

DOI: 10.5846/stxb202009192440

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. 生态学报, 2023, 43(6): 2202-2209.

Li F F, Li L, Wu G S, Yuan L, Meng C L, Guo H Y, Zhou Y, Ma C X, Gao Y Y, Xue Y D, Li D Q, Dai Y C. Habitat suitability assessment of *Panthera uncia* in Qilian Mountains of Qinghai based on MAXENT modeling. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(6): 2202-2209.

基于最大熵模型的青海祁连山雪豹生境适宜性评价

李芳菲^{1,2}, 李 丽^{2,*}, 吴巩胜², 袁 磊¹, 孟春林¹, 国洪艳¹, 周 跃², 马存新³, 高雅月⁴, 薛亚东⁵, 李迪强⁵, 代云川⁶

1 云南财经大学城市与环境学院, 昆明 650221

2 云南财经大学野生动植物管理与生态系统健康研究中心, 昆明 650221

3 祁连山国家公园青海服务保障中心, 西宁 810000

4 祁连山国家公园青海省管理局/祁连山国家公园国家长期科研基地, 西宁 810000

5 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所/生物多样性保护国家林业和草原局重点实验室, 北京 100091

6 重庆社会科学院生态与环境资源研究所/生态安全与绿色发展研究中心, 重庆 400020

摘要:近年来, 各种人为和自然因素导致了青海祁连山山区局部出现了严重的生态破坏, 加剧了祁连山雪豹生境的退化, 如何有效地对雪豹生境进行适宜性评价是恢复和改善祁连山生态环境的重要途径。本研究基于 3S 技术, 在青海祁连山雪豹分布区利用红外相机监测、日常巡护监测以及雪豹粪便、脚印等痕迹获得其分布点数据并综合考虑气候、地形、植被、人为干扰等关键环境变量, 运用 MAXENT 模型对青海祁连山区域雪豹生境适宜性进行分析评价。研究结果表明: 岩羊密度、降雨和海拔是影响雪豹生境选择的关键因子, 适宜生境总面积为 13935.98 km², 占研究区域的 37%, 而大约 48% 的适宜生境分布在保护区外。现有功能区下雪豹保护的关键区域为位于保护区中部及西北部区域的祁连山中段疏勒南山-托勒南山区域, 另有部分最适宜区位于保护区管辖范围之外的祁连县北部的沙龙滩管护站、托勒河源管护站及瓦乎斯管护站所在区域。

关键词:雪豹; 3S 技术; 生境; 最大熵 (MAXENT) 模型; 适宜性评价

Habitat suitability assessment of *Panthera uncia* in Qilian Mountains of Qinghai based on MAXENT modeling

LI Fangfei^{1,2}, LI Li^{2,*}, WU Gongsheng², YUAN Lei¹, MENG Chunlin¹, GUO Hongyan¹, ZHOU Yue², MA Cunxin³, GAO Yayue⁴, XUE Yadong⁵, LI Diqiang⁵, DAI Yunchuan⁶

1 School of Urban and Environment, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, China

2 Wildlife Management and Ecosystem Health Center, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, China

3 Qinghai Service Guarantee Center of Qilian Mountain National Park, Xining 810000, China

4 Qinghai Administration of Qilian Mountain National Park/National Long-term Scientific Research Base of Qilian Mountain National Park, Xining 810000, China

5 Key Laboratory of Biodiversity Conservation, State Forestry and Grassland Administration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

6 Institute for Ecology and Environmental Resources, Research Center for Ecological Security and Green Development, Chongqing Academy of Social Sciences, Chongqing 400020, China

基金项目:国家重点研发项目课题 (2017YFC0506405)

收稿日期:2020-09-19; **网络出版日期:**2022-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 601336244@qq.com

Abstract: Severely ecological damage in the Qilian Mountains is aggravating the fragmentation and degradation of the vulnerable snow leopard's habitat. This damage in recent years comes from both human and natural factors. Evaluating this habitat is a key component to improve, and perhaps restore, the creature's home. The data from infrared cameras, snow leopard excrement, and snow leopard footprints was integrated with climate, terrain, and disturbance factors. The MAXENT model was used to evaluate the habitat's suitability for the snow leopard. The results show that the rainfall, altitude, and the density of bharal (blue sheep) are critical factors for the habitat's suitability. About 37% (~14000 km²) of the study area was found to be suitable. Unfortunately, not all this suitable area was protected by the nature reserve. Snow Leopard protection is most critically needed in the Shulenan Mountain and Tuolenan Mountain areas within in the Qilian Mountain range, located in the central and northwestern region of the reserve. Outside of the reserve, Sharon Beach Management Station, Tuole River Headwater Management Station, and Wahusi Management and Protection Station in the northern part of Qilian County are also critical areas needing protection for the Snow Leopard.

Key Words: snow leopard; 3S technology; habitat; MAXENT model; suitability evaluation

生境的破碎和丧失是生物多样性降低的关键因素^[1],因此生境保护是维持物种生存和生物多样性稳定的根本前提。生境适宜性评价是以物种对生境的需求为基础,结合区域内各生态因子的分布情况,以此明确区域内该物种的适宜地理分布^[2],是分析保护对象种群减少、濒危原因的重要方式,可为制定有效的保护决策提供依据^[3]。深入了解物种的生态习性及其地理分布规律是开展保护规划与潜在分布预测的重要内容,也是生物多样性保护过程中识别生态与进化关键要素的重要基础^[4]。

雪豹(*Panthera uncia*)是一种仅存在于中亚高山地区的珍稀濒危大型猫科动物^[5],在 IUCN 物种红色名录中被列为易危(VU)种,是国家一级重点保护动物^[6]。全世界约 60%以上的雪豹栖息地分布于中国^[7],其中,青海省祁连山区作为世界高寒种质资源库是我国重要的生物多样性保护热点区域、野生动物迁徙的重要廊道^[8],更是青藏高原旗舰物种雪豹的关键栖息地之一^[9],其种群生存状况很好地反映了祁连山整体生态系统的健康与否。然而,近年来各种人为和自然因素导致山区局部出现了严重的生态破坏问题,祁连山南坡景观整体破碎化程度较高^[8];山区野生动物栖息环境恶化^[10];超载放牧造成了严重的草地退化,生态环境萎缩^[11]。以上种种加剧了祁连山雪豹生境退化的威胁,因此,基于雪豹生境保护开展的生境适宜性评价是恢复和改善祁连山生态环境的重要保障。

雪豹的相关研究涉及多个领域,比如种群密度^[12]、遗传多样性^[13]、气候变化影响^[14]和栖息地选择^[15]等。研究表明:由海拔和坡度等构成的非生物因素和人为干扰等构成的生物因素,是决定雪豹栖息地的两个主要方面^[16—17]。祁连山是青海雪豹分布的重要区域^[18],然而该区域研究多集中于气候变化^[19]、植被变化分析^[20]和土壤性状^[21]等,尚未进行雪豹栖息地适宜性评估研究,导致了保护行动相对于先前研究出现明显的滞后。随着 3S 技术的发展,越来越多的生境模型广泛地应用于大尺度物种生境研究已成为近年来的研究热点之一^[22—23]。作为生态位模型的代表,最大熵(MAXENT)模型是一种可以仅依靠物种“出现点”数据和环境数据进行可靠、准确地物种分布模拟的主要研究方法,具有较高的模拟精度^[24—25],因在各物种生境适宜性研究中展现出优秀的预测能力而得到广泛应用^[26—27]。本研究在两年的青海祁连山野外调查的基础上,基于 MAXENT 模型对雪豹生境进行适宜性评价,旨在探讨以下问题:(1)使用 MAXENT 模型评估青海祁连山雪豹的潜在生境分布,以及关键影响因素;(2)确定祁连山国家公园(青海片区)现有功能区下雪豹保护的关键区域。

1 研究区概况

祁连山位于青藏高原东北部,地跨甘肃、青海两省(图 1),是我国西部的重要生态屏障,也是我国重要生态功能区和生物多样性保护优先区域^[9]。祁连山国家公园试点区地处青海、甘肃两省交界,总面积 5.02×10^4

km²,分为甘肃、青海两个片区。其中,青海省片区总面积 1.58×10^4 km²,占 31.5%^[9],行政区划涉及青海省海西蒙古族藏族自治州德令哈市、天峻县和海北藏族自治州祁连县、门源回族自治县 4 县(市)。试点区平均海拔 4000m 以上,年平均气温 -5.3℃,年平均降水量 400mm,属于高原大陆性气候特征^[28],主要保护对象为典型的森林生态系统,雪豹、白唇鹿和冬虫夏草等珍稀濒危野生动植物以及构成水源涵养生态系统的湿地、冰川等资源^[29]。研究区植被垂直分布特征明显:山地草原带(1800—2800m)、温带灌丛草原带(2000—2200m)、山地森林草原带(2600—3400m)、亚高山灌丛草甸带(3200—3500m)和高山亚冰雪稀疏植被带(>3500m)。

2 研究方法

2.1 雪豹出现点数据信息采集与处理

利用 2017 年以来的祁连山国家公园(青海片区)布设的红外相机(5km×5km 的公里网格作为地理参照,每个网格放置两个相距至少大于 1km 的位点的红外相机布设标准,安置 154 台红外相机于祁连山省级自然保护区^[9])提取到 56 个雪豹出现点,并根据各保护区的实际情况,分别于冬季和夏季对雪豹痕迹位置进行野外定点调查,补充收集到 80 个分布点。经过分辨距离筛选,最终得到共 136 个雪豹分布点(图 1)用于模型模拟。

按照模型要求,所有分布点的经纬度坐标在 Excel 表中统计后保存为 CSV 格式^[30]。

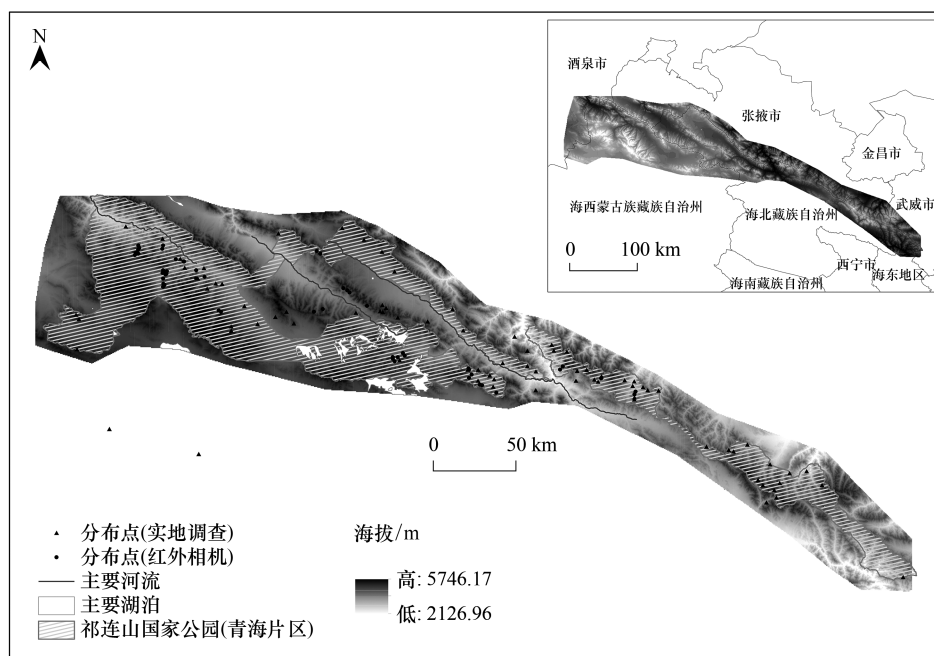


图 1 研究区位置及雪豹分布点

Fig.1 Study area location and snow leopard distribution points

2.2 环境变量信息获取与处理

本文综合选取雪豹生境选择相关的环境因子包括:气候因子、地形因子、植被因子、物种食源及人为干扰因子。气候数据来源于 WorldClim 气候数据库(<https://www.worldclim.org/>)的 19 个气候因子 bio1—bio19,分辨率为 30arc-seconds(约等 1 km)。植被归一化指数(Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)由中国科学院地理科学与资源研究所资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/>)获取。岩羊密度数据来源于红外相机提取及野外实地调查。人为干扰指数(Human Influence Index, HII)代表人为影响,通过人类可及性、人类土地利用和人口压力计算得出,获取自 NASA 社会经济数据与应用中心(<https://sedac.ciesin.columbia.edu/>)。从地理国情监测云平台获取 30m 分辨率的数字高程数据(DEM),并基于高程提取坡度。所有环境图层基于

ArcGIS 软件统一边界,坐标为 WGS-1984-UTM-Zone-47N,栅格大小为 500m×500m,并转换为“.asc”格式。

通过三步筛选,确定影响雪豹生境分布的关键环境变量^[31]。首先,使用刀切法(jackknife test)将用于筛选的环境变量全部添加至 MAXENT 模型,并删除贡献率低(<1%)的变量。其次,利用 ArcGIS10.4 软件中 Spatial Analyst 工具进行相关分析去除共线性过高($|r| \geq 0.8$)的因子。第三,筛选出贡献率高同时相关性低的变量在 MAXENT 模型中重复运算。

2.3 运用 MAXENT 模型进行适宜性预测与分析

将雪豹分布点数据和筛选所得环境变量数据导入 MAXENT 模型,随机选取 75% 的分布点用于训练集建立预测模型,剩余 25% 用于测试。勾选刀切法评估各变量贡献率,并绘制响应曲线对各因子进行敏感性分析,其他参数保持默认设置,预测结果以 logistic 格式输出^[32]。

模型采用受试者工作特征曲线(Receiver Operating Characteristic Curve, ROC 曲线)下面积值,即 AUC 值(Area Under Curve, AUC)评估 MAXENT 模型的精度,其值越接近于 1,表明所选环境变量与预测物种地理分布相关性越强,即模型预测精度越高^[33]。评定标准为:AUC 值为 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^[34]。

2.4 青海祁连山雪豹生境适宜性区划

MAXENT 模拟雪豹生境适宜性的输出结果为 ASC II 格式,导入 ArcGIS 软件进行重分类,同时叠加祁连山国家公园青海片区边界图进行可视化表达。本文采用最大训练敏感性加特异性之和为阈值^[35]将雪豹生境划分为不适宜区、次适宜区和最适宜区三个等级,并计算各等级面积及所占研究区域比例^[46]。

3 研究结果

3.1 模型预测精度检验

ROC 验证结果为:训练集与验证集的 AUC 值分别为 0.943 和 0.940,表明 MAXENT 模型预测精度较高(图 2)。

3.2 青海雪豹潜在生境与环境特征变量关系

经验证,8 个主导环境变量之间空间相关系数均小于 0.8,符合生境适宜性评价精度要求。由 Jackknife 检验结果可知(图 3),岩羊密度、降雨量变异系数和海拔是对预测效果增益最大的三个因子,表明三者对于雪豹在青海祁连山地区的生境分布影响较大。

各环境变量对 MAXENT 模型的贡献率(表 1)说明,岩羊密度为青海雪豹潜在分布的主要限制因子,单因子贡献率达 26.7%,其次,降雨量变异系数、年降水量、海拔、植被归一化指数、坡度、人类干扰指数和最干月降水量累计贡献率达 73.2%。

各主导环境变量与分布概率之间的响应曲线(图 4)表明,青海雪豹的生境分布在岩羊密度为 0.038 概率最大且在 0.06 时概率趋于平稳;随海拔升高而增加,适宜范围在 3950—5746m;降雨量变异系数在 106—111 之间概率最大,表示一年中各月份降雨量的差异性,其值越大,变化越大;坡度的适宜范围在 10—25°,17°以内概率分布随着坡度增加而上升,34°左右趋于平稳。地

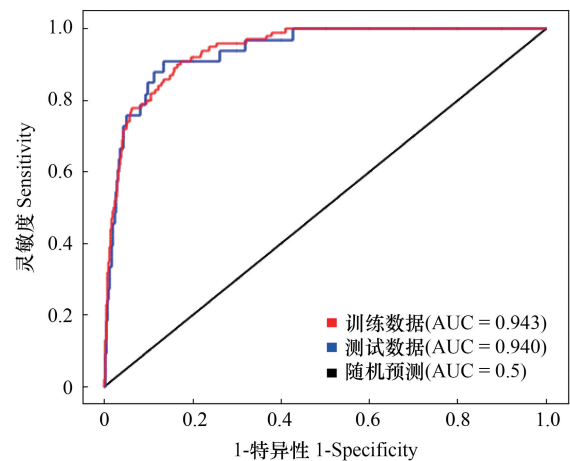


图 2 模型适用性检验 AUC 值

Fig.2 Model suitability test AUC value

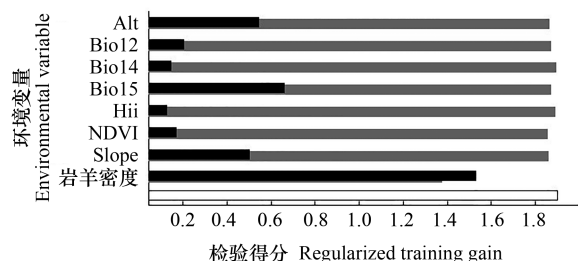


图 3 环境变量对青海雪豹分布的重要性

Fig.3 The importance of environmental variables for the distribution of Qinghai snow leopard

形因子(海拔和坡度)对于雪豹出现频次的曲线(图5)也可印证,雪豹在海拔3500m以上,坡度10—15°以上出现的概率达50%以上,根据祁连山垂直景观地带的划分,崎岖的高山草甸带(3500—3900m)是雪豹的主要生境类型。

表1 影响青海雪豹分布的环境变量贡献百分率

环境变量 Environmental variables	贡献百分率 Percent contribution/%
岩羊密度 The density of blue sheep	26.7
降雨量变异系数 Precipitation seasonality, Bio15	21.7
年降水量 Annual precipitation, Bio12	17.8
海拔 Altitude, Alt	15.4
植被归一化指数 Normalized difference vegetation index, NDVI	9.7
坡度 Slope	5.3
人类干扰指数 Human influence index, Hii	2.4
最干月降水量 Precipitation of driest month, Bio14	0.9

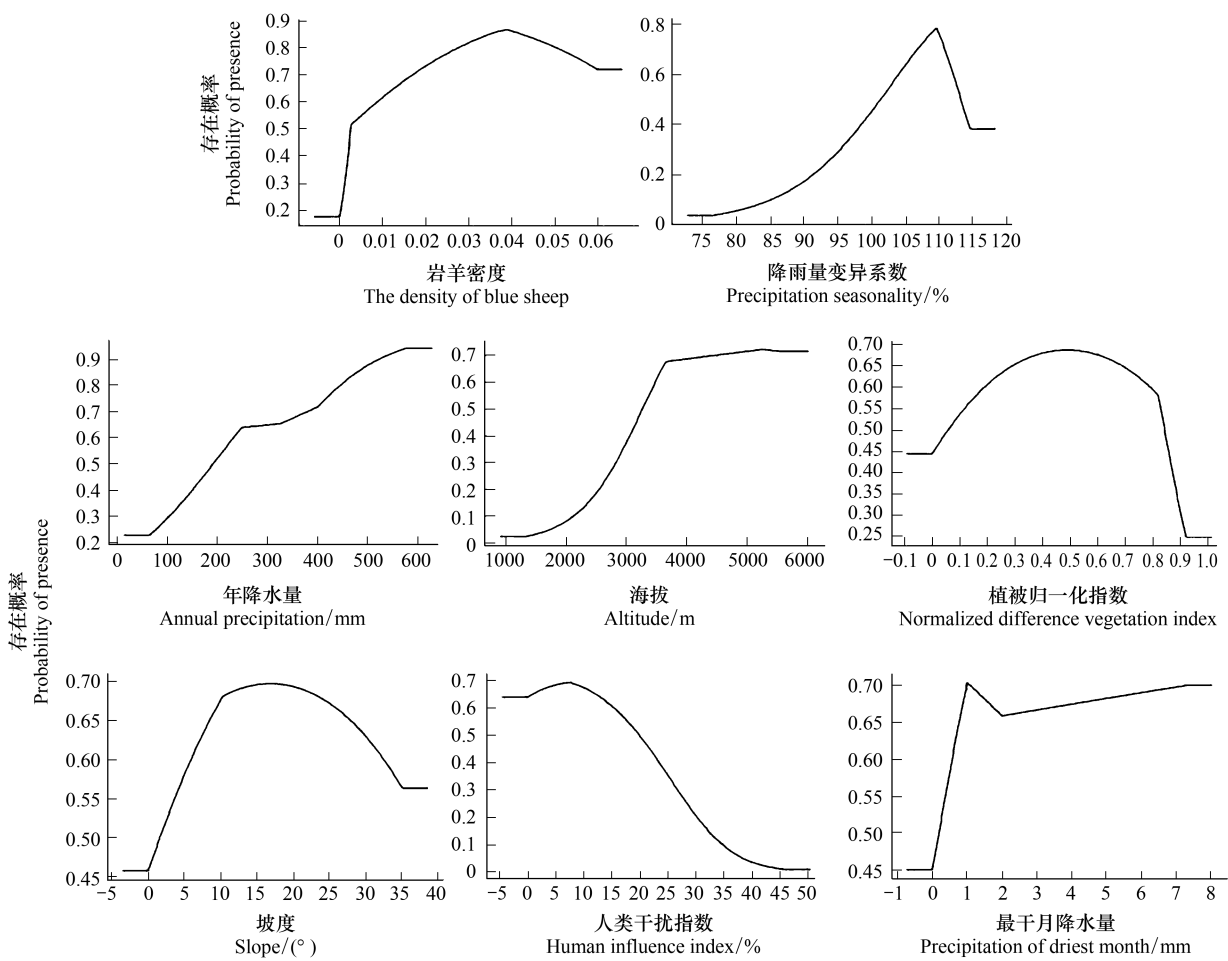


图4 预测概率对主导环境变量的响应曲线

Fig.4 Response curves of predicted probabilities to dominant environmental variables

3.3 青海祁连山雪豹生境适宜性分布

以模型最大训练敏感性加特异性之和 0.171 为阈值对祁连山雪豹分布预测结果在 ArcGIS 软件中进行重

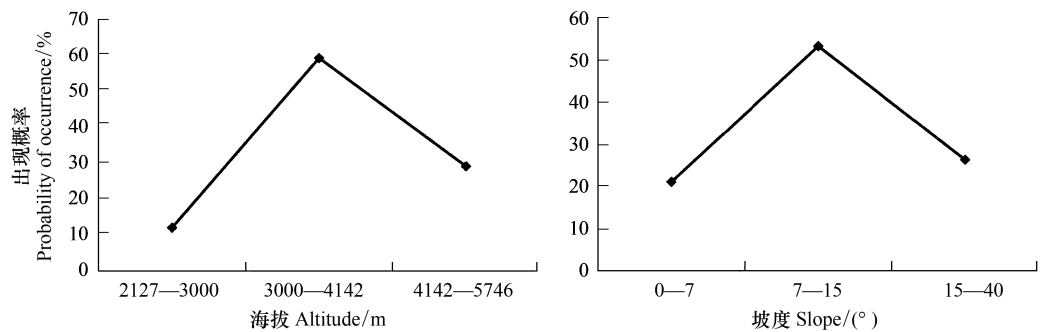


图 5 地形因子对雪豹出现频率的影响曲线

Fig.5 The influence curves of terrain factors on the frequency of snow leopards

分类,得到雪豹适宜生境区划图(图 6)。由图可知,祁连山国家公园(青海片区)现有功能区下雪豹保护的关键区域为祁连山东南坡中段的疏勒南山-托勒南山区域,位于保护区中部及西北部区域,为青海祁连山雪豹的最大栖息地。另有部分最适宜区位于保护区管辖范围之外的祁连县北部的沙龙滩管护站、托勒河源管护站及瓦乎斯管护站所在区域;次适宜区分布于保护区东南部和西北部,次适宜区和最适宜区交错分布;不适宜区则主要位于门源县东南部以及保护区以西。各适宜等级所占雪豹生境面积及比例如表 2 所示,除此之外有 6678.35km²的适宜区分布在国家公园之外。

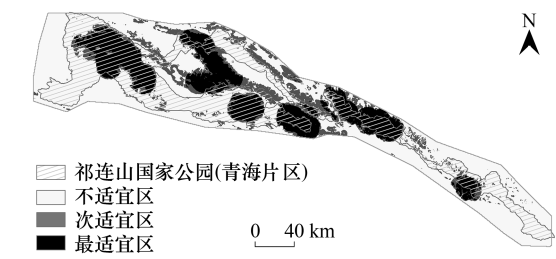


图 6 青海祁连山雪豹生境适宜性分布图

Fig.6 Distribution of snow leopards habitat suitability in Qilian Mountains, Qinghai

表 2 研究区内各适宜性等级所占面积及比例

适宜性等级 Suitability level	研究区 Study area		祁连山国家公园(青海片区) Qilian Mountain National Park (Qinghai area)	
	面积/km ²	%	面积/km ²	%
不适宜区 Unsuitable area	24225.44	63	8569.26	54
次适宜区 Sub-suitable area	5705.01	15	2145.82	14
最适宜区 Most suitable zone	8230.97	22	5111.81	32

4 讨论

物种分布对于环境因子的响应关系是生态学中物种生境需求与适宜性评价的重要研究内容之一。本文基于 MAXENT 最大熵模型,预测了雪豹在青海祁连山地区的地理分布,定性地选择 8 个环境变量数据,定量地划分了 3 个适宜等级的适生区,得出雪豹在青海祁连山的潜在分布区域大于保护区管辖范围,且模拟结果达到了优秀水平(AUC 值为 0.943)。通过实地野外调查以及县志记载得到的分布区与预测结果相一致,证实了 MAXENT 模型对于雪豹在青海祁连山地区的地理分布具有适用性。在物种分布数据较为不足的情况下,MAXENT 模型能够有效地明确该物种在某一区域的分布概率,从而为进一步开展野外调查及目标物种的保护提供指导意见,便于保护区制定更为合理有效的分区规划方案^[36]。

雪豹在青海祁连山的适宜生境主要分布于祁连山东南坡的中部以及西北部,关键区域为祁连山中段的疏勒南山-托勒南山区域,这与祁连山区不同区段降水、植被覆盖、地形及物种的食性有关。研究结果表明岩羊

密度是模型贡献率最高的影响因子,原因在于捕食动物的食性是其生态学特征的重要组成部分,并且是预测对其猎物种群造成的影响的重要依据^[37]。李娟和刘楚光^[38-39]的研究均表明,岩羊和牦牛是雪豹最为明显的食物偏好,其栖息环境的选择也深受这种依赖的影响。祁连山区降水的影响因素较为复杂,除高海拔之外,还受地理坐标、地形的影响,因此降水的季节、年际变化均较大^[40],印证了喜马拉雅山雪豹生境适宜性评价的研究结果。其次,坡度对于栖息地的重要性也得到了证实,雪豹喜好相对偏高的斜坡,以便有高大的岩石庇护^[41]。已有文献证明海拔是雪豹适生区主导因子之一,然而,海拔并不能直接影响雪豹的分布,而是作为温度的替代因子而间接的影响雪豹的生境:海拔每增加 1000m,温度降低 6.2℃^[42]。本研究证明了区域层面的降水和温度条件对雪豹的栖息地选择有很大影响^[43]。迟翔文^[44]等利用 MAXENT 模型对三江源国家公园的雪豹和岩羊进行生境适宜性评价,结果表明最干月降水量,海拔和坡度累计贡献率较高,与本研究结果相似;史晓昀^[45]等研究了四川邛崃山脉的雪豹与牦牛的潜在分布,得出温度季节性为贡献率最高的环境因子,与本研究结果不同,可能是由于青海祁连山和四川邛崃山气温、降水和植被分布差异较大,邛崃山的雪豹对于温度表示出明显的偏爱,对于海拔的限制则弱于温度,相对而言祁连山雪豹受海拔的影响则大于温度。

研究表明^[38],能够维持雪豹长期最小存活种群所需要的最小栖息地面积为 $1.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在本研究区域中尚有约 $1.08 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的保护空缺,其原因在于生境的离散破碎导致祁连山自然保护区虽覆盖大面积的雪豹适宜栖息地却无法维系雪豹种群的长期发展。本研究从青海祁连山雪豹保护及生态修复的角度提出以下几点建议:(1)根据国家有关野生动物保护、国家公园建设和自然保护地的方针政策和法律、法规,建立雪豹就地保护体系,保护雪豹生存景观,维持雪豹种群生存力。(2)评估保护区功能区效率。祁连山雪豹实际活动范围超出保护区边界,缺乏有效管护,应实施更好的保护策略并推广新的保护政策。(3)基于本文研究结果,下一步开展该区域的雪豹生境的潜在廊道研究及提出牧区管理规划建议。

由于时间和数据的限制,本文环境变量选取不够全面,诸多影响雪豹生境选择的环境因子尚未选择。雪深和土地覆被的信息将为雪豹生境的研究提供有力的理论支撑,有待于在下一步工作中得到数据的补充,人口空间分布等需要进一步的调查研究。本研究中雪豹分布点数据分别于 2017 至 2019 年的冬、夏季收集得到,短期的野外调查数据尚不足以支撑分别模拟雪豹冬季与夏季生境以深度分析其生境的季节特点的研究。因此,本次研究结果的完善与应用仍需长期的数据监测支撑。

参考文献 (References):

- [1] Fahrig L. Relative effects of habitat loss and fragmentation on population extinction. *The Journal of Wildlife Management*, 1997, 61(3): 603-610.
- [2] 高惠, 滕丽微, 汪洋, 王继飞, 刘振生. 阿拉善马鹿 (*Cervus alashanicus*) 生境适宜性评价. *生态学报*, 2017, 37(11): 3926-3931.
- [3] 杨彪, 张全建, 王彬, 龚旭, 段晨松, 张远彬. 基于 MaxEnt 模型的雅砻江冬麻豆生境适宜性评价. *生态学报*, 2020, 40(17): 6077-6085.
- [4] Elith J, Phillips S J, Hastie T, Dudík M, Chee Y E, Yates C J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 2011, 17(1): 43-57.
- [5] 王彦, 马鸣, 买尔旦·吐尔干. 近 60 年来雪豹 (*Uncia uncia*) 研究的文献分析. *生物学杂志*, 2012, 29(3): 78-82.
- [6] McCarthy T, Mallon D, Jackson R, Zahler P, McCarthy K. *Panthera uncia*. The IUCN Red List of Threatened Species 2017: e.T22732A50664030. (2022-06-15). <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-2.RLTS.T22732A50664030.en>.
- [7] Li J, Lu Z. Snow leopard poaching and trade in China 2000 - 2013. *Biological Conservation*, 2014, 176: 207-211.
- [8] 刘晶, 刘学录, 侯莉敏. 祁连山东段山地景观格局变化及其生态脆弱性分析. *干旱区地理*, 2012, 35(5): 795-805.
- [9] 薛亚东, 李佳, 胡杨, 马莉, 钱卫强, 严频发, 杨明伟, 陈大祥, 吴波, 李迪强. 利用红外相机调查祁连山国家公园(青海片区)兽类和鸟类多样性. *兽类学报*, 2019, 39(4): 466-475.
- [10] 汪有奎, 李进军, 杨全生, 李世霞, 袁虹. 祁连山北坡生态现状与治理对策. *中国水土保持*, 2014, (9): 27-31.
- [11] 覃琳, 宋孝玉, 冯湘华. 基于划区轮牧理论的祁连山北麓牧区动态草畜平衡研究. *农业工程学报*, 2019, 35(11): 256-264.
- [12] Alexander J S, Gopalaswamy A M, Shi K, Riordan P. Face value: towards robust estimates of snow leopard densities. *PLoS One*, 2015, 10(8): e0134815.
- [13] Janecka J E, Zhang Y G, Li D Q, Munkhtsog B, Bayaraa M, Galsandorj N, Wangchuk T R, Karmacharya D, Li J, Lu Z, Uulu K Z, Gaur A, Kumar S, Kumar K, Hussain S, Muhammad G, Jevit M, Hacker C, Burger P, Wultsch C, Janecka M J, Helgen K, Murphy W J, Jackson R. Range-wide snow leopard phylogeography supports three subspecies. *Journal of Heredity*, 2017, 108(6): 597-607.
- [14] Aryal A, Shrestha U B, Ji W H, Ale S B, Shrestha S, Ingty T, Maraseni T, Cockfield G, Raubenheimer D. Predicting the distributions of predator

- (snow leopard) and prey (blue sheep) under climate change in the Himalaya. *Ecology and Evolution*, 2016, 6(12): 4065-4075.
- [15] 徐峰, 马鸣, 殷守敬, Chundawat R S, 买尔旦, 牛亚林. 雪豹栖息地选择研究初报. *干旱区研究*, 2006, 23(3): 471-474.
- [16] Sharma R K, Bhatnagar Y V, Mishra C. Does livestock benefit or harm snow leopards? *Biological Conservation*, 2015, 190: 8-13.
- [17] Wolf M, Ale S. Signs at the top: habitat features influencing snow leopard *Uncia uncia* activity in sagarmatha national park, Nepal. *Journal of Mammalogy*, 2009, 90(3): 604-611.
- [18] 廖炎发. 青海雪豹地理分布的初步调查. *兽类学报*, 1985, 5(3): 183-188.
- [19] 郭小芹, 罗永忠. 1961—2016 年祁连山区季节性干旱综合指数特征分析. *气象与环境学报*, 2019, 35(1): 88-93.
- [20] 蒋友严, 杜文涛, 黄进, 赵慧珍, 王成福. 2000—2015 年祁连山植被变化分析. *冰川冻土*, 2017, 39(5): 1130-1136.
- [21] 赵锦梅, 张德罡, 刘长仲, 徐长林. 祁连山东段高寒地区土地利用方式对土壤性状的影响. *生态学报*, 2012, 32(2): 548-556.
- [22] 徐卫华, 欧阳志云, 李宇, 刘建国. 基于遥感和 GIS 的秦岭山系大熊猫生境评价. *遥感技术与应用*, 2006, (03): 238-242.
- [23] Ward D F. Modelling the potential geographic distribution of invasive ant species in New Zealand. *Biological Invasions*, 2007, 9(6): 723-735.
- [24] 李国庆, 刘长成, 刘玉国. 物种分布模型理论研究进展. *生态学报*, 2013, 33(16): 4827-4835.
- [25] Li M Y, Ju Y W, Kumar S, Stohlgren T J. Modeling potential habitats for alien species *Dreissena polymorpha* in continental USA. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4253-4258.
- [26] Urbani F, D'Alessandro P, Frasca R, Biondi M. Maximum entropy modeling of geographic distributions of the flea beetle species endemic in Italy (Coleoptera: Chrysomelidae: Galerucinae: Alticini). *Zoologischer Anzeiger-A Journal of Comparative Zoology*, 2015, 258: 99-109.
- [27] 马松梅, 张明理, 张宏祥, 孟宏虎, 陈曦. 利用最大熵模型和规则集遗传算法模型预测孑遗植物裸果木的潜在地理分布及格局. *植物生态学报*, 2010, 34(11): 1327-1335.
- [28] 程一凡, 薛亚东, 代云川, 张宇, 高雅月, 周杰, 李迪强, 刘洪江, 周跃, 李丽. 祁连山国家公园青海片区人兽冲突现状与牧民态度认知研究. *生态学报*, 2019, 39(4): 1385-1393.
- [29] 袁虹, 冯宏元, 汪有奎, 郭生祥, 李进军, 孙小霞. 祁连山自然保护区主要保护对象及类型调查分析. *中南林业科技大学学报*, 2016, 36(1): 6-11.
- [30] 叶永昌, 周广胜, 殷晓洁. 1961—2010 年内蒙古草原植被分布和生产力变化——基于 MAXENT 模型和综合模型的模拟分析. *生态学报*, 2016, 36(15): 4718-4728.
- [31] Dai Y C, Hacker C E, Zhang Y G, Li W W, Zhang Y, Liu H D, Zhang J J, Ji Y R, Xue Y D, Li D Q. Identifying climate refugia and its potential impact on Tibetan brown bear (*Ursus arctos pruinosus*) in Sanjiangyuan National Park, China. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(23): 13278-13293.
- [32] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [33] 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.
- [34] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [35] 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.
- [36] 高蓓, 卫海燕, 郭彦龙, 顾蔚. 应用 GIS 和最大熵模型分析秦岭冷杉潜在地理分布. *生态学杂志*, 2015, 34(3): 843-852.
- [37] 王君. 新疆塔什库干地区雪豹生态位研究及种群估算[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [38] 李娟. 青藏高原三江源地区雪豹(*Panthera uncia*)的生态学研究及保护[D]. 北京: 北京大学, 2012.
- [39] 刘楚光, 郑生武, 任军让. 雪豹的食性与食源调查研究. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 2003, 31(S2): 154-159.
- [40] 魏星涛, 曹广超, 曹生奎, 虞敏, 袁杰, 张航, 陈真. 祁连山南坡植被覆盖度时空变化与影响因子分析. *青海师范大学学报: 自然科学版*, 2018, 34(2): 65-72.
- [41] Li J, Schaller G B, McCarthy T M, Wang D J, Jiagong Z, Cai P, Basang L, Lu Z. A communal sign post of snow leopards (*Panthera uncia*) and other species on the Tibetan Plateau, China. *International Journal of Biodiversity*, 2013, 2013: 370905.
- [42] La Sorte F A, Jetz W. Projected range contractions of montane biodiversity under global warming. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 277(1699): 3401-3410.
- [43] Li J, McCarthy T M, Wang H, Weckworth B V, Schaller G B, Mishra C, Lu Z, Beissinger S R. Climate refugia of snow leopards in High Asia. *Biological Conservation*, 2016, 203: 188-196.
- [44] 迟翔文, 江峰, 高红梅, 覃雯, 吴彤, 张婧捷, 蔡振媛, 张同作. 三江源国家公园雪豹和岩羊生境适宜性分析. *兽类学报*, 2019, 39(4): 397-409.
- [45] 史晓昀, 施小刚, 胡强, 官天培, 付强, 张剑, 姚蒙, 李晟. 四川邛崃山脉雪豹与散放牦牛潜在分布重叠与捕食风险评估. *生物多样性*, 2019, 27(9): 951-959.
- [46] 李芳菲. 基于雪豹生境保护的青海祁连山土地利用景观格局优化研究[D]. 昆明: 云南财经大学, 2021.