

# 祁连山国家公园甘肃片区雪豹 栖息地廊道研究

朱高红<sup>④</sup> 胡大志<sup>④</sup> 马堆芳<sup>④</sup> 张俊涛<sup>④</sup> 王东武<sup>④</sup> 张广文<sup>④</sup>  
阿诚<sup>④</sup> 王亮<sup>④</sup> 马晨迪<sup>⑤</sup> 戴强<sup>①③</sup> 王义弘<sup>①②③\*</sup>

① 中国科学院成都生物研究所 成都 610041; ② 中国科学院西北高原生物研究所 西宁 810001;

③ 中国科学院大学 北京 100049; ④ 甘肃祁连山国家级自然保护区管护中心 张掖 734099;

⑤ 深圳市一个地球自然基金会 深圳 518000

**摘要:** 雪豹 (*Panthera uncia*) 是高山流石滩等山地生境生物多样性的旗舰物种, 对维持高山生态系统结构和功能稳定性起着重要作用。近年来雪豹种群数量有所恢复, 但多种因素导致的栖息地破碎化仍对雪豹的种群生存造成威胁。建立廊道可将分散的栖息地斑块连接起来, 提高雪豹抵抗干扰的能力, 并为雪豹的长期生存提供重要保障。本研究以祁连山国家公园甘肃张掖分局保护片区及其 15 km 缓冲区为研究区域, 基于祁连山国家公园甘肃张掖分局保护片区雪豹分布点数据, 选取气候、地形和土地利用等环境变量, 运用 MaxEnt 模型对雪豹栖息地适宜度进行分析并划定生态源地, 而后基于最小代价路径原理识别雪豹廊道。结果显示, 研究区域内雪豹适宜栖息地面积为 13 432.066 km<sup>2</sup>, 分布在片区内的适宜栖息地面积为 7 086.195 km<sup>2</sup>, 占适宜栖息地总面积的 52.756%。崎岖度、最干季度平均温度和季节降雨变异系数是影响雪豹栖息地选择的关键因子。通过分析, 最终划定 9 个生态源地用于后续廊道识别规划。在研究区域内共识别 10 条潜在生态廊道, 廊道最长为 18.725 km, 最短为 0.368 km, 平均廊道长度为 5.676 km。其中 3 条廊道连接片区内雪豹适宜栖息地斑块, 5 条廊道连接该片区与青海片区雪豹栖息地。基于上述结果, 我们建议在提升片区内雪豹适宜栖息地之间整体连接度的同时, 与青海省共同开展跨界保护工作, 以制定更加科学合理的保护与管理计划。

**关键词:** 雪豹; 栖息地; MaxEnt 模型; 最小代价路径原理; 廊道

**中图分类号:** Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2024) 04-493-12

## A Study of Snow Leopard *Panthera uncia* Habitat Corridors in Qilian Mountain National Park (Gansu Area)

ZHU Gao-Hong<sup>④</sup> HU Da-Zhi<sup>④</sup> MA Dui-Fang<sup>④</sup> ZHANG Jun-Tao<sup>④</sup>  
WANG Dong-Wu<sup>④</sup> ZHANG Guang-Wen<sup>④</sup> A Cheng<sup>④</sup> WANG Liang<sup>④</sup>  
MA Chen-Di<sup>⑤</sup> DAI Qiang<sup>①③</sup> WANG Yi-Hong<sup>①②③\*</sup>

**基金项目** 国家自然科学基金项目 (No. 32070520), GEF 国家公园体制机制创新项目大熊猫国家公园四川省试点示范项目;

\* 通讯作者, E-mail: 739572228@qq.com;

**第一作者介绍** 朱高红, 男, 林业高级工程师; 研究方向: 自然保护区管理及国家公园管理; Email: 446279303@qq.com.

收稿日期: 2023-09-27, 修回日期: 2024-04-13 DOI: 10.13859/j.cjz.202423186

- ① *Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041*; ② *Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001*; ③ *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*;  
④ *Management and Protection Center of Qilianshan National Nature Reserve, Zhangye 734099*;  
⑤ *Shenzhen One Planet Foundation, Shenzhen 518000, China*

**Abstract: [Objectives]** The Snow Leopard *Panthera uncia* is one of the world's rare and endangered species and is vital in maintaining alpine ecosystems' structural and functional stability. In recent years, grazing and other disturbances have led to the fragmentation of the Snow Leopard's habitat and threatening the population's survival. In order to protect and recover this species, conducting habitat suitability evaluation and building ecological corridors that connect scattered patches of habitat are essential for safeguarding its long-term survival. **[Methods]** The study area of this research are the Qilian Mountain National Park (Gansu area) and its 15 km buffer zone. A predictive habitat distribution map of Snow Leopards was estimated using the MaxEnt model with a total of 64 occurrence locations (Fig. 1) which were collected by camera monitoring and survey between 2018 and 2020 and environmental factors. The distribution of potential habitat and its relationship with major environmental factors were analyzed with MaxEnt 3.4.1. The accuracy of the result produced by the model with area was evaluated by receiver operating characteristic, ROC (area under the curve, AUC). The importance and contribution of environmental factors to the model's prediction were evaluated by the Jackknife test. Suitable habitat distribution was indicated by habitat suitability index (HSI). Ecological corridors for Snow Leopards were identified and planned using the least-cost path model (LCP). **[Results]** The results of the Jackknife test showed that three variables, roughness, mean temperature of driest quarter, and precipitation seasonality were the key factors influencing the distribution of Snow Leopards (Fig. 3), with a value of contribution of 45.936%, 17.078% and 11.519%, respectively (Table 1). The suitable habitat was positively correlated with the roughness, and the occurrence probability of Snow Leopards remained unchanged when the roughness exceeded about 200. The relationship between suitable habitat and mean temperature of driest quarter and precipitation seasonality were humped (Fig. 4). The suitable habitat area of Snow Leopards in the study area was 13 432.066 km<sup>2</sup>, and the suitable habitat distributed in the park was 7 086.195 km<sup>2</sup>, accounting for 52.756% of the total suitable habitat area (Fig. 5b). According to habitat suitability analysis and population distribution of Snow Leopard, 9 core habitat patches were identified and 10 potential ecological corridors for Snow Leopard migration were delineated. The longest corridor length was 18.725 km, and the average length was 5.676 km (Fig. 6). Three of these corridors connected suitable Snow Leopard habitat patches within the Gansu area, and five connected the habitat in the Qinghai area. **[Conclusion]** Based on the results mentioned above, we recommend that efforts should be undertaken to enhance the connectivity between suitable habitats for Snow Leopards. Concurrently, it is advised to collaborate with Qinghai Province to facilitate cross-border conservation initiatives and develop a more scientifically sound and rational plan for protection and management.

**Key words:** Snow Leopard, *Panthera uncia*; Habitat; MaxEnt model; Least-cost path model; Corridors

栖息地是物种赖以生存和繁衍的空间, 是维持其正常生命活动一切环境资源的总和

(Block et al. 1993)。栖息地的质量直接影响着物种的分布, 进而影响着整个生态系统的结

构和功能,因此,保护物种栖息地有助于维持生态系统的稳定,并促进生物多样性的持续发展(Liu et al. 2018)。栖息地保护旨在通过维持或恢复物种的自然生存空间,保持或增加物种的多样性,促进物种与环境之间的良好相互作用(Banks-leite et al. 2020)。结合各生态因子对物种栖息地进行适宜性评价,可明确物种的适宜分布区域并深入了解物种的分布规律(Lham et al. 2021),对于物种保护管理至关重要。

由于气候变化和人类活动的影响,物种的栖息地呈现出破碎化等问题,从而阻止了物种的自由扩散,增加了小种群灭绝的风险(程宏毅等 2006)。廊道是连接物种栖息地的线性或面状景观要素(Spellerberg et al. 1993, Brookes 1997),被视为有效保护生物多样性的景观管理策略之一(Mann et al. 1995)。构建生态廊道可以把破碎化或者分布相对松散的动物栖息地斑块连接起来,使得动物在栖息地斑块之间安全且自由地扩散或迁徙,保障区域生态系统的联通性与完整性(LaPiont et al. 2013),防止种群隔离并最终降低种群灭绝的风险(Mech et al. 2001)。廊道可以增加物种的栖息范围(Gilbert-norton et al. 2010),并增强种群的抗干扰能力以应对不断变化的环境,对改善生态环境、维护生态安全具有重要意义(Heller et al. 2009)。

雪豹(*Panthera uncia*)起源于青藏高原,是高山流石滩等山地生境生物多样性的旗舰物种,为国家一级重点保护野生动物(王彦等 2012),被世界自然保护联盟列为易危物种(McCarthy et al. 2017)。中国是拥有雪豹数量最多的国家,目前中国雪豹的数量占雪豹总数的60%左右(Li et al. 2014)。雪豹位于食物链顶端,对维持生态系统结构和功能的稳定具有重要作用,其生存状况可以很好地反映所在生态系统的健康状况(Li et al. 2016)。栖息地的丧失和破碎化是威胁雪豹生存的主要因素(Li et al. 2020),然而在中国,只有2%的雪

豹栖息地进行过严格意义上的调查(刘沿江等 2019)。祁连山脉分布于甘肃省和青海省,是雪豹等珍稀野生动物的重要栖息地(程一凡等 2019),其生态条件极其脆弱,一旦遭到破坏,很难恢复(李芳菲 2021)。近年来过牧等因素导致并加剧了祁连山雪豹栖息地的退化(覃琳等 2019)。因此,基于雪豹栖息地开展的栖息地适宜性评价和廊道识别分析可为祁连山雪豹保护提供科学依据。

在甘肃省,雪豹主要分布于祁连山区域,以往该区域的研究主要集中在生物多样性(胡大志等 2022)、雪豹生态位(张常智等 2023)、雪豹密度和数量(Alexander et al. 2015)等方面,较少研究雪豹栖息地适宜度分析及廊道识别,这可能会导致对雪豹的保护不足。我国政府在“十四五”相关规划中已明确提出,要通过改善雪豹栖息地质量,建设生态廊道,从而促进其种群数量的恢复(国家林业和草原局 2020)。因此,为明确甘肃地区雪豹的栖息地及廊道分布格局,本研究基于祁连山国家公园张掖分局保护片区雪豹分布位点数据和环境数据,利用最大熵模型(MaxEnt model)开展雪豹栖息地适宜度分析。而后根据最小代价路径原理(least-cost path model, LCP model)识别各生态源地间廊道。本研究可为祁连山国家公园甘肃张掖分局保护片区和其他雪豹分布区内的雪豹及其栖息地的保护管理提供基础资料和科学依据。

## 1 研究区域

祁连山位于青藏高原的东北边缘,是我国重要生态功能区和生物多样性保护优先区域,具有维系青藏高原生态平衡、阻止北部沙漠南侵和补给河西内陆水源的重要作用(胡大志等 2022)。祁连山国家公园地处青海和甘肃两省交界,分为甘肃、青海两个片区(胡大志等 2022)。其中祁连山国家公园甘肃张掖分局保护片区地理位置介于 $93^{\circ}31' \sim 102^{\circ}40' \text{N}$ 、 $36^{\circ}45' \sim 39^{\circ}30' \text{E}$ ,总面积 $19\,800 \text{ km}^2$ ,海拔 $1\,740 \sim 5\,564 \text{ m}$ ,

年平均气温为 0.2 ~ 3.6 °C，年降水量为 200 ~ 500 mm (邸华等 2014)，在行政区划上地跨武威、金昌、张掖三市 6 县(区)。祁连山国家公园甘肃张掖分局保护片区海拔高差大，生物多样性极其丰富，共有高等植物 1 311 种，隶属 95 科 451 属，国家二级保护植物 4 种；共有野生脊椎动物 28 目 63 科 286 种，其中，国家一级保护动物 14 种，国家二级保护动物 39 种 (廖空太 2019)。Johansson 等 (2018) 研究发现，雄性雪豹具有更大的活动区范围，以雄性雪豹的活动区直径作为缓冲距离，可以更好地保护雪豹生存空间并有助于维持整个种群的健康，且其对雪豹活动区面积研究时间跨度较长，雪豹个体样本数量较多，GPS 定位系统记录空间位置准确。因此，本研究采用 Johansson 等 (2018) 的研究结果，以雄性雪豹活动区面积 (225 km<sup>2</sup>) 的直径 15 km 作为祁连山国家公园甘肃张掖分局保护片区缓冲距离，即将边界扩展 15 km 后的区域设定为研究区域。

## 2 研究方法

### 2.1 雪豹出现点数据采集与处理

以 5 km × 5 km 的网格作为地理参照，依据每个网格至少放置 2 台红外相机的布设标准，于 2018 至 2020 年在研究区域内布设 318 台红外相机。同时在每一个调查网格内设置至少 2 km 的调查样线。红外相机有效调查位点数为 100 个，工作总时长为 26 308 d，每台红外相机平均工作时长为 118 d。雪豹记录位点数为 100 个，红外相机拍摄有效雪豹照片数量 2 861 张，其中独立有效照片 575 张。为减少物种分布数据空间自相关性的影响，对雪豹分布点进行 5 km 间距空间稀释，共筛选出 64 个分布点用于 MaxEnt 模型分析 (图 1)。

按照模型要求，所有分布点的坐标在 excel 表中统计后保存为 “.csv” 格式。

### 2.2 环境变量

本研究选取气候因子、地形因子及土地利用等环境变量进行后续分析。19 个生物气候因子

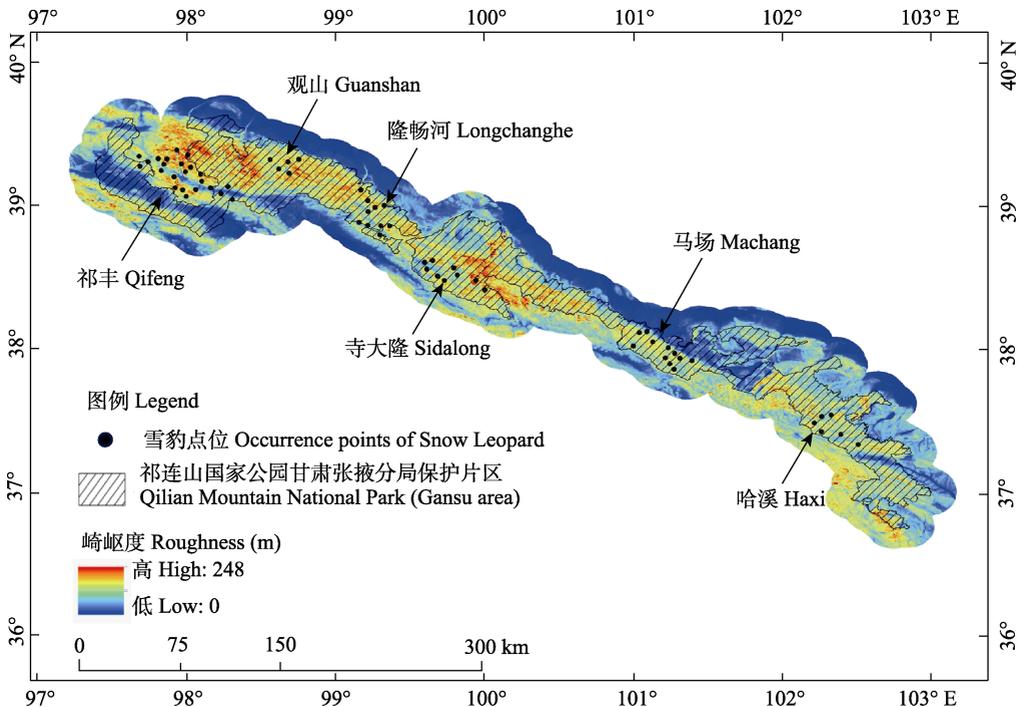


图 1 研究区域雪豹记录点位置

Fig. 1 Occurrence points of *Panthera uncia* in study area

下载自世界气象数据库 (<http://www.worldclim.org/>), 分辨率为 1 km。植被归一化指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 下载自中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>), 分辨率为 1 km。地理高程数据 (digital elevation model, DEM) 下载自地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 分辨率为 90 m。基于 DEM 计算坡度及坡向, 坡度经正弦转换, 坡向经余弦转换用于后续分析。崎岖度数据来源于 Amatulli 等 (2018) 研发的全球地形数据 (<http://www.earthenv.org/topography>), 该产品基于全球 250 m GMTED 2010 数字高程模型产品得出, 分辨率为 1 km。土地利用类型数据来源于清华大学研发的全球地表覆盖产品 FROM-GLC10 (<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>), 分辨率为 10 m, 该数据共有土地类型 10 类, 本文应用除冻土类型外其他所有类别。所有环境变量重采样为 90 m × 90 m 分辨率。分析前对环境因子进行方差膨胀因子 (variance inflation factor, VIF) 评估, 选取 VIF 小于 10 (Zhao et al. 2021) 的环境因子进行后续分析, 以消除空间自相关导致的过拟合。所有环境图层基于 ArcGIS 软件统一边界, 坐标为 WGS-1984-UTM-Zone-47N, 并转换为 “.asc” 格式。

### 2.3 栖息地适宜度分析与生态源地识别

利用雪豹分布点及环境变量数据, 通过最大熵模型 (MaxEnt, version 3.4.1) (Urbani et al. 2015) 分析, 采用 Subsample 方法重复运算 10 次, 以 10 次计算结果的平均值作为栖息地适宜度指数 (habitat suitability index, HSI) (邱兰 2022)。随机选取 75% 分布点建立模型, 25% 分布点验证模型, 并采用刀切法 (Jackknife) 来检验各环境变量对物种分布影响的重要性, 预测结果以 logistic 形式输出 (Shcheglovitova et al. 2013)。采用受试者工作特征曲线下面积 (area under the curve, AUC) 评估模型表现的优劣, 评定标准为: 0.5 ~ 0.6 为不合格; 0.6 ~ 0.7 为较差; 0.7 ~ 0.8 为一般; 0.8 ~ 0.9 为良好; 0.9 ~ 1.0 为优秀 (Phillips et al. 2006)。选取最

大化训练敏感性和特异性 (maximum training sensitivity plus specificity, MTSS) 阈值法 (Liu et al. 2013), 将预测结果重分类为适宜和非适宜栖息地 2 类。

在进行生态源地识别时, 利用 ArcGIS 的 “Eliminate Polygon Part” 功能消除适宜栖息地斑块内的缺失值, 确保生态廊道计算的可行性 (Tian et al. 2022)。由于栖息地面积小于物种活动区面积可能无法支撑物种生存, 故在进行生态源地斑块识别时, 根据雪豹所需较小活动区面积, 剔除面积小于 60 km<sup>2</sup> 的栖息地斑块 (Johansson et al. 2018)。

### 2.4 生态廊道识别

基于物种栖息地适宜度指数, 并根据 Zeller 等 (2012) 的研究, 将栖息地适宜度指数 (HSI) 的倒数作为阻力图层。最小代价路径原理 (LCP) 分析方法需要两个数据层, 一个为 “源” 数据层, 代表合适的栖息地斑块, 假设它们是物种迁移的起点和终点; 一个为成本层, 代表物种在景观中迁移的难易程度, 基于此计算物种的最小代价距离 (李敏 2020)。代价距离的计算通过 Linkage Mapper 3.0 实现。Linkage Mapper 是 ArcGIS 中的一个扩展工具, 用于支持野生动物栖息地连通性的区域分析。

## 3 结果

### 3.1 MaxEnt 模型精度评价

MaxEnt 模型的受试者工作特征曲线 (receiver operating characteristic, ROC) 结果显示, 模型的平均受试者工作特征曲线下面积 (AUC) 值为 0.860, 这表明 MaxEnt 模型预测精度达到 “良好” 水平 (图 2), 能准确反映雪豹种群的分布情况。

### 3.2 环境变量对雪豹分布的影响

由 Jackknife 检验结果可知, 崎岖度、最干季度平均温度和季节降雨变异系数是对预测效果增益最大的三个因子, 表明三者对于雪豹在祁连山国家公园甘肃张掖分局保护片区的栖息地分布影响较大 (图 3)。

通过环境变量对各物种的贡献率可知, 崎

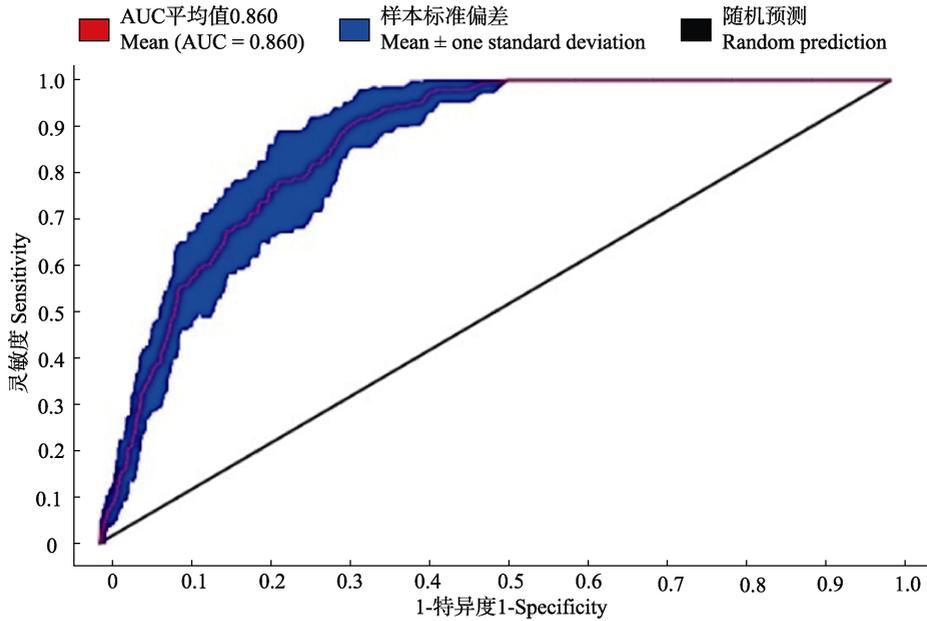


图 2 雪豹潜在分布区预测的受试者工作特征曲线验证

Fig. 2 Receiver operating characteristic (ROC) curve verification of potential distribution prediction of *Panthera uncia*

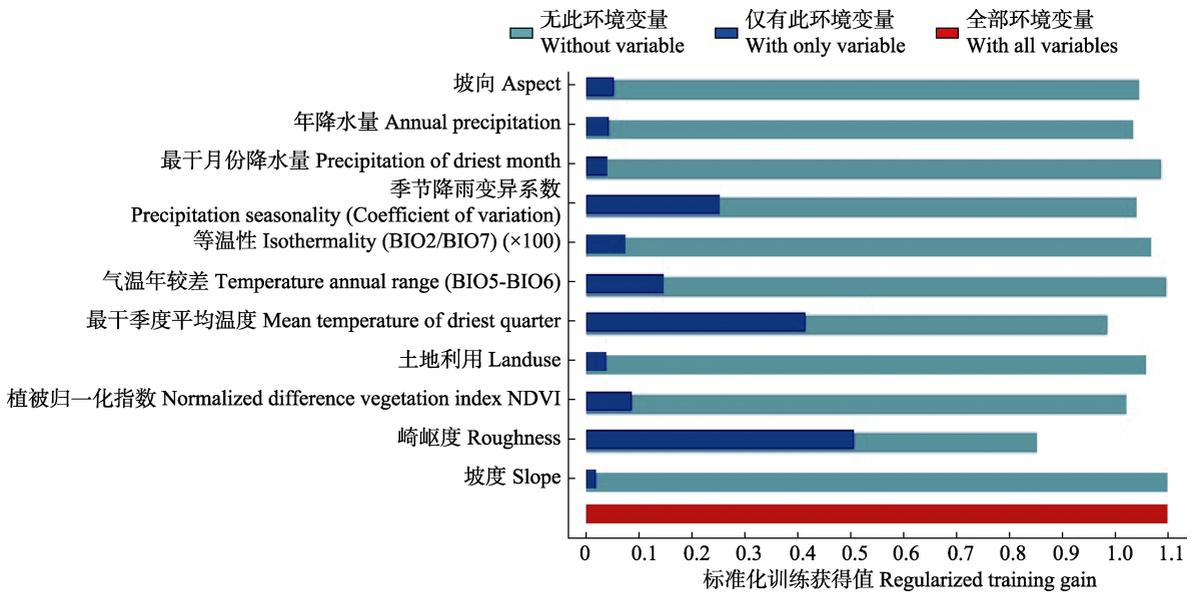


图 3 Jackknife 检验环境因子对雪豹栖息地适宜度的重要性

Fig. 3 Result of Jackknife test for evaluating relative importance of the environmental factors to the *Panthera uncia* habitat suitability index

崎岖度、最干季度平均温度和季节降雨变异系数这 3 个环境变量对雪豹栖息地选择有重要影

响，其综合贡献度分别为 45.936%、17.078%和 11.519%，累计贡献率占有所有环境变量总贡献

率的 74.533% (表 1)。

分析环境变量的响应曲线可以反映雪豹分布受研究区域内环境变量的影响趋势。结果表明, 随着崎岖度的增加, 适宜度指数随之升高, 当崎岖度指数超出约 200 时, 雪豹的出现概率保持不变。在最干季度平均温度适中的地区适

宜度指数最高, 在最干季度平均温度较低和较高的地区雪豹出现概率均减少; 随着季节降雨变异系数的增加, 适宜度指数随之升高, 当季节降雨变异系数大于 110 时, 雪豹的出现概率开始降低, 当季节降雨变异系数达到约 115 时, 雪豹的出现概率保持不变 (图 4)。

表 1 环境变量及其贡献百分率

Table 1 Percent contribution of environmental variables

环境变量 Environmental variables	贡献百分率 (%) Percent contribution	置换重要性 (%) Permutation importance
崎岖度 Roughness	45.936	39.717
最干季度平均温度 Mean temperature of driest quarter	17.078	23.460
季节降雨变异系数 Precipitation seasonality (Coefficient of variation)	11.519	6.765
植被归一化指数 Normalized difference vegetation index NDVI	7.587	8.618
土地利用 Landuse	5.465	2.241
坡向 Aspect	4.685	3.157
年降水量 Annual precipitation	3.775	9.358
等温性 Isothermality (BIO2/BIO7) ( $\times 100$ )	2.495	4.230
最干月份降水量 Precipitation of driest month	0.740	1.743
气温年较差 Temperature annual range (BIO5 - BIO6)	0.719	0.713
坡度 Slope	0.000	0.000

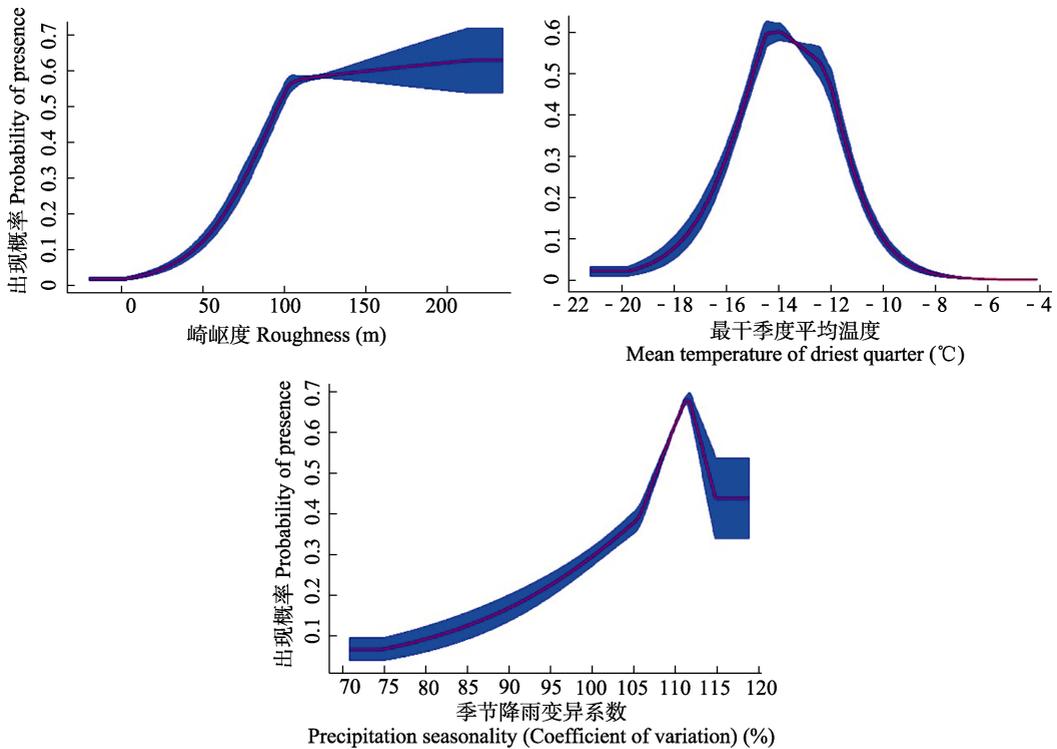


图 4 环境因子对模型预测的响应曲线

Fig. 4 Response curves of environment factors for model prediction

### 3.3 雪豹栖息地适宜性分析

基于 MaxEnt 模型的栖息地适宜度评估方法,发现雪豹在研究区域内均有潜在分布(图 5a)。通过数据最大敏感度和特异性之和确定适宜栖息地划分阈值为 0.225,并利用该阈值对雪豹分布预测概率图进行重分类。结果显示,研

究区域内雪豹适宜栖息地面积为 13 432.066 km<sup>2</sup>,分布在祁连山国家公园甘肃张掖分局保护片区内的栖息地面积为 7 086.195 km<sup>2</sup>,占栖息地总面积的 52.756%,占该片区面积的 39.519%。祁连山国家公园甘肃张掖分局保护片区雪豹适宜栖息地分布相对集中且面积较大,但局部地

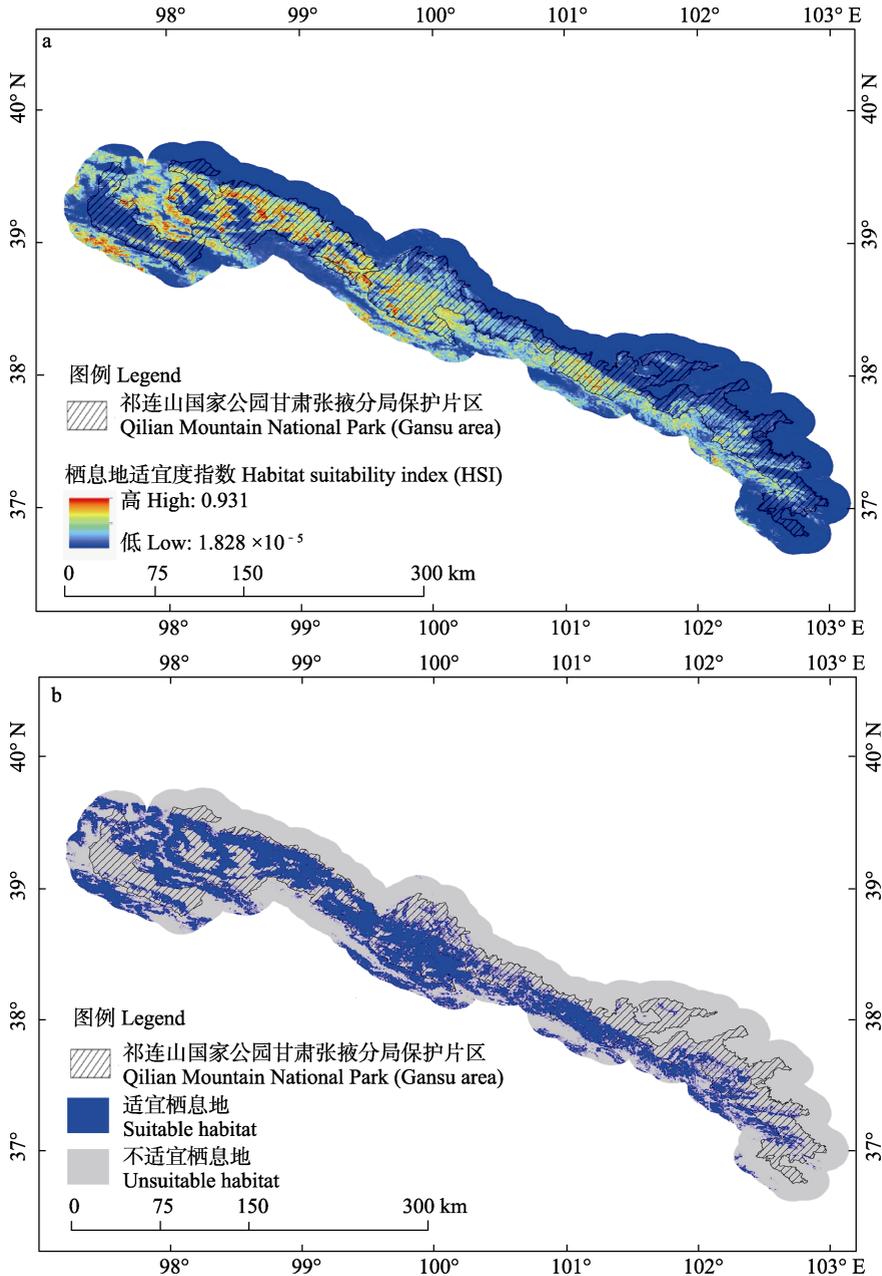


图 5 雪豹潜在分布区预测 (a) 及其适宜栖息地分布 (b)

Fig. 5 Potential distribution prediction of *Panthera uncia* (a) and its suitable habitat distribution (b)

区仍呈现破碎化分布（图 5b）。

### 3.4 生态廊道识别

根据栖息地斑块面积进行生态源地斑块识别，最终有 9 个栖息地斑块用于后续廊道识别规划。其中哈溪区域有 2 个斑块，马场、寺大隆、隆畅河和观山区域的栖息地相互连接成 1 个大斑块，寺大隆区域还包含有 1 个小斑块。祁丰地区栖息地由 1 个大斑块和 4 个小斑块组成。

基于雪豹的适宜栖息地斑块和最小代价路径原理，在研究区域内共识别 10 条潜在生态廊道（图 6C1 ~ C10）。廊道最长为 18.725 km，最短为 0.368 km，平均廊道长度为 5.676 km。其中 C1 ~ C2 廊道有助于栖息在哈溪区域的雪豹与马场区域的雪豹种群相互交流；C3 廊道有助于栖息在寺大隆附近区域的雪豹向此区域扩散；C4 ~ C10 廊道有助于雪豹种群向祁丰和观

山区域的适宜栖息地扩散，从而与隆畅河区域连接形成更大的种群。

## 4 讨论

本文应用 MaxEnt 模型来确定雪豹的适宜栖息地，研究发现研究区域内雪豹适宜栖息地面积为 13 432.066 km<sup>2</sup>，分布在祁连山国家公园甘肃张掖分局保护片区内的适宜栖息地面积为 7 086.195 km<sup>2</sup>，占适宜栖息地总面积的 52.756%。有研究表明，当栖息地面积超过 19 000 km<sup>2</sup> 时，才能够维持雪豹最小存活种群长期生存（李娟 2012），通过比较发现在祁连山国家公园甘肃张掖分局保护片区内部尚有较大的保护差距。虽然祁连山国家公园甘肃张掖分局保护片区能够覆盖大面积的雪豹适宜栖息地，但是由于栖息地分布离散，仍旧无法维系雪豹种群的长期发展。在研究区域的东南部，

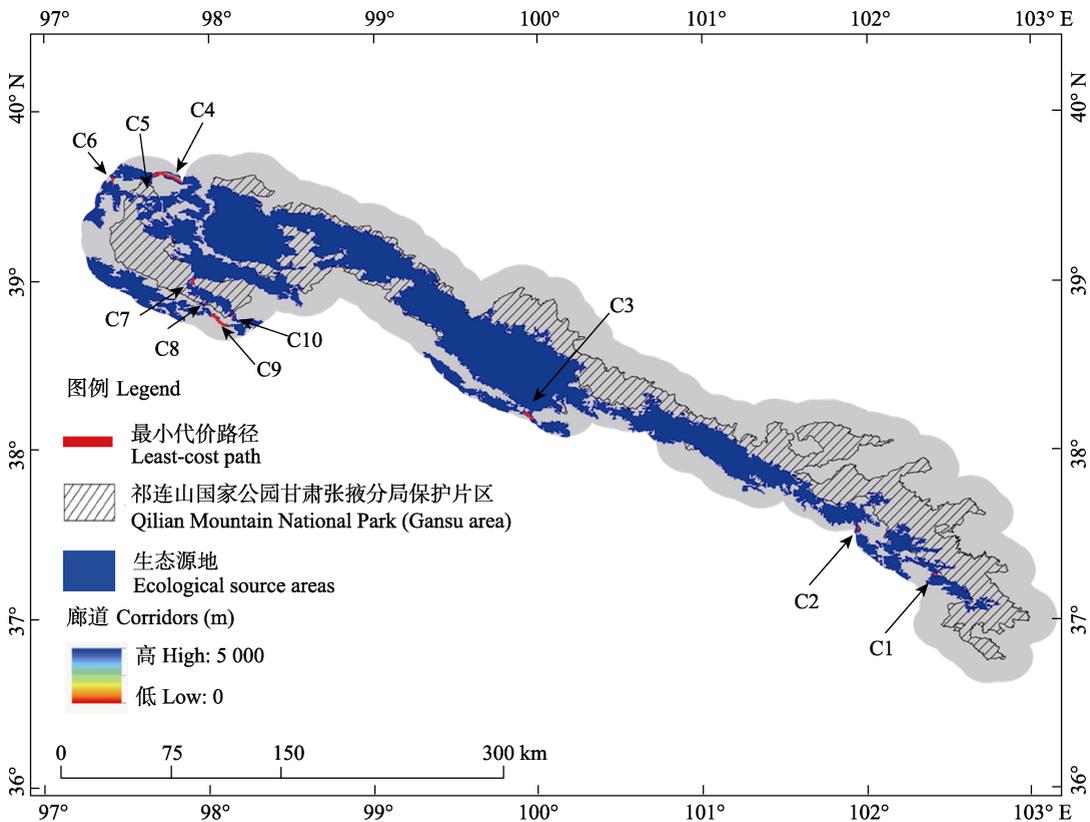


图 6 雪豹廊道分布图

Fig. 6 The distribution of the *Panthera uncia* corridors

即哈溪镇附近区域, 栖息地破碎化尤为明显, 这可能是由于该区域人类影响较大。栖息地的破碎化会导致栖息地斑块面积的减少, 斑块之间距离增加, 增加物种的灭绝风险 (蒙倩彬 2016)。加强栖息地斑块之间的连通性, 推进生态廊道的构建可以有效缓解物种的灭绝危机 (Červinka et al. 2013)。

本研究共识别廊道 10 条, 3 条廊道分布于片区内, 片区内廊道可提升祁连山国家公园甘肃张掖分局保护片区雪豹适宜栖息地之间的整体连接度。有 5 条廊道连接该片区与青海片区雪豹栖息地, 且有多个连续栖息地斑块为跨省分布, 因此我们强调要保持区域间栖息地的连通性, 即与青海省共同开展跨界保护工作。研究结果显示, 廊道的平均长度为 5.676 km, 最长距离为 18.725 km, 有 2 条廊道的长度超过 10 km, 因此, 构建生态廊道对于确保雪豹能够在其栖息地斑块之间安全迁移至关重要。各栖息地斑块均可充当雪豹迁移过程中的踏脚石, 不仅能为雪豹在寻找食物和适宜栖息地的过程中提供休息场所和中转站 (曾真等 2024), 还能够显著提升物种在迁移过程中的存活率 (张启舜等 2021)。

物种分布响应何种环境因子是生态学中评价物种栖息地适宜度的重要研究内容 (李芳菲等 2023), 因此, 探究影响栖息地适宜度的环境因子的重要性对了解物种的分布至关重要。本研究显示, 崎岖度、最干季度平均温度和季节降雨变异系数是影响物种分布的三个最重要的因素, 其中崎岖度对栖息地适宜度的影响最大。在之前的研究中, 研究人员认为气候条件及地形因子 (崎岖度) 是影响雪豹对栖息地进行选择的重要因素 (Li et al. 2022)。对我国三江源国家级自然保护区雪豹栖息地的分析发现, 年平均温度和崎岖度影响着雪豹对栖息地的选择 (Li et al. 2013); 蒙古的研究人员也发现, 崎岖的地形会在很大程度上决定雪豹如何利用栖息地 (McCarthy et al. 2005); 有关我国

珠穆朗玛峰国家级自然保护区的研究表明, 崎岖度和降雨量对雪豹利用适宜栖息地有着很大的影响 (Bai et al. 2018)。由于祁连山区地形较为复杂, 不同地区的环境变量可能有较大变化, 因此, 应加强局部地区的雪豹栖息地适宜性评估, 根据各地实际情况制定符合当地的保护行动。

虽然国家公园等保护区域可以在一定程度上保护雪豹这种大型食肉动物免受负面环境的影响, 但无法提供长期的保护, 因为雪豹需要大型且连续的栖息地才能够长久地生存 (Pal et al. 2022)。因此, 建议从雪豹栖息地保护的角度出发, 将物种栖息地评价机制纳入管理范畴, 通过分析研究区内各栖息地斑块之间的连通性, 更好地构建廊道以避免雪豹适宜栖息地退化或破碎。雪豹作为山地生态系统的旗舰物种之一 (Lyngdoh et al. 2014), 有望吸引大量的社会资源, 除了可以为雪豹建立廊道外, 还可以以雪豹作为旗舰物种建立多物种廊道, 从而获取更多的社会支持, 以便能够在实现对雪豹保护的同时实现对该区域其他物种的有效保护。在保护工作中加强跨区域保护合作, 确立共同保护目标, 并针对性地确定各区域优化原则, 制定符合各区域当前状况的优化目标, 完善自然保护区网络。

本研究利用红外相机监测数据, 揭示了雪豹适宜栖息地和生态廊道分布格局, 从而为祁连山国家公园甘肃张掖分局保护片区的雪豹保护管理工作提供了基础依据。由于数据的限制, 本文中有一些影响雪豹栖息地选择的环境因子尚未纳入分析, 比如放牧和食物丰富度等可能会影响雪豹的分布以及廊道识别的因素。这也提示在未来的调查研究中, 在收集雪豹本身的数据外, 还需要加强同域物种和人类活动等相关数据的采集。

**致谢** 本研究得到世界自然基金会 (World Wide Fund For Nature) (瑞士) 北京代表处的支持与帮助, 在此谨致衷心感谢。

## 参 考 文 献

- Alexander J S, Gopalaswamy A M, Shi K, et al. 2015. Face value: towards robust estimates of snow leopard densities. *PLoS ONE*, 10(9): e0134815.
- Amatulli G, Domisch S, Tuanmu M N, et al. 2018. A suite of global, cross-scale topographic variables for environmental and biodiversity modeling. *Scientific Data*, 5: 180040.
- Bai D F, Chen P J, Atzeni L, et al. 2018. Assessment of habitat suitability of the snow leopard (*Panthera uncia*) in Qomolangma National Nature Reserve based on MaxEnt modeling. *Zoological Research*, 39(6): 373–386.
- Banks-Leite C, Ewers R M, Folkard-Tapp H, et al. 2020. Countering the effects of habitat loss, fragmentation, and degradation through habitat restoration. *One Earth*, 3(6): 672–676.
- Block W M, Brennan L A. 1993. The habitat concept in ornithology. *Current Ornithology*, 11: 35–91.
- Brookes C J. 1997. A parameterized region-growing programme for site allocation on raster suitability maps. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(4): 375–396.
- Červinka J, Šálek M, Padyšáková E, et al. 2013. The effects of local and landscape-scale habitat characteristics and prey availability on corridor use by carnivores: a comparison of two contrasting farmlands. *Journal for Nature Conservation*, 21(2): 105–113.
- Gilbert-Norton L, Wilson R, Stevens J R, et al. 2010. A meta-analytic review of corridor effectiveness. *Conservation Biology*, 24(3): 660–668.
- Heller N E, Zavaleta E S. 2009. Biodiversity management in the face of climate change: a review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation*, 142(1): 14–32.
- Johansson Ö, Koehler G, Rauset G R, et al. 2018. Sex-specific seasonal variation in puma and snow leopard home range utilization. *Ecosphere*, 9(8): e02371.
- LaPoint S, Gallery P, Wikelski M, et al. 2013. Animal behavior, cost-based corridor models, and real corridors. *Landscape Ecology*, 28(8): 1615–1630.
- Lham D, Cozzi G, Sommer S, et al. 2021. Modeling distribution and habitat suitability for the snow leopard in Bhutan. *Frontiers in Conservation Science*, 2: 781085.
- Li J, Lu Z. 2014. Snow leopard poaching and trade in China 2000–2013. *Biological Conservation*, 176: 207–211.
- Li J, McCarthy T M, Wang H, et al. 2016. Climate refugia of snow leopards in High Asia. *Biological Conservation*, 203: 188–196.
- Li J, Schaller G B, McCarthy T M, et al. 2013. A communal sign post of snow leopards (*Panthera uncia*) and other species on the Tibetan Plateau, China. *International Journal of Biodiversity*, 2013: 370905.
- Li J, Weckworth B V, McCarthy T M, et al. 2020. Defining priorities for global snow leopard conservation landscapes. *Biological Conservation*, 241: 108387.
- Li Y, Zhang Y, Xue Y D, et al. 2022. Analysis of conservation gaps and landscape connectivity for snow leopard in Qilian Mountains of China. *Sustainability*, 14(3): 1638.
- Liu C, White M, Newell G. 2013. Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. *Journal of Biogeography*, 40(4): 778–789.
- Liu J, Wilson M, Hu G, et al. 2018. How does habitat fragmentation affect the biodiversity and ecosystem functioning relationship?. *Landscape Ecology*, 33: 341–352.
- Lyngdoh S, Shrotriya S, Goyal S P, et al. 2014. Prey preferences of the snow leopard (*Panthera uncia*): regional diet specificity holds global significance for conservation. *PLoS ONE*, 9(2): e88349.
- Mann C C, Plummer M L. 1995. Are wildlife corridors the right path? *Science*, 270(5241): 1428–1430.
- McCarthy T M, Fuller T K, Munkhtsog B. 2005. Movements and activities of snow leopards in Southwestern Mongolia. *Biological Conservation*, 124(4): 527–537.
- McCarthy T, Mallon D, Jackson R, et al. 2017. *Panthera uncia*. The IUCN Red List of Threatened Species 2017. [EB/OL]. [2022-01-19]. <https://www.iucnredlist.org/species/22732/50664030>.
- Mech S G, Hallett J G. 2001. Evaluating the effectiveness of corridors: a genetic approach. *Conservation Biology*, 15(2): 467–474.
- Pal R, Sutherland C, Qureshi Q, et al. 2022. Landscape connectivity and population density of snow leopards across a multi-use landscape in Western Himalaya. *Animal Conservation*, 25(3): 414–426.
- Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. 2006. Maximum entropy

- modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3/4): 231–259.
- Shcheglovitova M, Anderson R P. 2013. Estimating optimal complexity for ecological niche models: a jackknife approach for species with small sample sizes. *Ecological Modelling*, 269: 9–17.
- Spellerberg I F, Gaywood M J. 1993. Linear features: linear habitats & wildlife corridors. Center for Environmental Sciences.
- Tian M R, Chen X L, Gao J X, et al. 2022. Identifying ecological corridors for the Chinese ecological conservation redline. *PLoS ONE*, 17(7): e0271076.
- Urbani F, D'Alessandro P, Frasca R, et al. 2015. Maximum entropy modeling of geographic distributions of the flea beetle species endemic in Italy (Coleoptera: Chrysomelidae: Galerucinae: Alticini). *Zoologischer Anzeiger*, 258: 99–109.
- Zeller K A, McGarigal K, Whiteley A R. 2012. Estimating landscape resistance to movement: a review. *Landscape Ecology*, 27(6): 777–797.
- Zhao G H, Cui X Y, Sun J J, et al. 2021. Analysis of the distribution pattern of Chinese *Ziziphus jujuba* under climate change based on optimized biomod2 and MaxEnt models. *Ecological Indicators*, 132: 108256.
- 程宏毅, 鲍毅新, 葛宝明, 等. 2006. 栖息地片断化对动物种群间基因流的影响及其测定方法. *生态学杂志*, 25(7): 863–868.
- 程一凡, 薛亚东, 代云川, 等. 2019. 祁连山国家公园青海片区人兽冲突现状与牧民态度认知研究. *生态学报*, 39(4): 1385–1393.
- 邸华, 刘建泉, 贺晓香. 2014. 祁连山保护区近56年降水量变化稳定性探析. *甘肃科技*, 30(18): 58–59.
- 国家林业和草原局. 2020. 全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021–2035年). [EB/OL]. (2020-05-16) [2021-03-20]. [http://www.forestry.gov.cn/html/main/main\\_72/20200611183423666285011/file/20200611183608986247918.pdf](http://www.forestry.gov.cn/html/main/main_72/20200611183423666285011/file/20200611183608986247918.pdf).
- 胡大志, 徐恺, 张俊涛, 等. 2022. 甘肃祁连山国家级自然保护区野生动物红外相机监测分析. *野生动物学报*, 43(3): 692–703.
- 李芳菲. 2021. 基于雪豹生境保护的青海祁连山土地利用景观格局优化研究. 昆明: 云南财经大学硕士毕业论文.
- 李芳菲, 李丽, 吴巩固, 等. 2023. 基于最大熵模型的青海祁连山雪豹生境适宜性评价. *生态学报*, 43(6): 2202–2209.
- 李娟. 2012. 青藏高原三江源地区雪豹 (*Panthera uncia*) 的生态学研究及保护. 北京: 北京大学博士毕业论文.
- 李敏. 2020. 以旗舰物种为代理的多物种廊道规划-以拖乌山大熊猫廊道为例. 南充: 西华师范大学硕士毕业论文.
- 廖空太. 2019. 大熊猫祁连山国家公园甘肃管理局张掖分局雪豹等濒危珍稀野生动物生物多样性监测评估报告. 甘肃: 甘肃祁连山国家级自然保护区林业调查规划队.
- 刘沿江, 李雪阳, 梁旭昶, 等. 2019. “在哪里”和“有多少”? 中国雪豹调查与空缺. *生物多样性*, 27(9): 919–931.
- 廖倩彬. 2016. 基于生物多样性保护的城市生态廊道研究. 北京: 北京林业大学硕士毕业论文.
- 邱兰. 2022. 大熊猫国家公园及其周边的人兽冲突现状及保护管理探究. 南充: 西华师范大学硕士毕业论文.
- 覃琳, 宋孝玉, 冯湘华. 2019. 基于划区轮牧理论的祁连山北麓牧区动态草畜平衡研究. *农业工程学报*, 35(11): 256–264.
- 王彦, 马鸣, 买尔旦·吐尔干. 2012. 近60年来雪豹 (*Uncia uncia*) 研究的文献分析. *生物学杂志*, 29(3): 78–82.
- 曾真, 艾婧文, 王梓凌, 等. 2024. 三明市区景观格局时空演变及生态网络构建研究. *生态与农村环境学报*, 40(3): 335–344.
- 张常智, 马腾, 乌力吉, 等. 2023. 甘肃祁连山脉雪豹及其同域分布大型食肉动物时间生态位关系. *兽类学报*, 43(1): 109–115.
- 张启舜, 李飞雪, 王帝文, 等. 2021. 基于生态网络的江苏省生态空间连通性变化研究. *生态学报*, 41(8): 3007–3020.