

DOI: 10.5846/stxb202112043432

高浩翔, 申立泉, 刘瑞, 王功, 张爱萍, 陈蕾, 张毅祯, 张学炎, 祁军, 王春玲, 耿硕, 周鑫, 吕青昕, 吴佳忆, 孟秀祥. 基于最大熵模型的野生马麝夏季生境适宜性研究. 生态学报, 2023, 43(1): 441-448.

Gao H X, Shen L Q, Liu R, Wang G, Zhang A P, Chen L, Zhang Y Z, Zhang X Y, Qi J, Wang C L, Geng S, Zhou X, Lü Q X, Wu J Y, Meng X X. Summer habitat suitability of wild alpine musk deer based on MaxEnt model. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 441-448.

基于最大熵模型的野生马麝夏季生境适宜性研究

高浩翔¹, 申立泉¹, 刘瑞², 王功², 张爱萍², 陈蕾², 张毅祯², 张学炎², 祁军², 王春玲², 耿硕¹, 周鑫¹, 吕青昕¹, 吴佳忆¹, 孟秀祥^{1, 3, *}

¹ 中国人民大学环境学院, 北京 100872

² 甘肃兴隆山国家级自然保护区管护中心, 兰州 730117

³ 西藏大学理学院, 拉萨 850000

摘要:野生马麝 (*Moschus chrysogaster*) 是珍稀濒危资源动物, 分布于我国青藏高原及周边地区。甘肃兴隆山国家级自然保护区是野生马麝最重要的分布区之一, 深入了解保护区的生境结构、质量及分布是对区域内野生马麝进行成功保护的前提和基础, 但迄今缺乏大尺度的马麝生境适宜性研究。利用实地调查得到的兴隆山保护区的野生马麝夏季分布点数据, 采用最大熵 (MaxEnt) 模型, 结合地形、归一化植被指数、距河流距离、距道路距离等环境变量数据, 进行野生马麝的夏季生境适宜性分析。结果表明: 影响野生马麝夏季生境适宜性的主要生态因子是海拔、坡向、植被和河流, 其贡献率分别达 40.3%, 23.4%, 18.6% 和 10.9%; 兴隆山保护区野生马麝的夏季潜在适宜生境分布面积为 123.34 km², 占整个保护区的 41.11%, 占保护区林地的 61.92%; 野生马麝夏季潜在适宜生境主要集中在保护区的中部和西部, 其中高适宜性生境约为保护区的 4.47%, 各适宜区间及适宜区之内均存在一定程度的不连续分布。为加强对兴隆山保护区野生马麝种群及生境的就地保护, 建议通过生境保育措施, 提高野生马麝潜在分布区的生境适宜性, 同时增加各适宜生境之间的连通性。

关键词: 马麝 (*Moschus chrysogaster*); 兴隆山国家级自然保护区; 最大熵模型 (MaxEnt); 适宜性分析

Summer habitat suitability of wild alpine musk deer based on MaxEnt model

GAO Haoxiang¹, SHEN Liquan¹, LIU Rui², WANG Gong², ZHANG Aiping², CHEN Lei², ZHANG Yizhen², ZHANG Xueyan², QI Jun², WANG Chunling², GENG Shuo¹, ZHOU Xin¹, LÜ Qingxin¹, WU Jiayi¹, MENG Xiuxiang^{1, 3, *}

¹ School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China

² Gansu Xinglongshan National Nature Reserve, Lanzhou 730117, China

³ College of Science, Tibet University, Lasa 850000, China

Abstract: Alpine musk deer (*Moschus chrysogaster*) has been critically endangered, distributed in Qinghai-Tibet Plateau and surrounding areas in China. Xinglongshan National Nature Reserve (XNNR) is one of the most important distributing area of wild alpine musk deer, in-depth understanding of the habitat structure, quality and distribution of the reserve is a prerequisite and basis for successful conservation of alpine musk deer in this region, but there is lack of research on the habitat suitability of alpine musk deer on a large scale in XNNR. In this study, we used the distribution point data of wild alpine musk deer in XNNR obtained from field survey, and used MaxEnt model, combined with data of environmental variables such as topography, normalized difference vegetation index, distance to waterway and distance to road to conduct

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32170489, 31672300); 甘肃兴隆山国家级自然保护区第二次科学考察项目

收稿日期: 2021-12-04; **网络出版日期:** 2022-05-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: meng2014@ruc.edu.cn

summer habitat suitability analysis of wild alpine musk deer. The results showed that the main factors affecting the summer habitat suitability of alpine musk deer were altitude (accounting for 40.3%), aspect (accounting for 23.4%), normalized difference vegetation index (accounting for 18.6%) and distance to waterway (accounting for 10.9%); the distribution area of potentially summer suitable habitats for alpine musk deer in XNNR was 123.34 km², accounting for 41.11% of the whole reserve and 61.92% of the forest land in entire reserve; the potential summer distribution areas of alpine musk deer were mainly concentrated in the central and western reserve, of which the highly suitable habitats were about 4.47% of the reserve, and there were discontinuous distribution areas among and within the suitability areas. To strengthen the in situ conservation of wild alpine musk deer population and habitats in XNNR, it is recommended that habitat conservation measures should be taken to improve the habitat suitability of the potential distribution area of alpine musk deer, and to increase the connectivity between suitable habitats.

Key Words: alpine musk deer (*Moschus chrysogaster*); Xinglongshan National Nature Reserve; MaxEnt; suitability analysis

马麝(*Moschus chrysogaster*)又名高山麝,为我国珍稀资源动物,主要分布于青藏高原及周边区域,含青海、甘肃祁连山及肃南山地、贺兰山以及西藏东南部、云南北部高山地区和四川省西部地区^[1]。因气候变化和人类活动影响,马麝分布区内的生境破碎和栖息地丧失不断加剧,其野生种群急剧减少,已极度濒危,被列为国家 I 级重点保护动物。

甘肃省兴隆山国家级自然保护区是我国野生马麝种群密度最大的分布区之一,已有许多学者对其种群和生境进行研究。康发功^[2]、孙伟刚等^[3]及王静等^[4]等研究了兴隆山野生马麝分布、种群波动及影响因素,孟秀祥等^[5-6]、佟梦等^[7]及王向伟^[8]报道了马麝的微生境利用及季节格局。上述研究结果有助于了解野生马麝的种群动态及生境利用特征,但多基于微生境取样的较小尺度研究,迄今缺乏对野生马麝在整个保护区尺度上的大尺度生境适宜性分析。此外,麝类动物的繁殖定时和同步化极强^[1],野生马麝的分娩、育幼及麝香分泌期集中在夏季进行,种群动态及扩散等过程与其夏季生境的适宜性和利用格局关系紧密,但迄今缺乏相关研究。大尺度的生境适宜性分析研究,不仅有助于深入理解野生动物的生境利用、种群分布和种群动态,而且对自然保护区的规划和管理具有重要意义^[9]。

最大熵模型(MaxEnt)因为其较高的精度,近年来被越来越多地应用于野生动物保护和生境适宜性研究,表现出良好的预测能力^[10-14]。齐增湘等^[15]应用 MaxEnt 模型对秦岭山系黑熊(*Ursus thibetanus*)的生境空间分布、影响因子及自然保护区的保护空缺分析,对黑熊的生境廊道进行了规划,为黑熊的科学保护提供了依据。崔绍朋等^[16]用 MaxEnt 模型分析了中国青藏高原特有种白唇鹿(*Przewalskium albirostris*)的潜在地理分布。朱宇静等^[17]和白白露等^[18]等采用 MaxEnt 模型对川金丝猴(*Rhinopithecus roxellana*)的生境适宜性进行了预测评估。在麝类动物,油志远等^[19]及李宏群等^[9]尝试采用 MaxEnt 模型对马麝和原麝(*M. moschiferus*)的栖息地适宜性做了评价,并依据研究结果提出了保护建议。上述研究表明,MaxEnt 模型可很好地应用于麝类动物等野生动物的生境适宜性分析。

本文采用 MaxEnt 模型,在定量分析甘肃兴隆山保护区野生马麝的夏季潜在分布与各个环境变量因子之间关系的基础上,识别并预测整个保护区野生马麝夏季适宜生境的空间分布格局,为濒危野生马麝保护及自然保护区管理提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

兴隆山国家级自然保护区位于兰州市东南(103°50'—104°10'E; 35°38'—35°58'N),属于祁连山山系东延部分,山体东西长约 37km,南北宽 17 km,海拔区间为 1800—3670 m^[20]。保护区气候特征为温带半湿润

气候,主峰马鞍山海拔 3676 m,属大陆性干旱草原气候区。年降水量丰富主要集中于 7—9 月份。保护区内地貌形态以中、高山地,沟谷和坡地为主,主要土壤类型为高山草甸土、亚高山草甸土、栗钙土、灰褐土、黄绵土、新积土^[21]。保护区内生态系统类型齐全,垂直分带性明显,主要植被类型含针叶林、人工林、针阔混交林、阔叶林、灌木林和草甸^[4]。兴隆山自然保护区森林覆盖率为 79.98%,全区活立木总蓄积量为 70.7 万 m³^[22]。

1.2 生境适宜性分析方法

1.2.1 野生马麝分布点信息

野生马麝为小型林间独栖反刍动物,活动隐蔽,独居性强,在实际野外调查中难以被直接观察到^[23]。

于 2021 年 7 月 1 日—8 月 25 日期间,采用样线法进行野生马麝分布调查。本次调查的样线基于研究区域遥感和数字高程模型(DEM)数据,综合考虑保护区面积、马麝活动特性、人为干扰强度、可达性等因素及王静等^[4]调查的样线结果,确定了 33 条样线的起点与终点,每条样线长为 3km,样线覆盖各类植被类型。设定每人行走观察距离为左右各 3 m,即一人巡护宽度 6m 左右。运用全球定位系统(GPS)对马麝活体及痕迹点(实体、粪便、卧迹等)进行定位。重复两次样线调查,确保调查痕迹点的全面性和代表性。

1.2.2 环境因子变量获取

因兴隆山保护区所辖面积较小(300 km²),区内气温、降水等气候变量和土壤变量变化相对较小,参照其他有蹄类研究^[24],本文综合选取了对野生马麝具有重要影响的 6 个环境因子变量,含地形因子(海拔、坡度、坡向)、归一化植被指数(NDVI)及距离道路距离和距离河流距离。地形数据来自于由数字高程模型,数据来源于中国科学院计算机网络中心地理空间数字云平台 <http://www.gscloud.cn> 提取的海拔、坡度和坡向,分辨率为 30m。归一化植被指数通过 ENVI 5.3 软件对兴隆山地区遥感影像(来自于地理空间数字云平台 Landsat 8 OLI_TIRS 卫星数字产品)进行计算所得。距道路距离、距河流距离两个因子是通过 ArcGIS 10.6 对相应的矢量图层(来源于 <https://www.openstreetmap.org>)进行计算获得。

由于以上栅格数据具有不同分辨率和不同坐标系,需统一按照地形数据的标准在 ArcGIS 10.6 中以 30m 分辨率进行重采样,然后将各个数据图层统一坐标系为 WGS-1984- UTM -Zone-48N,之后将所有图层转化为 MaxEnt 模型软件运行所需的 ASCII 格式。

1.3 MaxEnt 模型分析

相关学者的最新研究表明,使用一种模型(MaxEnt)是具有一定合理性的^[25],因此本研究采用 MaxEnt3.4.4 软件对野生马麝的潜在分布区进行预测,模型背景点为实地调查所得 193 个马麝出现位点。通过多次数值调整以获得最佳的参数设置^[26],具体的模型运行参数为:模型重复运行 10 次;随机选取 75% 为训练集,25% 为测试集,其余参数为软件默认值。采用刀切法 Jackknife 测试法对各环境因子进行检验以评估其对马麝分布的重要性和贡献率,通过环境因子响应曲线检验环境因子与马麝出现概率的相关关系,以逻辑斯蒂 Logistic 格式输出结果。构建马麝分布模型进行模拟,以 10 次模拟结果的平均值作为最终结果^[27]。

研究采用受试者工作特征曲线(ROC 曲线)法以评估模型精度^[28]。ROC 曲线下的面积为 AUC 值,AUC 值越大,表示环境变量与预测物种地理分布模型间的相关性越大,越容易分辨该物种有无分布,预测效果也就越好。AUC 取值范围在 0—1 之间,评价标准为:0.5—0.6,失败;0.6—0.7,较差;0.7—0.8,一般;0.8—0.9,好;0.9—1.0,优秀^[29—30]。

1.4 潜在适宜分布区划分

由于模型输出结果为 0—1 之间的连续栅格数据,需利用 ArcGIS 10.6 的转换工具将 10 次模型平均预测结果的 ASCII 编码文件结果转化为栅格格式,按照人工分级法将马麝的生境适宜性分成 4 个等级^[31],即非适宜区(<0.3)、低适宜区(0.3—0.5)、中适宜区(0.5—0.7)、高适宜区(>0.7),最终得到马麝在整个兴隆山自然保护区的潜在适宜区分布图。同时,利用 ArcGIS 10.6 软件的空间统计功能,计算不同适宜分布区的面积及相应的比例。

2 结果

2.1 预测结果检验

模型的 ROC 曲线评价结果见图 1。MaxEnt 模型的预测结果达到优秀水平,其 AUC 达 0.932 (± 0.021),对马麝潜在适宜分布区预测结果可靠、精度较高。

2.2 环境因子变量重要性评价

运用 Jackknife 测试法计算每个变量的相对重要性和贡献率。如图 2 所示,海拔、坡向、归一化植被指数、距河流距离对模型增益效果最为明显,显示出较高的重要性,贡献率分别为 40.3%,23.4%,18.6%和 10.9%,累积贡献率达 93.2%。表明这 4 个环境因子是影响马麝分布的主要环境因子。6 个环境变量的贡献率及重要性见表 1。

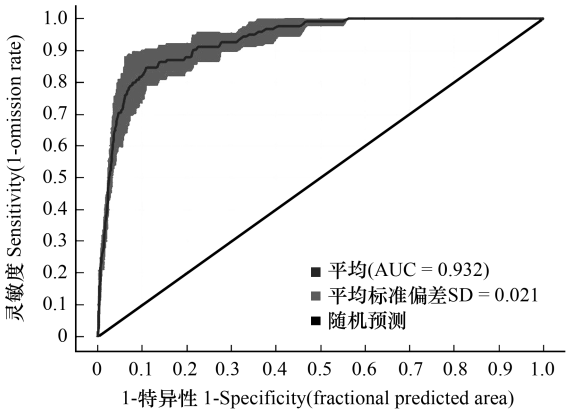


图 1 MaxEnt 模型的受试者工作特征曲线 (ROC) 曲线
Fig.1 ROC curve of Alpine musk deer on MaxEnt model

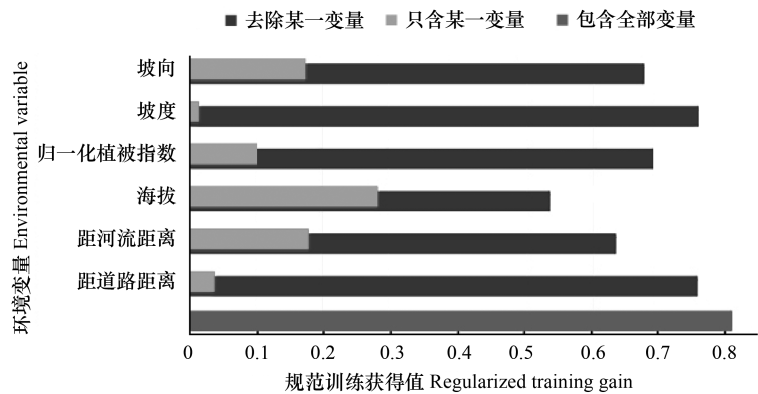


图 2 测试法检验训练数据中各变量的重要性
Fig.2 Variables importance of jackknife test in training data

表 1 影响马麝分布的重要环境变量

Table 1 Permutation importance of variables affecting the distribution of alpine musk deer		
环境变量 Variable	贡献率 Percent contribution/%	重要性 Permutation importance/%
海拔 Altitude	40.3	42.5
坡向 Aspect	23.4	11.8
距河流距离 Distance to waterway	18.6	18.2
归一化植被指数 NDVI	10.9	17.6
坡度 Slope	4	5.8
距道路距离 Distance to road	2.8	4.2

2.3 主要环境变量响应曲线

MaxEnt 模型运行结果中包含生态因子响应曲线,即存在概率与生态因子阈值范围的关系。根据 Jackknife 测试法重要性分析结果,选取海拔、坡向、归一化植被指数、距河流距离这四个因子,当存在概率 ≥ 0.5 时,对应的环境变量的变化范围适宜马麝的分布。通过生态因子响应曲线的描述即可分析环境变量对兴隆山马麝潜在生境适宜性的影响。

如图 3 所示,马麝在海拔 2300 m 左右时出现概率达到峰值,2300—2900m 范围逐渐降低;坡向范围在西

南坡和西北坡(240° — 360°)时马麝出现概率较高;归一化植被指数范围在 0.35—0.4 之间时马麝出现概率处在峰值,此后逐渐降低;马麝出现概率与距河流距离成负相关,即距河流越远,马麝出现概率也随之降低。

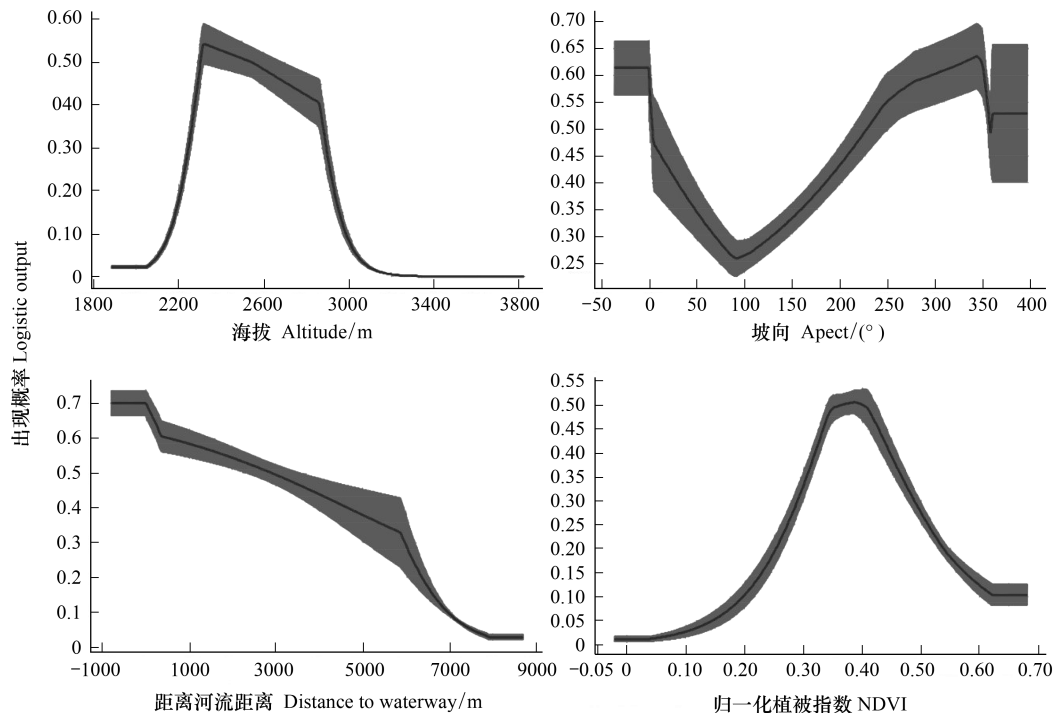


图3 环境因子响应曲线图

Fig.3 Response curve of environmental variables

2.4 兴隆山马麝潜在生境适宜性及种群估算

将模型结果导入 ArcGIS 10.6 并进行重分类,得到兴隆山保护区马麝的潜在生境适宜性分布图(图4)。其中,171个马麝出现位点都落在适宜分布区内,占全部位点的89%,说明模型结果真实可靠。

马麝适生区面积统计表明,马麝在兴隆山保护区的潜在适生区面积约为 123.34km^2 ,约占整个保护区总面积的41.11%。其中,高适宜区面积约为 13.41km^2 ,占保护区总面积的比重较小,约4.47%,占适宜区面积的10.87%;中适宜区面积约 41.89km^2 ,占保护区总面积的比重约13.96%,占适宜区面积的33.96%;低适宜区面积约 68.04km^2 ,占保护区总面积的比重最大,约22.68%,占适宜区面积的55.16%。

兴隆山马麝在适宜生境中种群密度可达 42.88 头/ km^2 ^[2],结合本文模型模拟出来的适宜分布区面积 123.34km^2 ,估算其种群数量可达5289头。根据王静等^[4]的报道,马麝2017—2018年在适宜生境中的种群密度可达 (8.85 ± 3.25) 头/ km^2 ,估算其现生种群数量在1092—1492头左右。

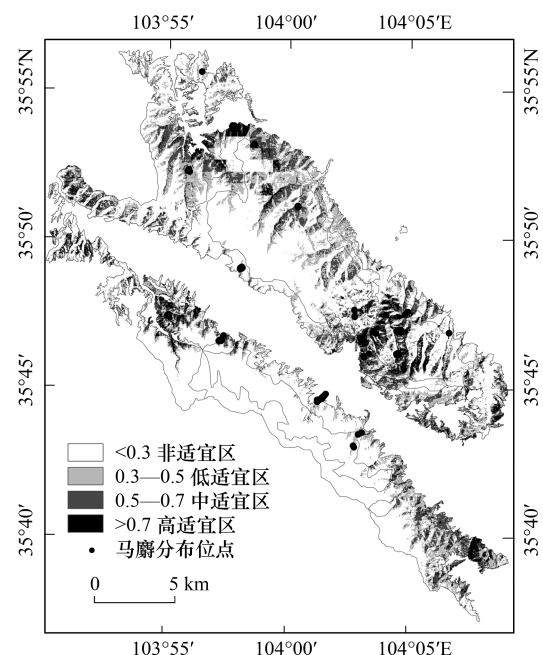


图4 兴隆山野生马麝出现位点与潜在生境分布

Fig.4 Potential habitat and occurrence of wild Alpine musk deer in Xinglong Mountain Reserve

3 讨论

本研究表明,海拔是影响兴隆山保护区马麝生境适宜性的主要生态因子,其重要性为 42.5%。兴隆山保护区马麝适宜分布区的海拔高度在 2000—2900m 范围内,峰值在 2300m 左右,佟梦等^[7]的微生境取样研究表明,马麝在夏季偏好选择一定海拔高度(2319.02 ± 9.31) m 的生境,本研究的大尺度分析结果很好地印证了其结论。因本研究为夏季进行,马麝为喜阴避热的动物,高温是马麝夏季的重要胁迫因素之一,马麝在夏季多向高海拔生境进行垂直迁移,以获取较低的喜好环境温度^[32]。同时,海拔还与植被的分布有一定关联,在兴隆山保护区,海拔 2000—2900m 内植被主要为针叶林、阔叶林和针阔混交林,为马麝夏季喜好栖息的生境;海拔 2900m 以上时,植被则变化为高山灌丛、草甸等,为马麝夏季回避的生境^[7]。从本研究的模型模拟结果上来看,坡向对于马麝生境适宜性也存在一定影响,其适宜分布区的坡向为西南坡和西北坡,这是由于夏季气温较高,马麝会较多选择在阴坡活动。这与佟梦等^[7]对兴隆山地区马麝夏季生境选择的实地研究结果一致,表明在微尺度和大尺度上,野生马麝均喜好选择西坡和北坡生境。

除海拔和坡向以外,归一化植被指数与距河流的距离也是影响马麝潜在生境的重要因子。归一化植被指数能够反映区域植被情况,当 $NDVI>0$ 时,通常表示地表有一定数量的植被覆盖,且随覆盖度增大而增大^[33]。本研究结果显示,兴隆山保护区马麝适宜分布区的 $NDVI$ 范围在 0.35—0.4 之间,说明马麝喜好植被覆盖较为适中的地区,米书慧等^[34]对于贺兰山地区马麝生境的研究结果以及杨萃等^[35]、佟梦等^[7]对于兴隆山区域马麝生境的研究结果也支持了该结论。在实地调查过程中发现,兴隆山保护区植被茂密地区多为密集的灌丛,野生马麝躲避豹猫(*Prionailurus bengalensis*)和黄喉貂(*Martes flavigula*)等天敌动物的对策主要是快速奔逃,密集灌丛会影响其反哺策略的有效性,因此野生马麝会回避茂密杂灌生境,佟梦等^[7]和高志千等^[36]的研究也表明,兴隆山地区野生马麝对灌丛生境的选择利用较少,这与本研究的模型预测结果一致,即在 $NDVI$ 值过高时,野生马麝的出现概率降低。此外,本研究表明,水源是影响野生马麝分布的关键因素,马麝出现概率与距水源的距离呈现负相关,验证了潘世秀等^[23]和杨萃等^[35]对于兴隆山区域马麝的微生境研究结论。其他用有蹄类动物的潜在适宜分布区预测研究也充分说明了水源对于有蹄类动物分布的重要性^[31,37]。交通道路影响在本模型结果中的贡献率较低,与刘志远等^[19]的研究结果相一致,一方面与保护区内的道路多为林间机耕道,其源于交通的胁迫较有限,另一方面也说明了海拔、坡向、植被、水源等因子对野生马麝来说是更为重要的因子。

本研究表明,野生马麝潜在适宜性生境占比较高,但高适宜区分布较少,而中、低适宜分布区占比较高,且高适宜区之间的分布较为割裂,同时在不同适宜区内部的分布也不连续。虽然适宜区面积占整个保护区的 41.11%,但只占林地面积的 61.92%,即仍有一部分林地并非马麝的潜在适宜分布区。从保护区各个保护站的划分上看,主要集中在兴隆山、上庄、马啣山三个保护站,这与王静等^[4]于 2020 年报道的兴隆山、上庄、马啣山三个保护站马麝种群数量比较多的结论相吻合。本文通过结合历史上在兴隆山地区报道过的种群密度,经估算得出 2003 种群数量应在 5289 头左右,高于康发功^[2]报道的 2003 年的种群数量(2539 ± 437)头;2017 年在 1092—1492 头左右,也略高于王静等^[4]报道的同年度实地调查数量(1159 ± 275)头。上述预测的野生马麝种群数量是保护区内各项资源环境条件最优情况下可以支撑的预测种群数量,均略大于同时期相关学者所报道的种群数量,但与保护区的环境容纳量的关系还有待进一步研究。

基于本研究结果,对兴隆山保护区野生马麝的生境及种群保护建议如下:(1)在保护区林地进行小范围间伐、开辟林窗及杂灌采伐,增加地表植被覆盖、增加马麝食物资源,使部分林地变为马麝的适宜分布区,同时提高中低适宜区的适宜性使其变为高适宜分布区;(2)在关键地带进行封山育林,封闭保护区内林间道路的使用,增加马麝现有潜在高适宜分布区之间以及分布区之内各斑块间的连通性。

致谢:感谢甘肃兴隆山国家级自然保护区管护中心及各保护站工作人员对本研究的支持,感谢北京师范大学

资源学院的何平博士的帮助。

参考文献 (References):

- [1] Yang Q S, Meng X X, Xia L, Feng Z J. Conservation status and causes of decline of musk deer (*Moschus* spp.) in China. *Biological Conservation*, 2003, 109(3): 333-342.
- [2] 康发功. 兴隆山马麝资源种群数量变化研究. *甘肃林业科技*, 2003, 28(4): 19-22.
- [3] 孙伟刚, 王义德, 康发功. 兴隆山马麝栖息生境种群数量变化分析及保护. *甘肃科学学报*, 2004, 16(3): 45-48.
- [4] 王静, 孙军平, 徐涛, 祁军, 张远林, 张学炎, 孟秀祥. 甘肃兴隆山保护区野生马麝分布、数量特征及影响因素. *生态学报*, 2020, 40(21): 7997-8004.
- [5] 孟秀祥, 潘世秀, 栾晓峰, 冯金朝. 兴隆山自然保护区马麝春季生境选择. *生态学报*, 2010, 30(20): 5509-5517.
- [6] 孟秀祥, 潘世秀, 惠岑悻, 张学炎, 潘世成, 冯金朝. 甘肃兴隆山自然保护区濒危马麝(*Moschus sifanicus*)秋季利用生境特征. *应用与环境生物学报*, 2011, 17(3): 412-417.
- [7] 佟梦, 潘世秀, 王向伟, 安谈红, 冯金朝, 孟秀祥. 甘肃兴隆山自然保护区马麝夏季栖息地特征及生境选择格局. *动物学研究*, 2010, 31(6): 610-616.
- [8] 王向伟. 野生马麝功能性生境选择[D]. 北京: 中央民族大学, 2012.
- [9] 李宏群, 牛常会, 袁晓青, 霍安平, 尚伟, 刘江成, 韩培士, 张云朝, 简宁. 基于 MaxEnt 模型的陕西黄龙山原麝(*Moschus moschiferus*)潜在分布区研究. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(12): 1616-1622.
- [10] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 2008, 31(2): 161-175.
- [11] Qin A L, Liu B, Guo Q S, Bussmann R W, Ma F Q, Jian Z J, Xu G X, Pei S X. Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sutchuenensis* Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China. *Global Ecology and Conservation*, 2017, 10: 139-146.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Booth T H, Nix H A, Busby J R, Hutchinson M F. BIOCLIM: the first species distribution modelling package, its early applications and relevance to most current MAXENT studies. *Diversity and Distributions*, 2014, 20(1): 1-9.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 白泚露, 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.
- [19] 油志远, 鲁碧耕, 骆念龙, 谢凡, 杨孔, 杨楠. 基于 MaxEnt 模型的四川察青松多白唇鹿国家级自然保护区马麝栖息地适宜性评价. *西南民族大学学报: 自然科学版*, 2021, 47(6): 555-561.
- [20] 陈蕾, 徐涛. 兴隆山自然保护区自然环境初步研究. *绿色科技*, 2017, (12): 181-182.
- [21] 代伟华. 黄河流域上游自然保护区生态环境保护意义及措施——以兴隆山保护区为例. *绿色科技*, 2021, 23(12): 15-16.
- [22] 魏强, 凌雷, 王多锋, 柴春山, 王芳, 钟怡铭, 陶继新, 张广忠, 李国林. 不同海拔甘肃兴隆山主要森林群落的土壤理化性质. *西北林学院学报*, 2019, 34(4): 26-35.
- [23] 潘世秀, 孟秀祥, 冯金朝, 周宜君, 徐宏发. 小型林间独栖反刍动物栖息地选择研究进展. *浙江林学院学报*, 2007, 24(3): 357-362.
- [24] 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.

- [25] Hao T X, Elith J, Lahoz-Monfort J J, Guillerá-Arroita G. Testing whether ensemble modelling is advantageous for maximising predictive performance of species distribution models. *Ecography*, 2020, 43(4): 549-558.
- [26] 张立博. 内蒙古高格斯台地区东北马鹿冬季生境空间结构分析与评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [27] Behdarvand N, Kaboli M, Ahmadi M, Nourani E, Mahini A S, Aghbolaghi M A. Spatial risk model and mitigation implications for wolf - human conflict in a highly modified agroecosystem in western Iran. *Biological Conservation*, 2014, 177: 156-164.
- [28] Leshowitz B. Comparison of ROC curves from one- and two-interval rating-scale procedures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1969, 46(2B): 399-402.
- [29] 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.
- [30] 余建平, 陈小南, 余顺海, 乐志芳, 申小莉, 曹铭昌. 基于 MAXENT 模型的古田山保护区黑麂生境适宜性评价. *兽类学报*, 2020, 40(2): 143-151.
- [31] 陈智强, 赵增辉, 王远飞, 韦力, 丁国骅, 林植华. 基于红外相机技术和 MaxEnt 模型的黑麂(*Muntiacus crinifrons*)活动节律分析和潜在适生区预测. *生态学报*, 2021, 41(9): 3535-3547.
- [32] 郑生武, 皮南林. 马麝的生态研究. *动物学报*, 1979, (2): 176-186.
- [33] 周启刚, 李剑, 孟浩斌, 张晓媛, 庞敏. 基于遥感解释的重庆市重要生态空间质量评价. *水土保持研究*, 2021, 28(6): 292-300.
- [34] 米书慧, 赵唱, 孙嘉, 李宗智, 滕丽微, 刘振生. 贺兰山马麝秋季生境选择. *四川动物*, 2021, 40(2): 169-175.
- [35] 杨萃, 潘世秀, 安谈红, 马光, 冯金朝, 孟秀祥. 甘肃兴隆山自然保护区马麝冬季生境喜好初步研究. *四川动物*, 2011, 30(3): 481-487.
- [36] 高志千, 康发功. 甘肃兴隆山食肉兽对马麝的影响. *野生动物*, 1997, (5): 17-18.
- [37] 张微, 姜哲, 巩虎忠, 栾晓峰. 气候变化对东北濒危动物驼鹿潜在生境的影响. *生态学报*, 2016, 36(7): 1815-1823.