

DOI: 10.20103/j.stxb.202305030915

傅强, 张海明, 张月蓉, 陈亚男, 康峰. 面向生境保护与连通性维护的鄂温克族自治旗生态空间划定. 生态学报, 2024, 44(6): 2295-2307.

Fu Q, Zhang H M, Zhang Y R, Chen Y N, Kang F. Delineation of ecological space with habitat protection and connectivity maintenance functions in Evenki Autonomous county. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(6): 2295-2307.

面向生境保护与连通性维护的鄂温克族自治旗生态空间划定

傅 强^{1,*}, 张海明², 张月蓉¹, 陈亚男¹, 康 峰³

1 内蒙古工业大学建筑学院, 呼和浩特 010051

2 内蒙古城市规划市政设计研究院有限公司, 呼和浩特 010070

3 鄂温克族自治旗自然资源保护与发展中心, 呼伦贝尔 021000

摘要: 在人类活动及气候变化影响下, 自然生境萎缩与破碎化现象严重, 生境保护与生境间连通性维护增强对生物多样性保护具有重要的作用与意义。以鄂温克族自治旗为例, 基于 MaxEnt 模型对物种分布数据与环境因子变量进行训练, 支持物种基质阻力面构建和生境斑块识别, 为最小成本路径模型 (Least Cost Path Model, LCM) 生境网络建模提供基础数据, 并在模拟路径有效性筛选、廊道宽度生成等方面改进 LCM, 通过物种生境网络集成与验证, 为面向生境保护与连通性维护的生态空间划定提供新的方法与思路。结果表明: (1) 生态空间发挥重要的栖息地保护作用, 对重点表征物种栖息地保护率为 100%, 对其他物种栖息地保护率均值达到 88%; (2) 根据关联长度指数评价, 生态空间对各物种的生境连通性维护作用明显, 对凤头鸊鷉、大山雀、大斑啄木鸟、天鹅、赤狐、雀鹰等物种生境连通性的提升作用显著, 最高可提升 626%; (3) 生态空间面积仅为鄂温克旗总面积的 25.1%, 为农牧业等人类活动留有较大发展空间; (4) 伊敏河既是鄂温克旗重要生态主轴, 也是社会经济发展主轴, 应注意协调生态保护与社会经济发展的关系; (5) 鄂温克旗东南部生境间连通性较差, 应依托伊敏河上游各支流提升这一区域生境连通性。

关键词: 生境网络; 生态空间; 生境连通性; 物种分布模型; 最小成本路径模型; 鄂温克族自治旗

Delineation of ecological space with habitat protection and connectivity maintenance functions in Evenki Autonomous county

FU Qiang^{1,*}, ZHANG Haiming², ZHANG Yuerong¹, CHEN Yanan¹, KANG Feng³

1 School of architecture, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China

2 Inner Mongolia Urban Planning and Municipal Design Institute, Hohhot 010070, China

3 Natural Resources Conservation and Development Center of Evenki Autonomous county, Hulunbuir 021000, China

Abstract: The natural habitat shrinkage and fragmentation is severe due to the combined human activities influence and climate change. Protection of habitat and maintenance of connectivity between habitats play an important role in biodiversity conservation. The ecological status of Inner Mongolia is related to China's ecological security, and Ewenki Autonomous county is located in the northeast of Inner Mongolia Autonomous Region, with diverse landscapes such as mountains, water, forests, fields, grass, sand, cities, villages, and mines within its territory. In recent years, with the protection of basic grasslands and the construction of various protected areas, the quality of the natural ecology has been greatly improved. However, the contradiction between human and land still exists, and the development of agricultural and animal husbandry

基金项目: 国家自然科学基金 (51408344); 内蒙古自治区自然科学基金项目 (2021MS05025, 2022QN05020)

收稿日期: 2023-05-03; **网络出版日期:** 2023-12-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fuqiangfio@163.com

activities and the exploitation of mineral resources pose varying degrees of threats to wildlife habitats and migration corridors. Taking Ewenki Autonomous county as study area, this study constructs matrix resistance surface and the identifies habitat patches of each species based on the training results between corresponding species occurrence data and environmental factors simulated by MaxEnt model, which are used to model habitat networks by Least Cost Path Model (LCM), then improves the LCM in terms of effective simulation path effectiveness sifting and corridor with meaningful width generating, and finally delineates the ecological space with the aim of habitat protection and connectivity maintenance by integration of each habitat network, and verifies the protection effectiveness of the integrated network using correlation length index. The results indicate that: (1) the ecological space plays an important role in habitat protection, with the protection rate of 100% for key characteristic species and average protection rate of 88% for other species; (2) The ecological space plays a significant role in maintaining the habitat connectivity of all studied species, and significantly improves the habitat connectivity of species crested grebe (*Podiceps cristatus*), great tit (*Parus major*), great spotted woodpecker (*Dendrocopos major*), swan (*Cygnus*), red fox (*Vulpes vulpes*), and Eurasian sparrowhawk (*Accipiter nisus*), with the maximum increase of 626%, according to the assessment of correlation length index; (3) The area of ecological space is only 25.1% of the total area of Evenki Autonomous county, leaving a large space for the development of human activities such as agriculture and animal husbandry; (4) The Yimin River is not only an important ecological axis in Evenki Autonomous county, but also a social and economic development axis, and attention should be paid to coordinate the relationship between ecological protection and social-economic development; (5) The poor connectivity between habitats is found in the southeast of Evenki Autonomous county, and it is necessary to enhance the connectivity of habitats in this area by the ecological protection and recovery of the tributaries of the upper reaches of the Yimin River.

Key Words: habitat network; Ecological space; Habitat connectivity; Species distribution model; Least cost path model; Evenki Autonomous county

在人类活动及气候变化影响下,自然生境萎缩与破碎化现象严重,生境的面积与连通性对于生态保护同样重要^[1],对生物多样性保护意义重大^[2-3]。党的十八大报告中强调“构建国土生态安全格局”,党的十九大报告中明确“构建生态廊道和生物多样性保护网络”,二十大要求“提升生态系统多样性、稳定性、持续性”。生态空间是指具有自然属性、以提供生态服务或生态产品为主体功能的国土空间^[4],是自然生态系统的重要载体。以国土空间规划为代表的相关规划中^[5],生态空间划定更多集中于基于因子分析方法的生态敏感性、脆弱性评价,对于生境网络构建关注相对不足。因此,进行面向生境保护与连通性维护的生态空间划定方法研究,对于优化生态安全格局、提升生态系统多样性保护水平,完善生态空间划定方法具有重要意义。

生境网络构建成为近年来景观生态学及相关领域研究的热点^[6-8]。生境网络以生境保护与连通性维护为目标,为生态安全格局构建与优化^[9-10]、生态空间质量演变评价^[11-12]、生态重要性空间识别^[13-14]等方面提供理论依据与分析方法^[15-17]。基质阻力面构建、生境斑块识别、网络廊道模拟是生境网络构建的重要内容。基质阻力面量化表征环境因子对于物种移动的支撑(阻碍)作用^[18-20],是生境网络构建的重要数据基础^[21-22]。生境斑块表征物种主要栖息地范围,是生境网络的重要源地与汇地^[23]。然而当前研究往往通过专家咨询^[24-25]、既有研究成果梳理^[16]等方式完成基质阻力面构建与生境斑块识别,存在主观性过强的问题,进而影响到生境网络构建的科学性。以 MaxEnt 为代表的物种分布模型^[26-27]可建立物种分布点数据与环境因子变量数据的量化关系^[28-29],为提升基质阻力面构建与生境斑块识别的客观性与科学性提供有力支持^[30]。然而当前研究通常聚焦于单一物种^[31-32],难以满足生态空间划定对生物多样性保护的要求^[33]。在网络廊道模拟方面,最小成本路径模型(Least Cost Path Model,简称“LCM”)^[34]是当前生境网络构建的主力模型^[35-36]。然而 LCM 所模拟的路径通常缺少宽度信息,导致无法对生态空间边界划定提供直接支持。此外,LCM 所模拟的路径仅是生境之间移动总成本最小的路径,其有效性有待进一步研究确定。

内蒙古的生态状态,关系到内蒙古各族群众的生存和发展以及全国的生态安全^[37]。鄂温克族自治旗(后文简称鄂温克旗)隶属于内蒙古自治区呼伦贝尔市,是内蒙古境内地类景观完整丰富的旗县之一。本文以鄂温克旗为研究区,基于物种分布模型,建立研究区各相关物种分布点数据与环境因子变量数据关联关系,为基质阻力面构建与生境斑块识别提供客观的数据支持;改进 LCM 生境网络模拟算法,对模拟路径进行有效性筛选,提升生境网络构建的科学性,并基于有效路径进行廊道宽度模拟,为生态空间边界划定提供数据支撑;开展基于重点表征物种生境网络的生态空间划定,验证其在研究区所有相关物种生境保护与连通性维护中的作用,对鄂温克旗生态保护与优化提出建议。以期建立包含“物种分布点数据模拟分析—生境网络构建—生态空间划定”全过程的、可复制推广的方法体系,为相关规划中生态空间发挥生境保护与连通性维护作用方面提供方法支撑。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

鄂温克旗(47°32'50"—49°17'37"N, 118°48'02"—121°09'25"E)位于内蒙古自治区东北部,处于大兴安岭山地林区向呼伦贝尔草原区过渡区域,行政区面积达到 19111 km²。该旗大部属中温带大陆性草原气候,北部偏东部分属中温带季风性森林草原气候。境内山、水、林、田、草、沙、城、村、矿等地类景观多样,有辉河、红花尔基樟子松林两个国家级自然保护区以及莫和尔图、红花尔基伊敏河两个国家湿地公园,野生动植物资源丰富。近年来随着基本草原保护、各类保护区及公园建设,自然生态环境质量得到了很大程度改善。然而人地矛盾依然存在,矿产资源开发、农牧业活动以及不断加剧的土地沙化风险,对野生动物生境、迁徙廊道构成不同程度威胁。

1.2 数据来源

1.2.1 物种及其分布点数据获取与处理

根据鄂温克旗旗志记载,并咨询当地相关专家,结合物种生态价值、经济价值以及数据的可获得性,选取大斑啄木鸟(*Dendrocopos major*)、大山雀(*Parus major*)、雀鹰(*Accipiter nisus*)、黑鸢(*Milvus migrans*)、鸳鸯(*Aix galericulata*)、普通鸬鹚(*Phalacrocorax carbo*)、绿头鸭(*Anas platyrhynchos*)、极北柳莺(*Phylloscopus borealis*)、环颈雉(*Phasianus colchicus*)、鸿雁(*Anser cygnoides*)、凤头鹳鹬(*Podiceps cristatus*)、赤麻鸭(*Tadorna ferruginea*)、苍鹭(*Ardea cinerea*)、斑翅山鹑(*Perdix dauurica*)、白鹡鸰(*Motacilla alba*)、紫貂(*Martes zibellina*)、赤狐(*Vulpes vulpes*)等 17 个物种。其分布点数据来源有:①全球生物多样性信息平台(<http://www.gbif.org>);②鸟类监测统计表(<http://www.birdreport.cn/>);③鄂温克旗提供的鸟类观测记录。采样点数量最小为极北柳莺 55 个,均达最低出现点数量要求^[38—39],为减少自相关,每一物种 500 m 范围内只保留一个位置点。

1.2.2 环境因子数据获取与处理

环境因子数据包括:(1)世界气候数据网站^[40]获取的生物气候数据(Bio1—Bio19),分辨率为 30 弧秒(约 1 km);(2)国家地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>)获取的 GDEM V2 数字高程数据,分辨率为 30 m,并基于 ArcMap 处理得到坡度和坡向数据;(3)土地覆被数据来源于哥白尼全球土地服务(<https://land.copernicus.eu/global/>),分辨率为 100 m,包括密林常绿针叶林、疏林落叶针叶林、灌木、草本植被、城镇建成区、湿地等 23 种土地覆被类型。将上述数据重采样至 100 m 分辨率。对环境因子变量进行斯皮尔曼相关性分析检验变量间的共线性,排除具有较高相关度的因子($r > 0.7$),保留年平均气温(Bio1)、等温性(Bio3)、最湿月降水量(Bio13)、坡向、坡度以及各土地覆被类型等共 22 个因子。

考虑到物种生境景观配置^[41—42]以及边缘作用^[42]对于物种适生评价有重要影响,采用以物种出现点为中心,以 200 m 缓冲区范围占比统计的方式对地形、土地覆被相关属性赋值。这种方法还可一定程度上修正出现点位置定位精度不足导致的数据误差。此外,也使得土地覆被数据由“类别”型向“连续”型的转变,有利于提高模型训练的精度。

2 研究方法

2.1 MaxEnt 模型构建

MaxEnt 是一种广泛使用的物种分布预测模型^[43], 具有仅使用出现点数据^[39,44], 且对小样本数据不敏感^[45]的优势。基于 MaxEnt 模型, 对物种分布点数据与环境因子变量数据进行关系建模。在建模过程中, 训练数据为随机选取 75% 的分布点数据, 将其余 25% 分布点数据作为测试数据用于模型验证^[46]。正则化乘数值为 1, 其他参数选择默认值^[47]。通过 MaxEnt 模型对各物种进行训练, 得到物种出现概率分布图、受试者工作特征曲线 (获取 AUC 值)、环境因子响应曲线等结果。其中, 物种出现概率分布图用于潜在生境识别与基质阻力面构建; AUC 值用于判断模型的模拟精度^[38,48]; 环境因子响应曲线用于提取数值进行 k 均值聚类, 以此量化各物种适生特征, 并结合生态习性特征资料分析与咨询当地专家, 确定研究区重点表征物种。

2.2 潜在生境识别与网络斑块筛选

以各物种出现概率分布图的适生值的第十百分位数值为阈值^[49-50], 提取大于该阈值的区域作为潜在生境。为提升生境网络的建模效率, 剔除小于 1 km² 的琐碎生境, 并使用 ArcMap 聚合面工具对剩余生境进行聚合, 聚合距离选择 1 km, 将聚合结果作为计算所需的生境网络的斑块。

2.3 基质阻力面构建

借鉴文献^[51]方法, 通过 ArcMap 的栅格计算器功能, 得到各物种所对应基质阻力面 (公式 1)。其中, R_i 代表基质阻力面中网格 i 对于物种移动的阻碍程度, HS_i 为物种出现概率分布图中网格 i 的适生值。 R 取值范围 0—100, 数值越大, 网格对物种移动的阻碍作用越强烈。基质阻力面由适生面转化而来, 减少了人工赋值的主观性。为使分析结果与现状建设用地减少交集, 本文对建设用地类型栅格统一赋值为 100。

$$R_i = 100^{(-1 \times HS_i)} \quad (1)$$

2.4 潜在路径模拟与分级网络构建

基于基质阻力面构建与网络斑块筛选, 通过 LCM 对网络斑块间连接路径进行模拟, 并计算模拟路径的实际长度 (L), 根据模拟路径途经基质的阻力值, 计算阻力加权长度 (RL), 表示物种在该路径移动的总难易度。由此, 每条模拟路径具有 L 和 RL 两个属性。在此基础上, 本文提出平均阻力系数 (MRC) 计算方法 (公式 2), 表示物种在该模拟路径上移动时, 所受到的平均阻碍程度。根据公式 2, MRC 取值范围与基质阻力面一致, 为 0—100, 数值越高, 则难度越大, 表示其对于物种移动的支撑效果越差。以此作为路径有效性筛选及生境网络分级的数据依据。

$$MRC = RL/L \quad (2)$$

2.5 网络结构评价

采用关联长度指数^[52], 对生境网络连通性进行量化评价。在生境网络中, 相互连通的斑块构成一个斑块集合, 关联长度指数 (Correlation Length, CL) 表示物种在碰到斑块集边界之前所迁移的平均距离, 单位为 km。 CL 值越大, 则表示研究区域生境网络连通性越强。关联长度由公式 3 定义:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i \times R_i)}{\sum_{i=1}^m n_i} \quad (3)$$

式中, m 是斑块集合中斑块的个数, n_i 是斑块集合 i 中斑块所覆盖的像素个数, R_i 是斑块集 i 的回转半径, 其定义如公式 4 所示

$$R_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} \sqrt{(x_j - \bar{x}_i)^2 + (y_j - \bar{y}_i)^2}}{n_i} \quad (4)$$

式中, $\bar{x}_i$ 和 $\bar{y}_i$ 是斑块集合 i 中核心斑块所有像素坐标 x 和 y 的平均值, x_j 和 y_j 是斑块集合 i 中第 j 个斑块像素的横坐标和纵坐标。

2.6 基于模拟路径的廊道宽度生成

本文使用 ArcEngine 中 IDistanceOp2 接口的 Corridor 方法, 基于基质阻力面, 实现网络斑块间模拟路径宽度的动态模拟, 为区别于 LCM 无宽度的路径, 将带有宽度的模拟路径称为模拟廊道。

综上, 构建面向生境保护与连通性维护的生态空间, 具体研究方法如图 1。基于 Microsoft Visual Studio, Net 开发平台和 ArcEngine 地理信息系统二次开发包开发的分析程序完成相关数据处理与计算。由于生物移动通常不受行政边界限制, 分析范围为包含鄂温克旗行政区范围的矩形, 后文相关分析、统计结果均基于此范围。

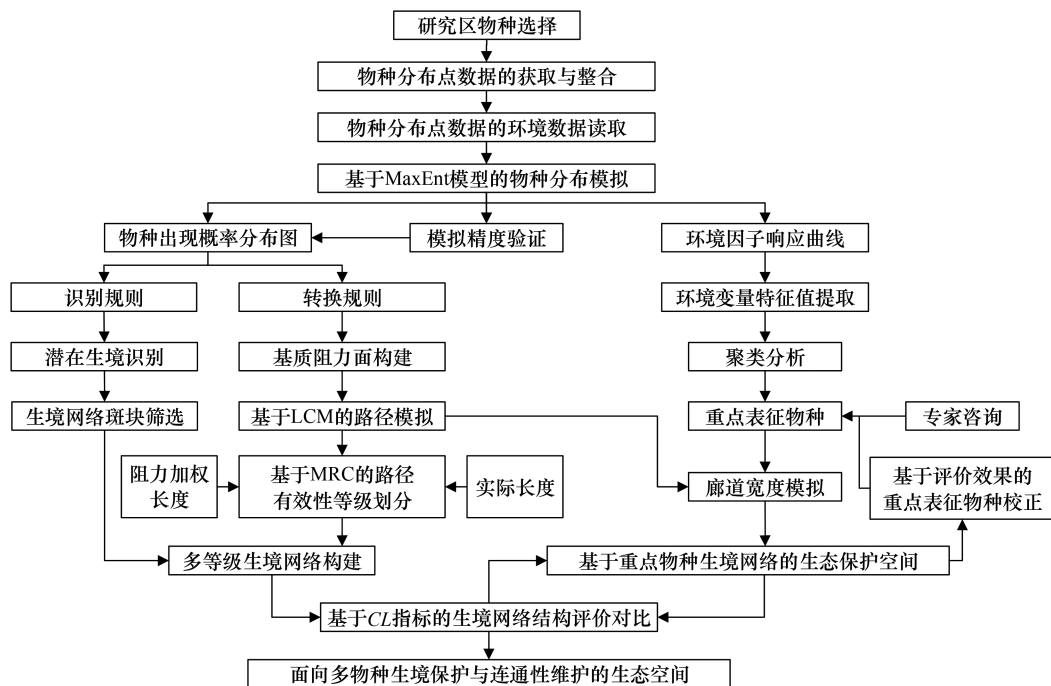


图 1 方法流程图

Fig.1 Technology sketch map

LCM:最小成本路径模型 Least Cost Path Model;MRC:平均阻力系数 Mean Resistance Coefficient;CL:关联长度指数 Correlation Length

3 结果与分析

3.1 MaxEnt 模型模拟结果

结果显示训练样本 AUC 值在 0.919(绿头鸭)—0.989(大山雀)之间, 测试样本 AUC 值在 0.892(绿头鸭)—0.992(凤头鹀)之间, 根据相关评判标准^[53], MaxEnt 模型预测精度达到或者接近极好, 结果可靠, 可较好地模拟鄂温克旗各相关物种的适生空间分布。基于各物种出现概率分布图(图 2), 转换成基质阻力面并进行潜在生境识别与网络斑块提取。通过 LCM 得到各物种生境与模拟路径空间分布图(图 3), 并确定大斑啄木鸟、大山雀、黑鸢、白鹡鸰、鸳鸯、赤狐、紫貂为研究区重点表征物种。

3.2 基准等级生境网络

MRC 值超过 70, 模拟路径途经区域对于物种移动的支撑作用与一般生态基质差异不大。因此, 以 10、20、30……70 为阈值对模拟路径的有效性进行分级划分, 得到各重点表征物种 7 个等级的生境网络(图 4)及结构评价(表 1)。除辉河保护区出现大山雀 30 等级模拟路径外, 其他各物种 30 等级以下模拟路径数量均为

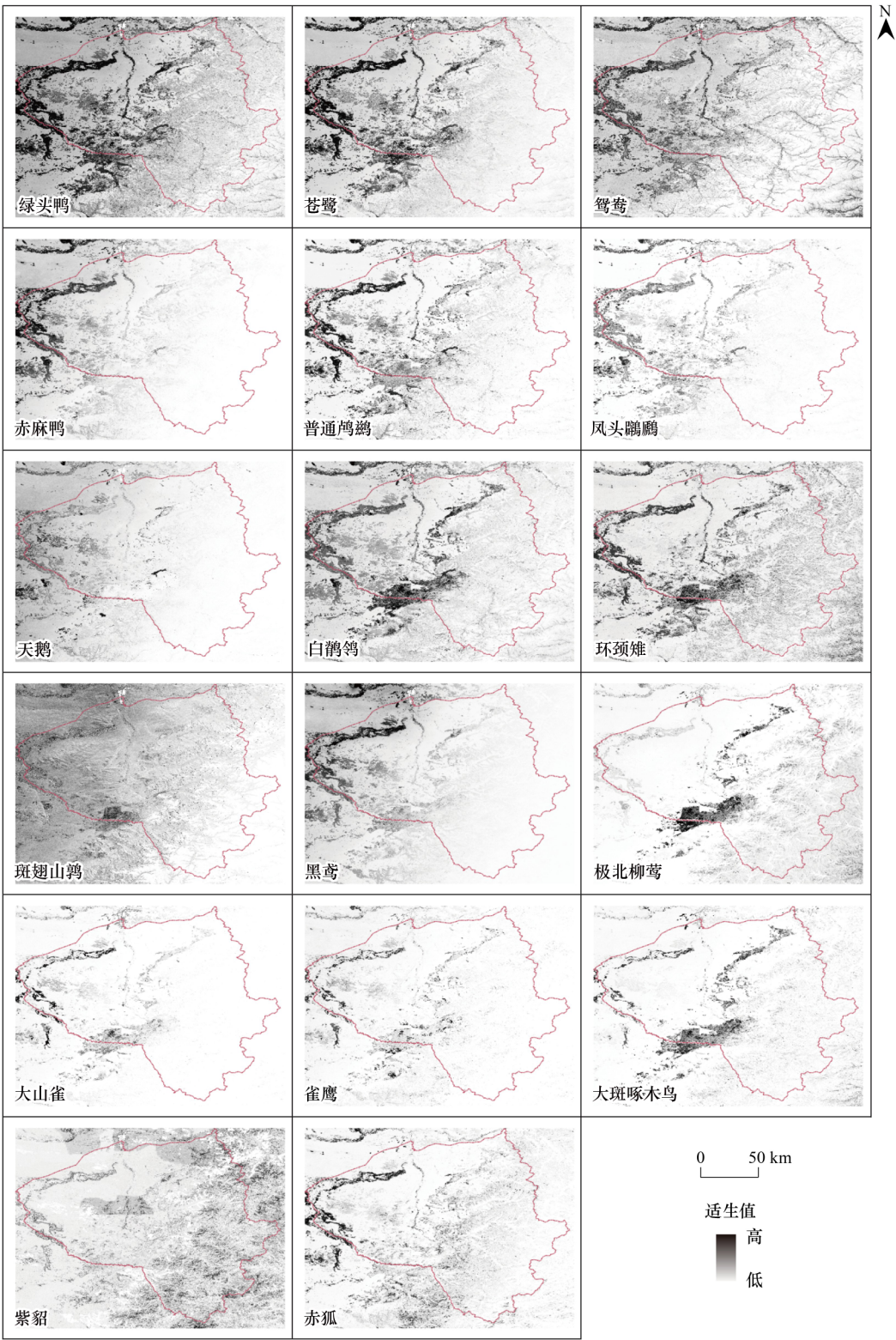


图 2 各物种出现概率分布图

Fig.2 Distribution maps of occurrence probability of each species

零,反映出鄂温克旗生态基质质量尚不足以支撑生境间高效连通。在 50 等级,各重点表征物种模拟路径均有较大数量出现。主要分布在辉河保护区西部与北部、红花尔基樟子松林保护区、鄂温克旗与新巴尔虎左旗交

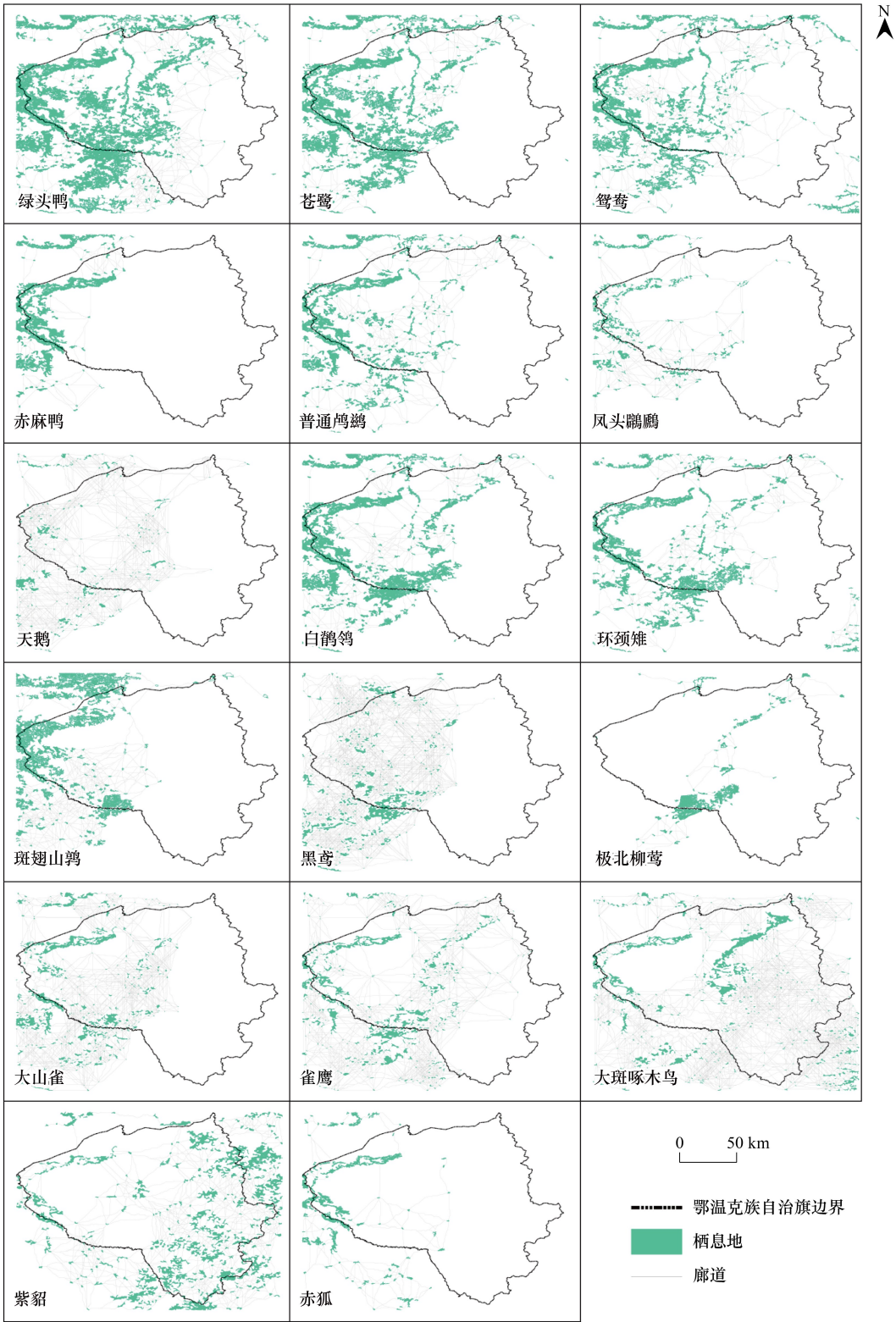


图 3 各物种生境与模拟路径空间分布图

Fig.3 The spatial distribution maps of simulated habitats and paths of each species

界处的巴彦岱护林站、鄂温克旗东南侧的牙克石市大兴安岭西麓、白银崓岗自然保护区、五泉山自然保护区、鄂温克旗东北部与牙克石市交界处的莫和尔图湿地公园。基于 CL 指数,对各物种不同等级生境网络进行评

价(表 1),各物种 40—50 等级生境网络连接质量提升明显。因此,以 $MRC \leq 50$ 作为重点表征物种有效模拟路径的基准等级。

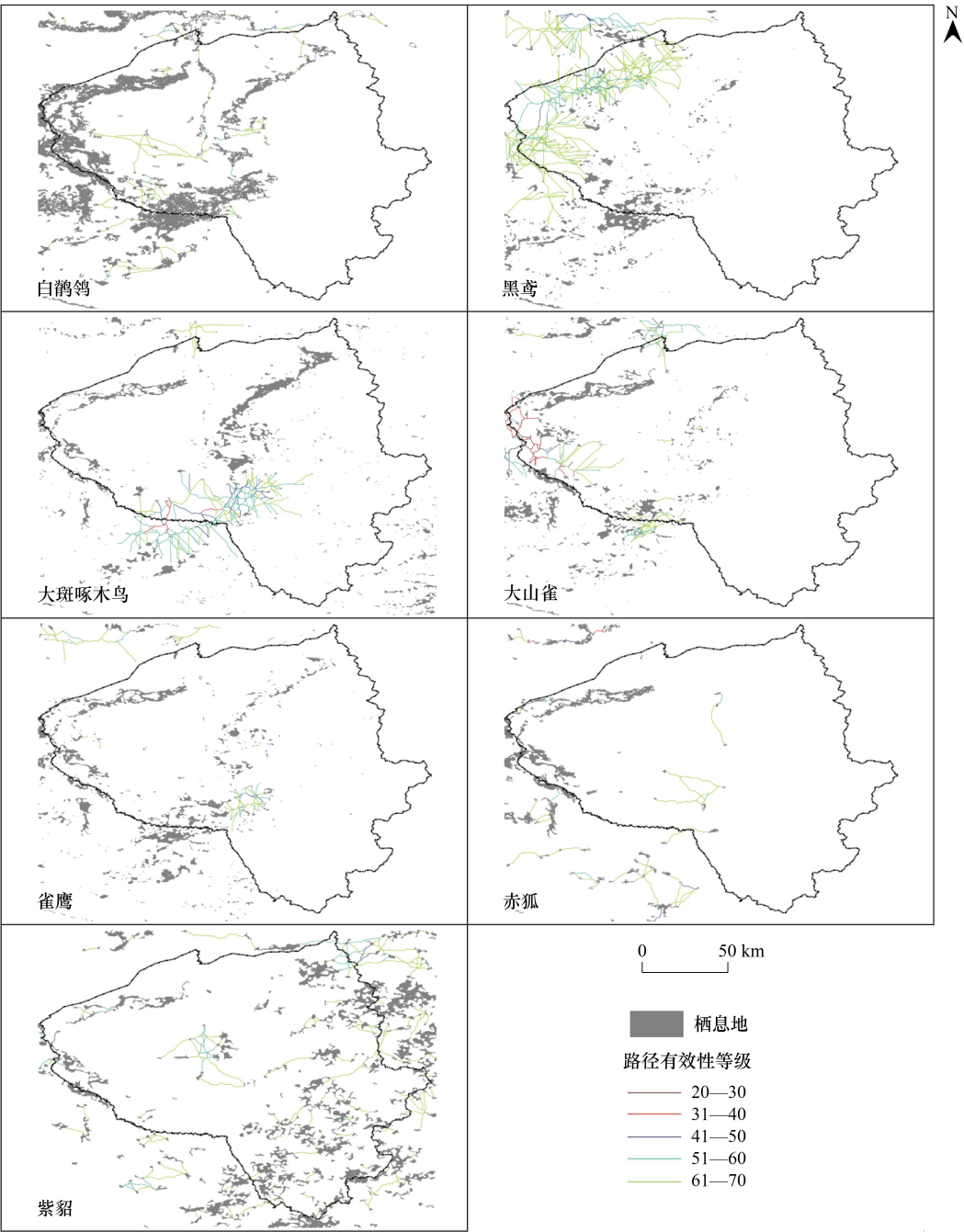


图 4 重点表征物种 7 个等级的生境网络
Fig.4 Seven levels of habitat networks of focal species

3.3 基于重点表征物种生境网络的生态空间划定

基于有效模拟路径,结合相应生境斑块,构建各重点表征物种的生境网络(图 5)。通过各生境网络的空间叠加合并,并对合并后空间数据“天窗”填充,得到基于重点表征物种生境网络的生态空间。根据生态空间对于研究区各物种的生境覆盖程度计算(表 2),其对其他物种的生境覆盖率在 69%(绿头鸭)—100%(极北柳莺)之间,参考生境保护比例^[1],生态空间对于研究区各物种生境斑块均表现出良好的保护效果。若将生

态空间覆盖率超过 90%的模拟路径作为相应物种生境网络的有效连接路径,对各生境网络做结构评价(表 2),生态空间内各物种生境网络连通性均有不同程度提升;凤头鸕鷀、大山雀、大斑啄木鸟、天鹅、赤狐、雀鹰等物种生境网络 CL 值大幅超过各物种 70 等级网络所对应的 CL 值,发挥极好的生境间连通性提升作用;极北柳莺、白鹡鸰、黑鸢、赤麻鸭、紫貂等物种 CL 值超过 60 等级网络;生境之间连通性较好的苍鹭、鸳鸯等物种,网络连通性也有一定程度提升。

表 1 各等级生境网络结构评价
Table 1 Structure evaluation of habitat networks of each level

		大山雀 Great Tit	大斑啄木鸟 Great spotted woodpecker	黑鸢 Black Kite	雀鹰 Eurasian Sparrowhawk	白鹡鸰 White Wagtail	赤狐 Red Fox	紫貂 Sable
网络斑块数量		345	488	374	402	145	74	295
10 等级网络	斑块集合数	345	488	374	402	145	74	295
10 network	路径数	0	0	0	0	0	0	0
	CL 值(1000 km)	426	723	297	368	4547	420	1022
20 等级网络	斑块集合数	345	488	374	402	145	74	295
20 network	路径数	0	0	0	0	0	0	0
	CL 值(1000 km)	426	723	297	368	4547	420	1022
	CL 提升率/%	0	0	0	0	0	0	0
30 等级网络	斑块集合数	341	488	374	402	145	74	295
30 network	路径数	51	0	0	0	0	0	0
	CL 值(1000 km)	428	723	297	368	4547	420	1022
	CL 提升率/%	0	0	0	0	0	0	0
40 等级网络	斑块集合数	330	486	370	400	145	72	295
40 network	路径数	156	33	7	4	0	4	0
	CL 值(1000 km)	500	725	300	369	4547	430	1022
	CL 提升率/%	17	0	1	0	0	2	0
50 等级网络	斑块集合数	317	472	355	388	140	65	286
50 network	路径数	232	131	126	61	9	18	19
	CL 值(1000 km)	518	739	333	394	4550	456	1047
	CL 提升率/%	4	2	11	7	0	6	3
60 等级网络	斑块集合数	297	457	328	381	122	56	254
60 network	路径数	358	318	447	128	46	35	94
	CL 值(1000 km)	549	773	353	424	4584	545	1205
	CL 提升率/%	6	5	6	7	1	19	15
70 等级网络	斑块集合数	268	437	268	358	63	33	125
70 network	路径数	501	441	1009	209	214	93	368
	CL 值(1000 km)	633	850	893	460	5490	758	2878
	CL 提升率/%	15	10	153	9	20	39	139

CL:关联长度指数 Correlation length

因此,基于重点表征物种生境网络的生态空间对于所有相关物种均具有较好的生境保护与连通性维护作用,该生态空间在鄂温克旗行政区内面积 4767 km²,占比 25.1%。对重点表征物种斑块和廊道累加,可进一步区分生态空间内部各地块的重要等级(图 6),形成两片、两轴、多点的鄂温克旗生态空间分布格局。辉河、红花尔基樟子松林保护区构成鄂温克旗生态空间的核心片区,两片区通过辉河上游支流水系相连接,形成鄂温克旗西部与南部重要的生态多样性保护空间。以红花尔基樟子松林保护区核心片区为源地,分别形成北向、东北向两条生态连通轴:(1)经由锡尼河东苏木、骆驼山、巴彦嵯岗苏木至五泉山的西南至东北走向的生态连通轴;(2)沿伊敏河及其湿地系统,经伊敏河镇、孟根楚鲁、锡尼河镇、巴彦塔拉达斡尔族乡到鄂温克旗中

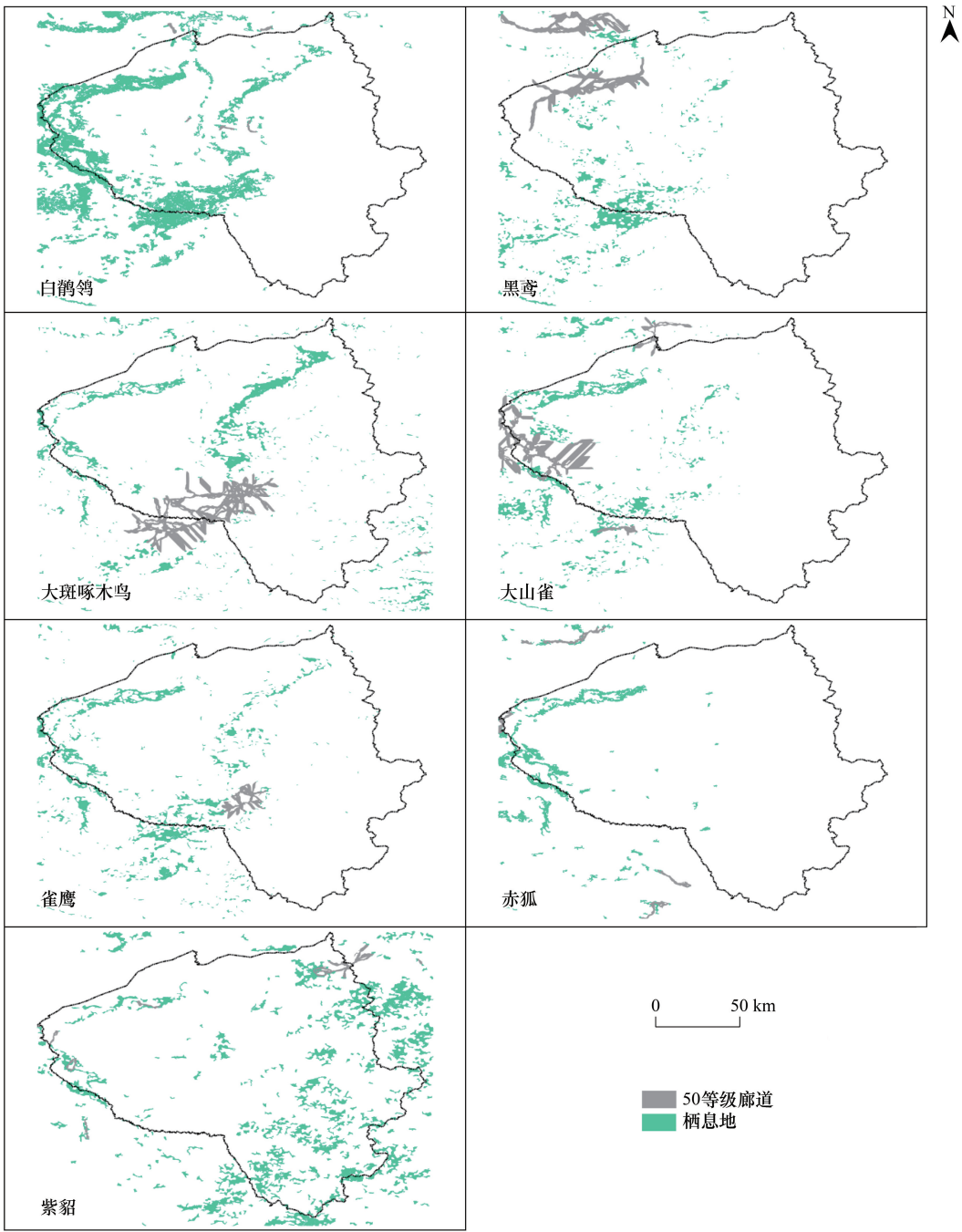


图 5 基于 50 等级廊道的重点表征物种生境网络空间分布图

Fig.5 The spatial distribution maps of habitat network of focal species based on a 50 level corridor

心城区,在巴彦塔拉达斡尔族乡与辉河保护区核心片区东侧相连,形成连接两大生态核心片区的纵贯南北的生态主轴。鄂温克旗东南部大兴安岭西麓一带则分布着多个互不相连的孤立生态空间。

4 结论与讨论

通过 MaxEnt 物种分布模型的引入,将其预测结果应用于潜在生境识别与基质阻力面构建,将景观类型、地形、气象等物种适生环境因子融入生境网络建模。提出 MRC,将其作为物种在生境间移动的整体难易度用于网络路径有效性评价的标准,鄂温克旗鲜见 30 等级以下廊道,各物种 70 等级以上模拟路径占比均值达到

70%,鄂温克旗生境间连接路径质量有待大幅提升。

表 2 生态空间对各物种生境的覆盖率及网络结构对比

Table 2 Habitat coverage rate and comparison of network structure under the ecological space					
物种名称 Species name	生态空间对栖息地的覆盖率/% Habitat coverage by ecological spaces	不同等级生境网络 CL 值(1000 km) CL values of different levels of habitat networks(1000 km)			生态空间覆盖 Coverage by ecological space
		50 等级 Level 50	60 等级 Level 60	70 等级 Level 70	
凤头鸊鷉 <i>Podiceps cristatus</i>	99	222	258	266	1614
大山雀 <i>Parus major</i>	100	518	549	633	1320
大斑啄木鸟 <i>Dendrocopos major</i>	100	739	773	850	1386
天鹅 <i>Cygnus</i>	98	63	63	63	423
赤狐 <i>Vulpes vulpes</i>	100	456	545	758	1352
雀鹰 <i>Accipiter nisus</i>	100	394	424	460	1452
极北柳莺 <i>Phylloscopus borealis</i>	100	434	487	658	616
白鹡鸰 <i>Motacilla alba</i>	100	4550	4584	5490	4871
黑鸢 <i>Milvus migrans</i>	100	333	353	893	583
赤麻鸭 <i>Tadorna ferruginea</i>	99	2863	2875	2901	2880
苍鹭 <i>Ardea cinerea</i>	79	5746	6690	11142	5814
绿头鸭 <i>Anas platyrhynchos</i>	69	9019	13552	22869	9011
鸳鸯 <i>Aix galericulata</i>	77	4686	5057	9161	4728
斑翅山鹑 <i>Perdix dauurica</i>	76	2878	3196	5864	3171
普通鸬鹚 <i>Phalacrocorax carbo</i>	90	2505	3469	6157	3385
环颈雉 <i>Phasianus colchicus</i>	88	2763	3489	6986	3409
紫貂 <i>Martes zibellina</i>	100	1047	1205	2878	1923

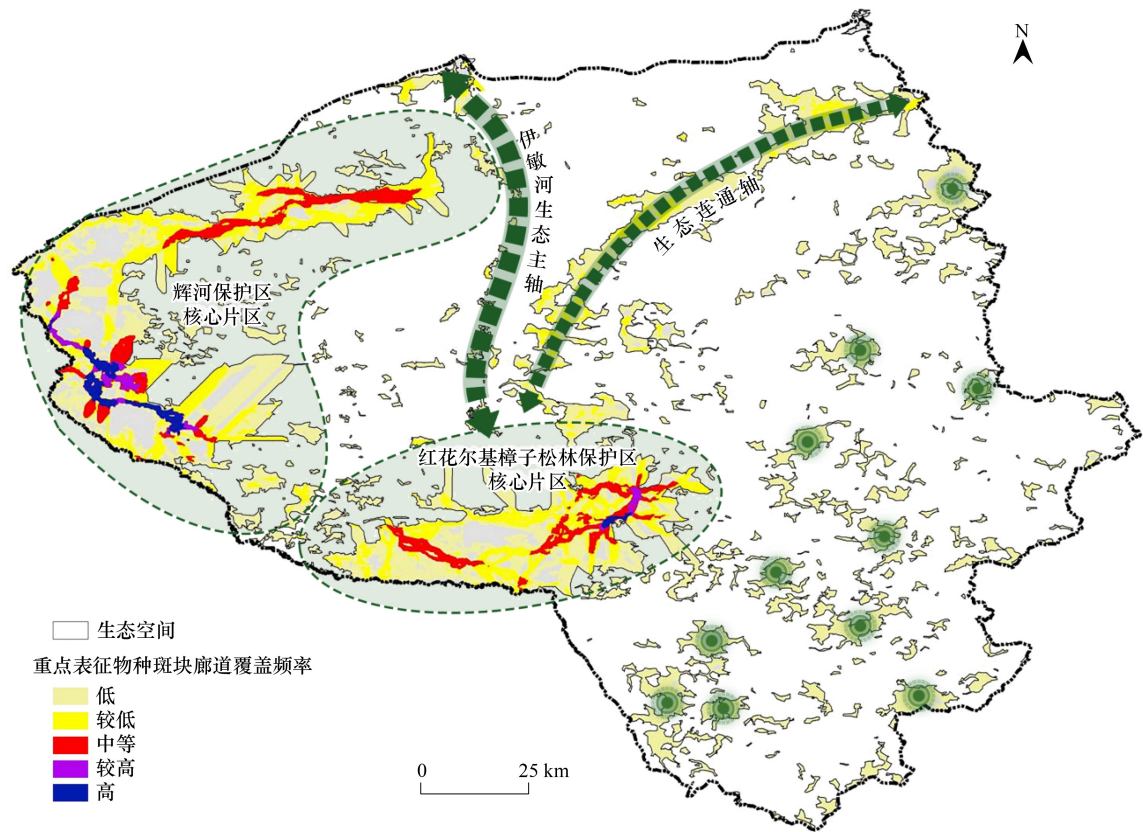


图 6 鄂温克旗面向生境保护与连通性维护的生态空间

Fig.6 Ecological space of Evenki Autonomous county with habitat protection and connectivity maintenance functions

基于重点表征物种基准等级生境网络构建的生态空间,对于研究区所有相关物种的生境均有较好的保护作用,对重点表征物种保护率为 100%,对其余物种生境平均保护率 88%,最高保护率 100%。以该生态空间作为生态保护与修复范围,将对凤头鸊鷉、大山雀、大斑啄木鸟、天鹅、赤狐、雀鹰等物种生境间连通性有明显提升作用,连通性最高提升 626%。除建设用地外,生态空间内部景观类型占比分别为:草地 46%、落叶阔叶林 17%、湿地 10%、落叶针叶林 9%、其他郁闭林 8%;而鄂温克旗全域景观类型占比前五分别为草地 62%、落叶阔叶林 11%、其他郁闭林 9%、落叶针叶林 8%、农田 4%,对比可知,生态空间既维护了生物多样性,也为鄂温克旗农牧业发展留有充足空间。生态空间内草地的牧业利用应严格执行草畜平衡、休牧轮牧等生态保育措施。作为鄂温克旗社会经济发展主轴的伊敏河廊道,是纵贯鄂温克旗南北、连接两大生态核心片区的重要生态轴,应特别注意协调这一区域生态保护与社会经济发展的关系。鄂温克旗东南部生境间连通性较差,应采取措施加强伊敏河上游各支流在生境连通性提升中的作用,并注重与鄂温克旗临近旗县生态空间的连通性构建与维护。

本文以鄂温克旗为例,以生境保护与连通性维护为目标,建立了“物种分布点数据模拟分析—生境网络构建—生态空间划定”方法体系,这一体系尽可能的规避人为主观因素的影响,使得不同时空、不同物种生境网络结构质量的横向量化比较成为可能。但在如下方面仍需深入研究:在划定的生态空间内部,进一步考虑各具体物种的生境与廊道适生环境因子的兼容性,为生态空间内部生态修复、生态恢复提供指引;考虑与生态重要性、敏感性评价结果的综合集成,以提升生态空间划定的完整性与系统性。

参考文献 (References):

- [1] Moore H A, Michael D R, Dunlop J A, Valentine L E, Cowan M A, Nimmo D G. Habitat amount is less important than habitat configuration for a threatened marsupial predator in naturally fragmented landscapes. *Landscape Ecology*, 2022, 37(4): 935-949.
- [2] 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.
- [3] Fahrig L. Why do several small patches hold more species than few large patches? *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29(4): 615-628.
- [4] 中共中央办公厅、国务院办公厅.《关于划定并严守生态保护红线的若干意见》.(2017-02-17) [2022-02-19]. http://www.gov.cn/zhengce/2017-02/07/content_5166291.htm.
- [5] 中共中央国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见.(2019-05-23) [2023-09-20]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content_5394187.htm
- [6] Goicolea T, Mateo-Sánchez M C. Static vs dynamic connectivity: how landscape changes affect connectivity predictions in the Iberian Peninsula. *Landscape Ecology*, 2022, 37(7): 1855-1870.
- [7] Godet C, Clauzel C. Comparison of landscape graph modelling methods for analysing pond network connectivity. *Landscape Ecology*, 2021, 36(3): 735 - 748.
- [8] Dondina O, Orioli V, Chiatante G, Bani L. Practical insights to select focal species and design priority areas for conservation. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105767.
- [9] 韩王亚,夏双双,周维,申宇,苏旭坤,刘国华.基于生态廊道识别的拉萨河流域生态安全格局构建. *生态学报*, 2023, 43(21): 1-10.
- [10] 金银丽,周冬梅,周凡,杨静,朱小燕,马静,张军.疏勒河流域生态安全网络构建及优化. *应用生态学报*, 2023, 34(4): 1063-1072.
- [11] 陈艳,马月伟,潘健峰,冯小鹤.顾及石漠化敏感性的山地型城市生态网络构建——以云南省曲靖市为例. *生态学报*, 2023, 43(17): 1-12.
- [12] 马扩,郝丽娜,童新,段利民,曹文梅,康雪儿,刘小勇,刘廷玺.科尔沁沙丘-草甸相间地区生态安全格局的时空演变. *应用生态学报*, 2023, 34(8): 2215-2225.
- [13] 柳建玲,李胜鹏,范胜龙,胡勇.基于生态安全格局的厦漳泉地区国土空间生态保护修复区与预警点识别. *生态学报*, 2021, 41(20): 8124-8134.
- [14] 樊影,王宏卫,杨胜天,刘勤,衡嘉尧,高一薄.基于生境质量和生态安全格局的阿勒泰地区生态保护关键区域识别. *生态学报*, 2021, 41(19): 7614-7626.
- [15] 阳文锐,李婧,闻丞,黄越,顾懿芸,朱洁,唐燕.基于物种分布的北京平原生态网络构建. *生态学报*, 2022, 42(20): 8213-8222.
- [16] 李权荃,金晓斌,张晓琳,韩博,李寒冰,周寅康.基于景观生态学原理的生态网络构建方法比较与评价. *生态学报*, 2023, 43(4): 1461-1473.
- [17] 张启舜,李飞雪,王帝文,李满春,陈东.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*, 2021, 41(8): 3007-3020.
- [18] Beier P, Majka D R, Newell S L. Uncertainty analysis of least-cost modeling for designing wildlife linkages. *Ecological Applications*, 2009, 19(8): 2067-2077.
- [19] Cushman S A, Lewis J S. Movement behavior explains genetic differentiation in American black bears. *Landscape Ecology*, 2010, 25(10): 1613-1625.
- [20] Zeller K A, McGarigal K, Whiteley A R. Estimating landscape resistance to movement; a review. *Landscape Ecology*, 2012, 27(6): 777-797.
- [21] Dutta T, Sharma S, Meyer N F V, Larroque J, Balkenhol N. An overview of computational tools for preparing, constructing and using resistance

- surfaces in connectivity research. *Landscape Ecology*, 2022, 37(9): 2195-2224.
- [22] Peterman W E. ResistanceGA: an R package for the optimization of resistance surfaces using genetic algorithms. *Methods in Ecology and Evolution*, 2018, 9(6): 1638-1647.
- [23] Bennett G, Mulongoy K J. Review of Experience with Ecological Networks, Corridors and Buffer Zones. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Technical Series, 2006, 23, 100 pages.
- [24] Etherington T R. Least-cost modelling and landscape ecology: concepts, applications, and opportunities. *Current Landscape Ecology Reports*, 2016, 1(1): 40-53.
- [25] 于成龙, 刘丹, 冯锐, 唐权, 郭春玲. 基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建. *生态学报*, 2021, 41(1): 290-301.
- [26] Phillips S. maxnet: Fitting "Maxent" species distribution models with "glmnet". (2022-10-13) [2023-09-20]. <https://mirrors.sjtug.sjtu.edu.cn/cran/web/packages/maxnet/maxnet.pdf>
- [27] Lele S R, Keim J L, Solymos P. Package 'Resource Selection'. (2023-07-09) [2023-09-20]. <https://cran.r-project.org/web/packages/ResourceSelection/ResourceSelection.pdf>
- [28] Villero D, Pla M, Camps D, Ruiz-Olmo J, Brotons L. Integrating species distribution modelling into decision-making to inform conservation actions. *Biodiversity and Conservation*, 2017, 26(2): 251-271.
- [29] Dickson B G, Albano C M, Anantharaman R, Beier P, Fargione J, Graves T A, Gray M E, Hall K R, Lawler J J, Leonard P B, Littlefield C E, McClure M L, Novembre J, Schloss C A, Schumaker N H, Shah V B, Theobald D M. Circuit-theory applications to connectivity science and conservation. *Conservation Biology: the Journal of the Society for Conservation Biology*, 2019, 33(2): 239-249.
- [30] Cushman S A, MacDonald E A, Landguth E L, Malhi Y, MacDonald D W. Multiple-scale prediction of forest loss risk across Borneo. *Landscape Ecology*, 2017, 32(8): 1581-1598.
- [31] Ahmadi M, Balouchi B N, Jowkar H, Hemami M, Fadakar D, Malakouti-khah S, Ostrowski S. Combining landscape suitability and habitat connectivity to conserve the last surviving population of cheetah in Asia. *Diversity and Distributions*, 2017, 23(6): 592-603.
- [32] Duflo 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.
- [33] Thompson P L, Rayfield B, Gonzalez A. Loss of habitat and connectivity erodes species diversity, ecosystem functioning, and stability in metacommunity networks. *Ecography*, 2017, 40(1): 98-108.
- [34] Adriaensen F, Chardon J P, De Blust 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.
- [35] 吴钰茹, 吴晶晶, 毕晓丽, 栗云召, 肖鲁湘. 综合模型法评估黄河三角洲湿地景观连通性. *生态学报*, 2022, 42(4): 1315-1326.
- [36] 尹海伟, 孔繁花, 祁毅, 王红扬, 周艳妮, 秦正茂. 湖南省城市群生态网络构建与优化. *生态学报*, 2011, 31(10): 2863-2874.
- [37] 央广网. 奋力书写中国式现代化内蒙古新篇章——习近平总书记在内蒙古考察引起广大干部群众热烈反响. (2023-06-10) [2023-07-09]. http://china.cnr.cn/news/sz/20230610/t20230610_526283015.shtml.
- [38] Wunderlich R F, Mukhtar H, Lin Y P. Comprehensively evaluating the performance of species distribution models across clades and resolutions: choosing the right tool for the job. *Landscape Ecology*, 2022, 37(8): 2045-2063.
- [39] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [40] Fick S E, Hijmans R J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(12): 4302-4315.
- [41] Fahrig L. Rethinking patch size and isolation effects: the habitat amount hypothesis. *Journal of Biogeography*, 2013, 40(9): 1649-1663.
- [42] McDonald L, Koper N. Landscape openness, not patch size or grassland amount, drives area sensitivity of songbirds in northern tall-grass prairies. *Landscape Ecology*, 2022, 37(4): 951-967.
- [43] Frangini L, Sterrer U, Franchini M, Pesaro S, Rüdiger J, Filacorda S. Stay home, stay safe? High habitat suitability and environmental connectivity increases road mortality in a colonizing mesocarnivore. *Landscape Ecology*, 2022, 37(9): 2343-2361.
- [44] García-Sánchez M, González-Ávila S, Solana - Gutiérrez J, Popa M, Jurj R, Ionescu G, Ionescu O, Fedorca M, Fedorca A. Sex-specific connectivity modelling for brown bear conservation in the Carpathian Mountains. *Landscape Ecology*, 2021, 37(4): 1311-1329.
- [45] Wisz M S, Hijmans R J, Li J, Peterson A T, Graham C H, Guisan A. Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions*, 2008, 14(5): 763-773.
- [46] 王鑫, 任亦钊, 黄琴, 邓小兵, 陈才文, 邓洪平. 基于 GIS 和 Maxent 模型的赤水河地区濒危植物桫欏生境适宜性评价. *生态学报*, 2021, 41(15): 6123-6133.
- [47] 钱灵颖, 黄智洵, 杨盛昌, 曹文志. 厦门市重点保护植物空间优先保护格局研究. *生态学报*, 2021, 41(11): 4367-4378.
- [48] Phillips S J, Dudík M, Elith J, Graham C H, Lehmann A, Leathwick J, Ferrier S. Sample selection bias and presence-only distribution models: implications for background and pseudo-absence data. *Ecological Applications*, 2009, 19(1): 181-197.
- [49] Capinha C, Larson E, Tricarico E, Olden J, Gherardi F. Effects of climate change, invasive species, and disease on the distribution of native European crayfishes. *Conservation Biology*, 2013, 27(4): 731-740.
- [50] Ramirez-Reyes C, Bateman B L, Radeloff V C. Effects of habitat suitability and minimum patch size thresholds on the assessment of landscape connectivity for jaguars in the Sierra Gorda, Mexico. *Biological Conservation*, 2016, 204: 296-305.
- [51] Mohammadi A, Almasieh K, Nayeri D, Ali Adibi M, Wan H Y. Comparison of habitat suitability and connectivity modelling for three carnivores of conservation concern in an Iranian montane landscape. *Landscape Ecology*, 2022, 37(2): 411-430.
- [52] Keitt T, Urban D L, Milne B T. Detecting critical scales in fragmented landscapes. *Conservation Ecology*, 1997, 1: art4.
- [53] Eskiildsen A, le Roux P C, Heikkinen R K, Høye T T, Kissling W D, Pöry J, Wisz M S, Luoto M. Testing species distribution models across space and time: high latitude butterflies and recent warming. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(12): 1293-1303.