

doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2025.06.009

人类活动和气候变化对中国原麝(*Moschus moschiferus*)适宜分布的影响研究

崔安邦¹, 徐都¹, 王重阳², 费雨露², 张天宇^{1,3}, 李文博^{1,3}

(1.安徽大学资源与环境工程学院,安徽合肥 230601)

(2.安徽大学生命科学学院,安徽合肥 230601)

(3.安徽省黄山生物多样性与短尾猴行为生态学国际联合研究中心,安徽合肥 230601)

[摘要] 人类活动和气候变化影响物种生存和分布,掌握物种适宜生境在空间上的分布特征,并准确评估栖息地的适宜性,对于开展物种保护工作至关重要。原麝(*Moschus moschiferus*)因其具有药用价值,历史上被大量捕杀,加之当前气候变化和人类活动加剧,导致该物种面临严峻的生存威胁。本研究采用物种分布模型(MaxEnt)整合最新的人类活动和气候变化及原麝分布数据(189个分布位点),对其可能受到的人类活动和气候变化的威胁因素、适宜分布区和未来分布变化趋势进行研究。结果表明:(1)保护区面积(PA)和国内生产总值(GDP)相对贡献率较高,分别为53.8%和23.7%。其中,GDP呈负效应,说明原麝偏好人口密度(PD)低和人类活动干扰较弱的区域。(2)气温季节性变化(Bio4,29.0%)、DEM(24.1%)、NDVI(19.2%)为贡献率较高的自然因子,对原麝的影响均呈峰型。原麝适宜性先和植被覆盖度呈正相关,在植被覆盖程度为0.6时适宜性最高(>0.6);平均温度日较差(Bio2)在10~12℃且气温季节性变化(Bio4)在1200~1400时,为原麝生存的最适气候条件;海拔近1000m时,原麝栖息地适宜性较高(>0.6)。(3)当前气候条件下原麝主要分布在河北、黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、山西、陕西、新疆等地,其高适宜栖息地面积为 1.53×10^5 km²,中适宜栖息地面积为 2.65×10^5 km²,低适宜栖息地面积为 5.96×10^5 km²。(4)未来气候下原麝的适宜区均收缩,向西迁移趋势明显。低辐射强迫情景(SSP1-2.6)下,原麝适宜区向高纬度地区扩张,高适宜栖息地面积呈现收缩(2030s为 4.58×10^4 km²,2050s为 6.18×10^4 km²,2070s为 7.26×10^4 km²)。在高辐射强迫情景(SSP5-8.5)下,在2030s、2050s、2070s高适宜区面积分别减少 4.41×10^4 km²、 12.38×10^4 km²和 13.38×10^4 km²。适宜栖息地在东北三省呈现出极其显著的收缩。鉴于植被覆盖、保护区范围、温度和降雨量仍然是影响当前和未来原麝适宜分布的重要因子,因此本研究认为持续加强森林保护计划和国家公园建设以及倡导节能减排仍然是保护原麝的重要举措。

[关键词] 原麝,MaxEnt模型,人类活动,气候变化,物种分布

[中图分类号]Q958.2 [文献标志码]A [文章编号]1001-4616(2025)06-0079-11

Impact of Human Activities and Climate Change on the Suitable Distribution of Siberian Musk Deer(*Moschus moschiferus*) in China

Cui Anbang¹, Xu Du¹, Wang Chongyang², Fei Yulu², Zhang Tianyu^{1,3}, Li Wenbo^{1,3}

(1.School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

(2.School of Life Sciences, Anhui University, Hefei 230601, China)

(3.International Collaborative Research Center for Huangshan Biodiversity and Tibetan Macaque Behavioral Ecology, Hefei 230601, China)

Abstract: Human activities and climate change critically influence species survival and distribution. Understanding the spatial patterns of suitable habitats and accurately assessing habitat suitability are fundamental for effective species conservation. The Siberian Musk Deer (*Moschus moschiferus*), heavily hunted for medicinal use and further threatened by intensified human activities and climate change, faces severe survival risks. This study integrated the latest human activity and climate data with 189 Musk Deer occurrence records using the MaxEnt species distribution model to evaluate threat factors, identify suitable habitats, and project future distribution trends. Key findings include: (1) Protected area coverage (PA), and GDP showed the highest relative contributions, with relative contributions of 53.8% and 23.7% respectively.

收稿日期:2025-04-22.

基金项目:国家自然科学基金项目(32201263).

通讯作者:李文博,博士(后),讲师,研究方向:行为生态学,保护生物学. E-mail:lwb@ahu.edu.cn

The negative effect of GDP indicates that Musk Deer prefer areas with low population density (PD) and minimal human disturbance. (2) Temperature seasonality (Bio4, 29.0%), elevation (DEM, 24.1%), and NDVI (19.2%) were predominant natural drivers, exhibiting bell-shaped relationships with Musk Deer distribution. The suitability of habitats for Musk Deer was positively correlated with vegetation cover. Optimal suitability occurred at NDVI > 0.6, elevation near 1,000 m, mean diurnal temperature range (Bio2) of 10–12 °C, and temperature seasonality (Bio4) of 1 200–1 400. (3) Current high-suitability habitats ($1.53 \times 10^5 \text{ km}^2$) are primarily distributed in Hebei, Heilongjiang, Jilin, Liaoning, Inner Mongolia, Shanxi, Shaanxi, and Xinjiang, with medium ($2.65 \times 10^5 \text{ km}^2$) and low suitability areas ($5.96 \times 10^5 \text{ km}^2$) spanning broader regions. (4) Future projections under climate change indicate habitat contraction with westward shifts. Under the low-emission scenario (SSP1–2.6), high-suitability areas contracted ($4.58 \times 10^4 \text{ km}^2$ by 2030s, $6.18 \times 10^4 \text{ km}^2$ by 2050s, $7.26 \times 10^4 \text{ km}^2$ by 2070s) but expanded toward higher latitudes. The high-emission scenario (SSP5–8.5) caused severe reductions in high-suitability habitats, with losses of $4.41 \times 10^4 \text{ km}^2$ (2030s), $12.38 \times 10^4 \text{ km}^2$ (2050s), and $13.38 \times 10^4 \text{ km}^2$ (2070s), particularly in Northeast China. Given that vegetation cover, protected area extent, temperature, and precipitation remain key factors affecting the current and future suitable distribution of Musk Deer, this study deems ongoing efforts in forest conservation and national park development, along with promoting energy-saved and emission-reduction, as crucial for Musk Deer protection.

Key words: *Moschus moschiferus*, MaxEnt, human activities, climate change, species distribution

随着人类社会的发展,森林砍伐、农业扩张、城市化进程以及捕猎等人类活动,导致大量野生动物的栖息地被破坏或破碎化并造成物种资源减少^[1-2]。气候变化能够通过改变动物栖息地环境,从而改变动物的物种分布,研究表明,野生反刍动物栖息地具有垂直迁移的变化,夏季大多选择在高海拔地区的阴坡活动,以减少水分和能量的丢失,冬季则倾向于选择在低海拔向阳的区域活动^[3]。另外,全球气候变暖导致一些物种的栖息地条件改变,迫使它们向高纬度和高海拔地区迁移,给相关物种的生存带来新的挑战,如食物的短缺、天敌的增多等,甚至最终导致物种灭绝^[3-5]。

原麝 (*Moschus moschiferus*) 又名麝鹿,属于偶蹄目 (Artiodactyla)、麝科 (Moschidae)、麝属 (*Moschus*), 是一种珍贵的野生动物,在中国主要分布于河北、黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、山西、陕西、新疆等省份,喜栖于山地多岩石的针叶林或针阔混交林中^[6-10],在中国被列为国家 I 级重点保护野生动物。雄麝可分泌一种外激素——麝香,是名贵的中药材。中国麝资源丰富,麝香产量曾占世界产量的 90%^[6-7,11]。但是,中国原麝目前面临诸多威胁:由于偷猎滥捕现象等人类活动以及环境变化,导致其生境破坏,原麝种群数量锐减,栖息地丧失,分布区面积急剧减少,造成严重破碎化的格局;分布区呈岛屿状,限制了种群个体之间基因的交流,导致近亲繁殖,影响原麝种群的增长^[6-8,11-15]。

生境是野生动物生存、繁殖和种群发展的关键场所,适宜的生境对野生动物种群的持续生存和繁衍至关重要^[13,16-17]。生境适宜性评估基于野生动物的栖息地,旨在分析一定区域内对动物生存和繁衍的适宜性,并识别影响动物种群分布的关键因素,有利于保护不同生境下的野生动物^[18-19]。对野生动物栖息地适宜性进行大尺度评估已成为研究的热点领域,国际上的学者广泛使用多种模型来评估目标物种的栖息地适宜性空间分布,并已经取得了相当成功的预测成果^[18-21]。其中,最大熵模型 (maximum entropy model, MaxEnt) 以其较高的预测精度和仅需目标物种分布点及环境数据的优势,成为生境评价和分布预测的重要工具^[20-21]。

当前对于不同地区原麝的生境需求和适应性评估的研究仍然缺乏较为全面的分析。此外,随着气候变化,原麝的生境适宜性可能会发生变化,这需要动态的监测和预测^[22-24]。因此,本研究旨在利用 MaxEnt 模型,对原麝的生境适应性进行评价,期望能够为原麝的保护工作提供科学依据以及新的视角和方法,有助于制定有效的保护措施,以确保这一珍贵物种的生存和繁衍。

1 研究方法

1.1 数据获取

原麝分布数据的获取:通过世界生物多样性信息机构 (Global Biodiversity Information Facility, GBIF, www.gbif.org) 下载分布点位,并检索相关文献和新闻报道,查询世界自然保护联盟濒危物种红色名录 (IUCN Red List of Threatened Species, <https://www.iucnredlist.org/>) 得到分布区域,参考中国生物志库

(<https://species.sciencereading.cn/>),配合野外实地考察补充校核,得到原麝分布点.之后为消除空间聚类,基于 ArcGis10.8 利用 SDMTtoolbox2.5(<https://www.sdmtoolbox.org/downloads>)对原麝分布点进行空间过滤,经筛选最后得到 189 个位点(图 1),其中,4 条来自于 GBIF,101 条来自中国生物志库,84 条来自文献查阅及野外验证,将其保存为 CSV 数据格式,以便进行模型构建.

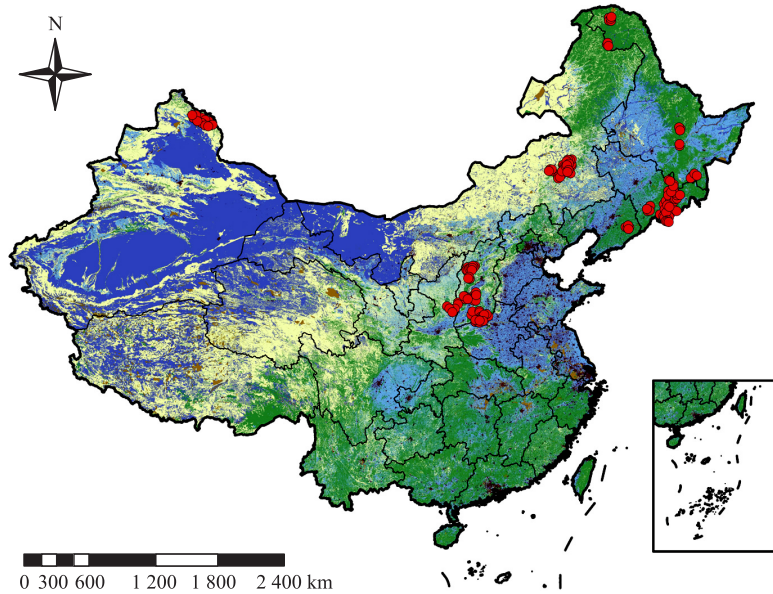


图 1 筛选后的原麝分布点

Fig.1 Distribution of *Moschus moschiferus*

注:底图来源于国家地理信息公共服务平台(天地图),审图号为 GS(2024)0650,底图无修改.

环境因子的获取和选择:根据全国土地覆盖数据(中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC))^[21],将土地覆盖分为耕地、林地、草地、水域、居民用地和未利用土地,分辨率为 1 km. 根据相关研究,气候、植被、人为干扰等生境因子均对在影响原麝栖息地的选择上有重要作用^[24]. 因此,本研究共选取了 25 个因子,包括 19 个生物气候因子(Bio1–Bio19)、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据、距道路距离(distance to road)、全国人口密度(population density, PD)、全国保护区分布(protection area, PA)和国内生产总值(gross domestic product, GDP)来分析. 其中,气候数据来源于 WorldClim 网站(<http://www.worldclim.org/>),分辨率为 2.5 min;归一化植被指数(NDVI)来自于数字地球开放平台(<https://open.geovisearth.com/service/resource>),分辨率为 30 m;DEM 数据、到公路的距离、全国人口密度(PD)、全国保护区分布(PA)和国内生产总值(GDP)来源于资源环境科学数据注册与出版系统(<https://www.resdc.cn/Default.aspx>),分辨率也为 30 m.

未来气候数据(2020–2040;2040–2060;2060–2080):来自于 WorldClim 网站,选用第六次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)北京气候中心中等分辨率气候系统模式(BCC-CSM2-MR)下 2.5 min 分辨率的数据. CMIP6 涵盖了 7 种共享社会经济路径(shared socioeconomic pathways, SSPs),包括 SSP1–1.9、SSP1–2.6、SSP2–4.5、SSP3–7.0、SSP4–3.4、SSP4–6.0 和 SSP5–8.5. 本研究特别关注了 SSP1–2.6(代表低辐射强迫情景)和 SSP5–8.5(代表高辐射强迫情景)两种情景^[25].

1.2 影响因子的筛选

MaxEnt 模型的准确性和精确性受环境因子数量的影响,环境因子间若有强烈的共线性,会导致模型的过度拟合,导致模型的不准确,因此,本研究将自然因子和人为干扰因子分别进行 Pearson 相关分析,构建所有变量两两之间的相关系数(r)矩阵,当 $|r|>0.8$ 时,表明因子间存在高度相关性($r^2 \geq 0.64$). 为避免多重共线性导致模型估计偏差,本研究筛选 $|r|>0.8$ 的环境因子,在后续分析中予以忽略,并去除了贡献度为 0 的因子,以提升变量集的独立性与模型稳健性^[26]. 最后,保留了 6 个自然因素和 5 个人为干扰因素,在 Arcgis 中将环境因子图层坐标系统一为 WGS1984,并将其转化为 ASC II 以便在 MaxEnt 中使用.

1.3 模型构建及评估

本研究使用 MaxEnt 3.4.4(<https://www.cs.princeton.edu/wschapire/Maxent/>)分析原麝的生境适宜性. 将原麝分布位点数据分别与 6 个自然因子、5 个人为干扰因子导入 MaxEnt3.4.4, 设置随机测试百分比为 25%, 最大背景点数量为 10000, 输出格式选为 Logistic, 勾选制作响应曲线、刀切法检验环境变量和随机种子选项. 为保证模型稳定性, 设置模型进行 10 次自举法(Bootstrap)重复取平均值^[27]. 使用刀切法(Jackknife)检验分析环境数据的重要性, 并采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)面积(area under curve, AUC)评价模型的精确度, 取值范围为 0.5~1.0. AUC 值越高, 模型的预测准确性和区分能力越强, 越容易正确预测物种的分布情况. 评价标准: AUC 值为 0.5~0.6, 失败; 0.6~0.7, 预测性能较差; 0.7~0.8, 一般; 0.8~0.9, 好; 0.9~1.0, 预测性能非常好^[28]. 在自然和人类干扰因子下潜在适宜栖息地的值范围为 0~1, 这些潜在生境被重新划分为四类, 即“高适宜”(0.6~1.0)、“中等适宜”(0.4~0.6)、“低适宜”(0.2~0.4)和“不适宜”(0~0.2). 本研究还利用 MaxEnt 对林麝未来气候情景(SSP1-2.6、SSP5-8.5)下的分布区进行了模拟和预测, 得到未来栖息地区域的变化, 将其分为“范围扩展”、“范围收缩”和“不变”^[29].

2 结果与讨论

2.1 人为因素对原麝在我国分布的影响

模型预测精度: ROC 曲线评价结果显示, AUC 值为 0.876, 标准差为 0.011(图 2), 达到优秀水平, 说明该模型预测准确, 可用于生境适宜性评价.

本研究使用 Jackknife 刀切法分析(图 3), 结果显示(表 1), 在人为因素影响中, 保护区面积(PA)贡献率最高(53.8%), 国内生产总值(GDP)其次(23.7%), 人口密度(PD)和距道路的距离贡献率均为 11.2%, 说明 PA 和 GDP 的影响较为显著, 二者累计贡献率达到 77.5%, PD 和距道路距离的影响相对最低.

由响应曲线知, 人口密度和国内生产总值对原麝有显著影响, 人类干扰使原麝出现概率降低; 保护区面积和距道路距离与原麝的存在概率间均总体呈负相关趋势.

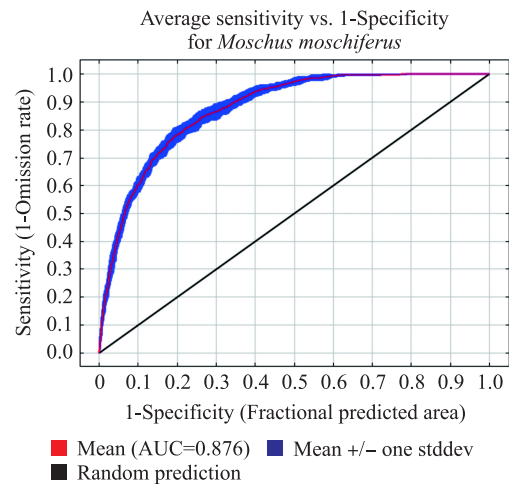


图 2 MaxEnt 模型的 ROC 曲线
Fig. 2 ROC curve of MaxEnt model

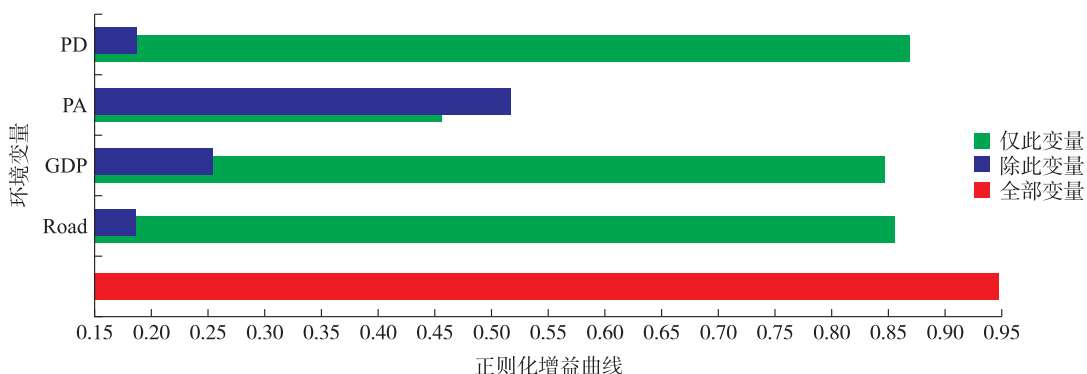


图 3 刀切法检验人为影响因子重要性

Fig. 3 The knife-cut method examines the importance of anthropogenic factors

表 1 重要人为因子的贡献率和置换重要性

Table 1 The percent contribution and permutation importance of the key anthropogenic factors

变量	相对贡献率/%	置换重要性	变量	相对贡献率/%	置换重要性
PA	53.8	51.7	PD	11.2	13.4
GDP	23.7	19.5	Road	11.2	15.3

研究表明,保护区面积(PA)、国内生产总值(GDP)和人口密度(PD)对原麝适宜区分布的贡献率较高.在保护区面积影响下,高适宜区面积为 $159.64 \times 10^4 \text{ km}^2$,中适宜区面积为 $127.81 \times 10^4 \text{ km}^2$,低适宜区面积为 $269.43 \times 10^4 \text{ km}^2$.在GDP影响下,高适宜区面积为 $25.44 \times 10^4 \text{ km}^2$,中适宜区为 $610.08 \times 10^4 \text{ km}^2$,低适宜区面积为 $118.95 \times 10^4 \text{ km}^2$.在人口密度的影响下,高适宜区面积为 $139.19 \times 10^4 \text{ km}^2$,中适宜区面积为 $132.58 \times 10^4 \text{ km}^2$,低适宜区面积为 $389.92 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图4).

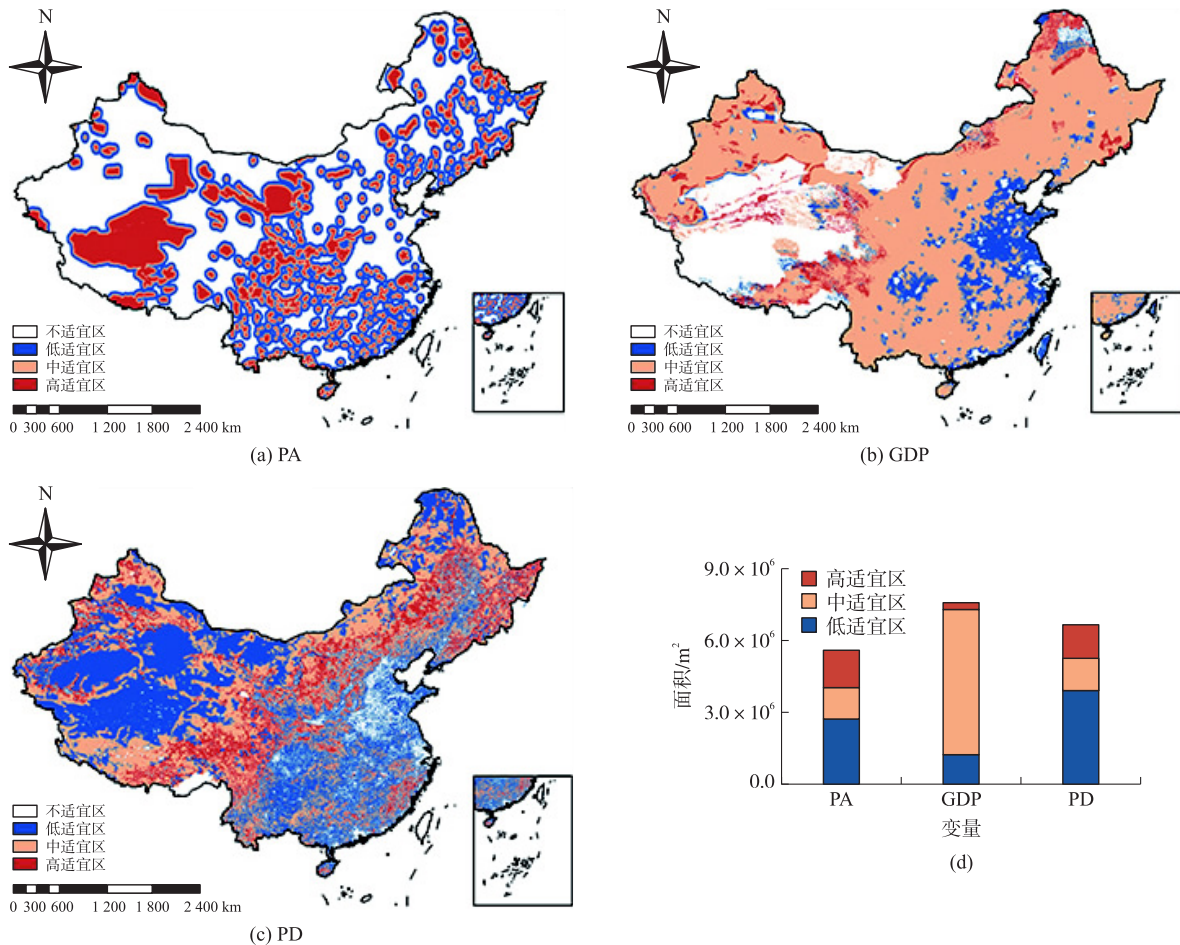


图4 重要人为因素影响下原麝的适宜分布

Fig. 4 The distribution of *Moschus moschiferus* under the influence of key anthropogenic factors

注:底图来源于国家地理信息公共服务平台(天地图),审图号为GS(2024)0650,底图无修改.

2.2 气候对原麝分布的影响

模型预测精度:研究结果 ROC 曲线显示(图5),AUC 值为 0.965,结果大于 0.9,表示预测结果达到优秀,精度较高.

气温季节性变化、DEM、NDVI 影响较显著,贡献率分别为 29.0%、24.1%和 19.2%,累计贡献率达 72.3%(表 2);最湿月降水量和最干月降水量贡献率分别为 11.6%和 10.4%;平均温度日较差贡献率较低(5.7%). Jackknife 刀切法结果显示,Bio4 是模型的核心驱动因素,而 NDVI 表现出较强的生态指示意义.

表 2 重要自然因子的贡献率和置换重要性

Table 2 The percent contribution and permutation importance of the natural factors

变量	相对贡献率/%	置换重要性	变量	相对贡献率/%	置换重要性
Bio4	29.0	46.5	Bio13	11.6	8.5
DEM	24.1	20.4	Bio14	10.4	6.2
NDVI	19.2	175	Bio2	5.7	0.9

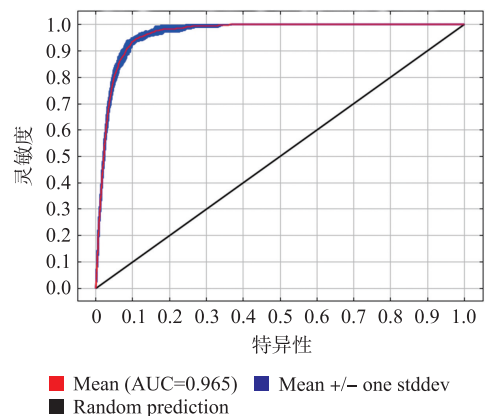


图5 MaxEnt 模型的 ROC 曲线

Fig. 5 ROC curve of MaxEnt model

MaxEnt 模拟的响应曲线显示(图 7),原麝出现概率随 DEM 值增加先升高后降低,在 DEM 值小于 1 000 m 时达到峰值(>0.6);出现概率在植被覆盖度较高时(归一化植被指数为 0.6)最大,气温季节性变化值在 1 200~1 400 时,出现概率达到峰值(>0.7);在最湿月降雨量在 100~200 mm 时,出现概率达到最大(>0.6);出现概率与最干季度降雨量的曲线为单峰型,最干季度降雨量在 0~20 mm 时,原麝出现概率最大(约 0.6);平均温度日均差为 12 °C 时,出现概率最大(>0.6).

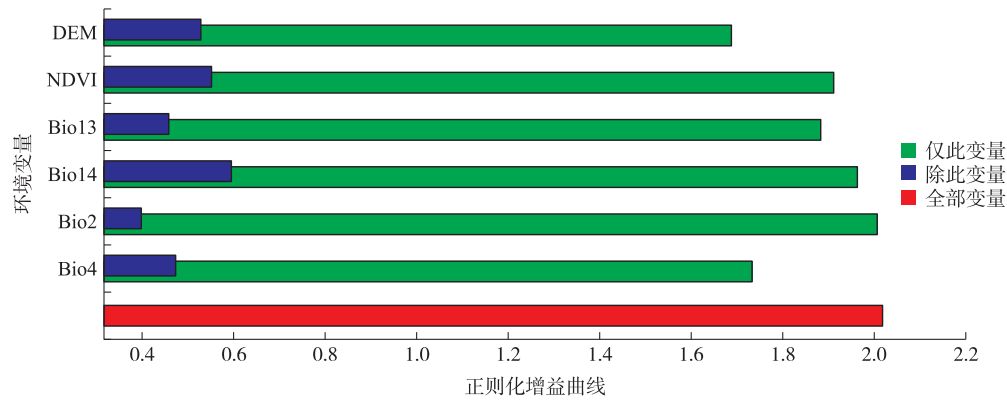


图 6 刀切法检验自然影响因子重要性

Fig. 6 The knife-cut method examines the importance of natural factors

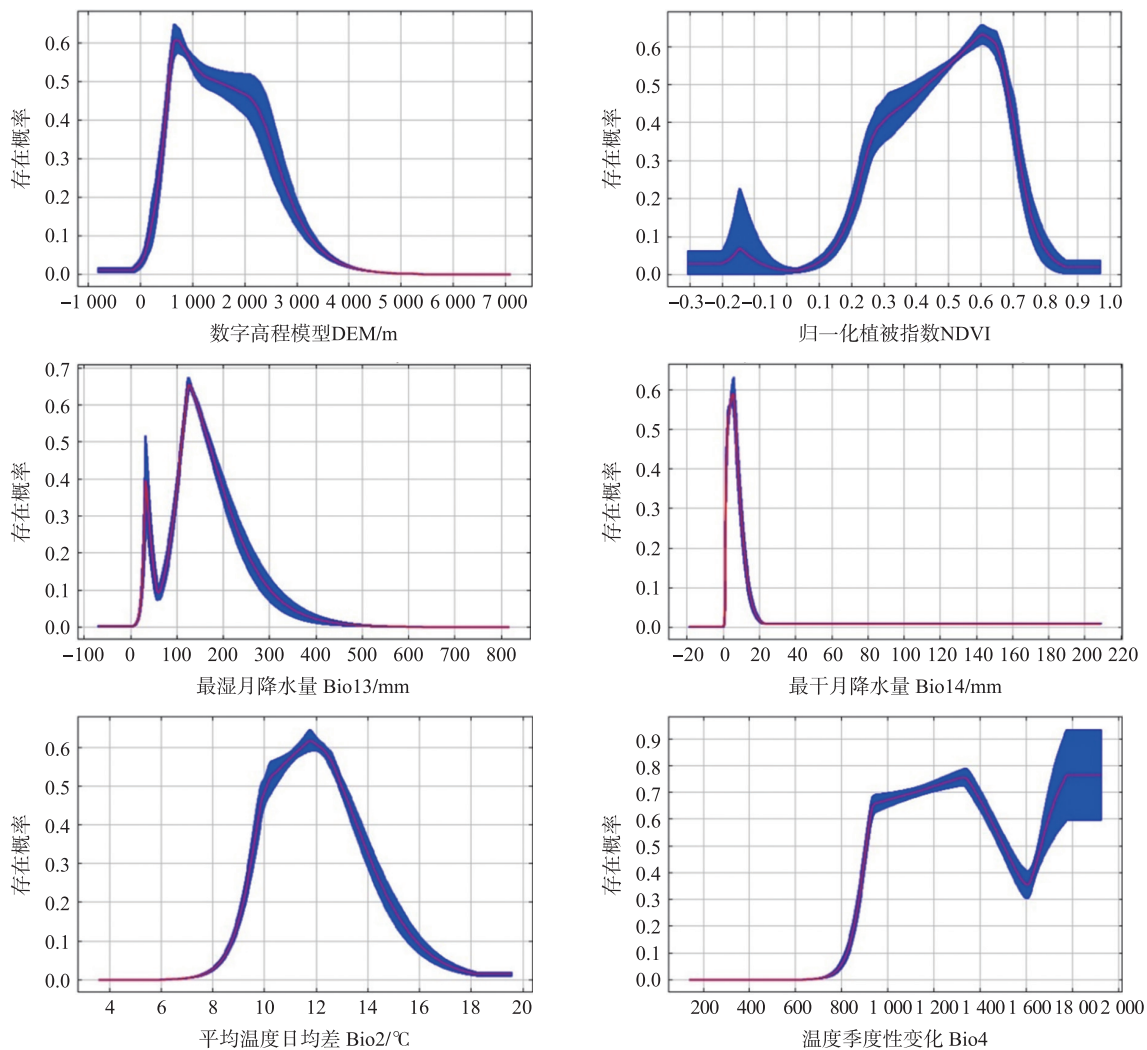


图 7 预测概率对主要环境变量的响应曲线

Fig. 7 The response curve of the predicted probability to the dominant environment variable

在当前气候影响下,高适宜区面积为 $15.30 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占 1.59%; 中等适宜区面积为 $26.54 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占 2.76%; 低适宜区面积为 $59.63 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占 6.21%; 不适宜区面积为 $858.53 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占 89.43% (图 8)。结果表明, 当前气候条件下, 大部分地区为原麝的非适生区。

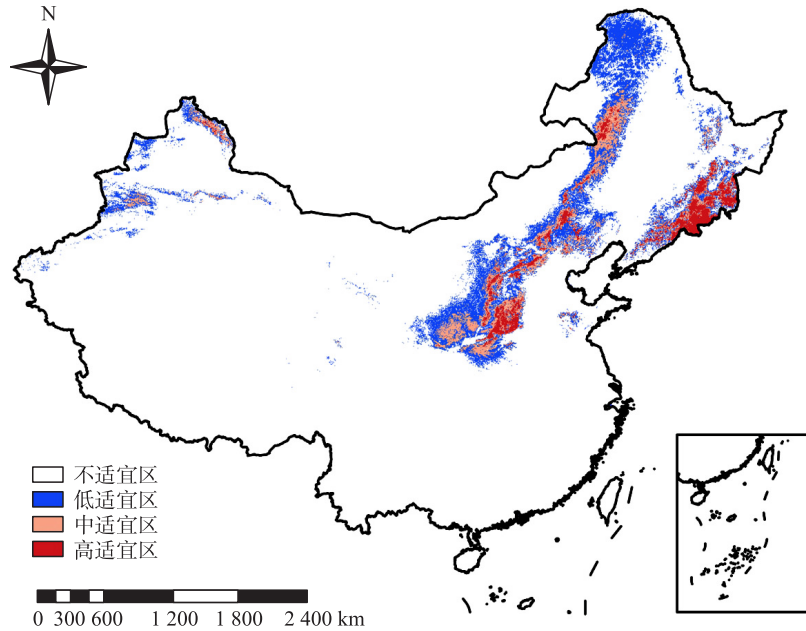


图 8 原麝适生区分布

Fig. 8 Suitable distribution area for *Moschus moschiferus*

注:底图来源于国家地理信息公共服务平台(天地图),审图号为GS(2024)0650,底图无修改。

2.3 未来气候下中国原麝的潜在分布和质心迁移路线

由表 3 知,在未来气候条件下预测,原麝的适宜区面积发生不同程度的减少。在低辐射情景下,2030s、2050s 和 2070s 低适生区面积分别减少了 $13.53 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $9.43 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $12.21 \times 10^4 \text{ km}^2$; 中适生区在 2050s 变化较少 ($0.66 \times 10^4 \text{ km}^2$); 高适生区面积减少范围为 $4.58 \times 10^4 \text{ km}^2 \sim 7.26 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在高辐射情景下,适生区面积明显减少。尤其在 2070s, 低中高适宜区面积分别减少 $45.83 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $22.70 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $13.38 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

表 3 不同气候情景下各等级适生区面积 ($\times 10^4 \text{ km}^2$)

Table 3 Area of different levels of suitable regions under different climate scenarios ($\times 10^4 \text{ km}^2$)

时期	低适生区	中适生区	高适生区
SSP1-2.6-2030s	46.22(-13.53)	28.66(-0.66)	10.47(-4.58)
SSP1-2.6-2050s	50.32(-9.44)	20.52(-8.79)	8.86(-6.18)
SSP1-2.6-2070s	47.55(-12.21)	21.06(-8.26)	7.78(-7.26)
SSP5-8.5-2030s	45.99(-13.77)	23.40(-5.91)	10.63(-4.41)
SSP5-8.5-2050s	35.73(-24.03)	12.82(-16.50)	2.66(-12.38)
SSP5-8.5-2070s	13.93(-45.83)	6.61(-22.70)	1.67(-13.38)

利用 Arcgis10.8 对 MaxEnt 模拟的结果进行重分类,得到原麝在未来气候的不同情况下,适生区的伸缩面积变化(表 4),并使用 Arcmap 绘制质心迁移图(图 9)和伸缩图(图 10)。

表 4 未来气候下原麝种群伸缩面积

Table 4 Expansion area of *Moschus moschiferus* population in future climate

气候情景	收缩面积 ($\times 10^4 \text{ km}^2$)	扩张面积 ($\times 10^4 \text{ km}^2$)	不变面积 ($\times 10^4 \text{ km}^2$)
SSP1-2.6-2030s	21.56	31.91	62.27
SSP1-2.6-2050s	30.60	31.09	53.22
SSP1-2.6-2070s	38.72	26.32	45.14
SSP5-8.5-2030s	38.21	20.29	46.05
SSP5-8.5-2050s	49.61	24.30	34.65
SSP5-8.5-2070s	73.83	15.57	10.00

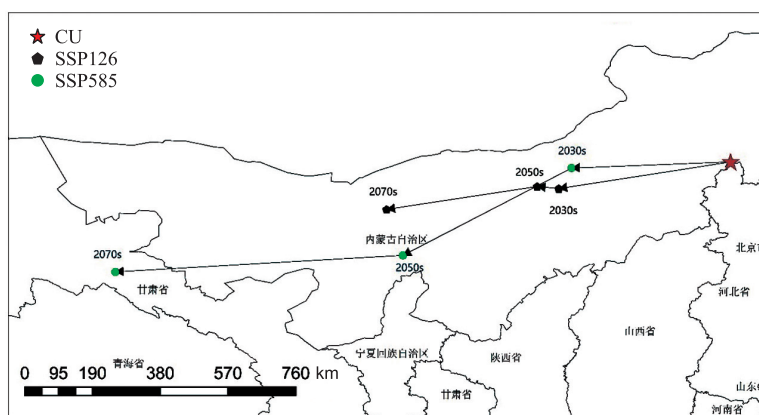


图 9 原麝适宜生境分布质心迁移图

Fig. 9 Centroid shift map of suitable habitats for *Moschus moschiferus*

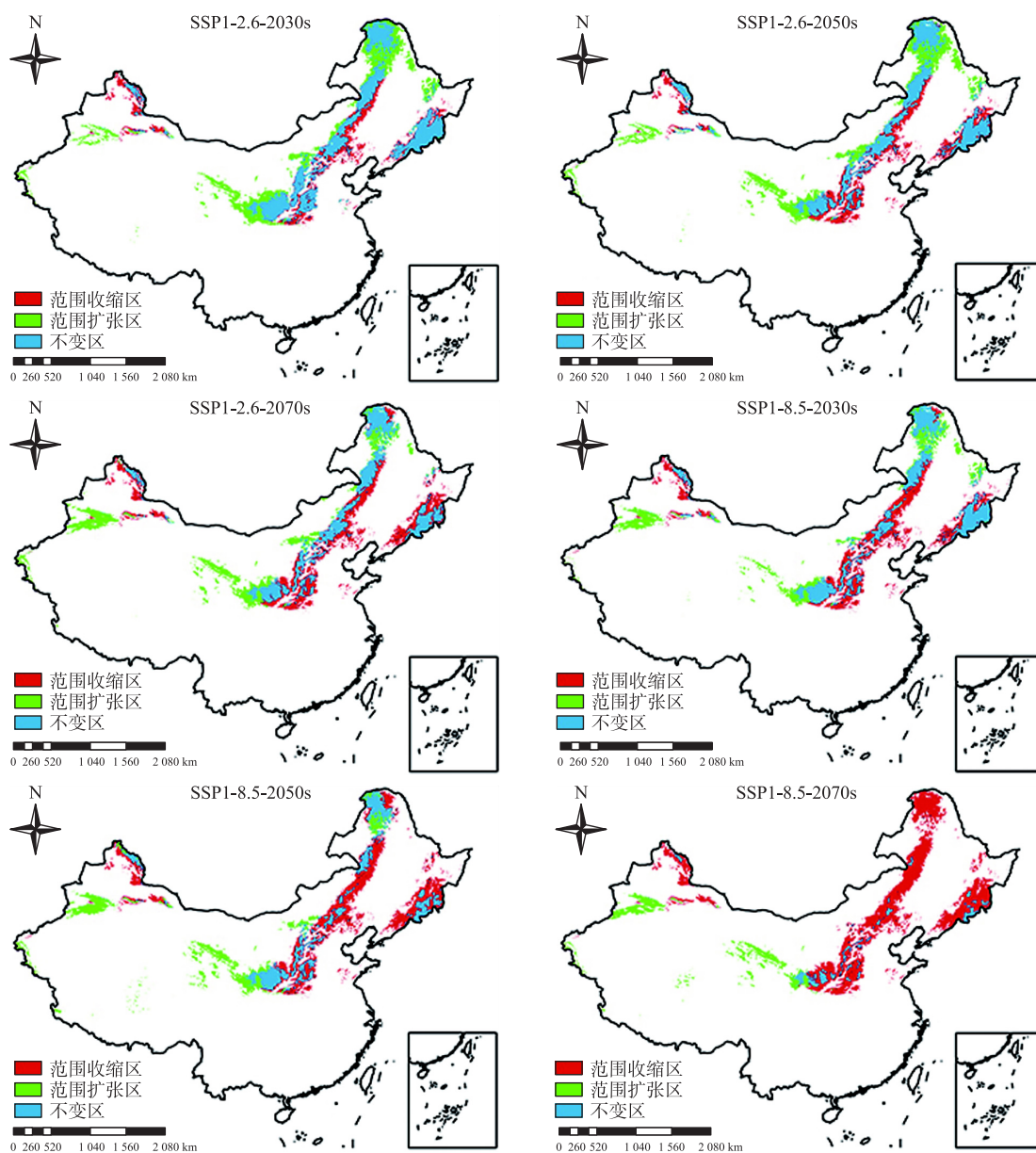


图 10 未来气候下原麝在中国的潜在分布

Fig. 10 Potential distribution of *Moschus moschiferus* in China under future climate

注:底图来源于国家地理信息公共服务平台(天地图),审图号为GS(2024)0650,底图无修改.

结果表明,原麝在未来气候条件下,向西迁移趋势明显,在低辐射胁迫情景(SSP1-2.6)下,随着时间的延续,收缩面积逐渐增大,但在2030年代和2050年代扩张面积较大.在此情景下,原麝在未来趋于向高纬度地区迁移,2030s及2050s时,在甘肃及其与青海交界处、内蒙古东北部(与黑龙江交界处)及南部(与山西交界处)、新疆和吉林等省份有较明显的扩张趋势,在山西、陕西和内蒙古东部则无面积变化为主.在高辐射胁迫情景(SSP5-8.5)下,收缩面积远远大于扩张面积,并随着时间增长,收缩面积显著增加,且趋势变快,这种趋势在2070s尤为显著,几乎中部东部原有适生区全部收缩;且原麝有明显向西扩张趋势,往甘肃、青海及新疆西部出现迁移.

2.4 讨论

在本研究中,归一化植被指数(NDVI)对原麝分布的贡献率最较高,为19.2%,与国内外已有研究^[9,24]一致,因此,表明原麝偏好高植被覆盖区域,这可能是由于高植被覆盖区能够为其提供丰富的食物资源和隐蔽场所;同时保护区的存在则有效减少了人类活动的干扰,为原麝的生存和繁衍提供了相对安全的环境,该结论亦与以往研究结果相符^[15].在距道路距离较近的区域原麝出现概率较高,说明道路可能对原麝的生存有显著的影响,道路建设可能是导致原麝生境破碎化的重要因素;此外,人口密度(PD)和国内生产总值(GDP)对原麝分布的影响呈现负相关关系,说明人类活动强度较高的地区对原麝的栖息地产生了明显的干扰作用,导致其适宜生境面积减少,这与已有研究中关于人类活动对野生动物栖息地破坏所造成的影响的结论相符^[30].

在以往的研究中各类影响因子常被一同纳入模型进行分析,而在实际生态过程中,不同因子作用的尺度并不一致.如在时间尺度上,人为干扰往往迅速且剧烈,而自然因素的作用一般相对缓和,而且通常具有时间上的滞后性^[31].在生态学尺度上,物种对自然环境的适应是长期进化形成的,而由于人类文明的迅速发展,一般无法与物种建立长期生态适应关系^[32];同时人类活动和气候变化影响往往存在交互作用,模型可能无法捕捉.因此,模型可能低估或高估某些影响因子的作用,导致结果严谨性下降,造成保护政策制定失误.因此,本研究将自然因素与人为因素分别分析.气温季节性变化、数字高程模型(DEM)、归一化植被指数(NDVI)对原麝生境适应性的影响最为显著,累计贡献率达到72.3%.气温季节性变化是贡献率最高的影响因子,说明温度对原麝的生境选择有重要动因.原麝在海拔约1000m的地区出现概率最高,且在气温季节性变化值为1200~1400时出现概率达到最大,这表明原麝对生境的海拔和气候条件具有一定的偏好性,其适宜栖息地主要集中在多岩石山地的针叶林或针阔混交林环境中,这与已有研究结果一致^[7,9].此外,最湿月降雨量和最干月降水量对原麝分布的影响也较为显著,这可能与原麝对水分条件的需求及其对于干旱环境的耐受能力有关.

通过对当前气候条件下原麝适宜区分布的分析,结果显示全国范围内高适宜区面积占1.59%,中等适宜区面积占2.76%,低适宜区面积占6.21%,而不适宜区面积占89.43%,这表明原麝的适宜栖息地有限,且主要集中在特定的自然保护区和植被覆盖良好的区域,说明自然环境条件对原麝分布的限制作用更为显著,可能是原麝对自然环境长期适应进化所导致.原麝的栖息地适宜性在未来将受到显著的气候变化影响,原麝的适宜生境存在明显向西迁移的趋势.在低辐射胁迫情景(SSP1-2.6)下,原麝适宜区在2030年代和2050年代表现出一定程度的扩张趋势,在2070年代呈收缩,表明较温和的气候变化短时间内可能为原麝提供更广泛的潜在栖息地,但随着时间跨度增加,仍然会对原麝的生存有胁迫.在高辐射胁迫情景(SSP5-8.5)下,适宜区在2030年代、2050年代和2070年代均呈现出收缩趋势,且随着时间的延续,收缩愈发明显,尤其是2070年代的适宜区收缩面积远大于扩张面积,这表明极端气候变化可能导致原麝栖息地的大幅减少和生存空间的显著压缩.

3 结论

针对原麝偏好针阔混交林和高海拔陡坡的特点,需优先保护现有栖息地,持续加强森林保护计划和国家公园建设,避免森林过度采伐和道路开发导致的生境破碎化.对于人类活动造成的栖息地破碎化,可通过建立生态廊道连接碎片化栖息地,注意结合地形与植被类型(如针阔混交林),保证原麝的基因交流,避免近亲繁殖.鉴于植被覆盖、保护区范围、温度和降雨仍然是影响当前和未来原麝适宜生境的关键因子,因此本研究认为持续加强森林保护计划和国家公园建设以及倡导节能减排仍然是保护原麝的重要举措.

[参考文献]

- [1] POWERS R P, JETZ W. Global habitat loss and extinction risk of terrestrial vertebrates under future land-use-change scenarios[J]. Nature climate change, 2019, 9(4): 323–329.
- [2] MENG Z, DONG J, ELLIS E C, et al. Post-2020 biodiversity framework challenged by cropland expansion in protected areas[J]. Nature sustainability, 2023, 6(7): 758–768.
- [3] CHEN I C, HILL J K, OHLEMILLER R, et al. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming[J]. Science, 2011, 333(6054): 1024–1026.
- [4] PECL G T, ARAÚJO M B, BELL J D, et al. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being[J]. Science, 2017, 355(6332): eaa19214.
- [5] ZHAO S, CHEN X, WAN Q. Assessment of genetic diversity in the forest musk deer (*Moschus berezovskii*) using microsatellite and AFLP markers[J]. Chinese science bulletin, 2011, 56(24): 2565–2569.
- [6] ZHOU Y J, MENG X X, FENG J C, et al. Review of the distribution, status and conservation of musk deer in China[J]. Folia zoologica: International journal of vertebratology, 2004, 53(2): 129–140.
- [7] 盛和林. 我国麝资源现状及救护措施[J]. 野生动物, 1996, 17(3): 10–12.
- [8] 李明, 李元广, 盛和林, 等. 原麝安徽亚种分类地位的再研究[J]. 科学通报, 1999, 44(2): 188–192.
- [9] ZHANG Z, WANG X, SU Y, et al. Assessing population status and influencing factors of alpine musk deer in patchy habitats: Implications for conservation strategies[J]. Global ecology and conservation, 2024, 54: e03134.
- [10] 李致祥. 中国麝一新种的记述[J]. 动物学研究, 1981, 2(2): 157–161.
- [11] LI D, CHEN B, ZHANG L, et al. The musk chemical composition and microbiota of Chinese forest musk deer males[J]. Scientific reports, 2016, 6: 18975.
- [12] 蒋志刚, 江建平, 王跃招, 等. 中国脊椎动物红色名录[J]. 生物多样性, 2016, 24(5): 501–551.
- [13] 王金亮, 陈姚. 3S技术在野生动物生境研究中的应用[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(6): 44–47.
- [14] 张微, 姜哲, 巩虎忠, 等. 气候变化对东北濒危动物驼鹿潜在生境的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(7): 1815–1823.
- [15] 张卫华, 王守波, 李晔, 等. 内蒙古汗马国家级自然保护区原麝的种群现状[J]. 内蒙古林业调查设计, 2015, 38(4): 96–98.
- [16] HOLT R D. On the evolutionary ecology of species' ranges[J]. Evolutionary ecology research, 2003, 5(2): 159–178.
- [17] GAILLARD J M, HEBBLEWHITE M, LOISON A, et al. Habitat-performance relationships: Finding the right metric at a given spatial scale[J]. Philosophical transactions of the royal society B: Biological sciences, 2010, 365(1550): 2255–2265.
- [18] PRINGLE C S M, MARTIN T G, RHODES J R. Interactions between climate and habitat loss effects on biodiversity: A systematic review and meta-analysis[J]. Global change biology, 2013, 19(5): 1642–1644.
- [19] QING Q, ZHANG M Y, TANG S Z, et al. Evolution of potential spatial distribution patterns of carex tussock wetlands under climate change scenarios, Northeast China[J]. Chinese geographical science, 2022, 32(1): 142–154.
- [20] WARREN D L, SEIFERT S N. Ecological niche modeling in Maxent: The importance of model complexity and the performance of model selection criteria[J]. Ecological applications: A publication of the Ecological Society of America, 2011, 21(3): 335–342.
- [21] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological modelling, 2006, 190(3/4): 231–259.
- [22] TRAVIS J M J. Climate change and habitat destruction: A deadly anthropogenic cocktail of species geographic distributions[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological sciences, 2003, 270(1514): 467–473.
- [23] 彭少麟, 李勤奋, 任海. 全球气候变化对野生动物的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1153–1159.
- [24] JIANG F, ZHANG J, GAO H, et al. Musk deer (*Moschus* spp.) face redistribution to higher elevations and latitudes under climate change in China[J]. Science of the total environment, 2020, 704: 135335.
- [25] 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.
- [26] GRAHAM M H. Confronting multicollinearity in ecological multiple regression[J]. Ecology, 2003, 84(11): 2809–2815.
- [27] MI C, MA L, YANG M, et al. Global protected areas as refuges for amphibians and reptiles under climate change[J]. Nature communications, 2023, 14(1): 1389.
- [28] SWETS J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems[J]. Science, 1988, 240(4857): 1285–1293.
- [29] ZHANG K, YAO L, MENG J, et al. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change[J]. Science of the total environment, 2018, 634: 1326–1334.

- [30] LI W B, TENG Y, ZHANG M Y, et al. Human activity and climate change accelerate the extinction risk to non-human primates in China[J]. *Global change biology*, 2023, 30(1) :e17114.
- [31] GUIAN A, ZIMMERMANN N E. Predictive habitat distribution models in ecology[J]. *Ecological modelling*, 2000, 135(2/3) : 147–186.
- [32] HANSEN M C, POTAPOV P V, MOORE R, et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change[J]. *Science*, 2013, 342(6160) :850–853.

[责任编辑:黄 敏]