

DOI: 10.5846/stxb202109062517

滕扬, 张沼, 张书理, 杨永昕, 贺伟, 王娜, 张正一, 鲍伟东. 大兴安岭南段马鹿生境适宜性分析与生态廊道构建. 生态学报, 2022, 42(14): 5990-6000.

Teng Y, Zhang Z, Zhang S L, Yang Y X, He W, Wang N, Zhang Z Y, Bao W D. Habitat suitability analysis and ecological corridor designs for red deer (*Cervus elaphus*) in the southern Greater Khingan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5990-6000.

大兴安岭南段马鹿生境适宜性分析与生态廊道构建

滕 扬¹, 张 沼¹, 张书理², 杨永昕², 贺 伟², 王 娜², 张正一³, 鲍伟东^{1,*}

1 北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083

2 赤峰市森林草原保护发展中心, 赤峰 025015

3 赤峰市野生动植物保护协会, 赤峰 025015

摘要: 构建生态廊道在缓解生境破碎化对生物多样性的影响、维持濒危物种的遗传多样性、维护自然生态系统结构完整与功能稳定方面具有重要作用。以内蒙古大兴安岭南段分布的马鹿(*Cervus elaphus*)种群为研究对象, 利用 MaxEnt 模型对其生境适宜性进行分析, 并利用最小累积阻力模型构建潜在生态扩散廊道, 探讨大兴安岭南段区域隔离马鹿种群的栖息地连通方案。结果显示, 马鹿栖息地呈破碎化状态, 种群有明显的隔离分布趋势, 现有适宜栖息地具有海拔较低(800—1200 m)、坡度较缓(<15°)、靠近水源、植被类型多为靠近山林的灌丛或草地等特点。所构建 12 条生态廊道具有经过河流浅水节段、远离村落等特点, 便于落实栖息地生态恢复管理措施。研究从区域尺度综合分析了大兴安岭南段马鹿栖息地现状及连通性, 有助于优化适宜栖息地格局, 促进马鹿扩散和栖息地连通, 为该物种隔离种群及其栖息地保护规划提供现实指导和基础资料。

关键词: 马鹿; 生境适宜性; MaxEnt 模型; 最小累积阻力模型; 生态廊道

Habitat suitability analysis and ecological corridor designs for red deer (*Cervus elaphus*) in the southern Greater Khingan Mountains

TENG Yang¹, ZHANG Zhao¹, ZHANG Shuli², YANG Yongxin², HE Wei², WANG Na², ZHANG Zhengyi³, BAO Weidong^{1,*}

1 College of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Chifeng Forest Grassland Protection and Development Center, Chifeng 025015, China

3 Chifeng Wildlife Protection Association, Chifeng 025015, China

Abstract: Effectively designed ecological corridors can eliminate the impact of habitat fragmentation on biodiversity, promote gene flow and the genetic diversity of endangered species, and maintain the structural integrity and functional stability of natural ecosystems. In this study, we used the MaxEnt model to analyze habitat suitability for red deer (*Cervus elaphus*) in the southern Greater Khingan Mountains, Inner Mongolia. We created a minimum cumulative resistance model to identify potentially ecological corridors for red deer. Results showed that red deer habitats in the study area were fragmented. The red deer population had an obvious trend of isolation distribution; the existing suitable habitats were characterized by low elevation (800—1200 m) and a gentle slope (<15°) close to a water source, and the suitable habitats mostly consisted of forest shrub or grassland vegetation close to woodland edges. The creation of 12 ecological corridors would encourage red deer dispersal and support habitat connectivity. Three main characteristics of the corridors that were conducive to habitat restoration management measures include-passing through shallow rivers, irregular topography, and

基金项目: 赤峰市林业科技振兴计划项目

收稿日期: 2021-09-06; 网络出版日期: 2022-03-23

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

being located far away from human residences. The comprehensive analysis of habitat suitability and ecological corridors from a large-scale perspective may help optimize red deer habitat distribution. The analysis can provide practical guidance and basic information for the conservation of the species in the southern Greater Khingan Mountains.

Key Words: red deer (*Cervus elaphus*); habitat suitability; MaxEnt model; minimum cumulative resistance model; ecological corridor

在自然生态系统中,生境是野生动植物生活和繁衍的场所,是其赖以生存和发展的基础。近年来,由于城镇化及道路交通的发展、农业建设用地扩张等大规模人类活动,直接影响野生动物生境的整体性和连通性,导致物种数量减少、死亡率增加及迁移率下降等一系列问题^[1-2],同时由于栖息地破碎化所产生的种群隔离,引起物种遗传多样性降低,致使局部种群丧失^[3]。随着生物多样性保护理论与实践的不断发展,发现孤立的自然保护区等生态保护地已经不能满足对物种保护的要求,生态廊道作为物种的生活、移动和迁移的重要通道,可以促进和维持隔离栖息地斑块间生境的连接,使物种能够通过廊道在破碎化生境之间自由扩散、迁徙,增加物种基因交流,防止种群隔离,维持最小种群数量并保护生物多样性^[4-5],因此,维持孤立栖息地斑块间的连通性,构建生态廊道已经成为消除生境破碎化的一个重要途径^[6-7]。

对野生动物生态廊道的研究开展较早且方法多样,目前基于电流理论和最小累积阻力模型(minimum cumulative resistance model, MCR)结合 GIS 技术的方法运用最为广泛^[2,8]。对于美国中西部 9 个州的美洲狮(*Puma concolor*)利用最小累积阻力模型建立了潜在廊道分布格局^[9];在将电流理论应用于三棱黑龟(*Melanochelys tricarinata*)核心生境间潜在廊道识别时发现,该模型能够准确识别廊道,并有助于开展小型动物的生境研究^[10];在使用 MaxEnt 模型识别狼(*Canis lupus*)高质量生境的分布区域时,根据有蹄类猎物的密度指数、人类活动影响、土地覆盖类型和坡度选择等生境信息,使用最小累积阻力模型确定了可能的迁徙廊道^[11]。同时,有学者提出使用距离样本探测和 GPS 项圈定位数据,结合负二项回归、逻辑回归和最大熵(MaxEnt)三种建模方法,来划定和验证野生动物廊道,并用这种方法描绘和验证了牛羚(*Connochaetes taurinus*)的迁徙廊道^[12]。在利用最大熵模型评估阿根廷米西奥内斯中北部地区美洲虎(*Panthera onca*)、美洲狮、虎猫(*Leopardus pardalis*)、小斑虎猫(*Leopardus tigrinus*)和薮犬(*Speothos venaticus*)的生境适宜性和潜在物种丰富度时,运用多因素成本分析得到该区域主要及次要廊道的最佳位置^[13]。我国学者对大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)的生态廊道开展了初步研究^[14-15],诸葛海锦等对青藏高原高寒荒漠区藏羚羊(*Pantholops hodgsonii*)生态廊道的识别为栖息地有效保护提供了基础信息^[16];同时,有研究探究了采矿活动对青藏高原藏羚羊栖息地及迁徙走廊的影响^[17];李美玲模拟了塔什库尔干保护区马可波罗盘羊(*Ovis polii*)的潜在生境分布,并识别了未来气候变化下的生态廊道^[18];对青海湖周边地区普氏原羚(*Procapra przewalskii*)栖息地景观网络模拟结果显示,青海湖东部的栖息地斑块连通性对普氏原羚种群间的交流至关重要^[19],而对于其他有蹄类动物生态廊道的研究工作亟待开展。

马鹿(*Cervus elaphus*)是一种世界上广泛分布的大型鹿科动物^[20],在我国主要分布于东北各省、四川、西藏、内蒙古等地。马鹿适应环境能力较强,栖息地类型多样丰富,但由于多年来人为干扰等因素的影响,在数量、密度和栖息地等方面的情况不容乐观^[21]。

大兴安岭南段区域作为马鹿主要分布地,受到人为干扰较强,张书理等^[22]对该区域内野生马鹿种群调查显示,数量约为 3509 只,主要种群处于显著隔离状态。张沼^[23]在 2019 年再次对该地区马鹿种群及保护状态进行调查,发现种群呈现明显恢复,数量约为 12160 只。由于种群数量恢复,有可能实现隔离种群在该区域的连通。因此,本研究运用最大熵模型(MaxEnt)和地理信息系统软件(ArcGIS)对该区域马鹿的生境适宜性进行分析,并综合植被类型、地理因素、人为干扰及物种迁移特性等因素,利用最小累积阻力模型构建适宜马鹿扩散的潜在生态廊道,从区域性尺度综合分析马鹿栖息地现状,有助于优化栖息地格局,为马鹿物种的保护和

栖息地重建规划提供现实指导和基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大兴安岭南段区域主要位于内蒙古自治区赤峰市北部,地处蒙古高原向东北平原过渡地带,地理坐标为东经 $116^{\circ}21'$ — $120^{\circ}58'$,北纬 $41^{\circ}17'$ — $45^{\circ}24'$,海拔 300—2000 m,为中温带半干旱大陆性季风气候区(图 1)。该区地形地貌复杂,属于森林与草原的交错带,该区是草原植物区系、华北植物区系和东北植物区系交汇的过渡地带,有森林、灌丛、草原、湿地等多种植被类型,有西拉木伦河、查干木伦河、乌力吉木伦河等 6 条河流发源并流经全境,境内天然湖泊、水库、溪流等湿地面积较大,多样的自然环境为野生动物的栖息和繁殖创造了良好条件^[22,24]。本研究区域由西南向东北分别经过克什克腾旗、林西县、巴林右旗、巴林左旗、阿鲁科尔沁旗,覆盖赤峰市整个西北部地区,调查涉及总面积为 55783.00 km²。

1.2 数据来源与处理

模型的基础数据是于 2019 年秋季,以及 2020 年夏、秋、冬季利用样线法及红外相机监测获得^[23],调查范围覆盖马鹿栖息地全部生境类型,确保分布位点的准确性及代表性,使用“spatially rare occurrence data for SDMs”工具剔除重复位点、排除数据集间聚集性后,共得到马鹿出现位点 602 处。

环境因子包括地形变量数据(海拔高差、坡度和坡向,由 DEM 数据获取本研究区域 30 m 分辨率,来自 <http://www.gscloud.cn/>);归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)为 2019 年 MYD13Q1 的 16 d 的合成产品(空间分辨率为 250 m,来源同上);气候数据来自世界气候数据库 WorldClim 网站(<http://www.worldclim.org/>)中 19 个气候因子 Bio1—Bio19,分辨率为 1 km;植被类型数据来自 Landsat 8 遥感影像解译(<https://glovis.usgs.gov/>),分辨率为 30 m;人类足迹数据下载自社会经济数据和应用中心(<https://sedac.ciesin.columbia.edu/>),以欧氏距离分析得到研究区域各个像元距居民点、铁路、水源、人类足迹距离等干扰因子^[25]。

环境变量均以 ArcGIS 10.2 为平台,将所有环境变量的图层统一边界,去除边界外的 GPS 坐标点,坐标系统一为 WGS-1984-UTM-Zone-50N 坐标,栅格统一为 30 m×30 m,转化为 MaxEnt 识别的 ASCII 文件格式。

1.3 研究方法

1.3.1 MaxEnt 模型的建立

将外业调查和环境变量因子数据导入 MaxEnt 3.4.1 软件^[26],随机选取马鹿分布位点数据 75%的点作为训练集建立预测模型,剩余 25%的分布点作为测试集验证模型,其余参数均选择模型的默认值,采用交叉验证方法验证模型模拟结果,在环境参数设置中选择刀切法,分析结果以 ASCII 类型文件输出^[27]。在 ArcGIS 10.2 软件中将模型输出的 ASCII 文件转换成栅格数据,对结果进行重分类^[28]。在总结以往对马鹿生境适宜性研究的基础上^[29—32],采用交叉验证法计算 10 次获得 AUC 均值为最终栖息地适宜度指数(habitat suitability index, HSI),根据 HSI 阈值对研究区域栖息地适宜度进行划分^[33],采用自然断点法^[34]将适宜度为 0—0.25 的范围划分为马鹿种群不适宜栖息地,0.25—0.45 为较适宜栖息地,0.45—0.65 为适宜栖息地,>0.65 为最佳

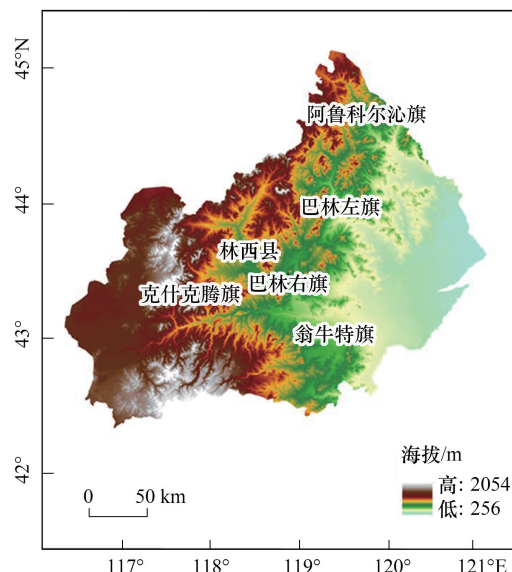


图 1 研究区域地理位置

Fig.1 Geographical location of the study area

栖息地 4 个等级,将最佳栖息地和适宜栖息地总面积作为大兴安岭南段区域马鹿种群的栖息地面积。

本研究采用受试者操作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)与横坐标围成的面积,即 AUC(area under curve)值来评价模型预测结果的精度。基于两组环境因子变量对马鹿分布模型构建所产生的模拟训练和数据测试 AUC 值均为 0.990, AUC 值越接近 1,表明预测与随机分布相距越远,模型预测效果越好^[35]。

1.3.2 马鹿生态廊道的建立

利用最小累积阻力模型(MCR)构建适宜马鹿扩散的生态廊道,该模型描述物种从源地到目标地的运动过程中,克服阻力需要的最短路径或最小成本路径,阻力越小,生态流越易进行^[36]。

(1) 生态源地的确立

以最大熵模型产生的马鹿栖息地分布状态为基础,利用 ArcGIS 10.2 的筛选工具对栖息地分布数据进行筛选提取,将最佳栖息地和适宜栖息地属性相加、合并到新的面要素,作为最小累积阻力模型运行的基础数据源。对栖息地基础数据中相对独立的区域进行定性,按属性分类、提取,作为单个独立的生态源地,利用 ArcGIS 10.2 建立新的面要素图层,所有生态源地合并,生成马鹿种群栖息地总生态源地的面要素图层,再利用筛选工具对每一块独立源地区域进行筛选提取,定义为源地 N(source n),对除源地 N 以外的源地进行合并提取,定义为目标源地 N(target n),最后确定产生 n 个独立的生态源地和一一对应的目标源地。以每一个生态源地之外的目标源地为扩散目标地,该生态源地扩散的消耗成本转为成本栅格,结合 ArcGIS 10.2 成本路径工具计算出马鹿种群从该生态源地向外扩散时,生态消费最低、阻力最小的路径,作为生态廊道的基础模型。

(2) 生态阻力面构建

以栖息地适宜度来反映研究区域的阻力系数,按照统一的阻力值分层规则,对所有背景环境阻力值进行垂直分层处理,以 MaxEnt 模型产生的环境因子敏感度为依据,得到马鹿种群对每个环境因子的偏好值,将其作为马鹿种群在扩散中受到的最小阻力等级,构建阻力垂直梯度,确定 6 个阻力等级(1—6),阻力值最大的等级为 6,最小为 1。

根据植被覆盖度将土地覆盖类型划分为 I、II 两个等级,参考马鹿在扩散过程中对环境选择的适宜度,将每个植被类型进行阻力值分配,确定土地类型受到的阻力值为林地<湿地<草地<耕地<其他植被表面<人工表面,将土地类型阻力值分为 6 个等级(表 1)。

表 1 土地类型分类赋值等级表

Table 1 Land type classification assignment grade

阻力等级 Resistance level	I 级分类 Classification of I level	II 级分类 Classification of II level
1	林地	落叶阔叶林、常绿针叶林、落叶针叶林、针阔混交林、落叶阔叶灌木林、常绿针叶灌木林、乔木园地、灌木园地、乔木绿地、灌木绿地
2	湿地	森林湿地、灌丛湿地、草本湿地、湖泊、水库/坑塘、河流、运河/水渠
3	草地	草甸、草原、草丛、草木绿地
4	耕地	水田、旱地
5	其他表面	稀疏林地、稀疏灌木丛、稀疏草地、苔藓/地衣、裸岩、裸土、沙漠/沙地、盐碱地
6	人工表面	居住地、工业用地、交通用地、采矿场

根据分布模型预测中马鹿种群对栖息地环境选择的偏好性,马鹿对地形的选择最优值在海拔 220 m 处,随着海拔的升高适宜度逐渐降低^[23],将地形按照海拔适宜度 225—500 m>501—700 m>701—900 m>901—1100 m>1101—1400 m>1401—2042 m 的顺序进行阻力值的分类赋值,再根据马鹿的最适宜坡度为 15°,小于 15°部分为正相关,大于 15°部分为负相关,将马鹿对坡度的适宜度按照 9°—15°>4°—8°>15°—25°>0—3°>25°—50°>45°的顺序进行阻力值的分类赋值。马鹿距水源距离和坡向适宜度为正相关的线性关系,按照梯度分层将其划分为对应的 6 个等级,马鹿距居民点的距离在 20 km 处获得最高的适宜度,按照这个规律对该阻

力因素进行阻力等级划分。植被覆盖指数和距道路距离的适宜度分别在 0.6 和 24 出现最适宜的钟型指数^[23],按此规律对这两个环境因子进行阻力值分配,最终将所有环境因子的阻力值等级划分整理,得到阻力赋值体系表(表 2)。

表 2 环境因子阻力赋值体系表

Table 2 Environmental factor resistance evaluation system

阻力等级 RL	地形/m Dem	坡度/(°) Slope	土地类型 LT	距水源 距离/m Water	坡向/(°) Aspect	距居民点 距离/m Resident	归一化 植被指数 NDVI	距道路 距离/m Road
1	225—500	9—15	林地	300	—1—60	26000	0.725—0.500	24
2	501—700	4—8	湿地	600	61—120	38000	0.930—0.725	32
3	701—900	15—25	草地	900	121—180	13000	0.500—0.375	39
4	901—1100	0—3	耕地	1200	181—240	51000	0.375—0.250	49
5	1101—1400	25—50	其他	1600	241—300	64000	0.250—0.125	64
6	1401—2042	>50	人工表面	>1600	301—360	84000	<0.125	90

RL:阻力等级 Resistance level; Dem:数字高程模型 Digital elevation model; Slope:坡度 Slope; LT:土地类型 Land type; Water:距水源距离 Distance from water source; Aspect:坡向 Slope direction; Resident:距居民点距离 Distance from residential area; Ndvi:归一化植被指数 Normalized vegetation index; Road:距道路距离 Distance from road

以层次分析法为理论基础,经咨询当地野生动物保护管理人员,采用专家问卷形式打分,结合统计分析软件(SPSS)^[37]分析各个阻力因子之间的阻力值,建立阻力值相关性矩阵,根据矩阵得出各阻力因子之间的相关性,再根据层次分析模型完成主观赋值法的计算^[38]。根据 MaxEnt 模型中因子对模型的贡献率得出各因子的客观权重,进而得到各阻力因子的阻力权重,结合客观和主观权重得出综合权重值(表 3)。

表 3 环境因子阻力值权重分析表

Table 3 Environmental factor resistance value weighting analysis table

	地形 Dem	坡度 Slope	土地类型 LT	距水源 距离 Water	坡向 Aspect	距居民点 距离 Resident	归一化 植被指数 NDVI	距道路 距离指数 Road
客观权重 P_k	0.145	0.107	0.096	0.129	0.127	0.12	0.138	0.138
主观权重 P_z	0.176	0.029	0.122	0.156	0.156	0.019	0.352	0.051
综合权重 P	0.160	0.068	0.109	0.143	0.143	0.07	0.244	0.095

P_k :客观权重 Objective weight; P_z :主观权重 Subjective weight; P :综合权重 Comprehensive weight

(3) 构建潜在生态廊道

以每个生态源地作为输入要素、除该元素以外的其他源地总和要素图层为目标要素,以累积阻力总基面为消费值,生成该生态源地马鹿种群扩散需要消耗的生态成本阻力值,然后利用成本路径工具生成该生态源地向外扩散的最小阻力路径。

2 结果与分析

2.1 马鹿生境预测

本研究受试者操作特征曲线(ROC)与横坐标围成的面积,AUC 值模拟训练和数据测试均为 0.990,模拟结果表明使用 MaxEnt 模型预测马鹿适生区精度较准确,获得的 ROC 曲线如图 2 所示。

增益指数按最湿季度平均气温、最暖月份最高温度、最干季度平均温度、最冷月最低温、距水源距离、海拔等环境因子的顺序从大到小排列,前六个环境因子的信息增益指数分别是 1.40、1.38、1.37、1.36、1.3、0.74,对研究区域内马鹿的分布起最显著的影响。当因子单独使用时,增益最高的环境变量是最湿季度平均气温;省略独立因子时,减少收益最多的环境变量是年均温变化范围(图 3)。模型的贡献率结果显示最干季度平均温度、最湿季度平均气温、距道路距离、最冷月最低温和最暖月份最高温度这五个参数对于模型的贡献最高,分

别为 25.6%、18.9%、18.4%、4.8%、4.3%。

马鹿种群较适宜生境面积 3742.91 km²,适宜生境 701.12 km²,最佳生境 309.70 km²;适宜生境总面积为 1010.82 km²,占研究区域总面积的 22.00%。结果显示研究地区马鹿种群分布斑块化明显,各分布地区之间有明显的断带存在(图 4)。

2.2 阻力面和生态廊道的建立

利用 ArcGIS 10.2 的栅格计算器,生成马鹿扩散最小阻力面(图 5)。

本研究得到 12 条最优解作为研究地区马鹿的扩散生态廊道(图 6、7、8),其中长距离廊道 9 条,短距离廊道 3 条。所有廊道均经过多条水源、远离居民点地区,其中两条距离较短的廊道直接连接到邻近栖息地,另一条短距离廊道连接阿鲁科尔沁旗与巴林左旗的马鹿栖息地,植被多为林地。

3 讨论

野生动物在选择栖息地时往往要考虑很多因素,包括食物资源的可获得性和规避捕食风险等^[39],预测物种的潜在适宜空间分布,对栖息地的监测和重建有重要意义,可以根据栖息地适宜性预测情况做出有效的保

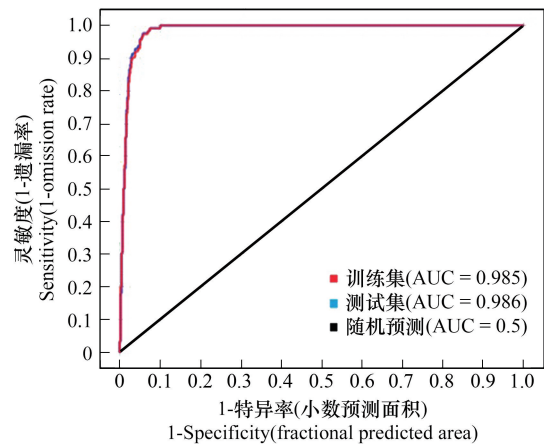


图 2 受试者操作曲线 ROC 曲线

Fig.2 Receiver operating curve ROC curve

ROC:受试者操作特征曲线 Receiver operating characteristic curve;

AUC:ROC 曲线下方面积 area under curve

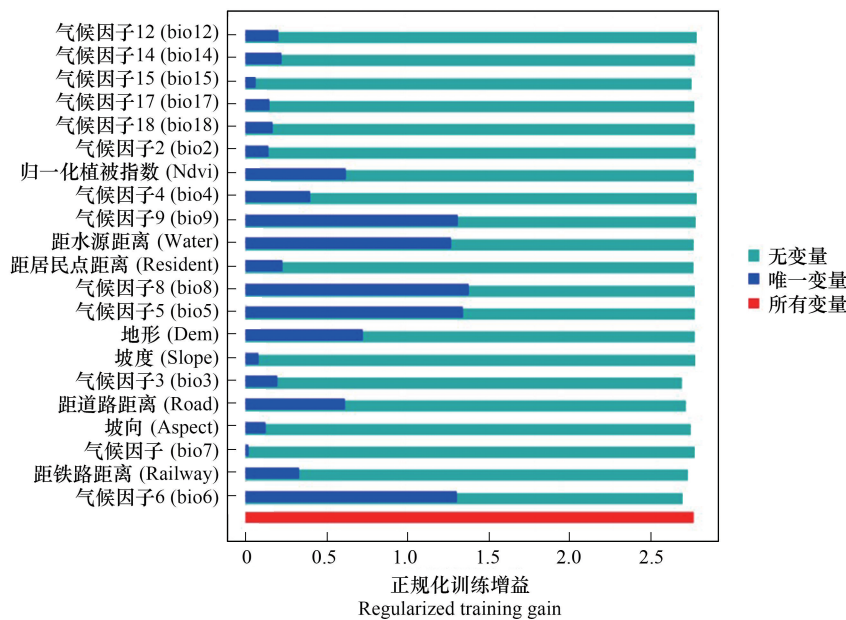


图 3 各环境变量对马鹿分布影响的正规化增益结果

Fig.3 Regularized training gain results of the influence of environmental variables on the distribution of red deer

bio12:年均降水量 Annual precipitation; bio14:最干月降水量 Precipitation of driest month; bio15:降水量变异系数 Precipitation seasonality; bio17:最干季度降水量 Precipitation of driest quarter; bio18:最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter; bio2:昼夜温差日均值 Mean diurnal range; bio4:温度季节性变化的标准差 Temperature seasonality; bio9:最干季度平均温度 Mean temperature of driest quarter; bio8:最湿季度平均温度 Mean temperature of wettest quarter; bio5:最暖月最高温 Max temperature of warmest month; bio3:等温性 Isothermality; bio7:年均温变化范围 Annual temperature range; Railway:距铁路距离 Distance from railway; bio6:最冷月最低温 Min temperature of coldest month; Dem:数字高程模型 Digital elevation model; Slope:坡度 Slope; Water:距水源距离 Distance from water source; Aspect:坡向 Slope direction; Resident:距居民点距离 Distance from residential area; NDVI:归一化植被指数 Normalized vegetation index; Road:距道路距离 Distance from road

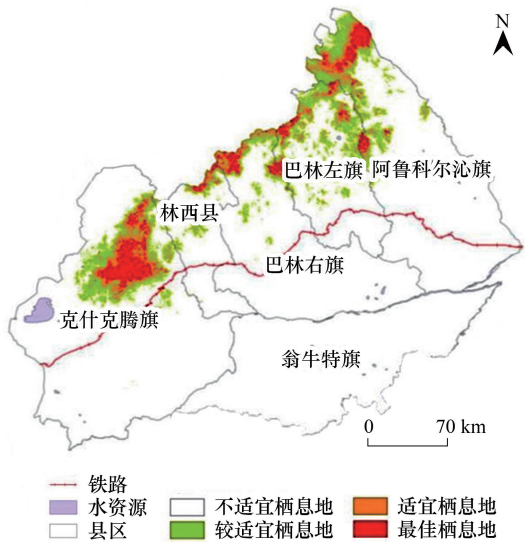


图 4 大兴安岭南段马鹿栖息地分布预测区划

Fig.4 Regionalization of predicted distribution for red deer in southern Great Khingan Mountains

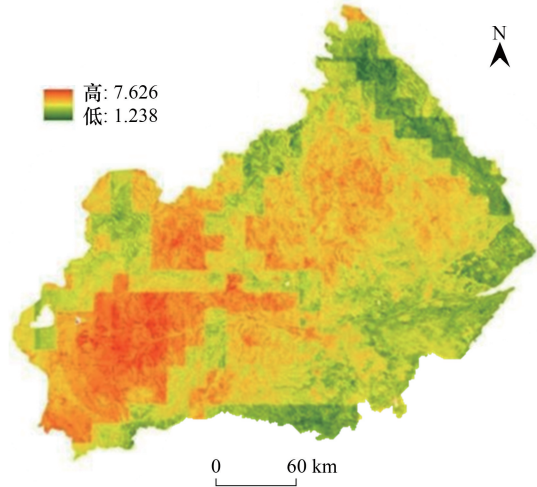


图 5 马鹿扩散最小累积阻力面

Fig.5 Minimum cumulative resistance surface for red deer dispersal

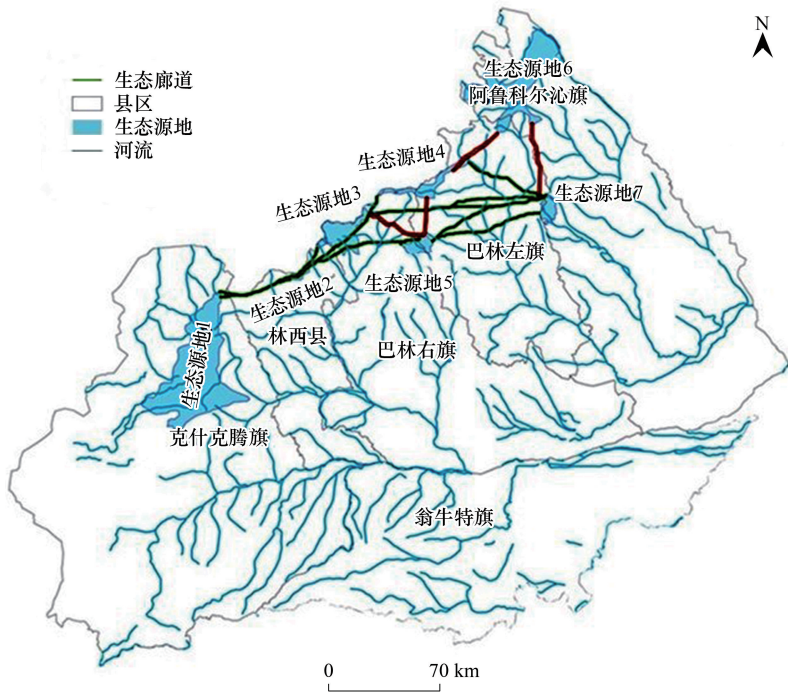


图 6 生态廊道与河流位置关系

Fig.6 Relationship between ecological corridors and river locations

护措施,如人工恢复或选择优先保护地点等^[40]。本研究发现马鹿的空间分布有明显聚集性,出现频率最高的位置均为自然保护区或者国有林场的核心保护地带。马鹿种群出现的位置都符合三个特点:(1)处于海拔较低(800—1200 m)的山脚下,并且地势较为平缓,坡度小于 15°,这既有利于马鹿到草场取食,也有利于马鹿规避风险时快速进入郁蔽的林区。马鹿在选择栖息地时,对地形与海拔的选择一直保持有较高的敏感性,对丹麦分布马鹿的栖息地选择分析发现,对地形和海拔的选择偏向性具有较强的季节性差异,但大多数马鹿

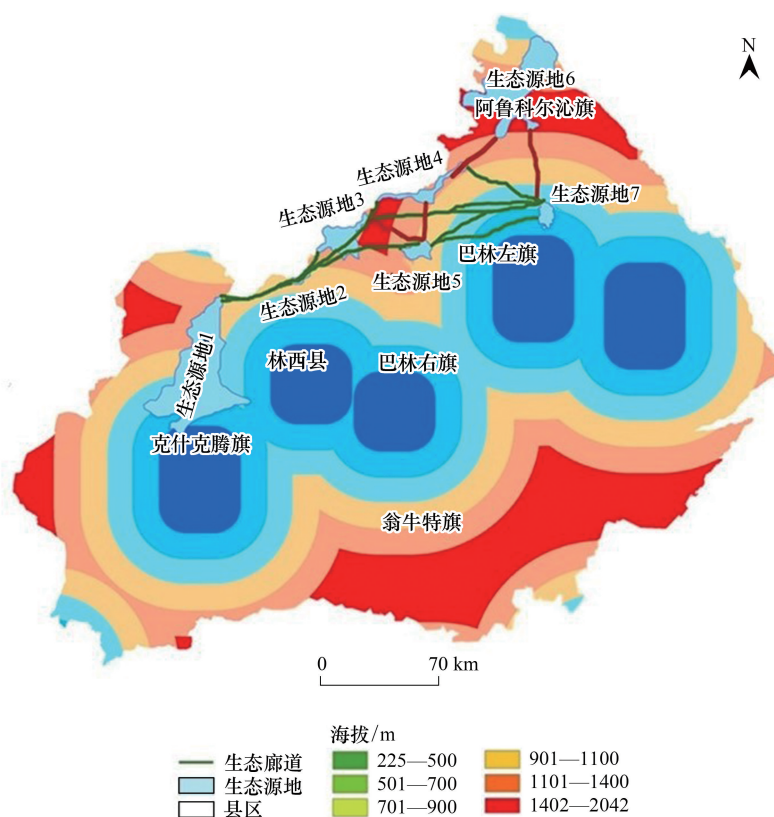


图7 生态廊道与居民点距离关系

Fig.7 Distance relationship between ecological corridors and human settlements

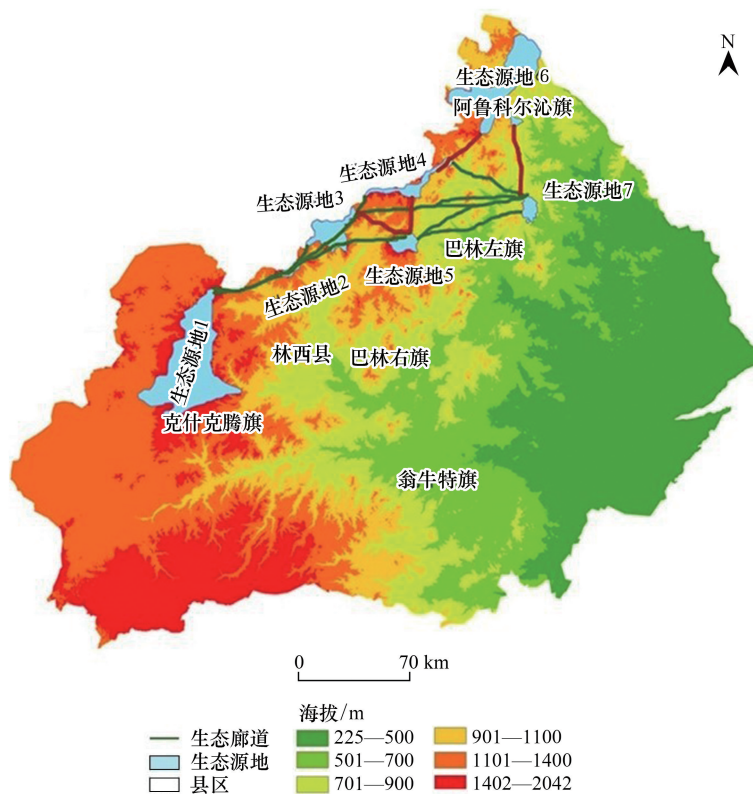


图8 生态廊道与地形关系

Fig.8 Relationship between ecological corridors and topography

选择的栖息地为海拔较低、地势较为平缓的地段^[31],然而,该研究在分析栖息地选择时着重考虑地形的影响,本研究在此基础上将人为干扰、植被类型、水源距离以及气候等因子纳入,综合分析马鹿在不同影响因子的作用下,倾向性最强的栖息地因素。(2)处于距离河流不远的位置,在河流、较为密集的溪流或人工建造的水库附近,马鹿出现频率要明显高于其他位置,保障了马鹿对生存用水的需求。对捷克分布的马鹿栖息地选择偏好结果显示,不管冬季还是夏季,马鹿种群的分布范围均是以水源为线性中心的^[41],这体现了马鹿种群在选择栖息地时水源是至关重要的。(3)处于林地边缘地带,植被类型多为灌丛和草甸共生。本研究开展实地调查时,对栖息地的植被类型进行分析,确认马鹿的分布核心区域主要为林地、森林湿地、灌丛草甸这几种类型,其中林地的比例明显小于草甸、灌丛的混合类型。在欧洲马鹿的栖息地研究中,草地占 60%、森林占 26%、非森林栖息地占 14%^[31,39,42],与本课题研究结果相符,体现出物种具有的生物学共性。

生态廊道常用于连接野生动物的破碎化栖息地,打破生物隔离分布现状,为种群提供基因交流机会、消除生境破碎化对生物多样性的影响,进而改善生态系统服务功能^[43]。一些实验证明,与孤立的斑块相比,由廊道连接的栖息地保留了更多的当地物种,这种效果会随着时间的推移而增强^[44],对维持当地生物多样性和生态系统平衡与稳定具有极为重要的作用^[45]。本研究筛选出的 12 条生态廊道显示,大部分廊道并未受到地形、坡度、坡向等环境因子的过度干扰,所有廊道都需经过多条河流,马鹿种群在迁移扩散过程中,表现出对水源的高度依赖性,由于当地主要为浅水溪流,没有大型河流,并未成为阻碍马鹿扩散的因素。廊道路径均为远离人群居住的区域,说明人为干扰因素对马鹿迁移的影响同样具有重要作用。此外,本研究选择的生态廊道分为短距离和远距离两种,在短距离廊道中植被类型简单,从林地穿过大片草原直接到目标栖息地;远距离廊道中植被以林地和草原不均匀分布为主,林地可以为马鹿提供避难隐藏场所,草原可以提供充足的食物资源。由此显示,有利于马鹿种群扩散的廊道反映了物种对当地生存环境的适应,在保证迁移路线上有充足水源和食物、避难场所后,选择远离人群、距离短、消耗体力少的路线进行扩散。建议在后期栖息地管理活动中,尽可能提高这些廊道的质量与稳定性,进一步修复和重建适宜栖息地,发挥其应有的生态功能。

气候对地球上的大多数物种空间分布起着决定性作用,而对气候变化最明确、最直接的响应就是物种分布格局的变化^[46]。气候变化能够改变陆地生态系统的结构和功能,使物种生境范围和分布区发生变化,目前由于气候变化所导致物种分布范围的扩展和收缩、物种生态相互作用的变化,以及物种适宜生境移动的方向等内容受到了广泛关注^[18]。本研究中刀切法结果表明,环境温度和湿度对马鹿分布的影响明显,其中最湿、最干、最暖、最冷月温度对马鹿影响能力最强,这与艾比湖国家级自然保护区马鹿种群的生境分析结果相符^[47]。结合实地调查发现,本研究区域 2020 年较 2019 年降雨偏多,降温时间较早,使得马鹿发情时间较往年有所提前、持续时间短。同时,马鹿的分布有从各保护区核心位置向外扩张迁移的趋势,说明研究区域内多个马鹿种群可能存在一定的连通性。

本研究对内蒙古大兴安岭南段马鹿的适宜生境进行分析,并结合栖息地具体特点构建潜在生态廊道,显示马鹿种群栖息地有明显的斑块化分布趋势,现有栖息地具备海拔较低(200—800 m)、坡度较缓($<15^{\circ}$)、靠近水源、植被类型多为靠近山林的灌丛或草地等特点,确定了 12 条有利于马鹿种群扩散连通的生态廊道的具体位置。据此我们建议,应提高潜在扩散廊道区域的适宜性,加强对水源的保护,增加人工林地的种植,为马鹿扩散过程中提供休息和避难场所。减少生态廊道区域内的放牧行为,为马鹿的迁移提供充足的食物资源,继续大力禁止非法盗猎、非法采药等行为,以保证马鹿种群不受人为因素的干扰,促进潜在生态廊道向真正有助于马鹿扩散的方向发展,全面恢复大兴安岭南段马鹿栖息地的连通性,达到连接现有破碎化栖息地的目的。

参考文献(References):

- [1] Yang R, Cao Y, Huo S, Peng Q Y, Wang X S, Wang F Y, TzHsuan T, Yu L, Steve C, Lan C, Zhao Z C, Shen X L, Li S, Zheng Y M, Liu H, Gong P, Ma K P. Cost-effective priorities for the expansion of global terrestrial protected areas: setting post-2020 global and national targets. *Science Advances*, 2020, 6(37): eabc3436.
- [2] 单楠,周可新,潘扬,唐夫凯.生物多样性保护廊道构建方法研究进展. *生态学报*, 2019, 39(2): 411-420.

- [3] Haddad N M, Brudvig L A, Clobert J, Davies K F, Gonzalez A, Holt R D, Lovejoy T E, Sexton J O, Austin M P, Collins C D, Cook W M, Damschen E I, Ewers R M, Foster B L, Jenkins C N, King A J, Laurance W F, Levey D J, Margules C R, Melbourne B A, Nicholls A O, Orrock J L, Song D X, Townshend J R. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 2015, 1 (2): e1500052.
- [4] Dai Y C, Hacker C E, Zhang Y G, Li W W, Zhang Y, Liu H D, Zhang J J, Ji Y R, Xue Y D, Li D Q. Identifying climate refugia and its potential impact on Tibetan brown bear (*Ursus arctos pruinosus*) in Sanjiangyuan National Park, China. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(23): 13278-13293.
- [5] Bastille-Rousseau G, Wittemyer G. Characterizing the landscape of movement to identify critical wildlife habitat and corridors. *Conservation Biology*, 2021, 35(1): 346-359.
- [6] 刘璐, 迟瑶, 吴朝宁, 钱天陆, 王结臣. 陆栖哺乳动物的地理隔离研究进展. *生物多样性*, 2021, 29(8): 1134-1145.
- [7] Nielsen S E, McDermid G, Stenhouse G B, Boyce B S. Dynamic wildlife habitat models: seasonal foods and mortality risk predict occupancy-abundance and habitat selection in grizzly bears. *Biological Conservation*, 2010, 143(7): 1623-1634.
- [8] Duflot R, Avon C, Roche P, Bergès L. Combining habitat suitability models and spatial graphs for more effective landscape conservation planning: an applied methodological framework and a species case study. *Journal for Nature Conservation*, 2018, 46: 38-47.
- [9] LaRue M A, Nielsen C K. Modelling potential dispersal corridors for cougars in midwestern North America using least-cost path methods. *Ecological Modelling*, 2008, 212(3/4): 372-381.
- [10] Mondal I, Kumar R S, Habib B, Talukdar G. Modelling fine scale movement corridors for the tricarinate hill turtle. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, XLI-B8: 719-725.
- [11] Kabir M, Hameed S, Ali H, Bosso L, Din J U, Bischof R, Redpath S, Ali Nawaz M. Habitat suitability and movement corridors of grey wolf (*Canis lupus*) in Northern Pakistan. *PLoS One*, 2017, 12(11): e0187027.
- [12] Bond M L, Bradley C M, Kiffner C, Morrison T A, Lee D E. A multi-method approach to delineate and validate migratory corridors. *Landscape Ecology*, 2017, 32(8): 1705-1721.
- [13] DeMatteo K E, Rinas M A, Zurano J P, Selleski N, Schneider R G, Argüelles C F. Using niche-modelling and species-specific cost analyses to determine a multispecies corridor in a fragmented landscape. *PLoS One*, 2017, 12(8): e0183648.
- [14] Kong L Q, Xu W H, Xiao Y, Pimm S L, Shi H, Ouyang Z Y. Spatial models of giant pandas under current and future conditions reveal extinction risks. *Nature Ecology & Evolution*, 2021, 5(9): 1309-1316.
- [15] 甄静. 未来气候变化对大熊猫栖息地影响精细评估与应对[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2018.
- [16] 诸葛海锦, 林丹琪, 李晓文. 青藏高原高寒荒漠区藏羚生态廊道识别及其保护状况评估. *应用生态学报*, 2015, 26(8): 2504-2510.
- [17] Su X K, Liu S L, Dong S K, Zhang Y, Wu X Y, Zhao H D, Zhao Z Z, Sha W. Effects of potential mining activities on migration corridors of Chiru (*Pantholops hodgsonii*) in the Altun National Nature Reserve, China. *Journal for Nature Conservation*, 2015, 28(11): 119-126.
- [18] 李美玲. 气候变化下马可波罗盘羊的环境适应性及生境廊道识别[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019.
- [19] Zhang J J, Jiang F, Cai Z Y, Dai Y C, Liu D X, Song P F, Hou Y S, Gao H M, Zhang T Z. Resistance-based connectivity model to construct corridors of the Przewalski's gazelle (*Procapra przewalskii*) in fragmented landscape. *Sustainability*, 2021, 13(4): 1656.
- [20] Kurtén B. Pleistocene mammals of Europe. *American Anthropologist*, 1969, 71(3): 562-563.
- [21] 国家林业局. 中国重点陆生野生动物资源调查. 北京: 中国林业出版社, 2009.
- [22] 张书理, 王志玲, 张鹏, 张帆, 杨永昕, 贺伟. 内蒙古赤峰市野生马鹿种群资源现状研究. *四川动物*, 2009, 28(5): 772-776, 784-784.
- [23] 张沼. 赤峰市马鹿(*Cervus canadensis*)种群恢复和栖息地保护研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
- [24] 代海燕, 陈素华, 武艳娟, 李丹, 朝鲁门. 内蒙古大兴安岭生态功能区冷暖季节气候变化趋势分析. *冰川冻土*, 2016, 38(3): 645-652.
- [25] 唐书培, 穆丽光, 王晓玲, 张静, 刘波, 孟和达来, 鲍伟东. 基于 MaxEnt 模型的赛罕乌拉国家级自然保护区斑羚生境适宜性评价. *北京林业大学学报*, 2019, 41(1): 102-108.
- [26] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 2008, 31(2): 161-175.
- [27] Brown J L. SDMtoolbox: a python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5(7): 694-700.
- [28] Cao Y, Dewalt R E, Robinson J L, Tweddle T, Hinz L, Pessino M. Using Maxent to model the historic distributions of stonefly species in Illinois streams: the effects of regularization and threshold selections. *Ecological Modelling*, 2013, 259: 30-39.
- [29] 高惠, 滕丽微, 汪洋, 王继飞, 刘振生. 阿拉善马鹿(*Cervus alashanicus*)生境适宜性评价. *生态学报*, 2017, 37(11): 3926-3931.
- [30] 吕忠海. 种间竞争影响下西藏马鹿(*Cervus wallichii*)草前期营养采食策略与生境选择及评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.
- [31] Müller A, Dahm M, Böcher P, Root-Bernstein M, Svenning J C. Large herbivores in novel ecosystems-habitat selection by red deer (*Cervus*

- elaphus*) in a former brown-coal mining area. PLoS One, 2017, 12(5): e0177431.
- [32] Sun Y, Yu Y Z, Guo J H, Zhang M H. The winter habitat selection of red deer (*Cervus elaphus*) based on a multi-scale model. Animals, 2020, 10(12): 2454.
- [33] 李明阳, 席庆, 徐海根. 基于 WEB 数据库和 Maxent 模型的白头叶猴潜在生境评价研究. 林业资源管理, 2010, 1(4): 31-36, 57-57.
- [34] 刘芳. 吉林珲春野生东北虎栖息地生境评价与潜在廊道分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [35] Hanley J A, McNeil B J. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. Radiology, 1982, 143(1): 29-36.
- [36] Adriaenssens F, Chardon J, Deblust G, Swinnen E, Villalba S, Gulinck H, Matthysen E. The application of 'least-cost' modelling as a functional landscape model. Landscape and Urban Planning, 2003, 64(4): 233-247.
- [37] Gábor L, Moudry V, Barták V, Lecours V. How do species and data characteristics affect species distribution models and when to use environmental filtering?. International Journal of Geographical Information Science, 2020, 34(8): 1567-1584.
- [38] Hui Y, Yang Z P, Xu X L. Ecological corridors analysis based on MSPA and MCR model-a case study of the Tomur World Natural Heritage Region. Sustainability, 2020, 12(3): 959.
- [39] Godvik I M R, Loe L E, Vik J O, Veiberg V, Langvatn R, Mysterud A. Temporal scales, trade-offs, and functional responses in red deer habitat selection. Ecology, 2009, 90(3): 699-710.
- [40] Kumar S, Stohlgren T J. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. Journal of Ecology and the Natural Environment, 2009, 1(4): 94-98.
- [41] Romportl D, Bláhová A, Andreas M, Chumanová E, Anděra M, Červený J. Current distribution and habitat preferences of red deer and Eurasian elk in the Czech republic. European Journal of Environmental Sciences, 2017, 7(1): 50-62.
- [42] Bojarska K, Kurek K, Śniezko S, Wierzbowska I, Król W, Zysk-Gorczyńska E, Baś G, Widera E, Okarma H. Winter severity and anthropogenic factors affect spatial behaviour of red deer in the Carpathians. Mammal Research, 2020, 65(4): 815-823.
- [43] Chetkiewicz C L B, Clair C C S, Boyce M S. Corridors for conservation: integrating pattern and process. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2006, 37: 317-342.
- [44] Damschen E I, Haddad N M, Orrock J L, Tewksbury J J, Levey D J. Corridors increase plant species richness at large scales. Science, 2006, 313(5791): 1284-1286.
- [45] 穆少杰, 周可新, 方颖, 朱超. 构建大尺度绿色廊道, 保护区域生物多样性. 生物多样性, 2014, 22(2): 242-249.
- [46] Root T L, Price J T, Hall K R, Schneider S H, Rosenzweig C, Pounds J A. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. Nature, 2003, 421(6918): 57-60.
- [47] 艾科拜尔·木哈塔尔, 热木图拉·阿卜杜克热木, 马合木提·哈力克. 基于生态位模型的艾比湖国家级自然保护区马鹿生境评价. 生态学报, 2017, 37(11): 3919-3925.