斑羚的适宜生境和次适宜生境的划分阈值分别为 0.35 和 0.06,即:HSI ≥ 0.35 为适宜生境,0.35>HSI>0.06 为次适宜生境,HSI ≤ 0.06 为不适宜生境。采

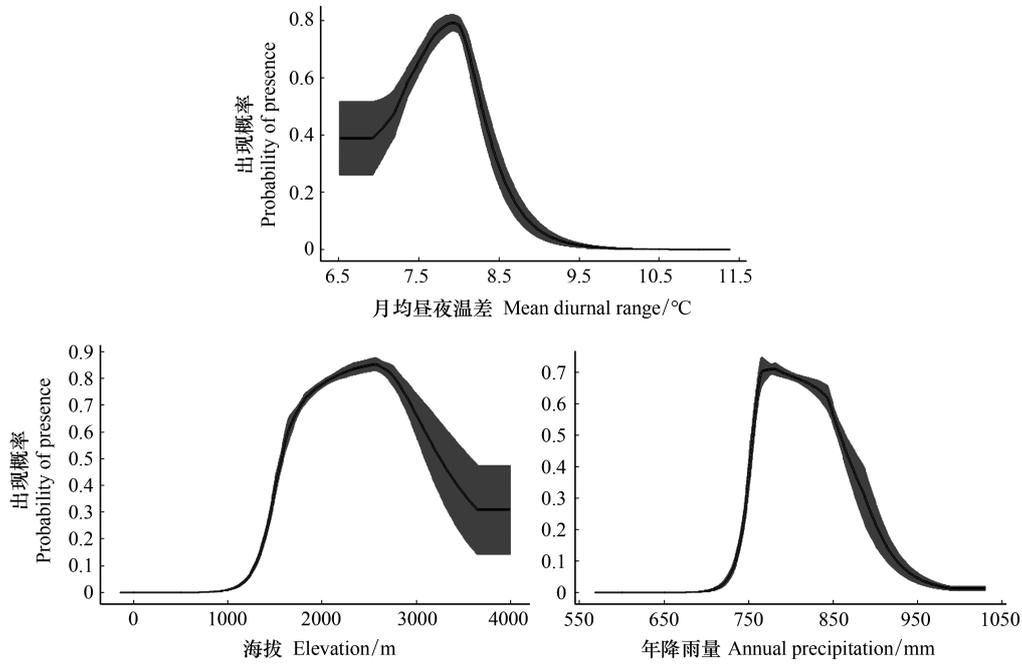


图 4 生境适宜性对主导环境变量的响应曲线

Fig.4 The response curves of habitat suitability to major environmental factors

用上述阈值对模型输出结果进行重分类,得到秦岭地区斑羚潜在适宜生境分布图(图 5)。经统计,秦岭山地斑羚的适宜生境面积为 9800 km²,占陕西秦岭地区面积的 17%,主要位于陕西秦岭的中西部区域且具有较好的连通性,在秦岭西南部也有少量分散的适宜生境;斑羚的次适宜生境面积为 6940 km²,占秦岭山地的 12%,主要分布于适宜生境的周边区域;不适宜生境面积为 40880 km²,占秦岭山地的 71%,主要分布于秦岭东部区域和中西部区域的低海拔区域。

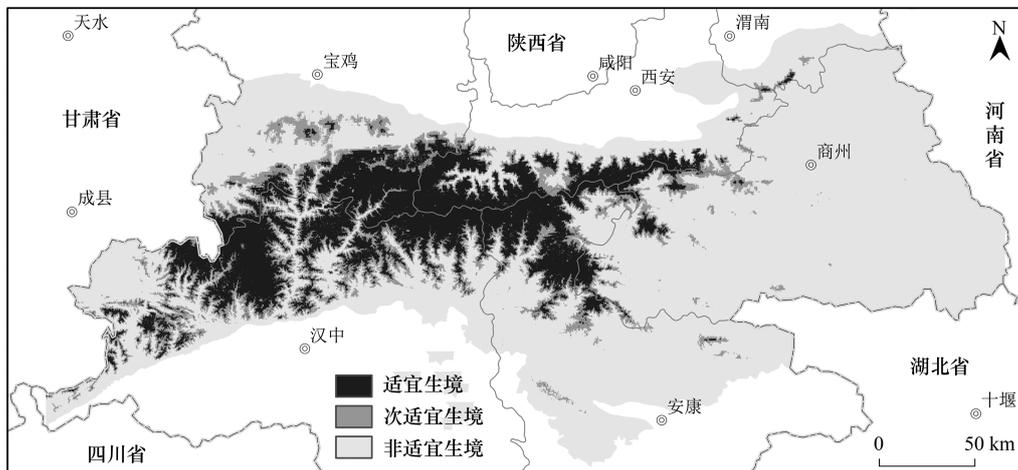


图 5 陕西秦岭山区中华斑羚生境适宜性分布图

Fig.5 Map of the habitat suitability of Chinese gorals in the Qinling Mountains

4 讨论

本文应用 MaxEnt 模型对陕西秦岭地区斑羚的生境适宜性进行了评估,预测结果精确度达到优秀水平。

根据模型预测,陕西秦岭地区斑羚的适宜和次适宜生境主要分布于秦岭中西部昼夜温差和降雨量适中的中高海拔地带,总面积约为 16740 km²(占陕西秦岭山地面积的 29%),远低于第一次全国陆生野生动物资源调查估计的分布面积(约 30000 km²)^[16],但明显高于罗翀的研究结果(约 8575 km²)^[31],这主要是由于分析方法不同所致。第一次全国陆生野生动物资源调查的分布面积是以县为统计单位,因此面积统计为分布县的面积而不是斑羚的实际分布面积,而罗翀的研究中没有考虑气候因素,并且划分适宜生境的阈值也大于本研究所使用的阈值,由此导致预测的生境面积明显小于本研究的预测结果。

本研究结果表明,海拔高度、月均昼夜温差和年降雨量这 3 个变量是影响秦岭斑羚生境质量的主要因素,这与已有的研究结果^[31-33]基本一致。海拔高度是影响斑羚分布的最重要因子之一,决定了秦岭山地的植被分布,其中海拔 2200 m 以下为落叶阔叶林带,2200—2600 m 为针阔叶混交林带,生境适宜性较高,其后随着海拔增高进入山地针叶林带,生境适宜性逐渐降低。而两个气候因子的贡献率位居前列,这可能是由于秦岭山大沟深并处于南北气候的交汇区域,东西向和南北向的自然气候条件变化较大,降水量过高或过低都会限制斑羚的分布,而昼夜温差太大也会限制斑羚的分布,因此限制了斑羚在秦岭东部区域的分布,但对中西部区域的适宜生境预测更为明确。

与现有斑羚栖息地选择研究结果^[31-33]不同的是,本研究结果显示地形、NDVI、居民点和道路等干扰因子对斑羚的影响并不显著,这可能是两者的研究尺度不同导致,即存在尺度效应^[34-35]。已有的栖息地选择研究为保护区范围的小尺度研究,而本文的研究区域覆盖了陕西秦岭山地全境,环境空间异质性明显高于保护区等小范围区域。斑羚食性较广,取食植物种类多样,并且生性胆小,对于人类和捕食者十分警觉。人类主要居住在海拔 1700 m 以下的区域,由于天然林保护及退耕还林等政策实施,人类活动范围和强度显著下降,所以斑羚并没有对干扰因子产生强烈的响应。此外,NDVI 间接反映了食物资源的丰富程度,而秦岭山地植被茂密,在 1500—2500 m 的斑羚主要活动区间内食物资源较为丰富且可利用性好,因而在不同等级的植被覆盖度中斑羚的出现率相当^[17],表现为对 NDVI 空间差异的响应不显著。

本研究所使用的斑羚野外分布点数据来源于陕西省第四次大熊猫调查中开展的伴生动物调查。由于调查区域仅为秦岭大熊猫的分布区及周边区域(6365 km²),缺少大熊猫分布区外的斑羚分布点,因此具有一定的局限性。虽然已有研究证明,当物种分布数据不全或很少的情况下,MaxEnt 模型也能取得良好的预测结果^[7-9],但数据的不完整性有可能会对评估结果产生影响。此外,本研究没有考虑不同道路等级、土壤类型和植被分布等因素对斑羚分布的潜在影响。如果能够综合并细化所有对斑羚生存有影响的因素,并使用更全面的物种分布点数据,将会得到更准确的评价结果^[35]。

秦岭山地是斑羚的重要集中分布区域之一^[15],但由于历史上大规模的森林砍伐,除了 80 年代设立的自然保护区之外,斑羚栖息地不断丧失及破碎化,生境质量下降^[16-19]。自 1998 年国家陆续实施天然林保护和退耕还林以来,新建了许多自然保护区和森林公园,保护和管理力度不断加强,采取了禁止采伐和限制农耕等一系列保护措施,使秦岭山地植被得以恢复,环境承载力得到提高。从本研究结果来看,人为干扰仍然对斑羚栖息地质量有一定影响。因此,应加强对秦岭山地斑羚等野生动物资源和人类活动监测,准确把握野生动物种群和人类干扰状况,并加强秦岭地区道路的规划和管理,新建道路的选线应尽量避免斑羚频繁出没的地段。秦岭西南部的斑羚适宜生境面积小且破碎化严重,受人为干扰较为强烈,不利于斑羚生存,因此有必要在该区域建立野生动物廊道以改善斑羚生境适宜性。此外,应加强当地居民的宣传教育,使人们充分认识到斑羚等野生动物作为食物网重要组分的意义和价值,提高居民的野生动物保护意识,以期推动秦岭山地斑羚种群的稳步发展。

致谢:感谢陕西省林业局、陕西佛坪国家级自然保护区管理局和陕西长青国家级自然保护区管理局提供数据支持。

参考文献 (References):

- [1] Fahrig L, Merriam G. Conservation of fragmented populations. *Conservation Biology*, 1994, 8(1): 50-59.
- [2] 蒋志刚, 马克平, 韩兴国. 保护生物学. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1997.
- [3] 欧阳志云, 刘建国, 肖寒, 谭迎春, 张和民. 卧龙自然保护区大熊猫生境评价. *生态学报*, 2001, 21(11): 1869-1874.
- [4] 王金亮, 陈姚. 3S 技术在野生动物生境研究中的应用. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(6): 44-47.
- [5] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [6] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent; new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 2008, 31(2): 161-175.
- [7] 邢丁亮, 郝占庆. 最大熵原理及其在生态学研究中的应用. *生物多样性*, 2011, 19(3): 295-302.
- [8] Pearson R G, Raxworthy C J, Nakamura M, Peterson A T. Original article: predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 2007, 34(1): 102-117.
- [9] Hernandez P A, Graham C H, Master L L, Albert D L. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography*, 2006, 29(5): 773-785.
- [10] Saupe E E, Qiao H J, Hendricks J R, Portell R W, Hunter S J, Soberón J, Lieberman B S. Niche breadth and geographic range size as determinants of species survival on geological time scales. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, 24(10): 1159-1169.
- [11] 徐卫华, 罗翀. MAXENT 模型在秦岭川金丝猴生境评价中的应用. *森林工程*, 2010, 26(2): 1-3, 26-26.
- [12] 齐增湘, 徐卫华, 熊兴耀, 欧阳志云, 郑华, 甘德欣. 基于 MAXENT 模型的秦岭山系黑熊潜在生境评价. *生物多样性*, 2011, 19(3): 343-352.
- [13] 蒋志刚. 中国脊椎动物生存现状研究. *生物多样性*, 2016, 24(5): 495-499.
- [14] IUCN 2019. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2019-2. <https://www.iucnredlist.org>. Downloaded on 01 January 2020.
- [15] 蒋志刚, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英. 中国哺乳动物多样性及地理分布. 北京: 科学出版社, 2015.
- [16] 马福, 张建龙. 中国重点陆生野生动物资源调查. 北京: 中国林业出版社, 2009.
- [17] 唐书培, 穆丽光, 王晓玲, 张静, 刘波, 孟和达来, 鲍伟东. 基于 MaxEnt 模型的赛罕乌拉国家级自然保护区斑羚生境适宜性评价. *北京林业大学学报*, 2019, 41(1): 102-108.
- [18] 程跃红, 王敏, 王超, 马联平, 何廷美, 王鹏彦. 川西亚高山斑羚冬春季死亡调查及保护策略. *四川林业科技*, 2018, 39(1): 54-58, 65-65.
- [19] 吴桥兴, 裴俊峰, 金学林, 县怡涵, 常玲玲, 车利锋, 李芳芳, 赵泽明, 沈洁, 刘育强. 秦岭野生斑羚死亡原因调查. *动物医学进展*, 2019, 40(12): 136-139.
- [20] 朱志诚. 秦岭及其以北黄土区植被地带性特征. *地理科学*, 1991, 11(2): 157-164.
- [21] 任毅, 王玛丽, 岳明, 李智军. 秦岭大熊猫栖息地植物. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998.
- [22] 闵芝兰. 陕西省重点保护野生动物. 北京: 中国林业出版社, 1991.
- [23] 周灵国. 秦岭大熊猫: 陕西省第四次大熊猫调查报告. 西安: 陕西科学技术出版社, 2017.
- [24] Brown J L. SDMtoolbox: a python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5(7): 694-700.
- [25] Wen L, Saintilan N, Yang X H, Hunter S, Mawer D. MODIS NDVI based metrics improve habitat suitability modelling in fragmented patchy floodplains. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2015, 1: 85-97.
- [26] 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.
- [27] Fick S E, Hijmans R J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(12): 4302-4315.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Clark J, Wang Y Q, August P V. Assessing current and projected suitable habitats for tree-of-heaven along the Appalachian Trail. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2014, 369(1643): 20130192.
- [31] 罗翀. 秦岭山系重要保护哺乳动物生境评价与保护对策[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [32] 边坤, 王开锋, 刘楚光, 司开创, 宋代博, 王志军. 秦岭周至自然保护区斑羚夏冬季生境选择利用. *生态学杂志*, 2016, 35(6): 1553-1560.
- [33] 吴华, 张泽均, 胡锦矗. 唐家河自然保护区斑羚春冬季对生境的选择. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2002, (2): 92-97.
- [34] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟. 景观生态学原理及应用(第二版). 北京: 科学出版社, 2011.
- [35] 朱世兵, 曲艺, Anna Y, Ivan K, Robert S, Viatcheslav R, Antonio H B J, 张士芳, 刘应竹, 张弘强. 基于 MaxEnt 模型的小兴安岭东北虎潜在生境适宜性评价. *兽类学报*, 2020, 40(4): 317-328.