

湖北木林子国家级自然保护区的林麝生境 适宜性评估

杨春宝¹, 陈俊韬¹, 杨刚¹, 严康², 薛创林², 严翼^{2*}

(1 湖北木林子国家级自然保护区管理局, 湖北 恩施 445000; 2 中南民族大学 资源与环境学院, 武汉 430074)

摘要 林麝(*Moschus berezovskii*)作为国家重点保护野生动物, 探明其在自然保护区的潜在分布区域及生态适宜性对动物保护和自然保护区管理至关重要。研究以湖北木林子国家自然保护区为例, 基于2016—2023年红外相机采集的林麝出没影像资料, 结合自然环境和人类活动的多源空间数据, 采用MaxEnt模型探究了研究区林麝的潜在分布区域及影响其分布的主要因子。研究结果表明距农业用地的距离是影响研究区林麝适宜区分布的最主要环境因子, 其次是土壤类型; 林麝的潜在总适生区面积为141.27 km², 占整个自然保护区面积的68.18%, 空间上主要分布在自然保护区的东部、中西部和东北部, 其中高适生区主要位于研究区东部和东北部; 高适生区和中适生区都主要位于自然保护区的核心区内, 保护区现有的功能分区能对林麝起到有效保护的作用。研究结果明晰了湖北木林子自然保护区林麝的生境适宜区及影响其分布的关键影响因素, 可为该区域林麝的保护和自然保护区优化管理提供科学依据。

关键词 林麝; 木林子自然保护区; MaxEnt模型; 生境适宜性; 多源数据

中图分类号 Q958 文献标志码 A 文章编号 1672-4321(2026)01-0119-10

doi: 10.20056/j.cnki.ZNMDZK.20250839

Habitat suitability assessment of forest musk deer (*Moschus berezovskii*) in Mulinzi National Nature Reserve in Hubei Province

YANG Chunbao¹, CHEN Juntao¹, YANG Gang¹, YAN Kang², XUE Chuanglin², YAN Yi^{2*}

(1 Hubei Mulinzi National Nature Reserve, Enshi 445000, Hubei China; 2 College of Resources and Environment, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, China)

Abstract The forest musk deer (*Moschus berezovskii*) is a key nationally protected wildlife species in China. Understanding its potential distribution areas and ecological suitability within nature reserves is of paramount importance. This study takes the Hubei Mulinzi National Nature Reserve as an example. Based on the image data of forest musk deer occurrences captured by infrared cameras from 2016 to 2023, combined with multi-source spatial data of natural environments and human activities, the MaxEnt model was used to explore the potential distribution areas of the forest musk deer in the study region and the main factors influencing its distribution. The research results indicate that the distance from agricultural land is the most significant environmental factor affecting the distribution of suitable areas for the forest musk deer in the study region, followed by soil type. The total potential suitable area for the forest musk deer is 141.27 km², accounting for 68.18% of the entire nature reserve area. Spatially, these areas are mainly distributed in the eastern, central-western, and northeastern parts of the nature reserve, with high suitability areas primarily located in the eastern and northeastern parts of the study region. Both high and medium suitability areas are predominantly located within the core zone of the nature reserve, indicating that the current functional zoning of the reserve effectively protects the forest musk deer. The findings of this study clarify the habitat suitability areas for the forest musk deer in the Hubei Mulinzi

收稿日期 2024-12-31

* 通信作者 严翼(1986-), 女, 讲师, 博士, 研究方向: 生态环境遥感监测, E-mail: yanyi@mail.scuec.edu.cn

基金项目 国家自然科学基金资助项目(41901235); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CZQ24029)

Nature Reserve and the key factors influencing its distribution, providing a scientific basis for the conservation of the forest musk deer and the optimized management of the nature reserve in this region.

Keywords *Moschus berezovskii*; Mulinzi Nature Reserve; MaxEnt; habitat adaptability; multi-source data

林麝是国家一级保护动物,属于栖息于高海拔地区的中型哺乳动物^[1-2],曾广泛分布于我国中部和南部大部分地区^[3],近年来受人类活动影响,林麝的分布区大面积萎缩,目前林麝的生存区域呈点状分布,种群数量少、密度低^[4].掌握林麝的空间潜在分布区并厘清影响其分布的主要因素是林麝保护和种群恢复的基础.

传统的动物潜在分布区探究和生境适宜性评价研究主要是采用调查法^[5]、红外相机监测法^[6]及访问法^[7],这些方法多侧重随时间的变化研究,而缺乏空间分布的区域研究.而后出现了基于地理空间信息叠加分析的方法,即根据专家先验知识选取影响动物分布的重要因素,采用地理空间分析和叠加分析的方法,辨识动物的自然适宜分布区^[8],这种方法的结果受人为给定的权重影响较大.近年来,依靠统计和数学分析方法建立的物种分布模型得到越来越广泛的应用^[9-10],常见的物种分布模型包括 MaxEnt 模型(最大熵模型)^[11],GBM(梯度提升模型)^[12],以及随机森林模型^[13-14]等. MaxEnt 模型自上世纪末发展以来,已逐渐成为物种分布建模领域的主流方法.它利用现有的物种出现记录和环境变量作为输入,通过最大化熵来估计物种在不同环境条件下出现的概率^[15]. MaxEnt 模型非常灵活和准确,能够处理各种类型的环境变量,它的优势之一在于即使数据有限也能提供精确的预测^[16].此外,因其在已知约束下生成最均匀的分布,减少了人为偏差,使其在生成准确的概率分布时更具鲁棒性.目前已广泛应用于林麝^[4]、川金丝猴^[17]、藏羚羊^[18]等多种珍稀、濒危动物的生境适宜性评价中,推动了多个自然保护区的保护规划.然而现有研究选取的环境因子较为单一,主要以自然环境要素中的气候和地形因子为主,缺乏对植被、土壤、水体分布等其他自然因素的考虑和土地利用、道路修建等人类活动因素的考量,导致预测结果在现实环境中的适用性有限.多源地理空间数据的发展为物种分布潜在影响因子研究的精细化提供了可能.多源数据如土地利用、土壤、植被、人口和社会经济等要素空间数据的获取对优化适宜性评价结果有重要意义.

湖北木林子国家级自然保护区(以下简称“木

林子自然保护区”),位于湖北省恩施土家族苗族自治州鹤峰县北部,地处武陵山余脉^[19],是华中地区最为重要的生物基因库,也是具有全球意义的生物多样性关键地区,具有重要的综合生态价值.林麝作为濒危野生动物,是该自然保护区五大主要保护对象之一.掌握自然保护区内林麝的可能分布区域有利于该区域林麝种群的保护和壮大,有利于保护区保护功能的更好实现和完善.

本研究将基于湖北木林子自然保护区内红外相机监测的林麝分布数据,结合自然和人为的多源环境数据和生态变量,采用 MaxEnt 模型在探测影响林麝分布的主要因子基础上,评估其潜在分布区,进一步分析林麝随主要影响因子的分布规律,并评估了林麝在研究区的保护状况,以期研究区林麝的有效保护和保护区管理政策的制定提供科学依据.

1 研究区概况

木林子保护区位于湖北省恩施土家族苗族自治州鹤峰县北部,东经 109°59'30"~110°17'58",北纬 29°55'59"~30°10'47",总面积 20838 ha,其中核心区 7634 ha、缓冲区 5621 ha、实验区 7583 ha(图 1).木林子自然保护区地处中亚热带与北亚热带的过渡带,全区皆山,属武陵山支脉^[20],地形复杂,相对高差大,海拔在 600~2100 m 之间.土壤类型具有明显的垂直规律性,大致在海拔 500~800 m 为黄壤,800~1500 m 为山地黄棕壤,1500 m 以上为棕壤.气候四季分明,年平均气温 15.3 °C,年平均降水量 1529.2 mm,无霜期 200-260 d.保护区区域大部分属于长江流域澧水水系,东北部分属于清江水系,区内主要河流有溇水河、咸盈河等数十条河流^[20].自然植被类型多样,以中亚热带山地常绿落叶阔叶混交林为主,共有针叶林、阔叶林,以及灌丛和灌草丛 3 个植被型组,暖性针叶林、温性针阔叶混交林、常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、落叶阔叶林、落叶阔叶灌丛以及灌草丛 7 个植被型,森林覆盖率达 94.38%.研究区有国家重点保护陆生野生脊椎动物共 55 种,其中 I 级有 5 种,包括云豹、豹、华南虎、林麝和金雕.

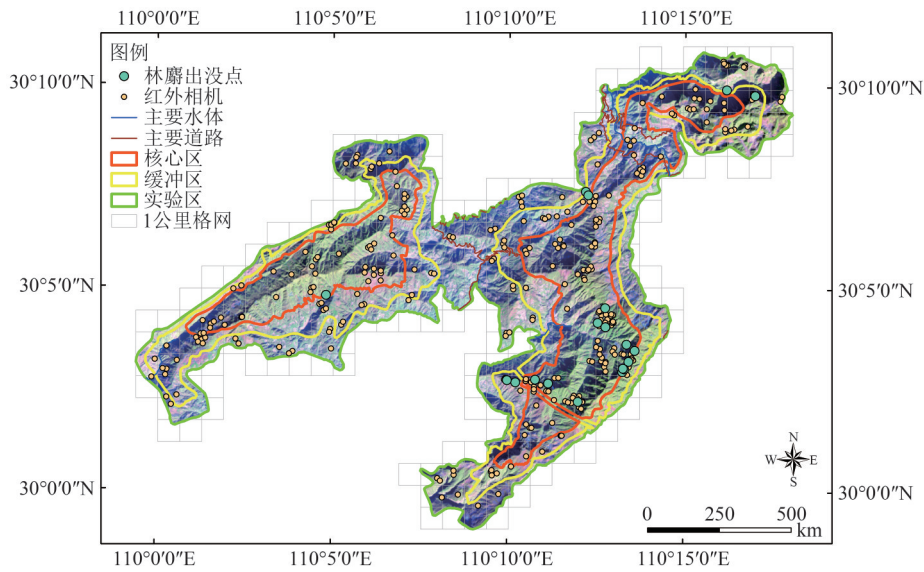


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

2 数据和方法

2.1 数据

红外相机以方格网为单元布设,覆盖木林子自然保护区范围建立 1 km × 1 km 方格网(图 1),整个保护区共划分 280 个方格网,其中保护区范围在单个方格网中占比不足 50% 的,该方格网不计为有效格网,占比超过 50%,该格网为有效格网,整个保护区有效格网为 217 个. 2016—2023 年来,共计布设 289 个点位,共覆盖 115 个方格网,覆盖率 52.99%. 2016 年至 2023 年共收集红外相机数据近 2T,从海量数据中找到林麝的影像资料,共计 104 份,涉及 20 个红外相机(表 1),拍摄的林麝照片如图 2 所示.

选取影响林麝潜在分布的 31 个自然和人为因子:包括气候、地形、土壤、植被、土地利用、经济等指标(表 2). 在 GIS 中将所有环境因子数据的坐标投影为 WGS_1984_Albers,栅格分辨率统一为 30 m,按掩膜提取与研究区边界一致的空间范围,并将所有环境因子转换为 ASCII 格式. 为尽量减少这些变量

表 1 相机拍摄记录的林麝出没日期和位置坐标

Tab. 1 Date and location coordinates of *Moschus berezovskii* occurrence recorded by camera shots

编号	出没日期	经度/°E	纬度/°N
1	2023/04/27	110.23	30.06
2	2022/10/13	110.21	30.07
3	2022/10/01	110.17	30.04
4	2022/09/06	110.21	30.08
5	2021/10/02	110.19	30.04
6	2021/10/28	110.22	30.05
7	2021/10/16	110.18	30.05
8	2021/04/28	110.22	30.06
9	2019/12/07	110.20	30.12
10	2019/12/31	110.20	30.12
11	2019/11/04	110.17	30.05
12	2019/10/20	110.20	30.04
13	2019/05/08	110.22	30.05
14	2018/03/09	110.28	30.16
15	2017/12/27	110.22	30.05
16	2017/12/20	110.22	30.05
17	2017/12/07	110.21	30.07
18	2017/07/28	110.27	30.17
19	2017/02/05	110.08	30.08
20	2016/11/20	110.21	30.07



图2 研究区林麝照片

Fig. 2 Photographs of *Moschus berezovskii* in the study area

表2 环境变量名称及来源
Tab. 2 Environment variable names and sources

序号	环境变量	名称	来源
1	Bio1	年平均温度	WorldClim (http://worldclim.org/version2)
2	Bio2	每月最高温与最低温差值的平均值	WorldClim
3	Bio3	温差等温值	WorldClim
4	Bio4	季节性温度差异	WorldClim
5	Bio5	最热月的最高温度	WorldClim
6	Bio6	最冷月的平均温度	WorldClim
7	Bio7	温度的年较差	WorldClim
8	Bio8	最湿季度的平均温度	WorldClim
9	Bio9	最干季度的平均温度	WorldClim
10	Bio10	最热季度的平均温度	WorldClim
11	Bio11	最冷季度的平均温度	WorldClim
12	Bio12	年降雨量	WorldClim
13	Bio13	最湿月的降雨量	WorldClim
14	Bio14	最干月的降雨量	WorldClim
15	Bio15	降雨量季节性变异系数	WorldClim
16	Bio16	最湿季度的降雨量	WorldClim
17	Bio17	最干季度的降雨量	WorldClim
18	Bio18	最热季度的降雨量	WorldClim
19	Bio19	最冷季度的降雨量	WorldClim
20	DEM	高程	实测
21	Slope	坡度	实测计算
22	Aspect	坡向	实测计算
23	Soil type (Soiltype)	土壤类型	资源环境科学与数据平台 (https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=145)
24	Dis_Water	距水体距离	据 OpenStreetMap 数据计算 (www.openstreetmap.org/)
25	Vegetation type (Veg_type)	植被类型	资源环境科学与数据平台 (https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=122)
26	NDVI	植被指数	MODIS 数据产品 (https://lpdaac.usgs.gov/products/mod09q1v061/)
27	LUCC	土地利用	Zenodo (https://zenodo.org/records/8176941)
28	Dis_agriculture (Dis_Agri)	距农业用地距离	据林业一张图提取计算
29	Dis_Road	距主要道路距离	据 openstreet 数据计算 (www.openstreetmap.org/)
30	Dis_Build	距建筑物距离	据林业一张图提取计算
31	GDP	国内生产总值	资源环境科学与数据平台 (https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=33)

对相关数据源的干扰,提高模型精度,使用SPSS软件计算皮尔逊相关系数,并剔除了相关系数大于0.8的变量(图3),以保留最突出的环境因子,最后获取了15个因子(表2中加粗显示)参与进一步的模型计算。

2.2 方法

最大熵算法(MaxEnt)是一种基于信息熵最大化原理的概率模型算法^[21],常用于在不确定性较大的情况下物种分布推测。

MaxEnt模型基于最大熵原理,通过在给定约束

下找到具有最高熵的模型来估计目标概率分布^[21]。当系统知识不完整时,这种方法提供最无偏的概率估计^[22]。它通过在已知信息条件下生成最为“均匀”的分布,最大限度地减少假设,从而得出最具客观性的结论。在物种分布建模中,MaxEnt使用自然要素和人类活动等环境变量以及物种出现记录来预测未知区域的存在概率。

本研究利用MaxEnt 3.4.1软件,进行林麝潜在分布区预测分析。将有效的林麝监测点位数据和影响因子数据导入MaxEnt模型中,进行如下设置:(1)

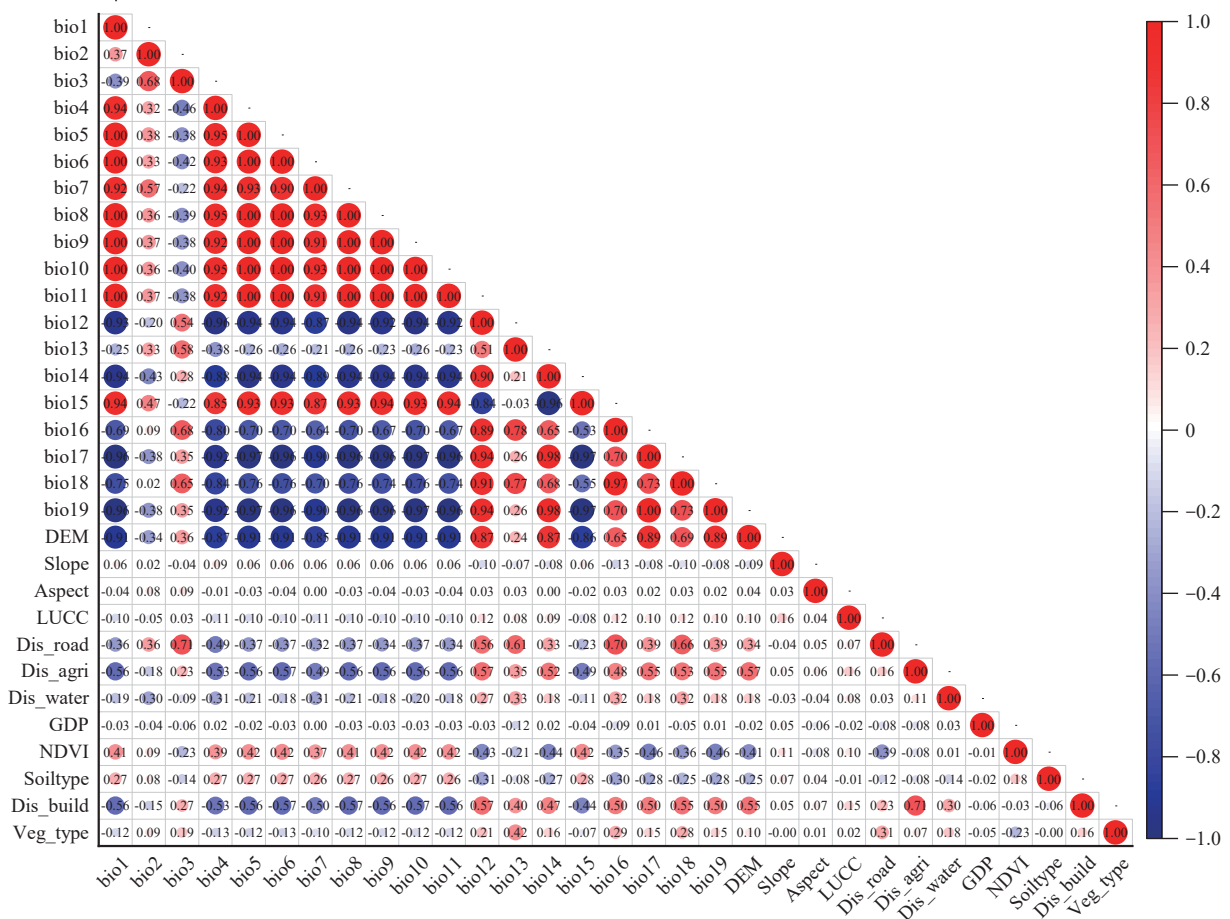


图3 环境因子相关系数

Fig. 3 Correlation coefficient of environmental factors

随机选取 10% 的数据作为测试数据; (2) 将正则化倍数设置为 1.1; (3) 使用 10 次重复交叉验证的平均值来进行下一步的分析; (4) 设置了线性、二次方、乘积和铰链特征; (5) 其他软件参数均为默认设置。

本研究使用刀切法来检验环境变量对物种分布的重要性和贡献度^[23], 并使用接收者操作特征分析(ROC)的曲线下面积(AUC)来评估物种模型的特异性和灵敏度. AUC 值越大, 表示模拟的物种分布与环境变量间的相关程度越高, 模型模拟预测精确性越高^[24-25], 其中 AUC 值在 0.5~0.6, 差; 0.6~0.7, 较差; 0.7~0.8, 一般; 0.8~0.9, 良好; 0.9~1.0, 极佳^[26]. 模型模拟结果在 GIS 中转为 TIFF 格式进行输出展示, 并通过阈值分割来为木林子自然保护区林麝提供适宜栖息地的定量评估. 根据模型参考阈值, 分别选择训练数据的 1% 存在率、10% 存在率和相等的训练敏感性和特异性值作为不适宜区、低适宜区、中适宜区和高适宜区的划分阈值, 并将结果图展示给保护区专家及工作人员, 以进行进一步验证和认可。

3 结果

3.1 模型精度评价

本研究使用 ROC 曲线作为模型精度评价指标, 采用 MaxEnt 软件, 设置 10 次重复得到的林麝预测 AUC 均值为 0.970 (图 4), 根据 AUC 值的评价标准: 本研究模型的预测结果达到极佳, 平均标准差为 0.010, 满足研究需要, 所建模型可用于林麝在研究区分布情况分析。

3.2 主导环境因子分析

MaxEnt 模型在输出结果中定量计算了每个环境因子对模型预测的贡献程度. 环境因子贡献率越大, 表明该因子在模型预测中提供的参考信息越多^[27]. 根据 10 次重复运行后每种环境因子的平均贡献率可以看到, 距农业用地距离、土壤类型、每月最高温与最低温差值的平均值、植被类型和坡向的贡献率较大, 分别为 43%、16.7%、9.1%、8.8% 和 7.4% (表 3), 这 5 个因子的累计贡献率达 85%, 表明这 5 个环境因子是影响林麝生境选择的主要环境因

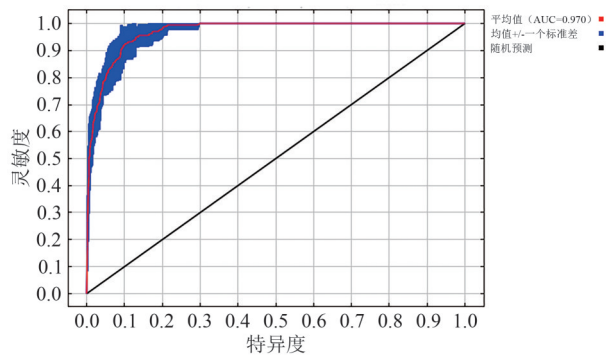


图4 林麝适生区预测的ROC曲线

Fig. 4 ROC curves for the prediction of suitable areas for *Moschus berezovskii*

表3 环境变量对林麝分布的贡献率

Tab. 3 Contribution rate of environmental variables to the distribution of *Moschus berezovskii*

变量	贡献率/%	置换重要性/%
Dis_Agri	43	43.5
Soiltype	16.7	13.6
bio2	9.1	1.7
Veg_type	8.8	3.6
Aspect	7.4	8.6
Dis_Road	4.6	11.4
Dis_Water	3.2	12.6
GDP	2	0.5
bio13	1.5	1.5
Slope	1.4	0.3
NDVI	0.9	1.7
bio16	0.8	0.5
bio1	0.5	0.5
LUCC	0.1	0
bio3	0	0

子,其他环境因子对林麝分布的影响较小. 置换重要值中,排前5位的是距农业用地的距离43.5%、土壤类型13.6%、距水体距离12.6%、距道路距离11.4%、坡向8.6%,置换重要值累计89.7%. 综合分析可知,距农业用地的距离和土壤类型是制约保护区林麝分布的关键因子,二者的平均贡献率和置换重要值均超过10%,尤其是距农业用地的距离其平均贡献率和置换重要值甚至都超过了40%. 距水体距离、距道路距离、坡向、每月最高温与最低温差值的平均值、植被类型也对林麝的分布具有一定影响,它们的平均贡献率和置换重要值都超过了5%.

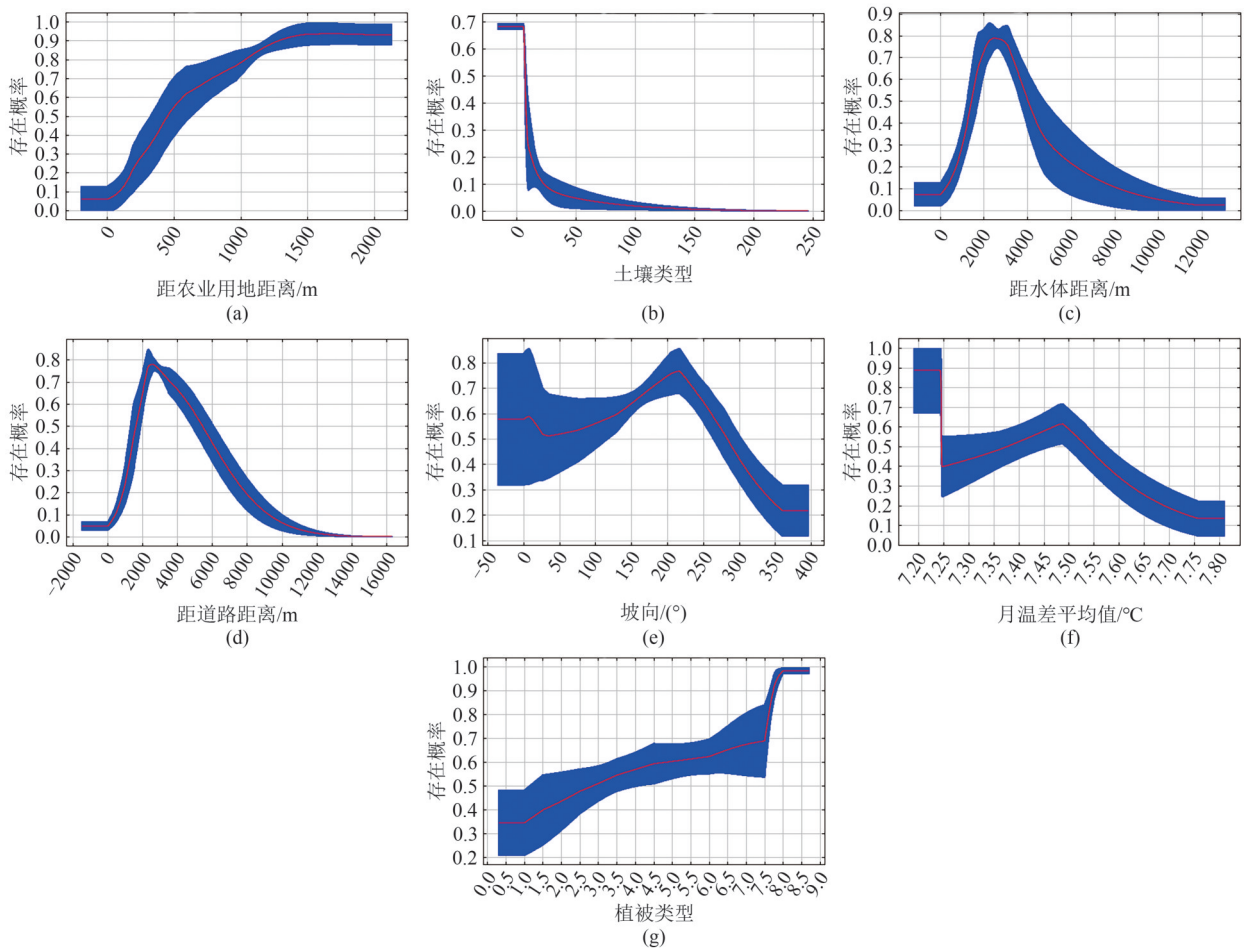
3.3 影响林麝空间分布的主导环境因子适宜范围

物种的主导环境因子是决定其空间分布最重要的因素,在MaxEnt模型中,一般根据建模结果中的因子响应曲线来量化物种的存在概率与因子之

间的关系,从而更直观地展示物种的各个主导环境因子具体怎样影响其分布. 通常取存在概率>0.5时对应的环境因子阈值为物种的适宜生存范围,因为此范围内生态因子的值更适合物种生存. 响应曲线是由红色线条和围绕红线的蓝色区间组成,其中前者代表了10次运行结果的均值,后者则代表10次运行结果的区间范围. 根据模型计算得到的各因子响应曲线(图5),林麝在中国区域的存在概率与各环境因子之间呈动态变化的关系,且距离农业用地越远、土壤类型为黄棕壤、植被类型更倾向于常绿阔叶类型,其他因子在一定阈值范围内的环境条件最适合林麝栖息. 距农业用地的距离是最重要的主导环境因子,林麝的存在概率随着距农业用地的距离增加逐步上升,在距离农业用地大于445 m时,林麝的存在概率大于0.5,这是林麝距农业用地的适宜范围,其在距离大于1653 m后趋于稳定. 林麝随土壤的分布,主要分布在黄棕壤这种土类上,最为适宜. 林麝的存在概率随着距水体距离先增加后减小,峰值在2446 m,距离水体1387 m到3938 m之间均为林麝的适宜分布区域. 林麝的存在概率随着距道路距离的增加先升高而后下降,在距道路距离为2302 m时存在概率达到峰值. 与道路距离为1586~5392 m之间林麝的存在概率大于0.5,这是林麝随道路距离的适宜范围. 林麝适宜分布的坡向范围主要在57~284°之间,即主要分布在东坡、东南坡、南坡、西南坡和西坡范围内,峰值出现在西南坡. 林麝随月温差(bio2)的分布在7.37~7.53 °C之间最为适宜. 植被类型最适宜的区域分布在除亚热带针叶林和亚热带落叶阔叶林外的其他区域,尤其适宜分布在一年两熟粮食作物区.

3.4 林麝适生区分析

根据模型运算得到的训练数据1%存在率阈值0.012、训练数据10%存在率阈值0.112和相等的训练敏感性和特异性值0.340,将研究区林麝的适生区分为非适生区、低适生区、中适生区和高适生区(图6),其面积分别为65.95、96.82、25.25、19.19 km²,分别占保护区总面积的比例为31.83%、46.73%、12.19%和9.26%(表4). 林麝的潜在总适生区面积约141.27 km²,占整个自然保护区总面积的68.18%,超过三分之二的占比说明研究区对林麝生存活动的适宜性,这些区域主要分布在自然保护区的东部、中西部和东北部,其中高适生区主要位于研究区东部和东北部,中适生区多围绕高适生区分布,低适生区广泛分布在环绕高、中适生区的外围区域.



(b) 土壤类型代码:6-黄棕壤、13-棕壤、224-黄壤;(e) 坡向范围:337.5°~22.5°-北坡、22.5°~67.5°-东北坡、67.5°~112.5°-东坡、112.5°~157.5°-东南坡、157.5°~202.5°-南坡、202.5°~247.5°-西南坡、247.5°~292.5°-西坡、292.5°~337.5°-西北坡;(g) 植被类型代码:1-亚热带针叶林、2-亚热带落叶阔叶林、3-亚热带常绿、落叶阔叶混交林、4-亚热带常绿阔叶林、5-亚热带、热带常绿阔叶林、7-亚热带、热带草丛、8-一年两熟粮食作物区。

图5 林麝存在概率对主要影响因子的响应曲线

Fig. 5 Response curves of the probability of the presence of *Moschus berezovskii* to the main influencing factors

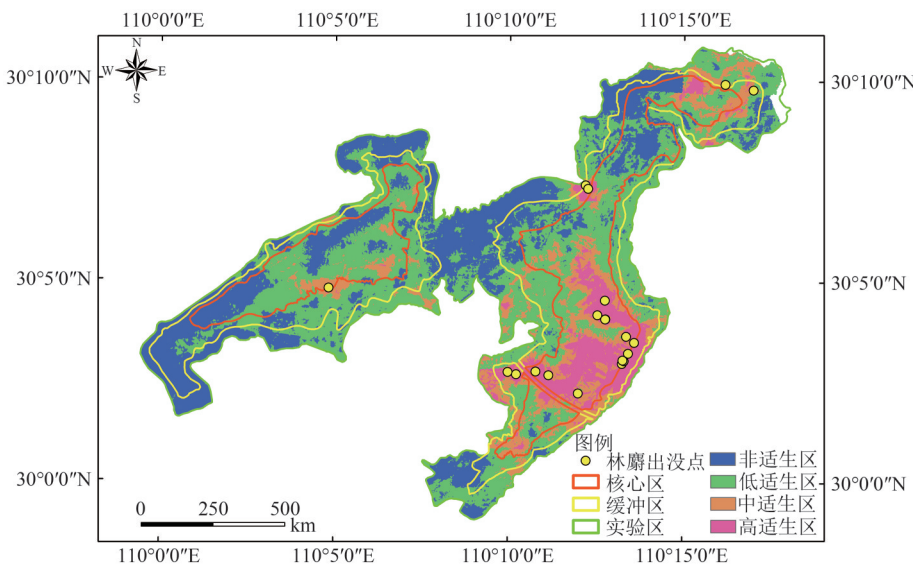


图6 木林子保护区林麝适生区分布

Fig. 6 Distribution of suitable habitat areas of *Moschus berezovskii*

表 4 林麝适生区在木林子保护区不同功能分区中的面积比例

Tab. 4 The proportion of *Moschus berezovskii* suitable area in different functional zones of the reserve

分区	非适生区		低适生区		中适生区		高适生区	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
实验区	33.02	43.58	32.84	43.34	5.95	7.85	2.38	3.14
核心区	15.89	20.80	34.32	44.90	13.23	17.31	12.96	16.96
缓冲区	16.86	30.01	29.47	52.46	6.02	10.72	3.82	6.80

木林子自然保护区的功能分区中,核心区面积为 76.42 km²,缓冲区面积为 56.19 km²,实验区面积为 75.77 km². 林麝当前适生区在木林子自然保护区不同功能区中的分布如表 4 所示. 其中,高适生区在核心区、缓冲区和实验区的面积分别为 12.96、3.82 和 2.38 km²,分别占核心区、缓冲区和实验区总面积的 16.96%、6.80% 和 3.14%. 中适生区在核心区、缓冲区和实验区的面积分别为 13.23、6.02、5.95 km²,分别占核心区、缓冲区和实验区总面积的 17.31%、10.72% 和 7.85%. 低适生区在核心区、缓冲区和实验区的面积分别为 34.82、29.47、32.84 km²,分别占核心区、缓冲区和实验区总面积的 44.90%、52.46% 和 43.34%. 非适生区在核心区、缓冲区和实验区的面积分别为 15.89、16.86 和 33.02 km²,分别占核心区、缓冲区和实验区总面积的 20.80%、30.01%、43.58%. 在自然保护区的核心区,低适生区的比例最大,占比近二分之一,中适生区和高适生区的占比近五分之一,非适生区的占比约为五分之一;在缓冲区内,低适生区的占比超过二分之一,中适生区占比约十分之一,高适生区占比不到十分之一,非适生区占比约百分之三十;在实验区内,低适生区和非适生区占比相当,均介于 43%~44% 之间,中适生区占比不到百分之十,高适生区占比不到百分之五. 高适生区和中适生区在核心区的占比都高于其分别在缓冲区和实验区的占比,即高适生区和中适生区都主要位于自然保护区的核心区内.

4 讨论

在以往关于动物生境适宜性的评价中,考虑较多的是气候和地形因子,而忽视了人类活动的影响. 本研究对木林子自然保护区林麝栖息地适应能力进行了建模,并确定了决定其栖息地的环境因素. 结果表明人为干扰是确定木林子自然保护区林麝适宜栖息地很重要的一个因素. 选取了人类活动相关的农业、道路和经济等因素进行建模,结果表明在自然保护区尺度上,影响林麝分布的最主要的环

境因子是距农业用地的距离,其对林麝分布的贡献率为 43%,因子曲线表明研究区林麝在距农业用地距离较远的地方存在概率较低. 这意味着,随着与农田距离增加,林麝存在的可能性也会增加. 反之,靠近农田,存在的可能性就会降低. 这与高心宇^[28]在陕西秦巴山区的研究结果一致,其在对陕西秦巴山区林麝空间分布格局进行研究时也发现与耕地的距离是决定区域林麝空间分布格局的主导环境因子之一. 这说明人类的农业生产活动对林麝的分布有很大影响,经调查林麝栖息地多在原始林中且属于独居动物,其活动时间多在黑夜,会选择远离人为干扰的地方生存活动. 因此,在探讨区域林麝生境适宜性评价的研究中,人类活动因子应当纳入考量以获得更准确的结果. 本文的研究结果与刘紫荆^[4]对林麝在中国的潜在适生区研究中的主导因子结果不一致,这一差异是由研究区尺度的不同造成的. 刘紫荆在对林麝在中国的潜在适生区研究中表明年降水量、坡度、冷季平均气温是影响林麝在中国分布的主导环境因子. 本文的研究区为自然保护区,区域相对较小,气候和地形这两种自然环境背景因子在这一区域相对均质,所以在自然保护区尺度上影响林麝分布的因素呈现出与大尺度区域不同的特征. 这一差异也佐证了白君君等^[29]提出要提物种分布模型的预测作用需考虑尺度效应对主要环境因子选择的影响. 多源数据获取扩展了综合全面考虑影响栖息地潜在分布多因素的可能性. 传统的野外观测和调查能收集到的数据有限,使用遥感和 GIS 收集地面空间数据,即使是无法到达的位置,也可以跨时间连续地观察和监测,进一步提高了物种适宜性分布研究的准确性^[30]. 该研究结果也是对探讨林麝在区域尺度上潜在分布的细化和补充.

土壤类型是研究区影响林麝分布最为重要的一个自然环境因子,研究区土壤类型共有 3 类,分别为黄棕壤、棕壤和黄壤(表 5),黄棕壤分布最广,面积占比近研究区总面积的三分之二,其次为棕壤,面积占比约为研究区总面积的三分之一,面积最少

的黄壤占比不到百分之三. 野外观测到的林麝出没点的土壤类型均属黄棕壤, 研究表明, 黄棕壤所属的淋溶土较为肥沃^[4], 植被覆盖类型较为丰富, 上覆植被类型满足林麝喜好, 所以林麝更倾向于生活在这一土壤类型区域上.

表 5 木林子自然保护区土壤类型占比

Tab. 5 Proportion of soil types in Mulinzi Nature Reserve

土纲	亚类名称	代码	栅格数	面积占比/%
淋溶土	黄棕壤	6	146850	63.78
淋溶土	棕壤	13	76585	33.26
铁铝土	黄壤	224	6804	2.96

木林子自然保护区林麝的潜在适生区面积占比超过研究区总面积的三分之二, 空间上主要分布在自然保护区的东部、中西部和东北部, 其中高适宜区面积为 19.19 km², 约占研究区总面积的十分之一, 主要分布在研究区东部和东北部. 高适生区和中适生区都主要位于自然保护区的核心区内, 说明该保护区现有的功能分区对林麝起到了有效保护的作用. 相比前人林麝生境适宜性研究的宏观尺度, 本研究聚焦于保护区小范围的微尺度生境差异, 以应对保护区内复杂自然环境和人类活动的挑战. 文章在 MaxEnt 模型的基础上, 尝试引入多源环境变量, 以提高模型的解释性与稳健性. 本研究综合考量了保护区内人类活动(如农业活动、道路布设)对适生区分布的潜在影响, 为保护区实际保护措施提供更贴近实际的建议. 受环境因子分辨率的影响, 部分区域会有斑块现象, 未来会收集更高分辨率的遥感影像, 以进一步提高模型模拟的精度.

此外, MaxEnt 为“黑箱”模型, 虽然能提供环境因子的贡献率, 但难以揭示物种-环境关系的生物学机制, 模型的生态学解释力相对不足. 未来可整合 MaxEnt 与其他机器学习模型(如随机森林、梯度提升算法), 提升适生区预测的准确性, 并拓展其适用性. 随着当前对气候变化影响的关注越来越广泛, 未来研究也将更注重新动态生境模型的构建, 以评估物种在不同气候情景下的生境变化, 提升对林麝未来适生区的预测能力.

5 结语

距农业用地的距离是影响木林子自然保护区林麝适宜区分布的最主要环境因子, 其次是土壤类型, 二者对林麝生境选择的贡献率之和达 59.7%. 林麝的潜在适生区面积约 141.27 km², 占整个自然保

护区面积的 68.18%, 空间上主要分布在自然保护区的东部、中西部和东北部, 其中高适生区主要位于研究区东部和东北部. 高适生区和中适生区都主要位于自然保护区的核心区内, 保护区现有的功能分区能对林麝起到有效保护的作用.

参 考 文 献

- [1] 盛和林, 徐宏发. 哺乳动物野外研究方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992.
- [2] 国家林业和草原局, 农业农村部. 国家重点保护野生动物名录[EB/OL]. [2022-04-11]. <https://www.forestry.gov.cn/c/www/lczc/90131.jhtml>.
- [3] 吴科君, 吴世磊, 苏宇, 等. 林麝的种群分布及食源研究概况和进展[J]. 南方农业, 2022, 16(8): 166-169.
- [4] 刘紫荆. 基于 MaxEnt 优化模型对林麝在中国的潜在适生区研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2022.
- [5] 王霞, 袁旭东, 周洪艳, 等. 重庆金佛山国家级自然保护区林麝(*Moschus berezovskii*)种群数量初步调查及地理分布[J]. 中国农学通报, 2020, 36(19): 44-47.
- [6] 宋芬, 周芸芸, 黄太福, 等. 基于红外相机技术的林麝行为 PAE 编码与多样性[J]. 生物多样性, 2024, 32(6): 81-91.
- [7] 陈红. 小相岭山系大中型兽类多样性调查评估[D]. 南充: 西华师范大学, 2021.
- [8] 李海萍, 咎僚, 周鑫, 等. 人类活动对青藏高原东缘兴隆山国家级自然保护区马麝(*Moschus chrysogaster*)生境的影响[J]. 生态学杂志, 2024, 43(6): 1920-1927.
- [9] 朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 等. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用[J]. 生物多样性, 2013, 21(1): 90-98.
- [10] SILLERO N. What does ecological modelling model? A proposed classification of ecological niche models based on their underlying methods[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(8): 1343-1346.
- [11] DOS SANTOS L A, MENDES M F, KRÜGER A P, et al. Global potential distribution of *Drosophila suzukii* (Diptera, Drosophilidae)[J]. PLoS One, 2017, 12(3): e0174318.
- [12] MARX M, QUILLFELDT P. Species distribution models of European Turtle Doves in Germany are more reliable with presence only rather than presence absence data[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 16898.
- [13] GAO C, HONG Y, SUN S, et al. An evaluation of suitable habitats for Amur tigers (*Panthera tigris altaica*) in northeastern China based on the random forest model[J]. Biology, 2023, 12(11): 1444.
- [14] 刘祺, 唐涛, 李建军, 等. 壶瓶山国家级自然保护区

- 毛冠鹿适生区评估[J]. 中国环境科学, 2024, 44(5): 2619-2629.
- [15] MEROW C, SMITH M J, SILANDER J A Jr. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter[J]. *Ecography*, 2013, 36(10): 1058-1069.
- [16] WISZ M S, HIJMANS R J, LI J, et al. Effects of sample size on the performance of species distribution models[J]. *Diversity and Distributions*, 2008, 14(5): 763-773.
- [17] 秦淑洁, 钱天陆, 李思青, 等. 人类活动胁迫下野生动物生境变迁研究——以中国仰鼻猴为例[J]. *生态学报*, 2024, 44(13): 5735-5745.
- [18] 王秋生, 温璐, 苏旭坤. 气候变化背景下青藏高原藏羚羊生境时空格局演变[J]. *生态学报*, 2022, 42(22): 8985-8993.
- [19] 李玮宜, 艾训儒, 姚兰, 等. 鄂西南 3 个国家级自然保护区生物多样性评价[J]. *湖北林业科技*, 2021, 50(2): 18-22.
- [20] 葛继稳, 胡鸿兴, 李博, 等. 湖北木林子自然保护区森林生物多样性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [21] JAYNES E T. Information theory and statistical mechanics[J]. *Physical Review*, 1957, 106(4): 620-630.
- [22] PHILLIPS S J. A brief tutorial on Maxent [J]. *At&t Research*, 2005, 190(4): 231-259.
- [23] 陈艳秋, 初雯雯, 李基才, 等. 新疆卡拉麦里山有蹄类自然保护区夏季鹅喉羚和蒙古野驴的生境适宜性和重叠性分析[J]. *四川动物*, 2024, 43(3): 264-273.
- [24] ZHAO Y, DENG X, XIANG W, et al. Predicting potential suitable habitats of Chinese fir under current and future climatic scenarios based on Maxent model[J]. *Ecological Informatics*, 2021, 64: 101393.
- [25] 罗翀, 徐卫华, 周志翔, 等. 基于生态位模型的秦岭山系林麝生境预测[J]. *生态学报*, 2011, 31(5): 1221-1229.
- [26] 赵金鹏, 王庆, 郑程莉, 等. 气候背景下林麝适宜生境的最大熵模型(MaxEnt)研究[J]. *湖北农业科学*, 2023, 62(3): 218-223.
- [27] 罗绮琪. 基于 Maxent 模型的珠三角地区水鸟多样性空间分布格局研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2020.
- [28] 高心宇. 土地利用变化背景下陕西秦巴山区林麝(*Moschus berezovskii*)空间分布格局研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- [29] 白君君, 侯鹏, 赵燕红, 等. 物种生境适宜性模型及验证的研究进展[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(7): 1423-1432.
- [30] 郭彦龙, 赵泽芳, 乔慧捷, 等. 物种分布模型面临的挑战与发展趋势[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(12): 1292-1305.

(责编&校对 姚春娜)