

DOI: 10.5846/stxb202010142615

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.
Li L, Wang L, Wen A M, Yan S W, Yao X J. Assessment of habitat suitability of *Asiatic ibex* (*Capra sibirica*) in the Gansu Anxi Extreme-Arid Desert National Nature Reserve based on MaxEnt model. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24): 9932-9940.

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

李 龙¹, 王 亮², 温阿敏³, 闫世伟¹, 姚晓军^{4,*}

1 兰州资源环境职业技术学院, 兰州 730021

2 甘肃安西极旱荒漠国家级自然保护区管理局, 酒泉 736100

3 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000

4 西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070

摘要:明晰甘肃安西极旱荒漠国家级自然保护区珍稀濒危物种北山羊的分布格局,并阐释气候变化和人类活动对北山羊的影响,对今后北山羊生境管理和物种保护具有重要意义。基于北山羊实测分布点记录和环境变量数据,结合 MaxEnt 模型和 ArcGIS 空间分析功能,利用 CMIP6 的 8 个气候模式均值预测中度发展路径(SSP2-4.5)下,基准期(1970—2000 年)和未来气候(2041—2060 年,2081—2100 年)变化情景下,甘肃安西极旱荒漠国家级自然保护区北山羊的潜在适生区分布范围及变化,并综合贡献率和置换重要性值对北山羊生境选择关键环境因子进行了分析。研究表明:(1)MaxEnt 模型的预测精度较高,三种气候条件下 ROC 曲线下面积(AUC, Area Under Curve)>0.97,且真实技巧统计(TSS, True Skill Statistic)>0.90,模拟结果可靠。(2)影响北山羊生境选择的主要环境因子为气候条件(降水量季节性变异系数和等温性)、海拔和人为干扰(距泉和居名点距离)。水是保护区北山羊生存的最基本要素,气候条件共同控制北山羊生境条件。此外,北山羊习性决定其生境宜选择高海拔和远离人类活动影响地区。(3)基准期保护区北山羊主要分布在北片和南片高海拔山区,面积 365.77 km²(占整个保护区的 4.31%),北山羊适生区面积北片>南片、中高等适生区主要位于保护区北片。(4)CMIP6 未来气候变化情景下,随着保护区生态环境改善和濒危物种保护措施的实施,北山羊潜在适生区面积呈增加趋势,但是受北山羊近亲繁殖的影响,整体上北山羊数量和适生区面积增加并不显著且有向南部及高海拔地区转移趋势。

关键词:北山羊;MaxEnt 模型;生境评估;环境变量

Assessment of habitat suitability of *Asiatic ibex* (*Capra sibirica*) in the Gansu Anxi Extreme-Arid Desert National Nature Reserve based on MaxEnt model

LI Long¹, WANG Liang², WEN Amin³, YAN Shiwei¹, YAO Xiaojun^{4,*}

1 Lanzhou Resources & Environment Voc-Tech College, Lanzhou 730021, China

2 Administration of Gansu Anxi Extreme-Arid Desert National Nature Reserve, Jiuquan 736100, China

3 Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Lanzhou 730000, China

4 Northwest Normal University, College of Geographical and Environmental Science, Lanzhou 730070, China

Abstract: To clarify the distribution pattern for the rare and endangered wild animals of *Asiatic ibex* (*Capra sibirica*) and determine the influence of climate change and human activities to this species in the Anxi Extreme-Arid Desert National Nature Reserve (AEDNNR) of Gansu Province, have great importance for the future habitat management and species

基金项目:国家自然科学基金项目(41861013);西藏自治区自然科学基金(XZ2019ZRG-171(Z));中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室开放基金项目(SKLCs 2020-03);兰州资源环境职业技术学院科研能力提升项目(Y2020C-03)

收稿日期:2020-10-14; 网络出版日期:2021-08-04

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

protection. In this paper, based on the field survey points and environmental variables, the maximum entropy (MaxEnt) model and ArcGIS spatial analysis tools were used to predict the potential distribution and dynamic of *Asiatic ibex* in AEDNNR. For the nineteen bioclimatic variables, we selected an average of eight global climate models under the intermediate greenhouse gas emissions (SSP2-4.5) for the base period (the years of 1970—2000) and future climate periods (the years of 2041—2060 and 2081—2100). Additionally, the key environmental factors for the habitat selection of *Asiatic ibex* were examined by combining the percentage contribution and permutation importance. The results showed that: (1) The prediction accuracy of MaxEnt model was high. The value of AUC (Area Under Curve) > 0.97, and TSS (True Skill Statistic) > 0.90, which indicated that the modeling results was reliable. (2) Niche suitability of the *Asiatic ibex* was dominated by climate conditions (including precipitation seasonality and Isothermality), altitude and human activities (distance to springs and residential areas). As the basic element for the survival of *Asiatic ibex*, it control the habitat ecology and environment together with climate conditions. Moreover, influenced by the behaviors of *Asiatic ibex*, it always distributed in the regions with relatively higher altitude and away from human activities. (3) In the baseline period, *Asiatic ibex* mainly distributed in the northern and southern regions with higher elevations, which occupied approximately 365.77 pa (accounting for 4.31% of the total area of AEDNNR). Spatially, the suitable area for *Asiatic ibex* in the north is larger than that in the south. The high and middle suitable habitats mainly located in the northern AEDNNR. (4) In the future climate scenarios, the suitable areas appeared increasing trends by the eco-environmental improvement and the implementation of endangered animals protection measures. However, influenced by inbreeding of *Asiatic ibex*, the long-term growth of the numbers and suitable areas were not significant. The occupied area increased towards the relatively higher elevation southern regions.

Key Words: *Asiatic ibex*; MaxEnt model; habitats assessment; environment variables

甘肃安西极旱荒漠国家级自然保护区(以下简称安西保护区),是“一带一路”自然保护与发展的关键区,是目前我国唯一的以保护干旱荒漠草原生态系统以及生物多样性为主的综合性自然保护区^[1]。安西保护区地域辽阔、地形复杂、环境因素多变、生态类型多样,且生态系统和功能脆弱^[2-3]。由于安西保护区特殊的生态系统,以及受人类活动影响,微气候变化和生境破碎化都可导致区内动植物的灭绝或生物多样性丧失^[2]。明确物种潜在地理空间分布格局,及其与自然环境和人为因素的关系,开展生境评价和预测,区划保护区功能,可为物种及其生境可持续保护和适应战略奠定基础^[4-5],亦可为“一带一路”生态环境修复提供科学支撑。

北山羊(*Asiatic ibex* (*Capra sibirica*)),属牛科(*Bovidae*)、山羊属,国家 I 级重点保护野生动物,中国红皮书列为濒危级^[6]。国外分布于欧洲高山国家、印度北部、阿富汗和蒙古等地,在我国分布于内蒙古西部、甘肃西北部和新疆等地。据调查,20 世纪 60 年代,我国天山一带约有 4—5 万头,可能甘肃北山有 3000—4000 头,内蒙古大青山可能已不见。北山羊栖息于海拔 3500—6000 m 的高原裸岩和山腰碎石嶙峋的地带,堪称栖居位置最高的哺乳动物之一。由于人类偷猎行为和高山牧场的大规模开发,导致其数量及分布区不断减小^[7]。为有效保护北山羊及其生境,开展大尺度或区域尺度的北山羊生境评估至关重要。虽然近年来国家采取了一系列保护措施,但由于北山羊近亲繁殖导致其数量增长并不明显^[8]。目前,国内外针对北山羊生态学特征^[9-10]、种群数量与分布^[11-12]、生境选择和活动规律^[13-14]等方面已有大量研究。但北山羊生性喜欢居住在高山隐蔽地区,常规人为观测很难监测其具体分布范围。Salas 等^[15]基于 MaxEnt 模型预测了塔吉克斯坦北山羊潜在地理分布及对气候变化的响应;Brambilla 等^[16]采用层次贝叶斯模型模拟了欧洲高山国家北山羊的地理分布范围。安西保护区作为我国北山羊种群分布区之一,部分区域可能已不见^[6]。王亮等^[17]采用布设热红外相机捕捉保护区北山羊活动点位数据,但未能明晰北山羊分布区及生境规律。因此,利用有效手段研究安西保护区北山羊空间分布格局及生境适宜性,确定合适的生存条件对北山羊保护至关重要。

物种分布模式(SDM_s)使用物种分布点和环境数据估算物种潜在分布及生境适宜性,已广泛用于预测鸟类、植物种、哺乳和爬行动物等物种的生境评估研究中^[18-20],准确评估了生境变化对物种生境的影响,为鉴定珍贵濒危物种高适应性地区、自然保护区功能区划及保护等提供了基础数据。利用SDM_s可将无规律、难寻踪迹的自然、生态和物种活动进行量化和可视化表达。结合3S技术,建立气候—地形—植被—位置关联的SDM_s,从大尺度开展物种生境评价和预测研究已成为新热点^[21-22]。最大熵模型(MaxEnt)是对物种生境适宜性进行评价的精度最高的生态位模型之一^[23],可在分布点较少和分布不均的条件下,基于物种“出现点”和环境变量数据,高精度预测物种的潜在地理分布,近年来得到了非常广泛地应用^[16-17]。

本研究采用MaxEnt模型模拟安西保护区北山羊潜在地理分布,明确北山羊生境分布的主要影响因素,并结合最新发布CMIP6气候模式数据,预测未来气候条件下安西保护区北山羊潜在适生区变化趋势,以期为安西保护区北山羊和生境保护建设提供科学依据。

1 保护区概况

甘肃安西极旱荒漠国家级自然保护区主要位于河西走廊西端的瓜州县境内,南与玉门市为界,北与新疆相接,东与肃北蒙古族自治县相交,西与敦煌相邻,总面积 $8.0 \times 10^3 \text{ km}^2$ (图1)。安西保护区分南北两片,南部位于瓜州县南部,地理位置为东经 $95^\circ 50' 30''$ — $96^\circ 05' 00''$,北纬 $39^\circ 50' 45''$ — $40^\circ 34' 40''$;北片位于瓜州县北部,地理位置为东经 $94^\circ 47'$ — $95^\circ 45'$,北纬 $41^\circ 19'$ — $41^\circ 53'$ 。区内气候属典型的大陆性气候,降水极少,蒸发量大,空气相对湿度低,日照时间长,昼夜温差大,夏季炎热,冬季严寒,风大沙多。荒漠类型多样,极旱荒漠、典型荒漠、草原化荒漠都有一定面积的分布。以典型的中亚四大荒漠植被泡泡刺荒漠、红砂荒漠、黑柴荒漠和珍珠猪毛菜荒漠最有代表性^[24]。区内国家级保护物种丰富多样,具有代表性的有雪豹(*Panthera uncia*)、普氏野马(*Equus ferus przewalskii*)、蒙古野驴(*Equus hemionus*)、北山羊等国家Ⅰ级保护物种^[11]。

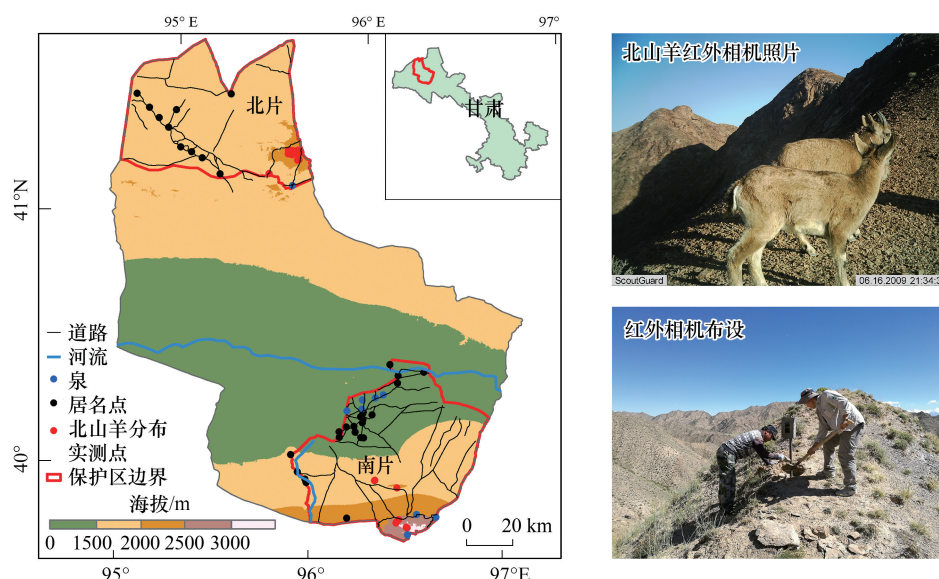


图1 研究区概况及北山羊分布点实测

Fig.1 The study area and occurrence records for Asiatic ibex

2 研究方法

2.1 北山羊分布点数据

北山羊分布点数据来源于安西保护区各管理站的野外调查和红外相机监测记录的出现点数据(图1)。

2014 年 4 月起安西保护区管理局在保护区动物痕迹(粪便、足迹和遗落物等)较多的地点(如兽径、水源点等处)布设红外相机,采用 GPS 导航仪记录相机坐标位点,由此观测红外相机周围北山羊活动及其分布情况。本研究采集的北山羊分布点数据尽量保证了全覆盖保护区(南片和北片)北山羊适生区全部生境类型,使得分布点数据具有代表性、准确性和完整性。最后,将北山羊分布点数据保存为.csv 格式用于模型进一步模拟。

2.2 环境变量数据

由于北山羊生境受气候条件、地形、植被类型、土地利用类型、水源及人为干扰(如道路和居名点)等因素的影响。因此,本文选择气候、地形、土地利用类型和植被共 27 个环境变量作为环境因子,其中 19 个气候变量来源于 IPCC AR6(IPCC Assessment Report6)及 CMIP6(6 Coupled Model Intercomparison Project)发布的 8 个气候模式(GCMs)数据(空间分辨率约 1 km, <https://www.worldclim.org/data/cmip6/>)。IPCC AR6 报告中 CMIP6 使用了新的气候模式,由不同社会经济模式驱动的新排放情景—共享经济路径(SSPs)组成,代替了 CMIP5 中四个代表性浓度路径(RCPs)。本文选择社会经济发展情景 SSP2-4.5(中间路径),并求取基准期(1970—2000 年)和未来(2041—2060 年、2081—2100 年)气候条件下 8 个气候模式的平均值用于 MaxEnt 模型气候因子建立。地形因子包括海拔、坡度和坡向,由中国科学院科学数据库 30 m 分辨率的数字高程模型计算提取得到。土地利用类型数据和植被类型数据由安西保护区实测数据提供,将安西保护区土地利用类型划分为戈壁、沙地、草地、耕地、水域、盐碱地和零星林地 7 种类型,植被类型分为梭梭荒漠、泡泡刺-红砂-麻黄荒漠、红砂-黑柴荒漠、合头草荒漠、裸果木-黑柴-麻黄-红砂荒漠、黑柴-红砂-锦鸡儿荒漠、齿叶白刺荒漠、芨芨草-蒿类草原、金露梅-委陵菜草甸、盐生草甸及农业植被和胡杨-怪柳疏林 12 类。其他数据包括居名点、道路及水源因子,利用 ArcGIS 空间分析获取各因子对北山羊生境选择的影响距离。

将所有环境变量数据重采样为统一空间分辨率 30 m×30 m,投影为 GCS_WGS_1984。为避免因变量间的多重共线性而导致模型过度拟合,本文对所有变量进行 Spearman 去相关处理,27 个环境变量中筛选出相关系数 $<|0.75|$ 的变量,若两变量的相关性大于 $|0.75|$,则舍去相对次要的一个变量^[25]。最后,共 15 个环境变量参与 MaxEnt 模型模拟。

2.3 北山羊分布模拟

基于 MaxEnt 3.4.0 软件(www.cs.princeton.edu/~schapire/MaxEnt)构建北山羊潜在分布区^[26-27]。将北山羊分布点及环境变量数据输入 MaxEnt 模型,随机选取 75% 的分布点作为训练集,25% 的分布点作为验证集。为减少模型计算工作量及指标参数增加造成的模型预测的不确定性,提高模型预测精度,采用刀切法(Jackknife 检验)测定各变量的重要性,结果以贡献率和置换重要性值衡量,单位为百分比,其值越大表明该环境变量通过比较每个环境变量对模型结果的影响程度来剔除影响较小的变量,筛选影响北山羊潜在分布的主导环境因子。

将 MaxEnt 模型迭代运算 10 次的平均值作为北山羊分布结果,其值为适宜性指数(HSI),值位于 0—1 之间。为准确评估北山羊生境,需设定 HSI 阈值,进而划分适生区和非适生区。本文根据模型计算的阈值等熵结果和北山羊原始分布点,将 $HSI \leq 0.05$ 设为北山羊非适生区,并根据模拟结果中北山羊潜在分布特征,将北山羊适生区分为边缘适生区($0.05 < HSI \leq 0.25$)、低等适生区($0.25 < HSI \leq 0.7$)、中等适生区($0.7 < HSI \leq 0.8$)和高等适生区($HSI > 0.8$)。

2.4 精度验证

模拟结果验证主要通过两种方式,一是采用 ROC(receiver operating characteristic)曲线下的面积(area under curve, AUC)和真实技巧统计法(true skill statistic, TSS)的大小来评价 MaxEnt 模型预测精度。AUC 值位于 0—1 之间,其值越大,表明环境变量与北山羊生境分布的相关性越大,判别北山羊的分布区,模型预测的结果越准确。评价标准为: AUC 值为 0.50—0.60, 失败; 0.60—0.70, 较差; 0.70—0.80, 一般; 0.80—0.90, 好; 0.90—1.00, 非常好^[28]。TSS 值范围为-1—1,其数值越接近于 1,表明预测效果越好,0.6—1 之间表示预测效果良好^[29]。二是通过野外实测调查进行验证,结合模型预测北山羊潜在分布区,实地采样对比验证。

3 结果与分析

3.1 MaxEnt 模型预测结果检验

MaxEnt 模型重复运行 10 次后,运用 AUC 和 TSS 两个指标检验模型模拟精度。基准期及未来气候情景下,AUC 平均值均大于 0.97,TSS 平均值均大于 0.90(表 1),表明模型预测结果都为优秀水平。

表 1 不同气候情景下 AUC 和 TSS 平均值

Table 1 The average values of AUC and TSS under different climate scenarios

时间 Time	曲线下面积均值 Area under curve (AUC _{mean})	标准差 Standard deviation (SD)	真实技巧统计 True skill statistic (TSS)
1970—2000	0.975	0.045	0.904
2041—2060	0.979	0.018	0.901
2081—2100	0.980	0.017	0.909

3.2 基准期气候情景下北山羊潜在地理分布及关键环境因子

Jackknife 检验的影响北山羊生境分布模拟的主要环境因子及其相应的贡献率和置换重要性值见表 2。贡献率排前四的因子为:降水量季节性降水变异系数(Bio15,41.9%),高程(Ele,13.9%),等温性(Bio3,13.7%)和距泉距离(DTS,12.3%),累计贡献率达 81.8%。此外,置换重要性排前四的因子为:距泉距离(DTS,70.6%)、等温性(Bio3,6.9%)和距居民点距离(DTRS,6.7%),累积值为 84.2%。综合来看,影响安西保护区北山羊生境选择的主要环境因子为:气候条件(降水量季节性降水变异系数和等温性)、海拔和人为因素(距泉和居民点距离)。

表 2 15 个环境变量的贡献量和置换重要性

Table 2 Percentage contributions and permutation importance of the 15 environmental variables

变量 Variable	描述 Details	贡献率/% Percent contribution	置换重要性/% Permutation importance
DTS *	距泉距离 (Distance to spring)	12.3	70.6
Bio3 *	等温性 (Isothermality = Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp-min temp) / (Max Temperature of Warmest Month - Min Temperature of Coldest Month) × 100))	13.7	6.9
DTRS *	距居民点距离 (Distance to residential area)	0.8	6.7
DTR	距道路距离 (Distance to road)	2.9	5.9
Bio15 *	降水量季节性变异系数 (Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation))	41.9	3.2
Asp	坡向 (Aspect)	6.6	3.1
LU	土地利用类型 (Land use types)	0.6	1.5
Ele *	高程 (Elevation)	13.9	0.4
Bio6	最冷月最低温 (Min Temperature of Coldest Month)	0.1	0.4
Slo	坡度 (Slope)	0.2	0.3
Bio9	最干季平均温度 (Mean Temperature of Driest Quarter)	0.1	0.3
Bio17	最干季降水量 (Precipitation of Driest Quarter)	0.5	0.2
Vtp	植被类型 (Vegetation types)	0.5	0.2
Bio19	最冷季降水量 (Precipitation of Coldest Quarter)	0.2	0.2
Bio2	平均气温日较差 (Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp-min temp)))	5.7	0.1

* 表示影响北山羊分布的主要环境变量

从基准期(1970—2000 年)气候情景下北山羊生境适宜性空间分布图(图 2)可以看出,安西保护区北山羊潜在地理分布区主要位于北片和南片高海拔山区。整个安西保护区北山羊适生区面积为 365.77 km²(占安

西保护区 4.31%), 其中北片适生区面积为 160.92 km², 南片适生区面积为 204.85 km²。根据生境适宜性指数分类结果可知, 北山羊中高等适生区面积约 34.15 km², 主要分布在北片 (24.25 km²), 而南片适生区面积则较小 (9.89 km²)。

3.3 气候变化对北山羊潜在分布影响

随着气候变化和经济社会发展, 在中等社会经济发展 SSP2-4.5 情景下, 到未来两个时间段内 (2041—2060 年和 2081—2100 年), 安西保护区北山羊潜在分布区面积整体上呈增加趋势 (图 3 和图 4)。与基准期安西保护区北山羊潜在地理分布区相比, 到 2041—2060 年, 北山羊适生区面积增加 0.08%, 而到 2081—2100 年, 北山羊适生区面积增加达 0.26%。从北山羊适生区等级划分来看, 中高等适生区主要分布在安西保护区北片, 而南片面积较小 (图 3)。整体而言, 未来气候情景下, 北山羊适生区占安西保护区面积比例呈增加趋势 (图 4), 且中高等适生区增加的面积呈南片>北片, 同时有向南部地区扩展的趋势 (图 3)。

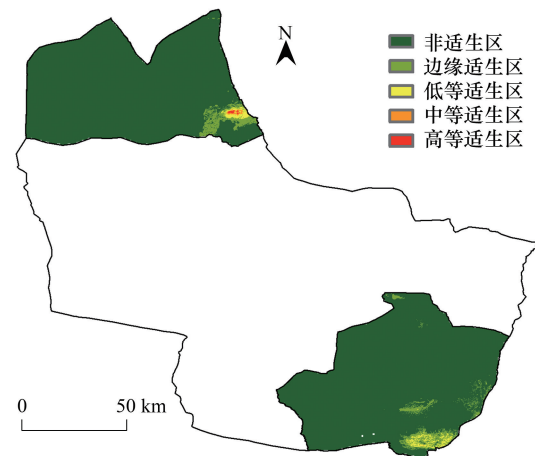


图 2 基准期 (1970—2000 年) 气候条件下北山羊适宜生境分布

Fig.2 Occupied habitat maps of Asiatic ibex during the years of 1970—2000

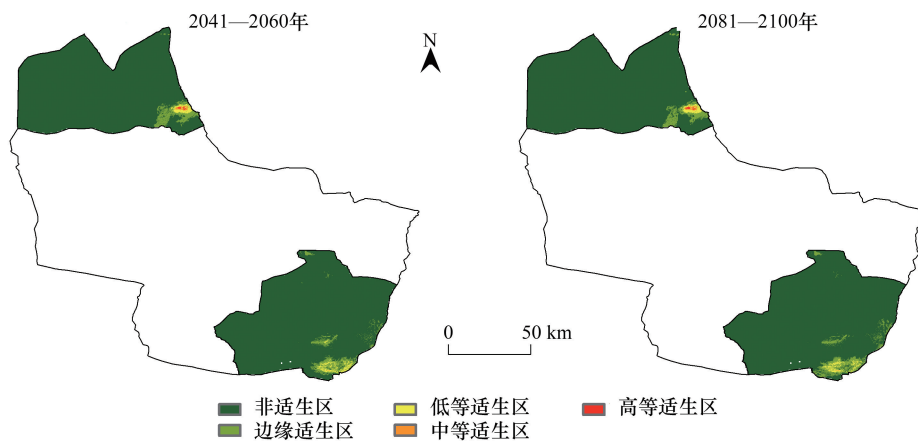


图 3 未来气候条件下北山羊适宜生境分布

Fig.3 Occupied habitat maps of Asiatic ibex under future climate scenarios

4 讨论

本文采用 MaxEnt 模型, 基于 CMIP6 气候模式模拟预测了安西保护区北山羊潜在地理分布格局及影响其生境选择的环境因子, AUC 和 TSS 值均表明模型模拟结果较可靠地评估了安西保护区北山羊生境状况^[29-30]。

4.1 环境因子对北山羊生境选择的影响

揭示物种与环境间的相互关系是物种生境适宜性评估的一个重要步骤^[31]。不考虑北山羊种群繁殖和种间关系的影响^[8], 本研究从气候、地形、土地利用类型以及人为因素方面综合分析了影响安西保护区北山羊生境选择的主要环境影响因子。模拟结果中贡献率和置换重要性值表明气候条件 (降水量季节性变异系数和等温性)、海拔和人为因素 (距泉和居名点距离) 是影响安西保护区北山羊分布的最主要环境因素。安西保护区为极旱荒漠地区, 降水极少。因此, 水源对于北山羊至为重要, 水是北山羊生存及其生境维持的最基本要

素^[32-33]。气温和降水影响生境小气候及生态环境变化。近年来,我国西北地区由暖干向暖湿转型有利于北山羊生境植被变绿、水源保持等,进而对北山羊水源、食物、行为活动规律及生境都产生影响^[34-35]。北山羊易受人类干扰和惊吓,因此生境选择时通常选择远离道路、远离居民点、隐蔽级高等特征的地区^[11]。此外,北山羊生警惕性高且喜欢攀爬,因此,生境选择偏好高海拔、阳坡、膜果麻黄与裸岩、坡度大及上坡位的高山地区,该结论也与本文用刀切法结果相符合^[16],同时与 Salas 等^[15]采用 Maxent 模型揭示的影响塔吉克斯坦东部区域北山羊生境选择影响因素保持一致。各因子之间相互影响、相互作用,共同决定北山羊生境演变及北山羊的生存活动。

4.2 气候变暖对北山羊生境的影响

从 MaxEnt 模型模拟的适生区分布结果来看,安西保护区北山羊主要位于安西保护区北片和南片高山地区,而中高等适生区主要分布在北片山区。此外,安西保护区北山羊适生区面积北片和南片变化程度不一,但整体上向南且高海拔地区扩张。以上结论与王亮等^[17]和边坤等^[32]的研究成果保持一致。气候变化会导致物种生境发生变化^[36],如植被变绿^[37]、降水增多^[38],进而影响北山羊生境转变,以及生态位向高海拔地区的扩张^[39](图 5)。本研究结果表明在 CMIP6 未来气候模式中间路径 SSP2-4.5 下,基准期到 2041—2060 年和 2081—2100 年,北山羊适生区面积呈增加趋势,该结论与近期相关科研和管理部门报道的野外调查结果中近年来北山羊生境好转且数量增多的结果相一致^[11, 40]。但是,整体上来看,虽然具备严格的保护区野生动物管控措施和生境条件改善工程,但是未来气候情景下,北山羊适生区面积增加并不明显。Bozzuto 等^[8]通过研究长时间序列数据集分析保护区北山羊繁殖特征发现,由于保护区中北山羊近亲繁殖减缓了其数量的大范围增长。同时, Brambilla 等^[16]发现欧洲高山地区北山羊数量近年来呈缓慢增长趋势。因此,在气候变化条件下,应加强保护区北山羊及其生境可持续发展和保护。

5 结论

本研究基于 MaxEnt 模型和 ArcGIS 空间分析功能,分析了 CMIP6 模式基准期和未来气候条件下安西保护区北山羊空间分布格局及其变化,定量阐释了北山羊分布对气候变化和人类活动等因素的响应,得到以下主要结论:

(1) MaxEnt 模型在预测和评估安西保护区濒危物种适生区分布及生境选择影响因子中,模型精度较高,该结论为今后研究中国乃至全球北山羊地理分布及分析其对气候和人类环境变化的响应提供借鉴思路。

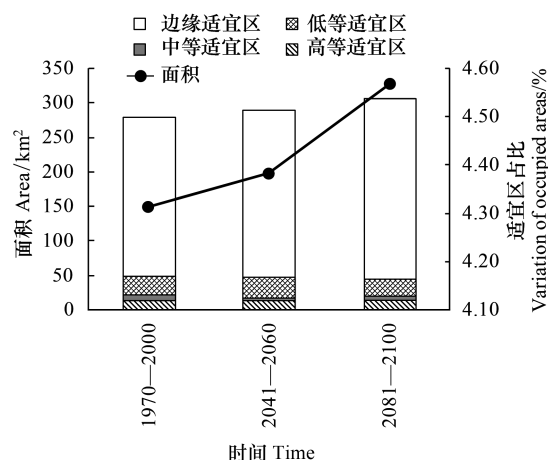


图 4 不同气候情景下安西保护区北山羊不同等级适生区面积变化及百分比

Fig.4 Variation of occupied areas for different HSI types and the ratios of Asiatic ibex in different time periods

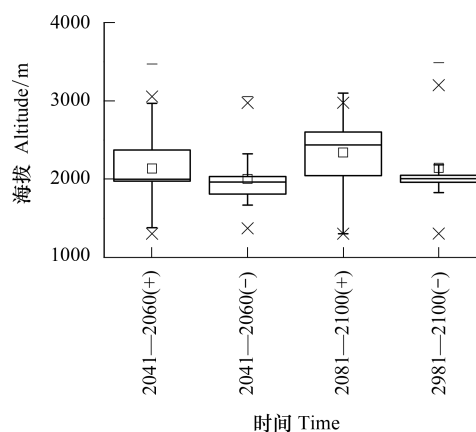


图 5 未来气候情景下北山羊生境海拔变化(+表示适生区增加区域;-表示适生区减少区域)

Fig.5 Elevation changes of the habitat of Asiatic ibex under future climate scenarios

(2) 安西保护区属于极旱荒漠型地区,降水量极少,因此水是北山羊生境选择的最主要且最基本的要素。其次,受北山羊生性特征影响,高海拔、人为干扰因素及气候条件共同作用,影响保护区北山羊生态位。

(3) 基准期气候条件下,安西保护区北山羊中高等适生区主要分布在保护区北片。随着气候变暖,安西保护区北山羊适生区北片和南片都呈增加趋势,但不显著。在未来气候条件下,北山羊适生区分布重心有向南及高海拔地区转移的趋势。

为加强对安西保护区北山羊等野生动物的保护,维护安西保护区生态平衡。根据本文研究结果提出了安西保护区内北山羊保护措施,如增加人工水源地、新建道路应尽量避免北山羊频繁出没地段、加强植被保护和人工种植等。此外,加强居民宣传教育,尽量减少人类对野生动物的干扰,对安西保护区实现生物多样性保护和生态修复具有积极作用。

参考文献 (References):

- [1] 王亮, 杨增武, 陶金鼎. 安西自然保护区保护现状与对策探讨. 国土与自然资源研究, 2010, (5): 61-62.
- [2] 田瑞祥, 王亮, 杨增武. 安西自然保护区生态补偿机制的探讨. 环境研究与监测, 2013, 26(3): 24-26, 32-32.
- [3] 刘方正, 张建亮, 王亮, 杨增武, 崔国发. 甘肃安西极旱荒漠国家级自然保护区南片植被长势与保护成效. 生态学报, 2016, 36(6): 1582-1590.
- [4] 薛达元, 蒋明康. 中国自然保护区对生物多样性保护的贡献. 自然资源学报, 1995, 10(3): 286-292.
- [5] Evers C R, Wardropper C B, Branoff B, Granek E F, Hirsch S L, Link T E, Olivero-Lora S, Wilson C. The ecosystem services and biodiversity of novel ecosystems: a literature review. Global Ecology and Conservation, 2018, 13: e00362.
- [6] 杨奇森, 冯祚建. 北山羊//汪松. 中国濒危动物红皮书: 兽类. 北京: 北京科学出版社, 1998: 314-317.
- [7] Pérez J M, Granados J E, Soriguer R N C, Fandos P, Márquez F J, Crampe J P. Distribution, status and conservation problems of the Spanish Ibex, *Capra pyrenaica* (Mammalia: Artiodactyla). Mammal Review, 2002, 32(1): 26-39.
- [8] Bozzuto C, Biebach I, Muff S, Ives A R, Keller L F. Inbreeding reduces long-term growth of Alpine ibex populations. Nature Ecology & Evolution, 2019, 3(9): 1359-1364.
- [9] 李建亮, 李佳琦, 王亮, 裴鹏祖, 马东辉, 嵇孟雅, 包新康. 基于红外相机技术分析极旱荒漠有蹄类动物的活动节律. 兽类学报, 2020, 40(2): 120-128.
- [10] 朱新胜, 汪沐阳, 杨维康, Blank D. 北山羊生态生物学研究现状. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3553-3559.
- [11] 包新康, 王亮, 卢梦洁, 裴鹏祖, 李建亮, 马东辉, 李佳琦. 利用红外相机监测甘肃安西极旱荒漠国家级自然保护区鸟兽物种多样性. 生物多样性, 2020, 28(9): 1141-1146.
- [12] 戴魁. 西昆仑地区北山羊和岩羊种群数量及分布特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [13] Xu F, Ma M, Wu Y Q. Population density and habitat utilization of ibex (*Capra ibex*) in Tomur National Nature Reserve, Xinjiang, China. Zoological Research, 2007, 28(1): 53-55.
- [14] 胡亮, 初红军, 王丽, 刘元超, 张钧泳, 陈刚. 基于红外相机陷阱技术的阿尔泰山东部北山羊 (*Capra ibex*) 的活动节律. 生物技术世界, 2016, (4): 36-39.
- [15] Salas E A L, Valdez R, Michel S, Boykin K G. Response of Asiatic ibex (*Capra sibirica*) under climate change scenarios. Journal of Resources and Ecology, 2020, 11(1): 27-37.
- [16] Brambilla A, Von Hardenberg A, Nelli L, Bassano B. Distribution, status, and recent population dynamics of Alpine ibex *Capra ibex* in Europe. Mammal Review, 2020, 50(3): 267-277.
- [17] 王亮, 杨增武, 田瑞祥, 陶金鼎, 包新康. 红外触发相机在荒漠区野生动物监测中的应用——以安西极旱荒漠自然保护区为例. 林业资源管理, 2014, (4): 137-141.
- [18] 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.
- [19] 胡苑, 张志勇, 陈陆丹, 彭焱松, 汪旭. 末次盛冰期以来观光木的潜在地理分布变迁. 植物生态学报, 2020, 44(1): 44-55.
- [20] Wang G, Wang C, Guo Z R, Dai L J, Wu Y Q, Liu H Y, Li Y F, Chen H, Zhang Y N, Zhao Y X, Cheng H, Ma T W, Xue F. Integrating MaxEnt model and landscape ecology theory for studying spatiotemporal dynamics of habitat: suggestions for conservation of endangered Red-crowned crane. Ecological Indicators, 2020, 116: 106472.
- [21] León B, Jiménez-Sánchez C, Retamosa-Izaguirre M. An environmental niche model to estimate the potential presence of Venezuelan equine encephalitis virus in Costa Rica. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(1): 227.

- [22] Poor E E, Scheick B K, Mullinax J M. Multiscale consensus habitat modeling for landscape level conservation prioritization. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 17783.
- [23] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2013, 190(3/4): 231-259.
- [24] 郝小玲. 甘肃安西极旱荒漠国家级自然保护区维管植物地理区系与植被类型分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [25] Graham C H, Elith J, Hijmans R J, Hijmans R J, Guisan A, Peterson A T, Loiselle B A, The Nceas Predicting Species Distributions Working Group. The influence of spatial errors in species occurrence data used in distribution models. *Journal of Applied Ecology*, 2008, 45(1): 239-247.
- [26] Elith J, Graham C H, Anderson R P, Dudík M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans R J, Huettmann F, Leathwick J R, Lehmann A, Li J, Lohmann L G, Loiselle B A, Manion G, Moritz C, Nakamura M, Nakazawa Y, Overton J M M, Peterson A T, Phillips S J, Richardson K, Scachetti-Pereira R, Schapire R E, Soberón J, Williams S, Wisz M S, Zimmermann N E. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 2006, 29(2): 129-151.
- [27] Phillips S J, Dudík M, Schapire R E. MaxEnt software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). (2019-05-30) [2021-01-26]. http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/MaxEnt/.
- [28] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [29] Allouche O, Tsoar A, Kadmon R. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the True Skill Statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(6): 1223-1232.
- [30] Fielding A H, Bell J F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 1997, 24(1): 38-49.
- [31] Yan H Y, Feng L, Zhao Y F, Feng L, Wu D, Zhu C P. Prediction of the spatial distribution of *Alternanthera philoxeroides* in China based on ArcGIS and MaxEnt. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 21: e00856.
- [32] 边坤, 刘楚光, 王开峰, 齐晓光, 王艳, 李保国. 甘肃马鬃山北山羊春季卧息地的选择. *四川动物*, 2011, 30(4): 633-637.
- [33] 魏子谦, 徐增让. 羌塘高原藏羚羊栖息地分布及影响因素. *生态学报*, 2020, 40(23): 8763-8772.
- [34] Bradie J, Leung B. A quantitative synthesis of the importance of variables used in MaxEnt species distribution models. *Journal of Biogeography*, 2017, 44(6): 1344-1361.
- [35] 韩芳. 气候变化对内蒙古荒漠草原生态系统的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2013.
- [36] IPCC, 2018; Summary for policymakers//Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner H, Roberts D, Skea J, Shukla P, Pirani A, Moufouma-Okia W, Péan C, Pidcock R, Connors S, Matthews J B R, Chen Y, Zhou X, Gomis M I, Lonnoy E, Maycock, Tignor M, Waterfield T, eds. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C Above pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
- [37] Jiang D B, Hu D, Tian Z P, Lang X M. Differences between CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate over China and the East Asian monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, 37(10): 1102-1118.
- [38] Piao S L, Wang X H, Park T, Chen C, Lian X, He Y, Bjerke J W, Chen A P, Ciais P, Tømmervik H, Nemani R R, Myneni R B. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(1): 14-27.
- [39] 范泽孟, 范斌. 欧亚大陆植被生态系统平均中心时空偏移的情景模拟. *生态学报*, 2019, 39(14): 5028-5039.
- [40] 韩雷, 汪沐阳, 杨维康. 高山精灵北山羊. *人与生物圈*, 2020, (S1): 71-73.