

雅鲁藏布江流域马麝适生区分布及活动节律

吕永磊^{1,2,3#} 刘郢^{4#} 崔雅倩¹ 王伟波^{1,2} 周薇^{1,5} 王渊³
程继龙¹ 夏霖¹ 葛德燕¹ 徐进博⁶ 储士杰⁷ 曹蕾⁸ 扈晶晶³
普布顿珠³ 温知新^{1*} 杨奇森^{1*}

1 中国科学院动物研究所动物进化与系统学国家重点实验室 北京 100101; 2 中国科学院大学 北京 100049; 3 西藏自治区林业调查规划研究院 拉萨 850000; 4 四川大学生命科学学院, 生物资源与生态环境教育部重点实验室 成都 610065; 5 河北大学生命科学学院 保定 071002; 6 西藏农牧学院资源与环境学院 林芝 860000; 7 安徽农业大学动物科技学院 合肥 230036;
8 西华师范大学生命科学学院 南充 637009

摘要: 马麝 (*Moschus chrysogaster*), 属于鲸偶蹄目 (Cetartiodactyla) 麝科 (Moschidae) 麝属, 是中国特有物种, 被列为国家一级重点保护野生动物, 主要分布于我国青藏高原及周边地区。雅鲁藏布江流域是马麝的重要分布区之一, 了解该区域马麝的栖息地适宜性与活动节律, 有助于促进马麝种群的科学保护及栖息地有效管理。本研究基于雅鲁藏布江流域资源调查及红外相机监测获得的 51 个马麝分布位点信息, 结合地形和气候 22 个环境因子构建 MaxEnt 模型, 对马麝在雅鲁藏布江流域栖息地选择的影响因子以及适宜栖息地分布现状进行了分析, 并对未来不同气候情境下马麝的适生区分布进行预测, 解析其栖息地变化趋势。此外, 基于红外相机数据分析了马麝的活动节律。结果表明: (1) MaxEnt 模型的受试者工作特征曲线下面积 (AUC) 值为 0.926, 表明预测结果的精度较高; (2) 影响雅鲁藏布江流域马麝栖息地选择的主要环境因子是最冷季度降水量 (Bio19) 和坡向 (Aspect), 总贡献率为 89.3%; (3) 马麝在当前气候条件下适宜栖息地主要分布在日喀则市东部、拉萨市中南部、山南市西北部以及林芝市西部区域, 高适宜栖息地分布较为集中, 主要在拉萨市、日喀则市和山南市交界区域; (4) 在未来不同气候情境下, 随着全球气温升高, 马麝的高适宜栖息地面积减少并且分布呈现更加集中的趋势; (5) 马麝的日活动节律呈现明显的晨昏型活动模式。本研究探讨了雅鲁藏布江流域马麝物种分布和活动节律, 可以加深对该地区马麝种群动态的了解, 并为今后该物种的保护和栖息地管理提供理论依据。

关键词: 马麝; 雅鲁藏布江流域; MaxEnt 模型; 适宜性分析; 活动节律

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2026) 01-13-15

基金项目 雅鲁藏布江流域典型大中型哺乳动物分布数量、活动规律的动态监测 (No. 54000022T000000071200, 54000024210200021038);

* 通信作者, E-mail: wenzx@ioz.ac.cn, yangqs@ioz.ac.cn;

共同第一作者 吕永磊, 男, 高级工程师; 研究方向: 保护地规划设计、野生动植物生态学; E-mail: lvyonglei@ioz.ac.cn;

刘郢, 男, 硕士研究生; 研究方向: 野生动植物保护与资源利用; E-mail: ying_liu5140@163.com。

收稿日期: 2025-01-21, 修回日期: 2025-06-26 DOI: 10.13859/j.cjz.202625014 CSTR: 32109.14.cjz.202625014

Distribution patterns of suitable habitats and activity rhythms of the Alpine Musk Deer in the Yarlung Zangbo River Basin, China

LÜ Yong-Lei^{1,2,3#} LIU Ying^{4#} CUI Ya-Qian¹ WANG Wei-Bo^{1,2} ZHOU Wei^{1,5} WANG Yuan³
CHENG Ji-Long¹ XIA Lin¹ GE De-Yan¹ XU Jin-Bo⁶ CHU Shi-Jie⁷ CAO Lei⁸
HU Jing-Jing³ PUBU Dunzhu³ WEN Zhi-Xin^{1*} YANG Qi-Sen^{1*}

¹ Key Laboratory of Zoological Systematics and Evolution, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; ³ Forestry Inventory and Planning Institute of Xizang Autonomous Region,

Lhasa 850000; ⁴ Key Laboratory of Bio-Resource and Eco-Environment of Ministry of Education, College of Life Sciences, Sichuan

University, Chengdu 610065; ⁵ College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002; ⁶ College of Resources and Environment,

Xizang Agricultural & Animal Husbandry University, Linzhi 860000; ⁷ College of Animal Science and Technology, Anhui Agricultural

University, Hefei 230036; ⁸ College of Life Science, China West Normal University, Nanchong 637009, China

Abstract: [Objectives] The Alpine Musk Deer (*Moschus chrysogaster*), belonging to the family Moschidae of the order Cetartiodactyla, is endemic to China and classified as a first-class animal under national protection. It primarily inhabits the Qinghai-Tibet Plateau and surrounding regions of China. The Yarlung Zangbo River Basin represents one of the critical distribution areas for the Alpine Musk Deer. Studying the habitat suitability and activity rhythms of this species in the Yarlung Zangbo River Basin can promote the conservation of Alpine Musk Deer populations and facilitate effective habitat management. **[Methods]** By resource surveys and infrared camera monitoring in the Yarlung Zangbo River Basin, we obtained a total of 51 distribution sites of the Alpine Musk Deer. Then, employing 22 environmental factors, including topography and climate, we constructed a MaxEnt model in MaxEnt 3.4.4 to assess the factors influencing the habitat selection of this species and map the current distribution of suitable habitats in Yarlung Zangbo River Basin with ArcGIS 10.8. Furthermore, we predicted the future distribution of suitable habitats under different climate scenarios to analyze the potential habitat change trends. Finally, we utilized infrared camera data to examine the species' daily activity patterns with R 4.4.3. **[Results]** (1) The area under the receiver operating characteristic curve of the MaxEnt model was 0.926, indicating high accuracy of the prediction (Fig. 2). (2) The main environmental factors affecting the habitat selection of the Alpine Musk Deer in the Yarlung Zangbo River Basin were the precipitation of coldest quarter (Bio19) and aspect, with a total contribution of 89.3% (Fig. 3, Table 2). (3) Under current climatic conditions, the suitable habitats of the Alpine Musk Deer are mainly distributed in eastern Xigaze, central and southern Lhasa, northwestern Shannan, and western Nyingchi. The high suitable habitats are predominantly distributed along the border regions of Lhasa, Xigaze, and Shannan (Fig. 6). (4) The prediction under different future climate scenarios shows a reduction in high suitable habitat areas with the increase in temperature, alongside a more concentrated distribution pattern (Fig. 5). (5) The daily activity rhythm of the Alpine Musk Deer exhibited a distinct crepuscular pattern (Fig. 7). **[Conclusion]** The study can deepen our understanding of population dynamics of the species in the region and provide a theoretical basis for its conservation and habitat management in the future.

Key words: *Moschus chrysogaster*; Yarlung Zangbo River Basin; MaxEnt model; Habitat suitability analysis;

Activity rhythm

关键资源直接影响群落结构、物种丰富度、分布范围、繁殖效率和个体存活率 (Liu et al. 2018)。野生动物的分布通常取决于栖息地质量, 物种通过选择高质量栖息地来最大化自身适合度 (Fretwell and Calver 1969, Cody 1978)。因此, 保护野生动物不仅要关注物种本身, 更应重视对其栖息地的保护 (武正军和李义明 2003, 蒋志刚和马克平 2009)。栖息地保护的核心在于维持和修复野生动物的栖息地, 保持或增加物种多样性, 促进物种与环境之间的相互作用。结合气候、地形、水文条件、植被类型等环境因子对物种栖息地进行适宜性评价, 从而评估物种对环境变化的敏感性, 从宏观角度预测物种潜在分布和评估物种栖息地质量, 分析和筛选影响物种分布的重要环境因子, 对于有效保护物种和管理栖息地具有重要价值 (Allnutt et al. 2002, Xu et al. 2019)。

动物能够通过调整自身行为对栖息地中植被类型、气候、水文条件等环境因子的周期性变化以及种间、种内动态变化做出适应性改变 (孙儒泳 2001)。活动节律是指动物的生理状态和行为模式在特定时间内循环往复出现的规律性变化, 与当地日出日落时间、昼夜长短以及温度等变化有关 (Marinho et al. 2020)。活动节律是动物行为学和生态学所关注的重要课题, 研究动物活动节律能够帮助揭示动物如何通过改变自身来应对变化的环境, 反映该环境情境下动物的生存状态 (Halle 2000), 并为物种管理和保护措施的制定提供数据支持。

物种分布模型 (species distribution model, SDM) 是用于描述或预测某一物种在特定时空范围内分布模式的统计模型。基于物种的已知分布数据与环境各类因子 (如气候、地理特征、土壤类型和植被覆盖等) 之间的关系, 物种分布模型可以有效分析生态因子对物种分布的影响, 从而预测物种在区域内的潜在分布 (Guisan and Zimmermann 2000)。物种分布模

型中最具代表性且被广泛应用的是最大熵模型 (maximum entropy, MaxEnt) (Morales et al. 2017)。MaxEnt 是基于最大熵原理的机器学习方法, 通过物种的出现数据和环境因子来预测物种的潜在分布。即使在环境数据有限、物种-环境关系不明确的情况下, 该模型仍表现出较高的预测精确度 (Merow et al. 2013)。因此, MaxEnt 被广泛应用于物种栖息地适宜性评价和潜在适宜栖息地的空间分布等研究中 (乔慧捷等 2013, Wang et al. 2021)。例如, 钱天陆等 (2022) 运用 MaxEnt 模型对自然环境和人类干扰两种情境下滇金丝猴 (*Rhinopithecus bieti*) 的适宜栖息地进行比较分析, 得出影响滇金丝猴分布的主要环境变量为海拔和年降水量, 并发现人类干扰对滇金丝猴栖息地有明显负影响。基于潜在适宜生境预测结果, 进一步利用 GIS 技术进行分析, 发现在距道路和距居民点 2 500 m 左右处的栖息地适宜性均出现明显拐点, 可作为开展保护工作的缓冲区参考距离。赵玥等 (2024) 采用 MaxEnt 模型分析预测了陕北林区黄喉貂 (*Martes flavigula*) 潜在适宜栖息地的空间分布, 并得出影响其分布的主要环境因子为森林面积和最冷季度降水量。

马麝 (*Moschus chrysogaster*), 属于鲸偶蹄目 (Cetartiodactyla) 麝科 (Moschidae) 麝属, 是中国特有种, 主要分布在中国青藏高原及周边地区的森林生境中 (林宏东等 2024, 魏辅文等 2025)。由于栖息地质量下降和生境破碎化以及非法狩猎等原因, 马麝的野外种群数量不断下降, 已被列为国家一级重点保护野生动物。目前, 关于马麝野外种群栖息地选择及生境适宜性评价的研究主要集中在兴隆山和贺兰山国家级自然保护区。孟秀祥等 (2010) 对兴隆山国家级自然保护区马麝栖息地选择的研究表明, 不同季节影响马麝栖息地选择的生态因子在种类和数量上存在显著差异, 这表明马麝的栖息地选择策略会随着季节变化做出相应的适

应性调整,但植被隐蔽度、坡向和海拔在不同季节下都对马麝栖息地选择有重要影响。类似的季节性选择差异在其他地区的研究中也有所体现。例如,赵唱(2018)对贺兰山国家级自然保护区马麝栖息地选择的研究表明,影响该地区马麝栖息地选择的重要因子包括食物、隐蔽等级以及距离人类活动区域距离等,这些因子的影响在不同季节之间有所变化。因此,马麝对植被和地形的选择相对固定,但随着季节变化,海拔、灌木密度和隐蔽等级等因素成为其选择微生境的关键,这可能与马麝躲避干扰和觅食等习性密切相关。

随着人类活动加剧和全球气候变暖,马麝的适宜栖息地面积大幅度减少(张致荣 2023)。基于 MaxEnt 模型对兴隆山和贺兰山保护区的马麝潜在适宜栖息地进行预测的结果显示,两地的适宜栖息地面积均不到保护区总面积的 5%(丁彦珂等 2023,高浩翔等 2023a,b)。除研究较为集中的兴隆山和贺兰山保护区外,我国的雅鲁藏布江流域也是马麝的重要分布区之一,这一区域马麝潜在适宜栖息地仅在中国科学院西北高原生物研究所研究团队关于中国西部马麝生境适宜性的研究中有所涉及,但并没有着重关注于雅鲁藏布江流域(Jiang et al. 2025)。雅鲁藏布江流域分布有丰富多样的有蹄类物种,研究显示,该区域共有 31 种有蹄类,其中 10 种为青藏高原特有种;16 种为国家一级重点保护野生动物;9 种为国家二级重点保护野生动物(蒋志刚等 2018,张同作等 2022,魏辅文等 2025)。丰富多样的物种分布得益于该区域特殊复杂的生态系统,能够提供更为多样化的栖息地选择(张玉波等 2017)。在进行物种分布研究时,也意味着该区域影响物种栖息地选择的环境因子更加复杂。然而,目前关于雅鲁藏布江流域马麝野外种群的研究极为稀缺,且尚无研究探讨该区域影响马麝栖息地选择的重要因子、潜在适宜栖息地分布以及活动节律。为了解雅鲁藏布江流域马麝潜在栖息地分布和日活动节律,本研究结合资源调查和红

外相机监测结果,利用 MaxEnt 模型分析了马麝适宜栖息地分布,并预测了未来不同气候变化情境下其适生区的变化趋势,同时分析了区域内马麝日活动节律。本研究有助于加深我们对雅鲁藏布江流域马麝的了解,并为未来马麝的保护和栖息地恢复提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区域

雅鲁藏布江发源于青藏高原西南部的喜马拉雅山脉北麓,其流域介于东经 82°00' ~ 97°07'和北纬 28°00' ~ 31°16'之间,流域面积 50 余万 km²,东西向最大长度约为 1 500 km,南北向最大宽度约为 290 km,平均宽度约为 166 km。东北部以冈底斯、念青唐古拉、倾多拉诸山脉与藏北内流水系区及怒江上游的高原峡谷过渡区相连;东边以伯舒拉岭与怒江相邻;西南与尼泊尔接壤,南面与我国藏南诸河分界。流域呈东南向狭长柳叶状,行政区划涉及我国西藏阿里、日喀则、山南、拉萨、那曲、林芝和昌都七地(余国安等 2012)。除上述地区之外,周边区域也在调查范围内(图 1)。流域内地形复杂,空间分布不均匀,海拔自东部的 7 000 m 下降到 200 m 左右;气温及降水随海拔相应变化。地区间年降水量差距大,上游地区气候寒冷,年降水量不足 300 mm;中游属于温带大陆性气候,年降水量超 600 mm;下游属于亚热带气候,温暖湿润,年降水量超过 2 000 mm(Yang et al. 2011)。复杂的气候条件使其生境更加多样,支持诸如高山植被、草甸、灌丛、针叶林和阔叶林等多种植被类型的存在(Cui et al. 2022)。

1.2 方法

1.2.1 数据来源 马麝的分布点位来自 2023 年 1 月至 2023 年 12 月期间红外相机的监测结果以及 2023 年 4 月至 12 月进行的 3 次野外调查。调查共布设调查样线 30 条,累计完成调查样线总长度 3 000 km,完成红外相机布设 350 台,回收 170 台。调查样线涉及日喀则市、林

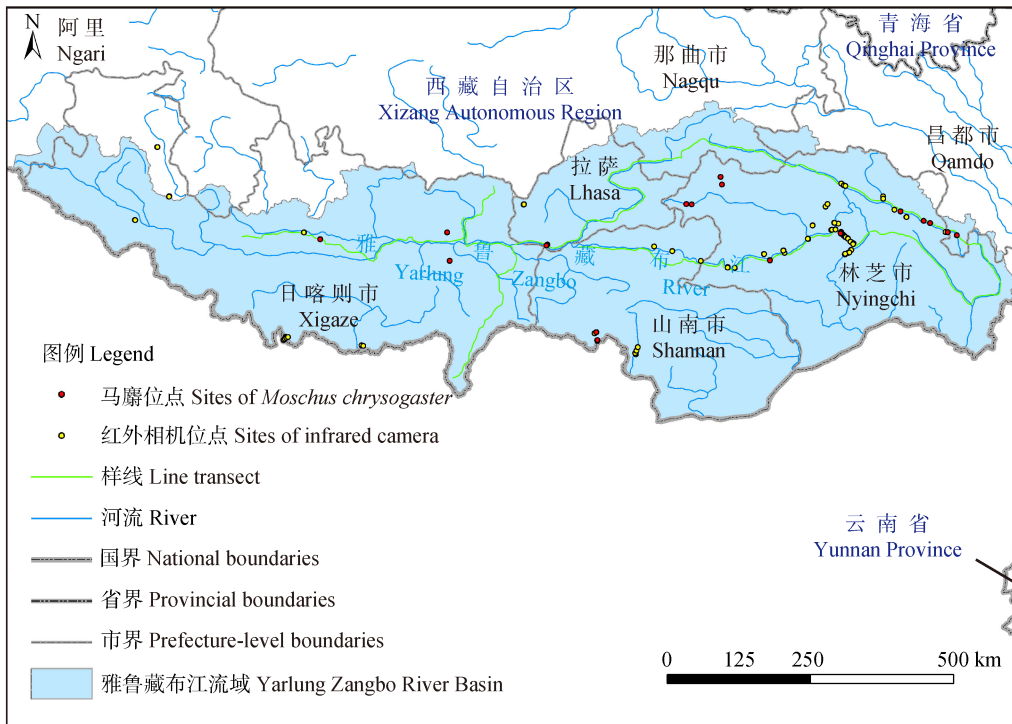


图 1 雅鲁藏布江流域马麝发现点

Fig. 1 Locations of *Moschus chrysogaster* in the Yarlung Zangbo River Basin

审图号：藏 S (2026) 005 号。Approval number: Zang S(2026)005.

芝市、山南市、那曲市和昌都市的 25 个县域，通过目击活体，结合足迹或粪便等活动痕迹判断马麝的分布位置。红外相机的布设涉及日喀则市、林芝市、山南市、那曲市和昌都市下的 20 个县域。安放时主要选取兽径、野生动物活动痕迹明显处以及野生动物出现可能性大的山脊、垭口和水源地，将红外相机固定于距离地面约 0.4~0.8 m 的树干或岩石，避免镜头被阳光直射，并清除掉相机镜头前的杂草和灌木，保证相机正常工作 (Pei 1995)。统一设置为连续拍摄 3 张照片和一段视频 (10 s)，中度灵敏度，采用 24 h 监测。安装时记录相应相机设备编号、布设时间、地理位置以及周围生境等信息。对于同一相机拍摄的同一种连续照片或视频，若拍摄间隔小于 30 min 记录的多张 (段) 马麝照片或视频，仅保留一张 (段) 照片或视频作为独立有效照片。为减少分布点之间空间自相关的影响，导致预测栖息地面积偏大，

通过 ENMtools (Version 3.3) 软件自动匹配环境因子栅格大小，删除同一栅格内的多余数据 (Warren et al. 2010)，最终共得到 51 个有效分布位点数据，用于 MaxEnt 模型的构建 (图 1)。

1.2.2 环境因子 选取气候变量和地形变量作为 MaxEnt 模型的输入：其中，地形变量包括海拔、坡度和坡向，气候变量包含当前以及未来的 19 个生物气候因子。高程数据及气候数据均下载自世界气候数据库 (WorldClim, <http://www.worldclim.org>)，空间分辨率为 30"。未来 2041—2060 年 (2050 年代) 的气候数据为通用第二代地球系统模型 (CMCC-ESM2, <http://www.worldclim.org>) 中不同碳排放情景 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 与 SSP5-8.5，分别代表温室气体排放处于低度、中度、较高和高度浓度的模拟。使用 ArcGIS 10.8 软件按照雅鲁藏布江流域的矢量地图对 22 个环境因子进行掩膜提取，以世界气候生物变量数据的

坐标和栅格大小为依据，将环境因子地理坐标系统一设置为 GCS_WGS_1984，通过 *converse* 工具将提取后的生物气候因子转换为 ASCII 格式进行保存（杨梦蝶等 2025）。

为降低生物气候数据之间存在相关性导致模型过度拟合，利用上述环境因子运行 MaxEnt 初始模型时，首先将马麝 51 个分布位点和 22 个环境因子加载到模型中，在 ArcGIS 软件中对所有因子进行皮尔逊相关系数（Pearson correlation coefficient, PCC）分析，并在 MaxEnt 3.4.4 软件中检验各因子的相对贡献值。排除环境因子间 PCC 绝对值 $|r| \geq 0.8$ 的因子后，优先选择保留初始模型构建中贡献率和置换重要值大的因子参与模型预测。最终筛选出 9 个主要环境因子用于评价马麝的潜在栖息地适宜性，分别为等温性（Bio3）、温度季节性（Bio4）、最干季度均温（Bio9）、最湿月份降水（Bio13）、降水季节性（Bio15）、最冷季度降水（Bio19）、海拔（Elevation）、坡度（Slope）和坡向（Aspect）（表 1）。

表 1 用于构建 MaxEnt 模型的环境变量

Table 1 Environment variables used to build MaxEnt model

变量 Variable	描述 Description
Bio3	等温性 Isothermality
Bio4	温度季节性 Temperature seasonality (standard deviation \times 100)
Bio9	最干季度均温 Mean temperature of driest quarter ($^{\circ}\text{C}$)
Bio13	最湿月份降水 Precipitation of wettest month (mm)
Bio15	降水季节性 Precipitation seasonality (mm)
Bio19	最冷季度降水 Precipitation of coldest quarter (mm)
Elevation	海拔 Elevation (m)
Slope	坡度 Slope ($^{\circ}$)
Aspect	坡向 Aspect ($^{\circ}$)

1.3 MaxEnt 模型建立与精度评价

将筛选后的马麝分布位点和环境因子加载到 MaxEnt 模型中，设置相关参数并运行，采用刀切法（Jackknife）检验环境因子对模型的贡献率，分布预测的输出格式选择为 logistic，随机选择 75% 分布点为训练集对模型进行校准

训练，25% 的分布点为测试集用于模型的验证，选用自举法（Bootstrap）重复运行 10 次，最大迭代次数设置为 1 000（杨梦蝶等 2025）。模型结果的精度运用受试者工作特征曲线（receiver operating characteristic curve, ROC）下的面积（area under curve, AUC）进行评价，AUC 不低于 0.9 时，表示预测结果很好，介于 0.8 与 0.9 之间时，表示预测结果较好；介于 0.7 与 0.8 之间时，表示预测结果一般；小于 0.7 时，表示预测结果较差（Ren et al. 2020）。

1.4 ArcGIS 中马麝适生区等级划分

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物种存在概率。一般情况下某环境因子对应的存在概率大于 0.5 时，认为该范围内的环境因子适合该物种生存（Elith et al. 2011）。将模型的输出结果导入 ArcGIS 10.8 软件中进行重分类，采用自然断点法（natural breaks）对马麝适生区进行划分，将其划分为：高适生区（0.50, 1.00]、中适生区（0.32, 0.50]、低适生区（0.14, 0.32] 和非适生区（0.00, 0.14] 四个等级（Chun et al. 2016, Javidan et al. 2021）。

1.5 活动节律

基于红外相机收集的 131 张独立有效照片分析马麝的活动节律。考虑到雅鲁藏布江流域东西跨度较大，为减少不同月份日出和日落时间差异对活动节律分析带来的影响，根据不同红外相机位点的经纬度和拍摄日期，将每天的日出和日落时间标准化为 06:00 时和 18:00 时。随后，根据每次拍摄的时钟时间（clock time）在一天 24 h 中的相对位置，将其转换为相应的太阳时间（sun time），以便更准确地评估马麝的活动节律（Nouvellet et al. 2012）。上述过程通过 R 程序包“overlap”中的“sunTime”函数实现（Ridout and Linkie 2009）。利用核密度估算法（kernel density estimation, KDE）评估马麝的日活动节律，该方法是将红外相机拍摄的照片以 24 h 为周期循环取样，被取样的概率取决于拍摄物种在该时段的活动强度，从而反

映物种活动节律模式。节律的计算通过 R 程序包“activity”中的“fitact”函数实现，并设置 10 000 次重复取样以获取 95%置信区间 (Rowcliffe et al. 2014)。最终绘制马麝的日活动节律曲线。

2 结果

2.1 MaxEnt 模型预测结果的表现评估

MaxEnt 模型的结果显示(图 2),模型 ROC 曲线重复运算 10 次后的平均训练集 AUC 值为 0.926, 标准差为 0.033, 说明预测结果的精度高、非常稳定, 预测准确, 可以用于雅鲁藏布江流域马麝栖息地适宜性评价。

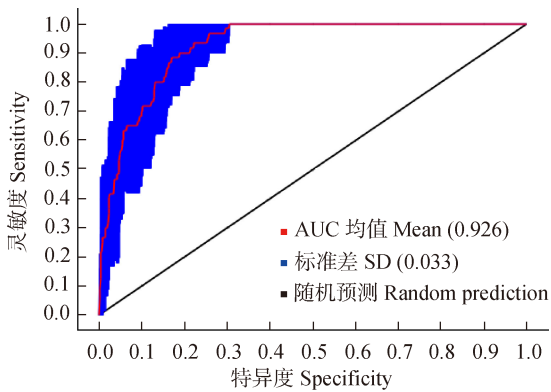


图 2 MaxEnt 模型预测雅鲁藏布江流域马麝分布的受试者工作特征曲线 (ROC)

Fig. 2 Receiver operating characteristic curve (ROC) of *Moschus chrysogaster* distribution in the Yarlung Zangbo River Basin predicted by the MaxEnt model

2.2 环境因子对马麝栖息地的影响

依据环境因子对模型的贡献率和置换重要性 (表 2), 贡献率最大的是最冷季度降水 (58.3%), 其次为坡向 (13.2%)、最湿月份降水 (8.5%)、降水季节性 (5.1%)、坡度 (5.0%)、等温性 (4.8%)、温度季节性 (3.2%)、最干季度均温 (1.9%) 及海拔 (0.1%); 置换重要性最高的环境变量为最冷季度降水 (35.6%), 其次为最湿月份降水 (25.8%)、坡向 (19.6%) 和温度季节性 (5.1%)。刀切法结果显示(图 3),

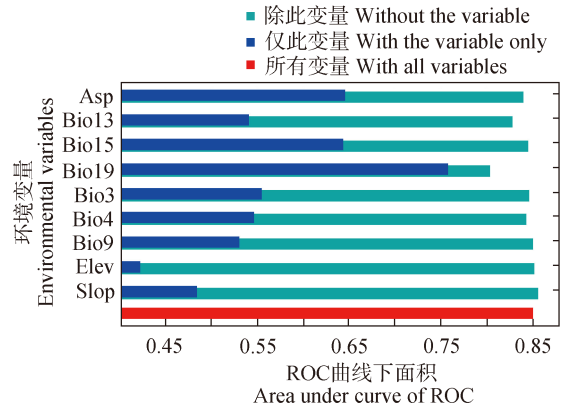


图 3 主要环境变量的刀切法测试

Fig. 3 Major environmental variables evaluated by Jackknife testing

Asp. 坡向; Bio13. 最湿月份降水; Bio15. 降水季节性; Bio19. 最冷季度降水; Bio3. 等温性; Bio4. 温度季节性; Bio9. 最干季度均温; Elev. 海拔; Slop. 坡度

Asp. Aspect; Bio13. Precipitation of wettest month; Bio15. Precipitation seasonality; Bio19. Precipitation of coldest quarter; Bio3. Isothermality; Bio4. Temperature seasonality; Bio9. Mean temperature of driest quarter; Elev. Elevation; Slop. Slope

表 2 主要环境变量的贡献率和置换重要性

Table 2 Contribution rates and permutation importance of major environmental variables

环境变量 Environmental variable	贡献率 (%) Contribution rate	置换重要性 (%) Permutation importance
最冷季度降水 Precipitation of coldest quarter	58.3	35.6
坡向 Aspect	13.2	19.6
最湿月份降水 Precipitation of wettest month	8.5	25.8
降水季节性 Precipitation seasonality	5.1	3.1
坡度 Slope	5.0	4.8
等温性 Isothermality	4.8	2.3
温度季节性 Temperature seasonality	3.2	5.1
最干季度均温 Mean temperature of driest quarter	1.9	3.7
海拔 Elevation	0.1	0.0

使用单环境因子变量建模时, 最冷季度降水、降水季节性以及坡向对模型的增益效果显著, 最湿月份降水、等温性、温度季节性以及最干

季度均温对模型的增益效果一般，海拔和坡度的增益效果最小。此外，对模型增益效果显著的三个变量中，影响最大的是最冷季度降水，表明最冷季度降水这一环境因子包含马麝潜在栖息地所需的重要信息。结合多种评价方法结果，最冷季度降水以及坡向是影响雅鲁藏布江流域马麝分布的关键环境因子。

2.3 环境因子的响应曲线分析

根据模型得到的单一环境因子响应曲线，马麝的存在概率随着最冷季度降水的增加而减小，当最冷季度降水超过 21.57 mm 后，其存在概率低于 0.5；随着坡向的增加而增加，当坡向超过 92.85°时，其存在概率超过 0.5（图 4）。

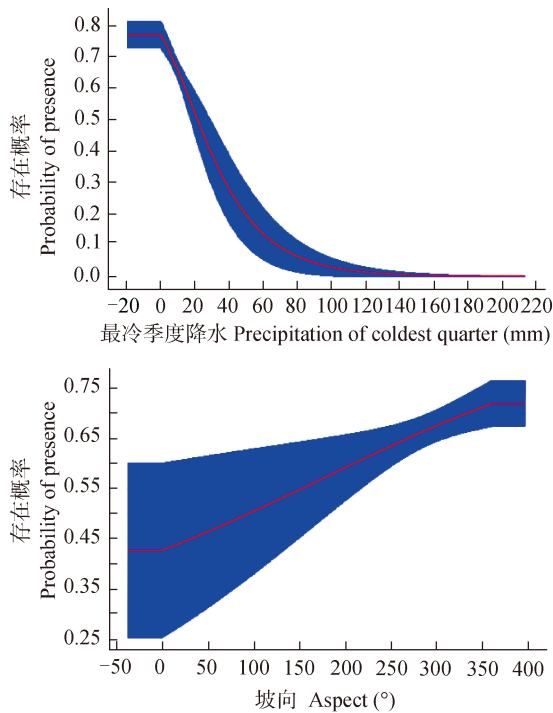


图 4 马麝分布概率对主要环境变量的影响曲线

Fig. 4 Response curves of *Moschus chrysogaster* distribution probability to environmental variables

2.4 雅鲁藏布江流域马麝适宜栖息地分布的预测结果

MaxEnt 模型输出的统计结果显示（图 5），当前气候情境下（图 6a），马麝在雅鲁藏布江

流域的适宜栖息地面积为 337 436.94 km²，占雅鲁藏布江流域面积的 67.29%。其中，高适宜栖息地面积为 88 495.28 km²，占比 17.65%；中度适宜栖息地面积为 122 017.26 km²，占比 24.33%；低度适宜栖息地面积为 126 924.39 km²，占比 25.31%。

马麝在雅鲁藏布江流域的适宜栖息地主要集中在雅鲁藏布江主干流及其支流，向周围呈辐射状分布。地域分布上，日喀则市主要在东部，包括康马县、白朗县、仁布县以及江孜县；在拉萨市的雅鲁藏布江流域均为适宜栖息地；山南市仅西北区域没有适宜栖息地的分布；林芝市的适宜栖息地主要集中在西北区域，并以雅鲁藏布江为中心向四周扩散分布；那曲市和昌都市雅鲁藏布江流域的适宜栖息地面积较小，并且均为中适生区和低适生区。马麝在雅鲁藏布江流域的高适生区在日喀则市东部呈现大面积连续分布；在拉萨市南部分布较集中且连续，东北部则主要沿着拉萨河向四周扩散分布，包括的县域有尼木县、曲水县、贡嘎县、林周县、当雄县和墨竹工卡县；在山南市北部分布于雅鲁藏布江主干流和支流流经的扎囊县、贡嘎县、洛扎县、琼结县以及曲松县等区域，以及南部西巴霞曲在山南市中部的支流流域，如隆子县；在林芝市西部分布于工布江达县以及朗县的小部分区域。

通过 MaxEnt 模型预测未来 2050 年代 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 与 SSP5-8.5（温室气体排放处于低度、中度、较高和高度浓度）气候情境下马麝适宜栖息地分布（图 6b~e）。将未来 2050 年代 SSP1-2.6（温室气体排放处于低度）气候情境下与当前气候条件相比，马麝在雅鲁藏布江河流周围的高适生区增加了 5 896.6 km²（与当前气候相比增加 6.66%），主要体现在高适生区的分布均向四周有所扩散，较为明显的是拉萨市的分布更加连续成面。而中适生区和低适生区的面积分别减少了 12 315.99 km²（10.09%）和 18 313.45 km²（14.43%），主要表现为山南市南部的中适生

区和低适生区向北缩减，林芝市东部的中适生区和低适生区分布向西部集中缩减。相比当前气候，未来 2050 年代 SSP2-4.5（温室气体排放处于中度）和 SSP5-8.5（温室气体排放处于高度浓度）气候情境下适生区的分布类似，并且高适生区和中适生区面积均有所减少。SSP2-4.5 气候情境下高适生区面积下降幅度较小，为 4 481.66 km²（5.06%），SSP5-8.5 气候情境下高适生区面积减少 24 790.31 km²（28.01%）。两种气候情境下中适生区和低适生区面积减少的幅度接近，SSP2-4.5 气候情境下中适生区减少 14 408.09 km²（11.81%），低适生区减少 3 770.36 km²（2.97%）；SSP5-8.5 气候情境下中适生区减少 16 308.28 km²（13.37%），低适生区减少 12 444.09 km²（9.79%）。两种气候情境下高适生区分布都集中在日喀则市东部，并且在此区域有连续大面积分布，在拉萨市、山南市和林芝市的高适生区分布与当前气候情境下相似，但均向雅鲁藏布江河流集中，分布面积减少。SSP2-4.5 气候情境下中适生区和低适生区的分布与 SSP1-2.6 气候情境下相似，均表现在林芝市和山南市的分布缩减；相比之下，SSP5-8.5 气候情境下中

适生区和低适生区在林芝市的分布进一步缩减，仅保留西部的适生区分布，北部中、低适生区分布狭小。在 SSP3-7.0 气候情境下，适生区的分布与当前气候情境下相似，但面积有所减少，高适生区面积减少 10 787.79 km²（12.19%），中适生区面积减少 15 409.89 km²（12.63%），低适生区面积减少 21 209.92 km²（16.71%）。高适生区面积在分布上更加分散，日喀则市东部和拉萨市南部的高适生区不连续，呈现零散块状分布，山南市和林芝市的高适生区更加向雅鲁藏布江河谷区域集中，并且在林芝市呈现碎片化的零散分布。中适生区和低适生区面积缩减较为明显的区域分布在山南市南部和林芝市北部与东部，特别是林芝市的中适生区与低适生区主要以高适生区分布为中心向周围扩散，并且面积较小。

2.5 马麝的活动节律

2023 年 1 月至 2023 年 12 月期间，在研究区域内通过红外相机共获得马麝有效照片 1 508 张，独立事件 244 次。马麝的日活动节律呈双峰型，上午的活动高峰在 06:00~09:00 时，活动的最高峰出现在 08:00 时左右。在 09:00 时之后进入活动低谷，持续到 15:00 时。下午

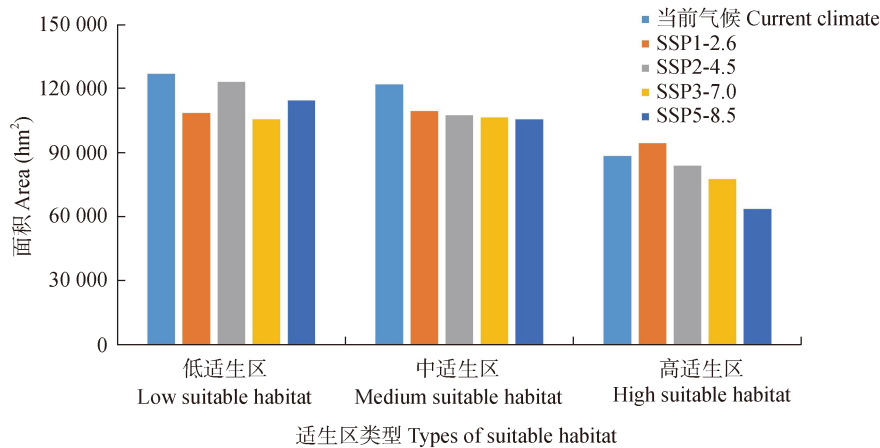


图 5 不同气候情景下马麝在雅鲁藏布江流域适生区面积

Fig. 5 Suitable distribution area of *Moschus chrysogaster* in Yarlung Zangbo River Basin under different climatic scenarios

SSP1-2.6. 可持续发展路径；SSP2-4.5. 中间路径；SSP3-7.0. 区域竞争路径；SSP5-8.5. 化石燃料发展路径。

SSP1-2.6. Sustainability; SSP2-4.5. Middle of the road; SSP3-7.0. Regional rivalry; SSP5-8.5. Fossil-fueled development.

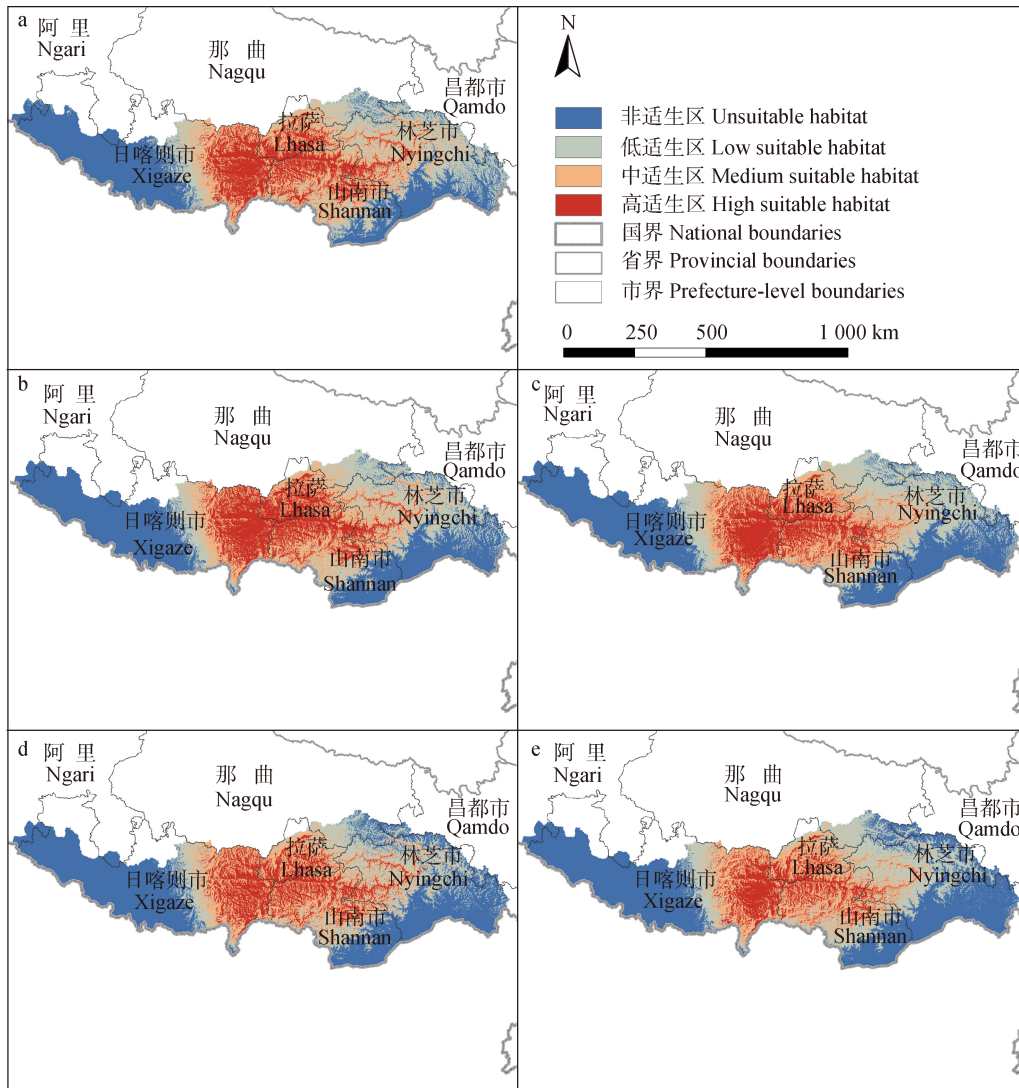


图 6 雅鲁藏布江流域马麝在当前及未来气候适生区分布预测图

Fig. 6 Distribution of the suitable area of *Moschus chrysogaster* in Yarlung Zangbo River Basin under current and future climatic scenarios

a. 当前气候条件; b. 2050 年代 SSP1-2.6 排放情景; c. 2050 年代 SSP2-4.5 排放情景; d. 2050 年代 SSP3-7.0 排放情景; e. 2050 年代 SSP5-8.5 排放情景。审图号: 藏 S (2026) 005 号。

a. Current climatic conditions; b. 2050s SSP1-2.6 scenario; c. 2050s SSP2-4.5 scenario; d. 2050s SSP3-7.0 scenario; e. 2050s SSP5-8.5 scenario. Approval number: Zang S(2026)005.

的活动高峰在 17:00 ~ 20:00 时, 活动最高峰在 18:00 时, 活动高峰过后其活动频次快速下降, 在 21:00 时到达活动低谷。到次日的 02:00 ~ 04:00 时出现活动最低谷, 其活动频次在 04:00 时达到最低 (图 7)。

3 讨论

栖息地选择是野生动物对其栖息地环境做出的一系列适应性行为。影响物种栖息地选择的因子众多, 主要包括物种本身生态学特征、

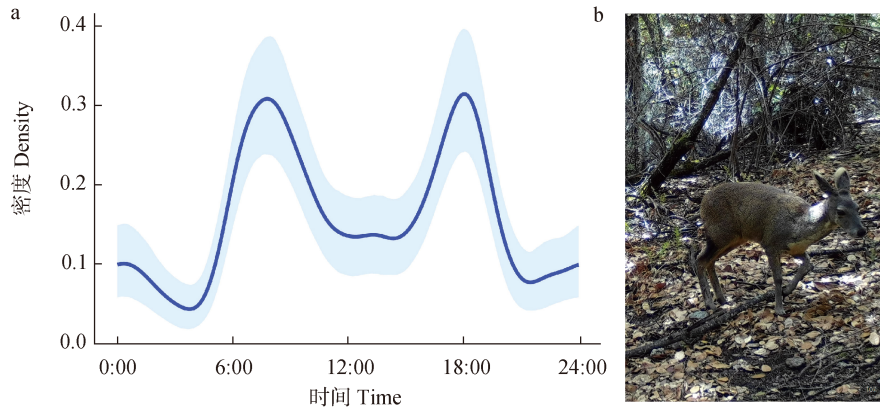


图 7 马麝的日活动节律

Fig. 7 Daily activity rhythms of *Moschus chrysogaster*

a. 马麝的日活动节律，其中，蓝线为活动节律曲线，浅蓝色区域为迭代采样结果的 95%置信区间；b. 马麝照片。

a. Daily activity rhythms of *Moschus chrysogaster*. The blue line represents the activity rhythm curve; the light blue area indicates the 95% confidence interval of the iterative sampling results; b. Picture of *Moschus chrysogaster*.

地形地势、气候以及植被组成特征等（魏辅文等 1998）。这些因子相互作用，共同决定着物种对于栖息地的选择。本研究筛选最干季度均温、最湿月份降水、等温性、温度季节性、降水季节性、最冷季度降水、海拔、坡度与坡向 9 个环境因子用于构建 MaxEnt 模型，以分析这些环境因子对雅鲁藏布江流域马麝栖息地选择的影响。马麝是典型的山地有蹄类物种，对食物的要求较高，喜食植物的幼嫩枝叶。本研究筛选得出的环境因子中影响最大的是最冷季度降水，其贡献率为 58.3%。在雅鲁藏布江流域适宜栖息地分布区的最冷季度降水超过 21.57 mm 后，区域内马麝存在的概率小于 0.5。这一环境因子可能与马麝冬季的觅食有关，雅鲁藏布江流域位于青藏高原，冬季气温低，降水多以降雪的形式存在，降雪带来的地面积雪导致地表植物可获得性降低，影响冬季野生有蹄类的食物获取（葛志勇 2012）。坡向也是影响马麝栖息地选择的重要因子，本研究结果显示，当坡向超过 92.85° 时其存在概率超过 0.5，即当坡向小于 92.85°（阴坡）时马麝出现的概率小，而当坡向大于 92.85°，处在接近半阳坡时马麝的

出现大概率增加，说明马麝不倾向于选择阴坡，而是更加偏好接近阳坡的半阳坡，这与王功等（2023）对兴隆山和孙嘉等（2020）对贺兰山马麝冬季栖息地选择的研究结果相似。半阳坡因位于背风向阳的一侧，接受的太阳辐射能多于阴坡，环境气候条件相对温和，积雪较少，食物的丰富度以及可获得性优于阴坡。此外，青藏高原海拔较高，阳光辐射较强，而半阳坡的日照强度低于阳坡，蒸发量较少，热量适中，这既有利于马麝保持体温，也有利于植物生长，从而为马麝提供更多的食物资源。孙嘉等（2020）的研究指出，马麝是喜冷避热的动物，自身代谢产热较高且保温性强。在冬季，阳坡会吸引大量捕食者觅食，同时存在与其他植食性动物之间的竞争，因此马麝会倾向于避开选择阳坡，而选择温度适中、捕食风险较低、竞争较弱的半阳坡。Jiang 等（2025）对中国西部马麝生境适宜性的研究发现，海拔、年平均温度和年温差是影响马麝适宜性分布的主要环境因子，适宜生境集中在海拔 3 000 ~ 5 000 m、年平均温度 0 ~ 5 °C、年温差 30 ~ 40 °C 的区域。这与本研究的结果有所不同，可能是因为两个

研究的样点分布以及研究区域存在一定差异。本研究更集中在雅鲁藏布江流域,这增加了我们对雅鲁藏布江这一特殊区域马麝适宜栖息地环境的了解,为包括马麝在内的濒危物种栖息地环境保护提供了科学依据。

本研究基于雅鲁藏布江流域的资源调查和红外相机监测所获得的马麝分布位点,利用 MaxEnt 模型有效预测了马麝的适宜生境分布。结果显示,雅鲁藏布江流域马麝的适宜栖息地面积较大,占流域面积的 67.29%。其中低适生区分布最广,高适生区相对较少,主要集中在日喀则市东部、拉萨市、山南市大部分区域和林芝市北部。在未来不同的气候情景(SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 与 SSP5-8.5)下,马麝的适生区面积和分布范围将发生显著变化,整体呈缩减趋势。但在 SSP1-2.6 气候情境下,高适生区面积略有增加,可能是因为该气候条件下较适宜的降水和温度条件促进了植物的生长,从而为马麝提供了充足的食物资源,可促进其生存。总的来说,未来气候变化下,雅鲁藏布江流域马麝的适生区面积减少,且高适生区分布呈现出更加零散并且更加向雅鲁藏布江主流以及支流区域集中,一方面可能由于全球气候变暖的影响,导致马麝在雅鲁藏布江流域的分布范围减小,只能更加集中在河流周围;另一方面,人类活动的影响可能使一些原本破碎化的高适生区退化为低适生区或中适生区,进一步减少了适生区面积与分布。这与前人的研究结果一致,即在全球气候变暖的背景下,物种的适生区分布会减少,导致物种逐渐向残存的适宜栖息地迁移,使得未来气候条件下物种的适生区分布更加集中并呈现空间变化(Fang et al. 2018)。

马麝的日活动节律呈现明显的双峰型,活动主要出现在日出后和日落后。这与大部分有蹄类的日活动节律研究结果一致。大多数有蹄类物种活动节律具有晨昏性,如熊子翔等(2024)利用红外相机监测数据发现安徽麝(*M. anhuiensis*)在一天中出现两个活动高峰,分别

是 10:00 时和 22:00 时。本研究发现,马麝的活动在每天清晨(06:00~09:00 时)以及傍晚(17:00~20:00 时)达到高峰,清晨的活动高峰过后,马麝的活动频次快速下降,进入明显的低谷期,这与大多数有蹄类的日活动节律分布类似,章书声等(2012)对黑麝(*Muntiacus crinifrons*)的日活动节律研究发现,其高峰出现在早上(06:00~08:00 时)和傍晚(18:00~20:00 时)。李冬森(2022)对海南麝(*M. nigripes*)活动节律的研究发现,海南麝在中午期间也会有一段活动低谷期,并认为这可能与躲避高温以及消化上午的食物有关。雅鲁藏布江流域昼夜温差大,对于食草动物而言,清晨植物富含露水,在觅食的过程中补充水分,可减少去水源地饮水被捕食的风险(章书声等 2012)。傍晚的活动最高峰主要出现在 18:00 时左右,这是马麝对早晨觅食活动的补偿,通过傍晚的觅食储备夜间所需要的能量。而早晨的活动低谷则可能是对夜间活动的恢复,恢复体力的同时消化夜间觅食所得的食物。

本研究揭示了影响马麝在雅鲁藏布江流域分布的主要环境因子为最冷季度降水和坡向。这两个因子主要通过决定栖息地内植被的类型与分布,进而影响马麝食物的丰富度和可获得性,从而对其分布产生重要影响。同时,本研究利用 MaxEnt 模型预测了该地区当前气候条件下以及未来不同气候情景下马麝的适宜栖息地分布。结果表明,受全球气候变暖以及人类活动加剧的影响,马麝在雅鲁藏布江流域的分布面积可能呈现一定程度的减少,高适生区分布趋于更加集中。马麝的日活动节律呈现明显的晨昏型活动模式。雅鲁藏布江流域是马麝重要的栖息地,同时由于青藏高原独特的地理环境,使其对全球气候变化以及人类活动更加敏感。麝科动物是对生境依赖性最强的有蹄类动物之一,其生存与栖息地质量息息相关。在雅鲁藏布江流域未来的野生动物保护与管理工作中,应重点关注马麝适宜栖息地的连续性保护,增加高适生区斑块之间的连通性,同时提高中、

低适生区的适宜性, 促使其变为高适生区。

致谢 本研究得到了西藏自治区林业和草原局及下辖各地市林业和草原局、自然保护区的大力支持, 提供了资源、设备及样地信息, 协助完成数据采集和红外相机布设。感谢西藏各地市工作人员克服困难, 保障项目顺利进行。感谢所有支持者为西藏野生动物保护和生态研究所做出的贡献。

参 考 文 献

- Allnutt T F, Wettengel W W, Reyna J V, et al. 2002. The efficacy of TM satellite imagery for rapid assessment of Chihuahuan xeric habitat intactness for ecoregion-scale conservation planning. *Journal of Arid Environments*, 52(1): 135–153.
- Chun Y W, Koo H, Griffith D A. 2016. A comparison of optimal map classification methods incorporating uncertainty information // Bailly J S, Griffith D A, Josselin D. *Proceedings of the Spatial Accuracy*. Montpellier, France: 177–181.
- Cody M L. 1978. Habitat selection and interspecific territoriality among the sylviid warblers of England and Sweden. *Ecological Monographs*, 48(4): 351–396.
- Cui L Z, Pang B, Zhao G, et al. 2022. Assessing the sensitivity of vegetation cover to climate change in the Yarlung Zangbo River Basin using machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 14(7): 1556.
- Elith J, Phillips S J, Hastie T, et al. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1): 43–57.
- Fang J Y, Zhu J L, Shi Y. 2018. The responses of ecosystems to global warming. *Chinese Science Bulletin*, 63(2): 136–140.
- Fretwell S D, Calver J S. 1969. On territorial behavior and other factors influencing habitat distribution in birds: II. Sex ratio variation in the Dickcissel (*Spiza americana* Gmel). *Acta Biotheoretica*, 19(1): 37–44.
- Guisan A, Zimmermann N E. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2/3): 147–186.
- Halle S. 2000. Ecological relevance of daily activity patterns // Halle S, Stenseth N C. *Activity Patterns in Small Mammals: An Ecological Approach*. Berlin, Heidelberg: Springer: 67–90.
- Javidan N, Kaviani A, Pourghasemi H R, et al. 2021. Evaluation of multi-hazard map produced using MaxEnt machine learning technique. *Scientific Reports*, 11: 6496.
- Jiang F, Song P F, Zhang J J, et al. 2025. Assessment approach for conservation effectiveness and gaps for endangered species based on habitat suitability: a case study of alpine musk deer in western China. *Ecological Indicators*, 170: 113080.
- Liu J J, Wilson M, Hu G, et al. 2018. How does habitat fragmentation affect the biodiversity and ecosystem functioning relationship? *Landscape Ecology*, 33(3): 341–352.
- Marinho P H, Fonseca C R, Sarmiento P, et al. 2020. Temporal niche overlap among mesocarnivores in a Caatinga dry forest. *European Journal of Wildlife Research*, 66(2): 34.
- Merow C, Smith M J, Silander J A Jr. 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10): 1058–1069.
- Morales N S, Fernández I C, Baca-González V. 2017. MaxEnt's parameter configuration and small samples: are we paying attention to recommendations? A systematic review. *PeerJ*, 5: e3093.
- Nouvellet P, Rasmussen G S A, MacDonald D W, et al. 2012. Noisy clocks and silent sunrises: measurement methods of daily activity pattern. *Journal of Zoology*, 286(3): 179–184.
- Pei K J. 1995. Activity rhythm of the spinous country rat (*Niviventer coxingi*) in Taiwan. *Zoological Studies*, 34(1): 55–58.
- Ren Q, Wu D T, Wu C P, et al. 2020. Modeling the potential distribution of *Machilus thunbergii* under the climate change patterns in China. *Open Journal of Forestry*, 10(2): 217–231.
- Ridout M S, Linkie M. 2009. Estimating overlap of daily activity patterns from camera trap data. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 14(3): 322–337.
- Rowcliffe J M, Kays R, Kranstauber B, et al. 2014. Quantifying levels of animal activity using camera trap data. *Methods in Ecology and Evolution*, 5(11): 1170–1179.
- Wang T X, Zhang Z Y, Liu L, et al. 2021. Simulation of the potential distribution of the glacier based on maximum entropy model in the Tianshan Mountains, China. *Water*, 13(11): 1541.
- Warren D L, Glor R E, Turelli M. 2010. ENMTools: a toolbox for comparative studies of environmental niche models. *Ecography*,

- 33(3): 607–611.
- Xu W B, Svenning J C, Chen G K, et al. 2019. Human activities have opposing effects on distributions of narrow-ranged and widespread plant species in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(52): 26674–26681.
- Yang K, Ye B, Zhou D, et al. 2011. Response of hydrological cycle to recent climate changes in the Tibetan Plateau. *Climatic Change*, 109(3): 517–534.
- 丁彦珂, 姚志诚, 赵唱, 等. 2023. 贺兰山马麝 (*Moschus chrysogaster*) 生境适宜性评价. *生态学报*, 43(8): 3150–3156. [Ding Y K, Yao Z C, Zhao C, et al. 2023. Habitat suitability assessment of *Moschus chrysogaster* in Helan Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 43(8): 3150–3156.]
- 高浩翔, 申立泉, 刘瑞, 等. 2023a. 甘肃兴隆山国家级自然保护区马麝夏季种群分布与生境适宜性的关系. *野生动物学报*, 44(2): 284–289. [Gao H X, Shen L Q, Liu R, et al. 2023a. Population dynamics of Alpine musk deer in Xinglongshan national nature reserve and the relationships to the summer habitat suitability. *Chinese Journal of Wildlife*, 44(2): 284–289.]
- 高浩翔, 申立泉, 刘瑞, 等. 2023b. 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*, 43(1): 441–448. [Gao H X, Shen L Q, Liu R, et al. 2023b. Summer habitat suitability of wild Alpine musk deer based on MaxEnt model. *Acta Ecologica Sinica*, 43(1): 441–448.]
- 葛志勇. 2012. 黄泥河自然保护区有蹄类动物冬季栖息地选择. 长春: 吉林农业大学硕士学位论文. [Ge Z Y. 2012. Winter habitat selection by ungulates in Huangnihe nature reserve. Changchun: Jilin Agricultural University, Master's dissertation.]
- 蒋志刚, 李立立, 胡一鸣, 等. 2018. 青藏高原有蹄类动物多样性和特有性: 演化与保护. *生物多样性*, 26(2): 158–170. [Jiang Z G, Li L L, Hu Y M, et al. 2018. Diversity and endemism of ungulates on the Qinghai-Tibetan Plateau: Evolution and conservation. *Biodiversity Science*, 26(2): 158–170.]
- 蒋志刚, 马克平. 2009. 保护生物学的现状、挑战和对策. *生物多样性*, 17(2): 107–116. [Jiang Z G, Ma K P. 2009. Status quo, challenges and strategy in Conservation Biology. *Biodiversity Science*, 17(2): 107–116.]
- 李冬森. 2022. 海南尖峰岭林区哺乳动物空间分布格局和活动节律研究. 汉中: 陕西理工大学硕士学位论文. [Li D S. 2022. Spatial distribution pattern and activity rhythm of mammals in Jianfengling forest area, Hainan. Hanzhong: Shaanxi University of Technology, Master's dissertation.]
- 林宏东, 郑启泽, 申立泉, 等. 2024. 基于MaxEnt模型的兴隆山保护区野生马麝秋季生境适宜性评价. *生态学杂志*, 43(1): 299–304. [Lin H D, Zheng Q Z, Shen L Q, et al. 2024. Assessment of habitat suitability in autumn for wild Alpine musk deer in Xinglongshan National Nature Reserve with MaxEnt model. *Chinese Journal of Ecology*, 43(1): 299–304.]
- 孟秀祥, 潘世秀, 栾晓峰, 等. 2010. 兴隆山自然保护区马麝春季生境选择. *生态学报*, 30(20): 5509–5517. [Meng X X, Pan S X, Luan X F, et al. 2010. Spring habitat selection by Alpine musk deer (*Moschus sifanicus*) in Xinglongshan National Nature Reserve, Western China. *Acta Ecologica Sinica*, 30(20): 5509–5517.]
- 钱天陆, 秦淑洁, 吴朝宁, 等. 2022. 基于MaxEnt模型的人类干扰对滇金丝猴潜在分布的影响. *兽类学报*, 42(4): 349–361. [Qian T L, Qin S J, Wu Z N, et al. 2022. Impacts of human interference on the potential distribution of Yunnan snub-nosed monkeys by MaxEnt model. *Acta Theriologica Sinica*, 42(4): 349–361.]
- 乔慧捷, 胡军华, 黄继红. 2013. 生态位模型的理论基础、发展方向与挑战. *中国科学: 生命科学*, 43(11): 915–927. [Qiao H J, Hu J H, Huang J H. 2013. Theoretical basis, future directions, and challenges for ecological niche models. *Scientia Sinica: Vitae*, 43(11): 915–927.]
- 孙嘉, 赵唱, 孟德怀, 等. 2020. 贺兰山马麝冬季生境选择. *野生动物学报*, 41(3): 573–579. [Sun J, Zhao C, Meng D H, et al. 2020. Winter habitat selection of Alpine musk deer (*Moschus chrysogaster sifanicus*) in Helan Mountain. *Chinese Journal of Wildlife*, 41(3): 573–579.]
- 孙儒泳. 2001. 动物生态学原理. 3版. 北京: 北京师范大学出版社. [Sun R Y. 2001. Principles of Animal Ecology. 3rd ed. Beijing: Beijing Normal University Publishing Group.]
- 王功, 申立泉, 高浩翔, 等. 2023. 甘肃兴隆山保护区野生马麝的冬季卧息地生境特征. *动物学杂志*, 58(2): 209–217. [Wang G, Shen L Q, Gao H X, et al. 2023. Winter bed-sites utilization of wild Alpine musk deer in Xinglongshan national nature reserve, Gansu Province. *Chinese Journal of Zoology*, 58(2): 209–217.]

- 魏辅文, 冯祚建, 王祖望. 1998. 野生动物对生境选择的研究概况. 动物学杂志, 33(4): 48–52. [Wei F W, Feng Z J, Wang Z W. 1998. Research overview of habitat selection of wild animals. Chinese Journal of Zoology, 33(4): 48–52.]
- 魏辅文, 杨奇森, 吴毅, 等. 2025. 中国兽类名录 (2024 版). 兽类学报, 45(1): 1–16. [Wei F W, Yang Q S, Wu Y, et al. 2025. Catalogue of mammals in China (2024). Acta Theriologica Sinica, 45(1): 1–16.]
- 武正军, 李义明. 2003. 生境破碎化对动物种群存活的影响. 生态学报, 23(11): 2424–2435. [Wu Z J, Li Y M. 2003. Effects of habitat fragmentation on survival of animal populations. Acta Ecologica Sinica, 23(11): 2424–2435.]
- 熊子翔, 许晓萌, 唱意, 等. 2024. 基于红外相机监测数据分析安徽麝活动节律. 动物学杂志, 59(1): 19–28. [Xiong Z X, Xu X M, Chang Y, et al. 2024. Activity rhythm of *Moschus anhuiensis* based on camera-trapping monitoring data. Chinese Journal of Zoology, 59(1): 19–28.]
- 杨梦蝶, 邓泽帅, 曹越, 等. 2025. 基于 MaxEnt 模型的湖南省毛冠鹿潜在生境适宜性评价. 生态学杂志, 44(4): 1314–1320. [Yang M D, Deng Z S, Cao Y, et al. 2025. Assessing habitat suitability of *Elaphodus cephalophus* in Hunan Province based on MaxEnt model. Chinese Journal of Ecology, 44(4): 1314–1320.]
- 余国安, 王兆印, 刘乐, 等. 2012. 新构造运动影响下的雅鲁藏布江水系发育和河流地貌特征. 水科学进展, 23(2): 163–169. [Yu G A, Wang Z Y, Liu L, et al. 2012. Drainage network and fluvial morphology features of Yarlung Tsangpo River under the impact of neotectonic movement. Advances in Water Science, 23(2): 163–169.]
- 张同作, 江峰, 徐波, 等. 2022. 青藏高原濒危兽类保护与管理研究进展. 兽类学报, 42(5): 490–507. [Zhang T Z, Jiang F, Xu B, et al. 2022. Research advances in conservation and management of endangered mammals on the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Theriologica Sinica, 42(5): 490–507.]
- 张玉波, 杜金鸿, 李俊生, 等. 2017. 青藏高原生态系统发育与生物多样性. 科技导报, 35(12): 14–18. [Zhang Y B, Du J H, Li J S, et al. 2017. Ecosystem development and biodiversity of Tibetan Plateau. Science & Technology Review, 35(12): 14–18.]
- 张致荣. 2023. 贺兰山地区马麝种群现状及保护遗传学研究. 哈尔滨: 东北林业大学博士学位论文. [Zhang Z R. 2023. Population demography and conservation genetics of Alpine musk deer in Helan Mountains, China. Harbin: Northeast Forestry University, Doctoral dissertation.]
- 章书声, 鲍毅新, 王艳妮, 等. 2012. 基于红外相机技术的黑麝活动节律. 兽类学报, 32(4): 368–372. [Zhang S S, Bao Y X, Wang Y N, et al. 2012. Activity rhythms of black muntjac (*Muntiacus crinifrons*) revealed with infrared camera. Acta Theriologica Sinica, 32(4): 368–372.]
- 赵唱. 2018. 贺兰山马麝的营养采食策略和微生境选择及评价研究. 哈尔滨: 东北林业大学博士学位论文. [Zhao C. 2018. Nutrition diet strategy, micro-habitat selection and evaluation of Alpine musk deer (*Moschus sifanicus*) in Helan Mountains, China. Harbin: Northeast Forestry University, Doctoral dissertation.]
- 赵玥, 朱晓雅, 李卫强, 等. 2024. 基于 MaxEnt 模型的陕北林区黄喉貂潜在适宜生境评估. 延安大学学报: 自然科学版, 43(4): 28–35. [Zhao Y, Zhu X Y, Li W Q, et al. 2024. Evaluation of potential suitable habitat for *Martes flavigula* in northern Shaanxi forest region based on MaxEnt model. Journal of Yanan University: Natural Science Edition, 43(4): 28–35.]