

DOI: 10.20103/j.stxb.202409192266

刘力兮, 马勇, 姚武韬, 曾怡. 基于集成物种分布模型的历山华北豹栖息地研究. 生态学报, 2025, 45(18): - .

Liu L X, Ma Y, Yao W T, Zeng Y. Habitat study of the northern Chinese leopard in Alexandria based on an integrated species distribution model. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(18): - .

基于集成物种分布模型的历山华北豹栖息地研究

刘力兮¹, 马勇², 姚武韬², 曾怡^{1,*}

1 北京林业大学信息学院, 北京 100083

2 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

摘要: 栖息地作为生物生存、繁衍和发展的基础, 其质量与完整性直接影响生物的种群维持、物种多样性以及生态系统的平衡与稳定。华北豹 (*Panthera pardus japonensis*) 作为中国特有的豹亚种及生态系统中的顶级捕食者, 正面临着栖息地破碎化等严峻挑战。历山作为华北豹的重要活动区域, 目前缺乏对该区域华北豹适宜栖息地、环境偏好相关研究。利用以往华北豹研究文献、相关资讯和监测数据结合相关环境数据, 通过构建集成物种分布模型以评价栖息地适宜性, 对华北豹在该区域的环境偏好加以探讨, 并依据当前保护区各区域设置状况进行综合分析。研究结果显示, 历山保护区保留了 40% 以上的适宜栖息地。空间分布方面, 保护区内中高适宜栖息地由东西两侧较大面积且连续的斑块以及众多破碎化的图斑共同构成。保护区内适宜性栖息地的不连续, 可能导致该区域华北豹的扩散存在一定程度上的限制。环境偏好方面, 该区域华北豹更倾向于中海拔、植被茂密、地势崎岖、距水源地较近、降水量变化较大的环境, 且对于居民点没有表现出明显的回避趋势。研究结果表明, 当前保护区在华北豹适宜栖息地保护方面已取得一定成效, 但依旧存在栖息地破碎化以及核心保护区覆盖不足等问题。因此, 建议对保护区针对华北豹保护策略根据栖息地变化实施动态调整, 并推行一系列科学管理举措, 包括强化人类活动监管力度、开展栖息地修复工程以及建立生态廊道维护机制等, 以期通过采取这些适应性保护策略, 能够更好地保障华北豹的长期生存及其生态作用, 进而有助于整个生态系统的健康与稳定。

关键词: 华北豹; 集成物种分布模型; 栖息地适宜性; 生境破碎

Habitat study of the northern Chinese leopard in Alexandria based on an integrated species distribution model

Liu Lixi¹, Ma Yong², Yao Wutao², Zeng Yi^{1,*}

1 School of Information Science & Technology of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract: Habitat, as the fundamental basis for the survival, reproduction, and development of organisms, plays a crucial role in maintaining populations, preserving species diversity, and ensuring the balance and stability of ecosystems through its quality and integrity. The North China Leopard (*Panthera pardus japonensis*), a subspecies endemic to China, serves as a keystone predator within its ecosystem. However, it faces significant threats, particularly habitat fragmentation. Despite its ecological importance, research concerning habitat suitability and environmental preferences within the Lishan Nature Reserve remains limited. This study integrates past research literature on the North China leopard, relevant information, and monitoring data with corresponding environmental data, to construct an ensemble species distribution model (ESDM) that evaluates habitat suitability. By incorporating relevant environmental data, the model explores the environmental preferences of the North China leopard in the study area. Additionally, a comprehensive analysis is conducted based on the current

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42201063)

收稿日期: 2024-09-19; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zengyi@bjfu.edu.cn

configuration of different zones within the protected area. This approach provides insights into the factors influencing the distribution and habitat use of the North China leopard, aiding in the development of targeted conservation strategies. The result indicated that over 40% of the reserve remains suitable habitat for the North China Leopard. In terms of spatial distribution, the moderately to highly suitable habitats within the reserve are composed of large, continuous patches on the eastern and western sides, as well as numerous fragmented patches. The discontinuity of suitable habitats within the reserve may impose certain limitations on the dispersal of the North China leopard in the area. The environmental preferences of the North China leopard include areas with medium altitudes, dense vegetation, rugged terrain, close proximity to water sources, and significant precipitation variability. Interestingly, there was no evident inclination to avoid inhabited areas. These findings suggest that while the reserve has made progress in conserving suitable habitats for the North China Leopard, challenges such as habitat fragmentation and insufficient coverage of core conservation zones persist. Therefore, it is recommended that the conservation strategies for the North China leopard within the protected area be dynamically adjusted in response to habitat changes. A series of scientific management measures should be implemented to address these challenges. These measures include strengthening the monitoring of human activities to minimize disturbances, conducting habitat restoration projects to enhance the quality and connectivity of suitable habitats, and establishing mechanisms for the maintenance of ecological corridors to facilitate the movement of the leopards. Such initiatives are crucial for promoting the recovery and dispersal of the North China leopard population in the region. By adopting these adaptive conservation strategies, the long-term survival and ecological role of the North China leopard can be better supported, contributing to the overall health and stability of the ecosystem. By adopting these adaptive conservation strategies, the long-term survival and ecological role of the North China leopard can be better supported, contributing to the overall health and stability of the ecosystem.

Key Words: North China leopard; ensemble species distribution model; habitat suitability; habitat fragmentation

栖息地是生物生存、繁衍和发展的基础^[1],其质量和完整性直接影响生物的种群维持、物种多样性以及生态系统的平衡与稳定^[2]。因此,栖息地保护对于维持生物多样性、保持生态平衡以及可持续发展具有至关重要的意义^[3]。物种分布模型(Species Distribution Models, SDM)作为评估栖息地适宜性的重要工具之一,被广泛用于栖息地保护。其核心目标在于将物种的分布数据与环境变量信息相结合,构建模型以预测物种于不同时空条件下的潜在适宜栖息地分布^[4-5]。现有的 SDM 包含广义线性模型(Generalized Linear Model, GLM)、随机森林(Random Forest, RF)和支持向量机(Support Vector Machine, SVM)等^[6-7],这些模型在一定程度上提高了栖息地预测的准确性。然而,模型本身存在局限性,这在一定程度上限制了预测结果的精度,尤其是在面对复杂生态系统的预测工作中^[8]。集成物种分布模型(Ensemble Species Distribution Model, ESDM)作为解决 SDM 局限性的一种方式被提出。现阶段,ESDM 已被广泛应用于模拟和预测物种的潜在分布区等研究中^[9-10]。许多使用者认为 ESDM 在栖息地评价任务中能够获得更高的精度,并且具有更强的泛化性与鲁棒性^[9]。

华北豹是唯一栖息于中国的金钱豹亚种,亦被称作中国豹^[11]。作为生态系统食物链顶端物种,栖息地对华北豹种群影响尤为突出^[12]。历史上,华北豹广泛分布于太行山—燕山地区^[13],但由于栖息地破坏及人为干扰,现存华北豹种群小且分散,栖息地相互隔离,种群的维系及生存受到极大的威胁^[14]。作为国家 I 级重点保护野生动物、CITES 附录 I 物种、IUCN 红色名录近危物种^[15],华北豹的生存状况一直备受关注。历山国家级自然保护区作为华北豹的主要活动场所之一,是华北豹等珍稀野生动物的重要栖息地。然而,近年来,因为旅游开发、当地村民生产生活、保护区开展工作难度大等原因,华北豹栖息地受到一定程度影响,局部栖息地出现破碎化现象^[16]。

以往,针对该区域的华北豹研究多集中于密度与数量调查、物种相互作用等方面^[17-18]。尽管部分大尺度

范围的华北豹研究涵盖了该区域^[19-20],然而该保护区仍然严重缺少针对保护区层面的更为细节的研究。对该区域华北豹栖息地的空间分布情况,华北豹对关键环境因子响应机制缺乏了解,难以科学系统地制定华北豹保护管理策略。为解决当前工作需要,本研究整合多来源获取的研究区华北豹分布位点数据,结合相关环境数据,利用ESDM预测该物种的适宜栖息地,并讨论其环境偏好与潜在分布,为历山保护区华北豹的保护管理提供科学依据。

1 研究方法及材料

1.1 研究区域

历山国家级自然保护区地处山西省运城、晋城、临汾三市的垣曲、阳城、沁水、翼城四县交界地带。其地理坐标为东经111°51'10"—112°5'35",北纬35°16'30"—35°27'20"^[21],总面积248km²。保护区地处暖温带季风性大陆性气候区,植被类型丰富多样,自然生态系统较为完整^[22]。特别是核心区内的混沟原始森林,生态系统稳定,生物多样性指数高,被誉为“华北动植物资源基因库”。区域海拔范围为685—2320m,年降水量大约在600—800mm之间^[23]。

历山自然保护区作为秦岭以北生物多样性最丰富的地区之一,据最新研究数据,保护区内共有高等植物1700余种,野生动物580余种,其中包括许多珍稀物种。在该保护区中分布着国家一级保护动物,如华北豹(*Panthera pardus japonensis*)、黑鹳(*Ciconia nigra*)、金雕(*Aquila chrysaetos*)、褐马鸡(*Crossoptilon mantchuricum*)和草原雕(*Aquila nipalensis*)。此外,保护区内还存在其他重要保护物种,包括但不限于猕猴(*Macaca mulatta*)、红腹锦鸡(*Chrysolophus pictus*)等^[24]。如此高度的生物多样性,使得历山自然保护区成为生态系统研究和生物保护的重要基地^[25]。

1.2 物种分布数据

物种分布数据源自以往华北豹研究文献^[26]、相关资讯收集并结合2022年至2023年收集所得到的华北豹活动位点。使用ArcGIS10.4对研究区域进行30m×30m的划分,并利用邻域分析中的缓冲区模块对分布数据点进行剔除,保证每个栅格仅有一个分布点,避免人为因素导致分布点过多而出现过度拟合现象,最终获得总计34个有效位点用于物种分布模型分析(图1)。

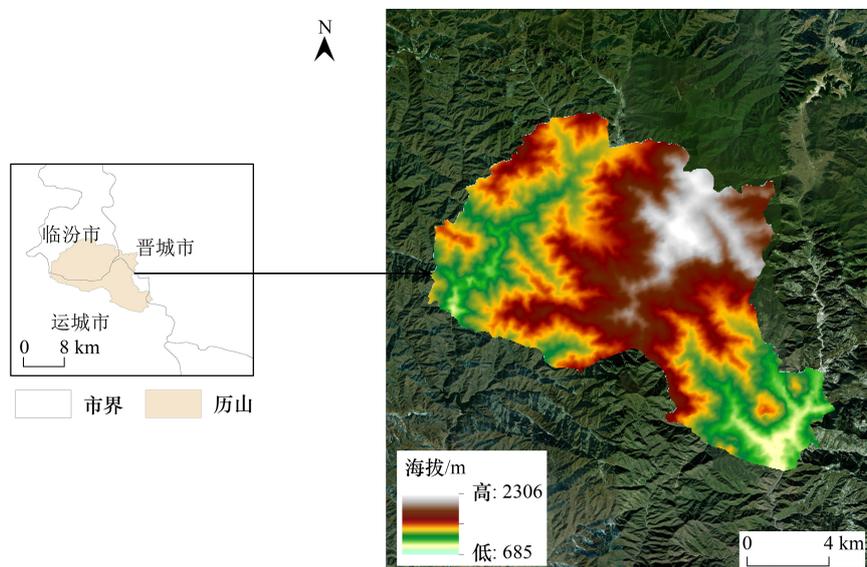


图1 研究区及其海拔示意图

Fig.1 Study area and elevation map

1.3 环境数据

本研究针对华北豹栖息地选择气候数据、环境数据、人为干扰数据等协变量进行后续分析。其中,包括 WorldClim2.1 版的 19 个气象因子 (<http://www.worldclim.org>),分辨率为 1km。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)下载来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),分辨率为 1km。数字高程数据(digital elevation model, DEM)来源于地理空间数据云的 ASTER GDEM v3 数据集(<http://www.gscloud.cn>),分辨率为 30m。基于 DEM,在 ArcGIS 中获得坡度数据、坡向数据。距道路数据与距水源数据下载自 OSM(<https://www.openstreetmap.org>),数据年份为 2022 年,并在 ArcGIS 中利用欧式距离生成 30m 分辨率的栅格数据参与模型计算。土地利用数据选择空天院 30m 土地利用数据集(<https://zenodo.org/records/8239305>),分辨率为 30m。人为干扰因子方面,本文选取距道路距离、距居民点距离、距耕地距离,数据源自全国地理信息资源目录服务系统 1:25 万(<https://www.webmap.cn/main.do?method=index>)。崎岖度数据来源 Amatulli 等(2018)研发的全球地形数据(<http://www.earthenv.org/topography>),该产品基于全球 250m GMTED2010 数字高程模型产品得出,分辨率为 1km^[27]。

针对环境因子过多导致的模型拟合,结合皮尔逊相关性系数实验,最终确定参与模型预测的环境变量为土地利用数据、DEM、NDVI、距河流距离、崎岖度、距居民点距离、降水量变异系数(BIO15)总共 8 种环境数据。其中,所有数据的相关性均小于 0.81,意味着各环境因子间不具有较强的线性相关性,避免了环境因子造成的模型预测过度拟合^[28]。考虑到模型对环境尺度要求,所有环境数据通过重采样分辨率至 30 米。

1.4 模型构建

本研究在 R4.3.3 环境下利用 SSDM 包 0.2.9 版本实现 ESDM 的构建^[29],ESDM 加权集成计算公式如下^[29]:

$$W_j = \frac{r_j}{\sum_{j=1}^h r_j}$$

式中, W_j 表示第 j 个模型的权重,通过第 j 个模型的 AUC 值与所有模型 AUC 值总和的比值确定; r_j 表示第 j 个单一模型的 AUC; h 表示 AUC 值大于 0.85 的单一模型总个数。

SDM 包括人工神经网络模型(Artificial Neural Network, ANN)、RF、最大熵模型(Maximum Entropy Modeling, MaxEnt)、GLM、SVM、广义相加模型(Generalized additive model, GAM)、多元自适应回归样条(Multivariate adaptive regression splines, MARS)、分类树分析(Classification tree analysis, CTA)、广义提升回归模型(Generalized boosted regressions model, GBM)。本文首先通过对不同 SDM 进行预测工作,选择出表现出色的 SDM 进行加权集成。ESDM 随机拆分出 80%的物种分布数据作为模型的训练集,剩余的 20%物种分布数据作为测试集,并通过自举检验重复 10 次。在自举检验技术中,每次抽取与原始数据大小相等的样本并将其用于训练数据时,均需重复进行替换抽样。为了消除运行次数的影响,设置重复次数 100 次。模型预测结果以栅格数据格式呈现,栅格值范围从 0 到 1,表示从不适宜到最优栖息地。并利用 SSDM 包中默认的刀切法(Jackknife)对参与模型计算的环境因子贡献度量,并分析该区域华北豹的环境偏好。

本研究通过计算生态研究中广泛使用的两个指标来评估 ESDM 预测性能,即受试者工作特征曲线下面积(AUC)^[30]和真实技能统计量(TSS)^[31]。其中 AUC 的范围为[0.5, 1],其值越接近于 1,表示模型拟合度越高,模型与解释变量之间的相关性越强;反之则表示模型预测效果越差,越接近于随机估计;TSS 的取值范围为[0, 1],其值越接近于 1,模型预测效果越好,反之则表示模型预测效果越差。

2 结果

2.1 SDM 评估结果

所有 SDM 预测结果的评价指标如图 2 所示。其中,SDM 预测结果的 AUC 范围在 0.835 至 0.917 之间,表

现最好的 SDM 为 ANN。TSS 指标除 MaxEnt 以外,其余 SDM 的指标均大于 0.5。综合评价指标分析,本文构建的 SDM 均达到“良好”的预测性能。考虑到 AUC 评价指标不受阈值影响且广泛应用^[32],本研究选择以 AUC 为主,TSS 为辅选择表现较为良好的单一 SDM(ANN、SVM、RF、MaxEnt、CTA)作为 ESDM 的集成对象。

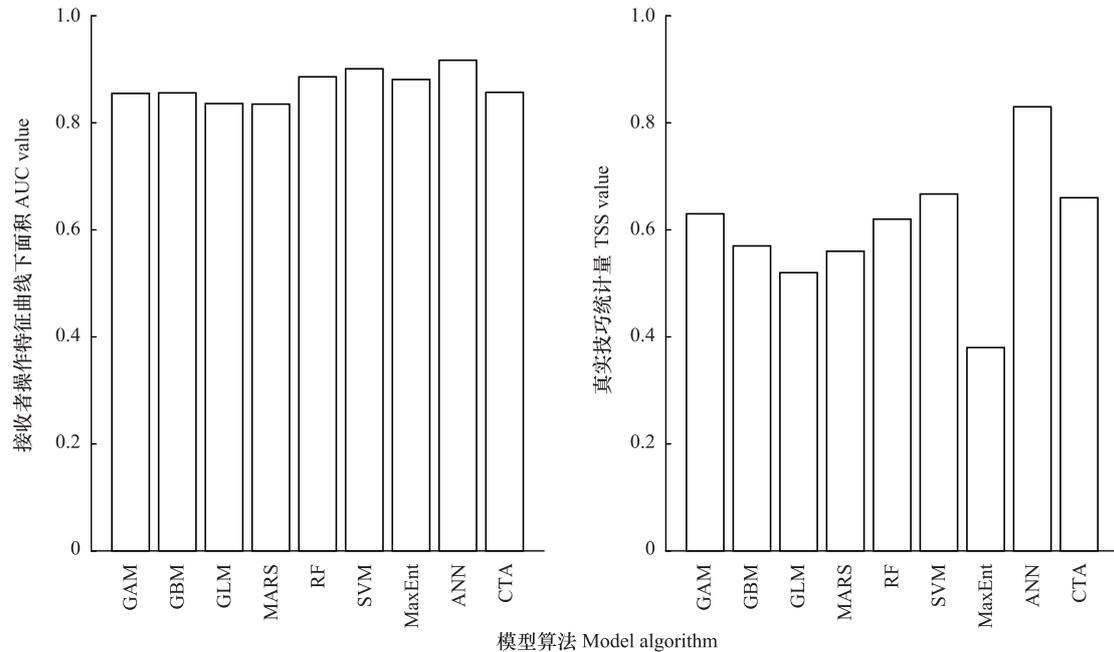


图 2 各个模型预测结果评价指标示意图

Fig.2 Schematic diagram of the evaluation indicators of the prediction results of each model

AUC:受试者工作特征曲线下面积 Area under the curve;TSS:真实技能统计量 True skill statistic;GAM:广义相加模型 Generalized additive model;GBM:广义提升回归模型 Generalized boosted regressions model;GLM:广义线性模型 Generalized linear model;MARS:多元自适应回归样条 Multivariate adaptive regression splines;RF:随机森林 Random forest;SVM:支持向量机 Support vector machines;MaxEnt:最大熵模型 Maximum entropy;ANN:人工神经网络 Artificial neural network;CTA:分类树分析 Classification tree analysis

2.2 ESDM 预测结果

对 ESDM 预测结果的评估显示,其 AUC 值为 0.87,TSS 为 0.56。这表明模型的预测精度达到“良好”,其预测能力较强,能够较准确地地区分物种的区域存在与不存在的。综合分析两个指标,结果显示该模型结果具备有效性,可以用于后续适宜栖息地的分析。

ESDM 预测结果空间分布如图 3 所示,根据自然断点法,将预测结果分为不适宜栖息地(0—0.299)、低适宜栖息地(0.299—0.455)、中适宜栖息地(0.455—0.643)、高适宜栖息地(0.643—1)四部分。结果显示,高适宜栖息地占保护区总面积的 34.63%,面积约为 85.7km²。中适宜栖息地占比为 19.11%,面积约为 47.41km²。整体中高适宜栖息地被保护区中部的低适宜和不适宜栖息地分割,呈现东西两侧分布。高适宜栖息地相对集中在保护区的西侧,面积较大且连续,东侧的少量高适宜栖息地呈现出破碎化分布。

2.3 ESDM 环境因子贡献度分析与响应曲线

ESDM 环境因子贡献度显示,DEM、NDVI、降水量

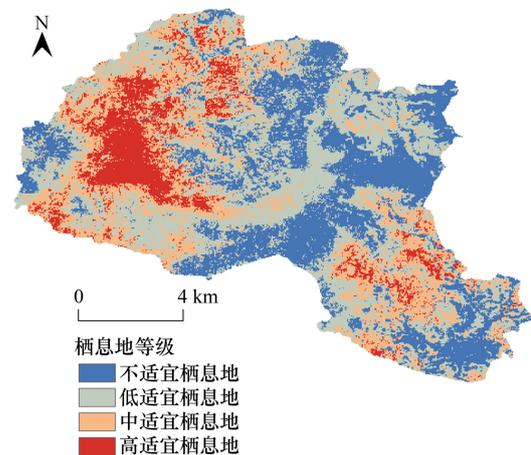


图 3 ESDM 预测适宜栖息地分布示意图

Fig.3 Schematic of the distribution of suitable habitat predicted by ESDM

变异系数(BIO15)的贡献度为 21.91%、16.66%、14.25%, 累计贡献度占据所有环境因子贡献度 52.82%, 其余环境因子中贡献度排序为坡度(11.35%)>距河流距离(9.64%)>崎岖度(9.62%)>距居民距离(9.54)>土地利用数据(6.83%)(图 4), 表明 DEM、NDVI、BIO15 三个因子对历山华北豹栖息地选择具有重要影响且存在明显偏好。各环境因子响应曲线表明, 华北豹偏好海拔 800—1400m、NDVI 值超过 0.5、降水量系数较大区域(图 5)。

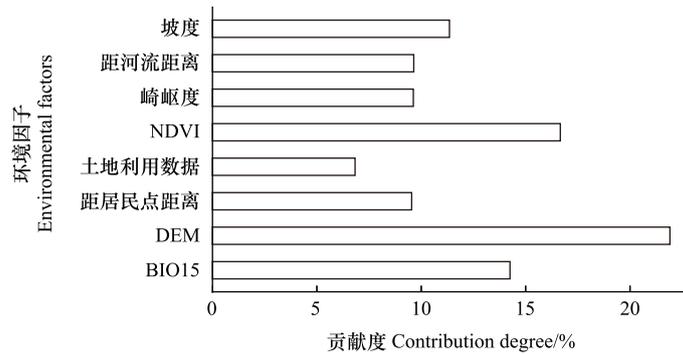


图 4 环境因子贡献度示意图

Fig.4 Environmental factors schematic of contributions

NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; DEM: 数字高程模型 Digital elevation model; BIO15: 降水量变异系数 Precipitation seasonality

3 讨论

3.1 历山华北豹栖息地分布情况

本研究模型预测栖息地结果表明,保护区整体栖息地空间分布上呈现东西两侧分割并伴随一定程度的破碎化。预测结果中整体中高适宜栖息地占总面积约 46%, 其中,高适宜栖息地占总面积的 30.4% 约为 75.39km²;中适宜栖息地占比为 15.9%, 约 39.43km²。占据近半面积的中高适宜栖息地意味着,保护区有效地保存了相对完整、优质栖息地。这有助于维持种群稳定性,增强应对环境变化的能力。

针对保护区东西两侧中高适宜栖息地的分割现状,结合保护区内的自然环境因子,本研究认为,保护区仍然存在相互扩散潜力。但值得注意的是,在考虑到距居民点距离、距道路距离等人为干扰因子后,本研究发现东边区域受到人类活动的影响较为显著,这可能成为限制保护区两侧华北豹扩散的关键因素之一。鉴于华北豹属于扩散距离相对较大的物种,本研究认为,保护区东西两侧的中高适宜栖息地具备连通的潜力。然而,当前仍需采取更为有力的措施限制人类活动,以促进华北豹在该区域的扩散。

3.2 历山华北豹环境偏好与响应

环境响应结果显示,海拔、植被是影响华北豹栖息地选择的主要原因(图 5)。海拔作为贡献度最高的影响因子,华北豹偏好中海拔区域,当海拔从 800m 升至 1000m 时栖息地适宜性指数出现较大提升,这与 Wang 的研究存在一定相似性^[33]。本文认为华北豹偏好中海拔区域可能受食物资源、人为影响等原因影响,这是一种综合多方面因素的结果。结合该保护区人为干扰数据,包括居民点距离、距耕地距离、距道路距离等,本研究发现,在低海拔区域人类干扰较大,可能导致猎物资源减少。结合本研究数据,中海拔区域原麝等有蹄类分布数据较多。为获取更高质量的食物,华北豹可能选择往更高的海拔区域迁移,这与部分研究结论相似^[34]。相较于高海拔区域的植被较少,中海拔区域的植被生长条件相对较好,能够为华北豹的主要猎物孢、野猪等有蹄类提供高质量的栖息环境。并且该区域分布着面积较大的阔叶林,符合豹以树木、灌丛作掩护伏击猎物的习性。综合生态因素的影响,这使得海拔成为影响华北豹栖息地选择的重要因素。

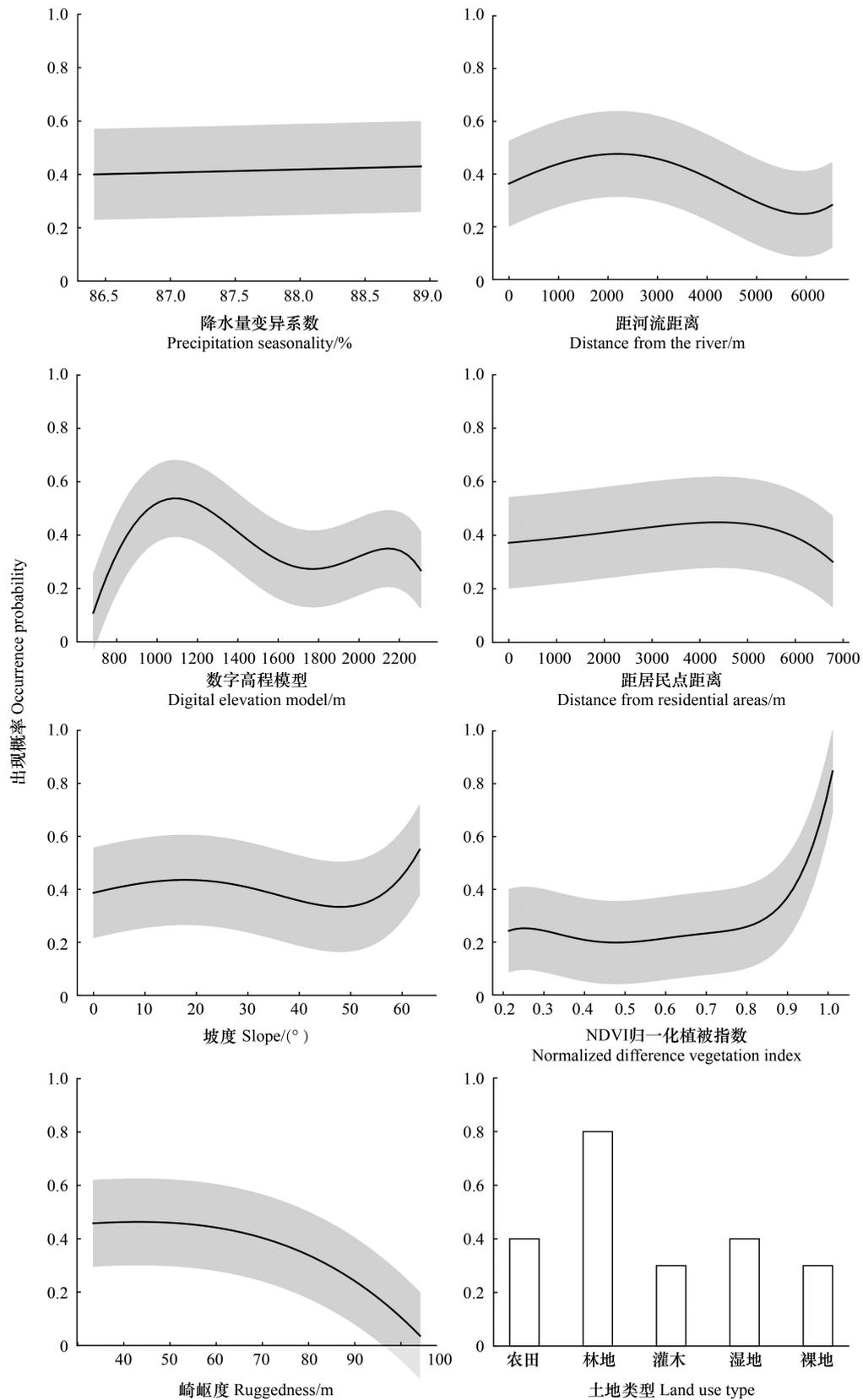


图 5 各环境因子响应曲线

Fig.5 Response curves of various environmental factors

灰色阴影部分:平均响应±标准差

NDVI 作为第二大影响因子,与华北豹栖息地适宜性呈现明显正相关。研究表明,华北豹优先选择 NDVI 较大区域作为栖息地,栖息地适宜性随着 NDVI 在 0.6—0.8 之间的提高出现一定程度的提高。当 NDVI 达到 0.8 后,栖息地适宜性出现较大提升,这与其他地区华北豹的植被条件喜好相似^[34-35]。这意味着,退耕还林、天然林保护工程等工作能有效地保护华北豹栖息地适宜性,对恢复华北豹种群数量工作具有重要意义。

此外,在居民点距离响应方面,本研究发现华北豹没有表现出显著的回避倾向。分析环境图层与预测结果,随着距居民点距离的增加华北豹栖息地适宜性呈现一定的上升趋势,这种趋势会保持到 4000m 的范围。然而,超过 4000m 后适宜性会出现一定程度的下降。这种情况与其他保护区华北豹研究相互印证,例如,六盘山地区的华北豹适宜栖息地主要沿六盘山东西两侧山脉分布,部分区域可能靠近居民点,但由于其具备成熟的植被和崎岖的地势等条件,华北豹仍可能在此栖息^[35]。因此,我们需关注其在历山区域的活动,特别是可能由于栖息地居民接近而引发的人兽冲突风险。这一现象提醒我们在未来的保护管理中,应更好地预防和处理可能发生的冲突,确保华北豹与人类的共存。

与其他研究中土地利用数据对栖息地影响程度较大不同^[36-39],本研究发现其贡献度较低,这种差异可能源于数据本身,通过对华北豹存在点的土地利用类型数据进行深入分析,我们发现除个别点位于常绿针叶林区域外,其余大部分存在点均分布于落叶阔叶林区域。这种土地利用数据差异不明显,可能导致模型在分析华北豹生境选择与土地利用类型关系时,未充分发挥该类型对华北豹分布的显著影响,因此土地利用数据在本研究中的贡献度相对较低。尽管如此,我们仍然不能忽视土地利用类型数据的潜在影响,Dong 等人提出了土地利用类型对华北豹的威胁^[40],这进一步提醒我们要充分认识到土地利用类型在华北豹生存环境中的重要性,即使在当前研究中其贡献度表现不高,我们也应持续关注并深入研究土地利用类型与华北豹之间的复杂关系,以便为更好地保护华北豹及其生存环境提供更有价值的科学依据。

3.3 保护管理策略

本文结合现阶段保护区区域划分情况与预测结果的中高适宜栖息地分布情况(图 6)分析。结果显示,东西侧核心区与缓冲区的设置与中高适宜栖息地相契合,能够在一定程度上满足华北豹栖息地保护需求。然而,仍有部分适宜栖息地所在区域没有被设置为核心区。本文建议,有必要对保护区针对华北豹保护策略实施动态调整,以更好地应对栖息地的变化。例如,可以建立更加科学的监测机制,实时掌握华北豹栖息地的变化情况,以便及时调整保护区的范围和功能分区。同时,考虑到保护区实际面积与华北豹扩散距离,本研究建议加强保护区与周边地区的合作,共同保护华北豹的栖息地,形成更大范围的生态保护网络。此外,针对保护区东西两侧中高适宜栖息地被低适宜区分割情况,本文建议加强对东西两侧中高适宜栖息地之间生态廊道的建设与维护,以促进华北豹在不同区域之间的活动与交流,增强种群的基因流动。同时,应进一步加大对保护区的管理力度,严格控制人类活动对生态廊道的干扰,减少对华北豹扩散的影响。此外,可以通过开展生态修复工程,提升低适宜区的生态质量,逐步扩大中高适宜栖息地的范围,为华北豹创造更加良好的生存环境。

参考文献(References):

- [1] Block W M, Brennan L A. The habitat concept in ornithology: theory and applications//Power D M, ed. Current Ornithology. Boston, MA: Springer US, 1993, 11: 35-91.

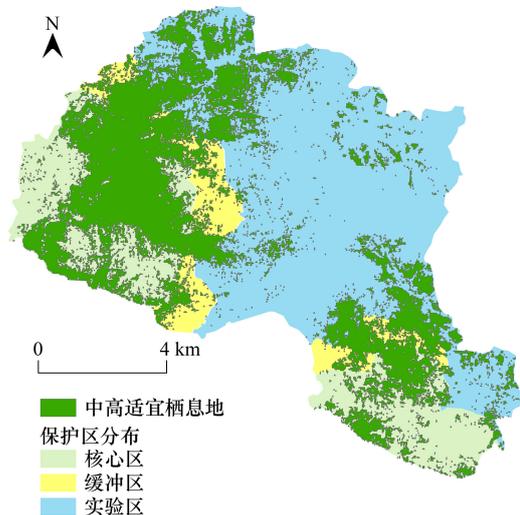


图 6 保护区分区与中高适宜栖息地示意图

Fig.6 Schematic diagram of protected area zoning and medium-high suitable habitats

- [2] Banks-Leite C, Ewers R M, Folkard-Tapp H, Fraser A. Countering the effects of habitat loss, fragmentation, and degradation through habitat restoration. *One Earth*, 2020, 3(6): 672-676.
- [3] Costanza J K, Terando A J. Landscape connectivity planning for adaptation to future climate and land-use change. *Current Landscape Ecology Reports*, 2019, 4(1): 1-13.
- [4] Mainali K P, Warren D L, Dhileepan K, McConnachie A, Strathie L, Hassan G, Karki D, Shrestha B B, Parmesan C. Projecting future expansion of invasive species: comparing and improving methodologies for species distribution modeling. *Global Change Biology*, 2015, 21(12): 4464-4480.
- [5] Ramirez-Villegas J, Cuesta F, Devenish C, Peralvo M, Jarvis A, Arnillas C A. Using species distributions models for designing conservation strategies of Tropical Andean biodiversity under climate change. *Journal for Nature Conservation*, 2014, 22(5): 391-404.
- [6] 李文,蒲艳,田辉伍,邓华堂,成必新,孙干,刘绍平,陈大庆,段辛斌.黑水河红尾副鲈时空分布特征及其最适生境条件. *中国水产科学*, 2023, 30(4): 515-524.
- [7] Liu Y, Tian J W, Zheng W F, Yin L R. Spatial and temporal distribution characteristics of haze and pollution particles in China based on spatial statistics. *Urban Climate*, 2022, 41: 101031.
- [8] 毕雅琼, 张明旭, 陈元, 王爱祥, 李旻辉. 基于 Biomod2 组合模型的中国野生芍药 *Paeonia lactiflora* 适宜生境分布. *中国中药杂志*, 2022, 47(2): 376-384.
- [9] Hao T X, Elith J, Guillerá-Arroita G, Lahoz-Monfort J J. A review of evidence about use and performance of species distribution modelling ensembles like BIOMOD. *Diversity and Distributions*, 2019, 25(5): 839-852.
- [10] Araújo M B, New M. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, 22(1): 42-47.
- [11] Miththapala S, Seidensticker J, O'Brien S J. Phylogeographic subspecies recognition in leopards (*Panthera pardus*): molecular genetic variation. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1115-1132.
- [12] Meißner R, Blumer M, Weiß M, Beukes M, Aramayo Ledezma G, Condori Callisaya Y, Aramayo Bejarano J L, Jansen M. Habitat destruction threatens jaguars in a mixed land-use region of eastern Bolivia. *Oryx*, 2024, 58(1): 110-120.
- [13] Zhu M Y, Zaman M, Wang M, Vitekere K, Ma J Z, Jiang G S. Population density and driving factors of North China leopards in Tie Qiao Shan nature reserve. *Animals*, 2021, 11(2): 429.
- [14] Krishnendu M, Subhadeep B Shilpi G, Kalyanasundaram S, Qamar Q. Home range and resource selection of "problem" leopards trans-located to forested habitat. *Current Science* 2013, 105(3): 338-345.
- [15] Stein A B, Athreya V, Gerngross P, Balme G, Henschel P, Karanth U, Miquelle D, Rostro-Garcia S, Kamler JF, Laguardia A, Khorozyan I, Ghodousi A. IUCN Red List of Threatened Species; *Panthera pardus*. IUCN Red List Threat. Species, 2020.
- [16] 郎彩琴. 浅析山西历山国家级自然保护区野生动物栖息地保护. *山西林业*, 2023(4): 54-55.
- [17] 韦怡. 华北豹恐惧效应下豹猫的食物组成研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
- [18] 刘佳影. 金钱豹个体识别与保护措施研究. *山西林业*, 2018(1): 24-25.
- [19] Liang G F, Li Y, Zhou L N. Promoting the conservation of the leopard in North China based on habitat suitability and connectivity. *Global Ecology and Conservation*, 2024, 50: e02817.
- [20] Zhu M Y, Zhao Y, Wang M, Zaman M, Jiang G S. Response of wildlife communities to human activities in the distribution area of the North China Leopard. *Global Ecology and Conservation*, 2024, 51: e02872.
- [21] 张金屯, 张峰, 上官铁梁. 中条山植被垂直带谱再分析. *山西大学学报(自然科学版)*, 1997, 20(1): 76-79.
- [22] 刘晓铃, 谢树莲. 山西历山自然保护区野生观赏植物研究. *山西大学学报: 自然科学版*, 2005, 28(2): 89-92.
- [23] 张峰, 张金屯, 张峰. 历山自然保护区猪尾沟森林群落植被格局及环境解释. *生态学报*, 2003, 23(3): 421-427.
- [24] 刘越. 山西历山国家级自然保护区固定样线调查. *中国林业产业*, 2024(5): 61-63.
- [25] 侯永平. 历山自然保护区野生资源植物及保护. *山西农业科学*, 2018, 46(4): 612-615.
- [26] Amatulli G, Domisch S, Tuanmu M N, et al. A suite of global, cross-scale topographic variables for environmental and biodiversity modeling. *Scientific data*, 2018, 5(1): 1-15.
- [27] 李艳. 基于周期性特征的华北豹栖息地利用强度与鸟兽多样性之间的关系研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
- [28] 陈敏豪, 张超, 王嘉栋, 湛振杰, 陈君帆, 栾晓峰. 北美水貂和欧亚水獭在东北地区的分布与生态位重叠. *生物多样性*, 2023, 31(1): 183-193.
- [29] Schmitt S, Pouteau R, Justeau D, de Boissieu F, Birnbaum P. Ssdm: an r package to predict distribution of species richness and composition based on stacked species distribution models. *Methods in Ecology and Evolution*, 2017, 8(12): 1795-1803.
- [30] Drew C, Wiersma Y, Huettmann F. Predictive species and habitat modeling in landscape ecology: concepts and applications. 2011.
- [31] Guisan A, Zimmermann N E. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 2000, 135(2/3): 147-186.
- [32] Guo Y L, Li X, Zhao Z F, Nawaz Z. Predicting the impacts of climate change, soils and vegetation types on the geographic distribution of *Polyporus umbellatus* in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 1-11.
- [33] Wang Y D, Liu M Z, Xia F, Wang Y Q, Song D Z, Liu Y L, Li S. Big cats persisting in human-dominated landscape: habitat suitability and connectivity of leopards in central North China. *Landscape Ecology*, 2024, 39(5): 94.
- [34] Wang Y D, Liu M Z, Xia F, Li S. Human activities reshape the spatial overlap between North Chinese leopard and its wild ungulate prey. *Frontiers in Zoology*, 2024, 21(1): 24.
- [35] 王双贵, 郭志宏, 顾伯健, 李天醒, 苏玉兵, 马伯丞, 管宏信, 黄巧雯, 王放, 张卓锦, 六盘山华北豹的栖息地利用及保护建议. *生物多样性* 2022, 30(9): 163-173.
- [36] 满慧, 黄保祥, 齐进哲, 姜广顺. 蟒河国家级自然保护区华北豹栖息地选择. *野生动物学报*, 2022, 43(3): 585-594.
- [37] 金瑜, 王娟, 杨玥, 杨雄伟, 马惠敏. 云南思茅土地利用变化方式对亚洲象栖息地的影响. *林业资源管理*, 2023, (3): 46-55.
- [38] 陈玉美, 马月伟, 潘健峰, 陈艳. 夹金山脉大熊猫栖息地土地利用变化对生境质量的影响. *东北林业大学学报*, 2022, 50(9): 97-104.
- [39] 王春晓, 何建华, 刘殿锋, 于秀波, 石青青. 土地利用变化对鸟类栖息地连通性的影响——以鄂州市为例. *生态学报*, 2022, 42(10): 4197-4208.
- [40] Dong X H, Ju T. New farmlands threaten the North China leopard. *Science*, 2023, 380(6651): 1230.