神农架林区不同海拔梯度下鸟类生态廊道的识别与构建*

万艺欣[1] 李硕文[1] 张婧雅[1,2] 钟 乐[1,2]

（1. 华中农业大学园艺林学学院，武汉 430070；2. 农业农村部华中都市农业重点实验室，武汉 430070）

摘要：【目的】识别神农架林区不同海拔梯度下鸟类生态廊道的空间分布特征，揭示山地生态系统垂直连通性，为鸟类多样性保护与生态网络构建提供科学依据。【方法】选取黄胸鹀（低海拔）、白冠长尾雉（中海拔）和红嘴相思鸟（高海拔）作为焦点物种，采用 MaxEnt 模型识别生态源地，通过构建三维阻力面，运用 Linkage Mapper 工具提取潜在生态廊道。【结果】1）3 种鸟类生态廊道分布存在差异，黄胸鹀廊道主要沿水系和开阔地带分布，白冠长尾雉廊道多分布于山谷和森林边缘，红嘴相思鸟廊道与山脊线和连续林带基本吻合；2）海拔 1 000~1 500 m 生态过渡带内，黄胸鹀与白冠长尾雉的生态廊道存在空间重叠，红嘴相思鸟的高海拔廊道则分布于该区域以上。3）现有自然保护地对中高海拔森林生态系统覆盖较好，但低海拔生态源地和廊道多位于保护区外。【结论】鸟类生态廊道分布与海拔梯度密切相关，1 000~1 500 m 过渡带是维持山地垂直连通性的关键区域。建议将跨海拔生态过渡带的识别与保护纳入区域生态规划，实施鸟类生境分区保育，构建以过渡带为核心的鸟类生态网络优先保育区；同时，通过补齐低海拔保护空缺，促进廊道网络与自然保护地体系协同发展。

关键词：生态廊道；神农架林区；焦点物种；三维阻力面；海拔梯度

DOI：10.12169/zgcsly.2026.01.21.0002

Identification and Establishment of Avian Ecological Corridors across Altitude Gradients in the Shennongjia Forest Area

Wan Yixin[1] Li Shouwen[1] Zhang Jingya[1,2] Zhong Le[1,2]

（1. College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Agriculture and Rural Affairs for Urban Agriculture in Central China, Wuhan 430070, China）

Abstract:【Objective】This study aims to identify spatial distribution characteristics of avian ecological corridors across altitude gradients in the Shennongjia Forest Area, elucidate vertical connectivity in mountain ecosystems, and provide a scientific basis for bird diversity conservation and ecological networking.【Method】Yellow-breasted Bunting (*Emberiza aureola*) at low altitudes, Reeves's Pheasant (*Syrmaticus reevesii*) at mid altitudes, and Red-billed Leiothrix (*Leiothrix lutea*) at high altitudes are selected as focus species. The MaxEnt model is employed to identify ecological sources, and a three-dimensional resistance surface is constructed to extract potential ecological corridors using the Linkage Mapper tool.【Result】1) Ecological corridor distribution differs among species. Ecological corridors for *E. aureola* are mainly along water systems and open areas; corridors for *S. reevesii* are most distributed in valleys and forest edges; and corridors for *L. lutea* go largely alongside ridgelines and continuous forest

收稿日期：2026-01-21

* 基金项目：国家自然科学基金项目（32371946）

第一作者：万艺欣，女，2002 年生，硕士生，研究方向为风景园林规划与设计。E-mail：wanyixin2002@163.com

通信作者：张婧雅，女，1987 年生，博士，副教授，研究方向为国家公园与自然保护地。E-mail：zhangjy@mail.hzau.edu.cn

belts；2）Within the ecotone at the altitude of 1 000－1 500 m，corridors for *E. aureola* and *S. reevesii* spatially overlap，whereas high-altitude corridors for *L. lutea* seat above this zone；and 3）Existing natural protected areas are largely located in forests at mid- and high-altitude，but most low-altitude ecological sources and corridors are situated outside nature reserves.【Conclusion】Avian ecological corridors exhibit distinct altitude gradients，while the ecotone at 1 000－1 500 m serves as a critical hub for mountain vertical connectivity. It is proposed to integrate the identification and protection of cross-altitudinal ecotones into regional ecological planning，implement habitat zoning conservation for birds，and establish priority conservation areas centered on ecotones，establish priority conservation areas within the avian ecological network with ecotones as the core，and foster synergistic development between corridor networks and natural protected area systems through addressing low-altitude conservation gaps.

Keywords：ecological corridor；Shennongjia Forest Area；focal species；3D resistance surface；altitude gradient

生境破碎化是全球生物多样性丧失的主要驱动因素之一[1]。作为维持景观连通性、保障物种扩散与基因交流的关键景观结构，生态廊道的构建已成为生态保护研究的核心内容。鸟类作为对环境变化敏感的指示类群，是区域生态系统的重要组成部分，对维持生态平衡和功能具有重要作用[2]。

早期鸟类生态廊道研究对象多聚焦于单一濒危物种[3]，然而单一物种策略难以保障区域生物多样性的整体安全，且仅聚焦濒危物种忽略了常见但生态功能重要的物种，存在物种代表性不足的问题[4]。近年来，越来越多的研究按照生态功能类群构建多种鸟类的差异化廊道。例如，将水鸟划分为涉禽、游禽等类群分别构建阻力面或划分为留鸟、林鸟、水鸟、广适性鸟构建差异化鸟类廊道[5-6]。分类后再进一步选择焦点物种能够涵盖不同迁飞习惯的鸟类，有助于构建完善的区域鸟类生态网络。

生态廊道构建普遍遵循“生态源地识别-阻力面构建-廊道提取”的研究范式[7-8]。在源地识别方面，MaxEnt 模型因其对物种分布数据的高效利用而成为主流的生境适宜性评价与生态源地识别工具[9-10]。阻力面构建则多基于土地利用类型数据，并为其赋予经验性阻力系数[11]；廊道提取多基于最小成本路径模型与电路理论的结合[12]。二维土地利用类型所构造的阻力面无法适配鸟类的飞行特性，将建筑高度、地形高程[13-14]考虑到阻力面中的研究大多集中于流域[15]、高密度城市区域[6,13]与区域尺度[11,16-17]，对于复杂山地区域的研究不足。鸟类在山地区域存在垂直替代现象，由于资源的获取会进行季节性垂直迁移[18]。深入探讨山地区域不同海拔下鸟类生态廊道的构建与连通对理解山地鸟类多样性的维持机制具有重要意义。

因此，本研究以地形高度复杂的神农架林区为研究对象，通过 MaxEnt 模型识别多海拔梯度下的鸟类生态源地，构建三维阻力面，并运用 Linkage Mapper 提取潜在生态廊道，构建不同海拔梯度下的鸟类生态网络，为神农架林区的生态保护与可持续发展提供科学依据。

1　研究区概况

神农架林区（图 1）地处湖北省西部（31°15′—31°57′N，109°56′—110°58′E），海拔为 409～3 096 m，土地总面积 3 253 km^2。该地区地形复杂，垂直高差明显，形成了包括常绿阔叶林、针阔混交林、温带针叶林、高山灌丛和草甸等完整的垂直植被带谱。多样化的梯度生境为不同生态需求的动植物类群提供了适宜的生存条件，使得神农架成为生物多样性丰富和物种聚集的关键地区。神农架林区鸟类多样性尤为突出，迄今记录鸟类 470 种，约占全国鸟类总种数的 1/3，包括多种国家级重点保护野生鸟类。此外，神农架地处我国东部和中部候鸟迁徙区的交汇处，是东亚澳大利西亚和中亚候鸟迁徙路线的重要区域。

2　研究方法

2.1　数据来源与预处理

使用 ArcGIS10.8 软件对所有数据进行坐标定义，地理坐标统一设置为 GCS _ WGS _ 1984；投

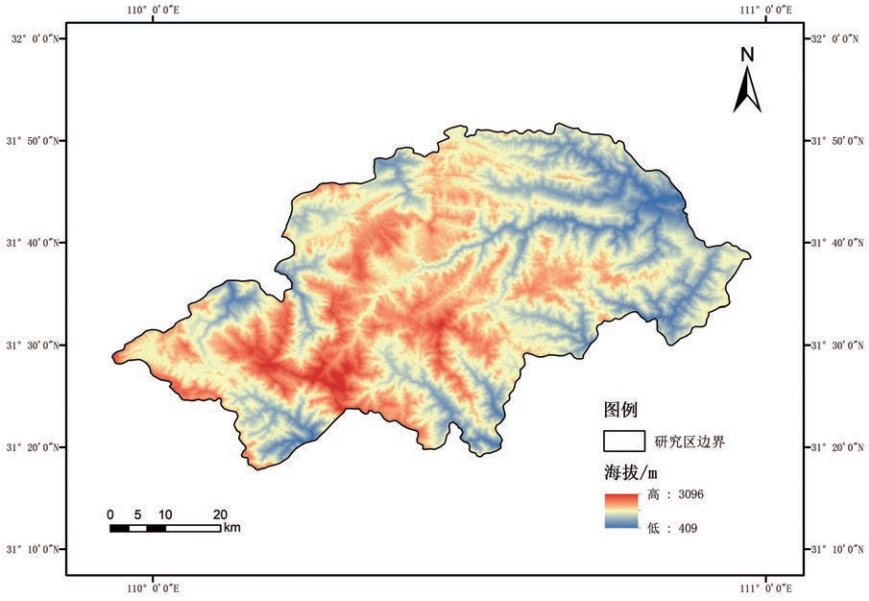


图 1 研究区位

影坐标统一设置为 WGS_ 1984_ UTM_ Zone_ 49N。针对不同数据类型进行空间化、坐标转换等预处理，并将研究区裁剪为 1 km×1 km 的格网作为本文的基本研究单元（表 1）。

表 1 数据类型及来源

数据类型	数据名称	数据来源	年份	精度
物种分布数据	鸟类分布数据	中国鸟类观测记录中心(https://www.birdreport.cn/) 全球生物多样性信息网络(https://www.gbif.org)平台	—	—
环境数据	土地覆盖数据	ttps://zenodo.org/records/12779975	2023	30 m
	数字高程模型 DEM	地理空间数据云 30 m 分辨率 DEM 数据集(https://www.gscloud.cn/)	—	30 m
	归一化植被指数 NDVI	地球科学数据集(https://www.earthdata.nasa.gov/)	2023	30 m
	气候因子	全球气候数据中心(http://www.wordclim.org/)	—	1 km
	人口密度	全球人口数据网站(http://www.worldpop.org/)	2020	1 km
	河网、路网数据	https://www.openstreetmap.org/	2023	—

2.2 焦点物种选择

焦点物种法被广泛用于指导生态廊道构建与生物多样性保护[19]。焦点物种的选择原则主要包括：具有重要的生态学意义或价值、具有生物学上的代表性与典型性、栖息地丧失或破碎化威胁、对其他物种及各类型栖息地的指示作用、相关资料可获取性与可参考性等[20-21]。基于以上原则采用以下 6 个评价指标构建评价体系：1）物种濒危程度；2）物种保护级别；3）物种分布范围；4）作为迁徙物种的重要性；5）物种在神农架的出现频次；6）物种点位数据获取难易程度。采用 1~5 的评分方法，合理选择焦点物种鸟类（表 2）。

表 2 神农架林区鸟类焦点物种评分

分数	濒危程度	保护级别	分布范围	作为迁徙物种的重要性	在神农架的出现频次/次	点位数量/个
5	极危 CR	CITES 附录Ⅰ、国家一级保护动物	分布非常狭窄,其中物种仅在中国的一个省份或自然保护区特有	出现在中日、中澳候鸟保护协定鸟类名录中	>90	>40
4	濒危 EN	CITES 附录Ⅱ、国家二级保护动物	地理分布狭窄,仅发生在中国的 2~3 个省份		60~90	30~40
3	易危 VU	CITES 附录Ⅲ	在生物地理区域广泛分布但局部罕见且边缘		30~60	20~30
2	近危 NT	湖北省级重点保护物种	广泛分布于中国	未出现在中日、中澳候鸟保护协定鸟类名录中	<30	10~20
1	无危 LC					0~10

神农架的海拔范围为 398～3 106.2 m，根据《地形图编绘规范》（GB/T12343－2008）划分为 0～1 000 m、1 000～2 000 m、2 000 m 以上 3 个梯度。在各海拔梯度下，基于综合考虑物种得分，选取黄胸鹀（*Emberiza aureola*）、白冠长尾雉（*Syrmaticus reevesii*）和红嘴相思鸟（*Leiothrix lutea*）3 种鸟类作为焦点物种。所选物种不仅具有较高的保护优先级与数据可获得性，还在某种程度上反映了神农架林区不同海拔梯度鸟类的栖息地需求及扩散策略（表 3）。

表 3　神农架林区鸟类焦点物种的生物特征

物种	黄胸鹀	白冠长尾雉	红嘴相思鸟
适生海拔	1 000 m 以下	1 000～2 000 m	2 000 m 以上
迁徙模式	候鸟	留鸟	留鸟
栖息地特征	湿地周边的灌丛、农田和草甸	常绿–落叶阔叶混交林	高山灌丛、竹林及常绿阔叶林上层
生活习性	中等，迁徙借气流长距飞行，高度 5～15 m	弱，高度低于树冠层	弱，高度 2～5 m
保护级别	国家Ⅰ级保护动物	国家Ⅰ级保护动物	国家Ⅱ级保护动物

2.3　基于 MaxEnt 模型的生态源地识别

生态源地是物种完成栖息、繁殖等生命活动的主要场所。当前研究多结合 MaxEnt 与形态空间格局分析（MSPA）模型以提高精度[5,22]，但由于神农架林区以林地和草地为主导，景观基质高度均质，MSPA 难以有效区分不同栖息地的质量差异，故本研究单独采用 MaxEnt 模型进行识别。选取各海拔梯度综合指数最高的鸟类作为指示物种，利用 MaxEnt 模型模拟其适宜栖息地分布，以构建生态廊道的源地基础。结合神农架林区的环境特征与鸟类的栖息地特点，选择年平均气温、高程、植被类型和距道路距离等 10 个影响鸟类分布的环境因子用于构建模型[5,23]（表 4）。

表 4　神农架林区用于物种分布模型的环境因子

类别	环境因子
气候因子	年平均气温/℃
	年降水量/mm
	年平均相对湿度/rh
地形因子	高程/m
	坡度/°
	坡向
生境因子	植被类型
	距水源距离/m
干扰因子	人口密度/人·km^{-2}
	距道路距离/m

将 3 种鸟类的点位数据分别按 75% 训练、25%检验的比例划分，采用 bootstrap 方法重复分析 10 轮，取 10 次验证的平均值作为最终结果。以平均生境适合度表征物种分布概率，AUC 值评估模型精度，环境变量贡献度衡量因子作用。采用刀切法判断环境变量的相对重要性，通过 AUC 值验证模型模拟效果。AUC 值的评价标准如下：较差（0.6～0.7）、一般（0.7～0.8）、良好（0.8～0.9）、优秀（0.9～1）[24]。选取均等测试敏感性与特异性阈值将平均生境适合度二值化，1 表示潜在分布区，0 表示无分布[25]。

2.4　基于鸟类迁飞能力的三维景观阻力面构建

生态阻力面反映物种在源地间迁移的通行难度，是刻画生态过程水平抵抗性的重要手段[26]。阻力值的确定是构建阻力面的关键，常见的阻力因子有土地覆盖类型、坡度、高程、人为活动等[12,27]。由于神农架林区海拔变化显著，且所选指示物种均为林鸟，其生态过程主要受到高程、植被类型和人类活动的影响。据此选取海拔、坡度、地形起伏度、土地利用类型、植被覆盖率和距道路距离作为阻力因子[2,28]（表 5）。

表 5　神农架林区鸟类阻力因子阻力值

阻力因子		阻力分级	阻力值	权重
土地覆盖类型	通用	森林	1	0.4
		灌丛	2	
		农田、草原	3	
		水域	4	
		建设用地	5	
坡度/°	通用	0～0.5	1	0.1
		0.5～2	2	
		2～–5	3	
		5～10	4	
		>10	5	
距道路距离/m	通用	>5 000	1	0.1
		5 000	2	
		3 000	3	
		2 000	4	
		1 000	5	

表 5(续)

阻力因子		阻力分级	阻力值	权重
NDVI	通用	0.924 4~0.999 1	1	0.1
		0.889 4~0.924 4	2	
		0.819 2~0.889 4	3	
		0.604 6~0.819 2	4	
		0.169 4~0.604 6	5	
地形起伏度/m	通用	7~213	1	0.1
		213~311	2	
		311~408	3	
		408~528	4	
		528~957	5	
海拔/m	黄胸鹀	409~1 000	1	0.1
		1 000~1 500	2	
		1 500~2 000	3	
		2 000~2 500	4	
		>2 500	5	
	白冠长尾雉	409~1 000	2	
		1 000~1 500	1	
		1 500~2 000	3	
		2 000~2 500	4	
		>2 500	5	
	红嘴相思鸟	409~1 000	5	
		1 000~1 500	4	
		1 500~2 000	3	
		2 000~2 500	2	
		>2 500	1	

2.5 鸟类生态廊道构建

Linkage Mapper 工具的核心原理是基于最小累计阻力模型（Minimum Cumulative Resistance，MCR），旨在通过识别生态过程中的空间连通性，提取潜在生态廊道[29]。在 ArcGIS10.8 软件中使用 Linkage Mapper2.0.0 工具，根据前文 MaxEnt 模型所提取的核心生态源地与所构建阻力面栅格数据，计算源地间成本加权距离与最小成本路径，生成各物种的潜在生态廊道网络。

3 结果与分析

3.1 鸟类生态源地识别

经 ROC 验证，所选指示物种鸟类分布模型的训练集与测试集 AUC 均超过 0.75，其中黄胸鹀 AUC = 0.903；白冠长尾雉 AUC = 0.785；红嘴相思鸟 AUC = 0.908。这表明模型预测精度较高。通过 ArcGIS 重分类，采用自然断点法将生境适宜性划分为不适宜区、低、中、高适宜区 4 个等级。以均等测试敏感性与特异性阈值为标准，将平均生境适合度二值化，其中 1 为潜在分布区，0 为无分布。最终提取 3 种鸟类的潜在分布区作为生态源地（图 2）。

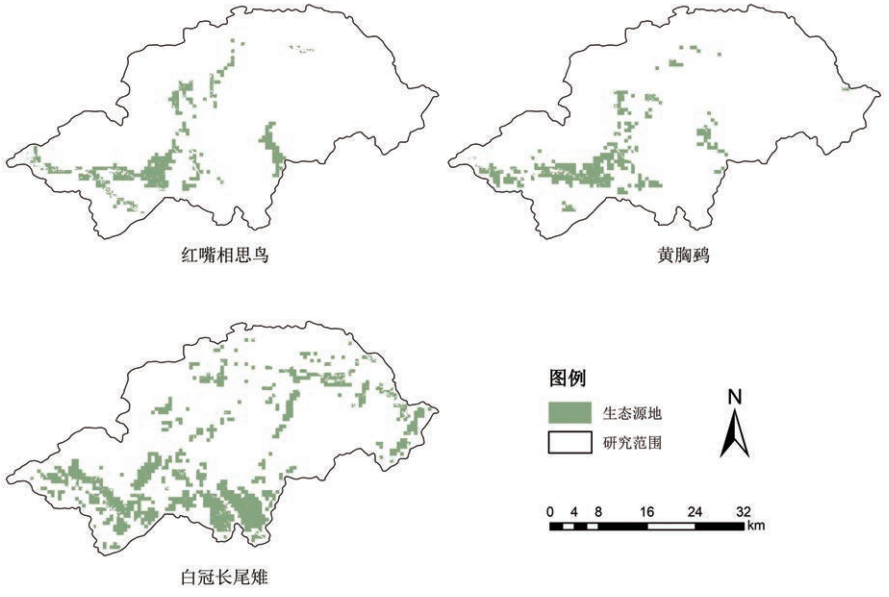


图 2 神农架林区鸟类生态源地分布

生态源地提取结果显示：黄胸鹀生态源地 61 个，总面积约 199.21 km^2；白冠长尾雉生态源地 109 个，总面积约 517.06 km^2；红嘴相思鸟生态源地 47 个，总面积约 182.72 km^2。黄胸鹀生态源地主要分布在神农架林区西南部的低海拔区域，中部和东部存在缺失，以阔叶林、灌丛为主。白冠长尾雉生态源地主要分布在南部的中海拔区域，北部破碎化严重，以林地和灌丛为主。红嘴相思鸟生态源地主要分布在中部和南部的高海拔区域，东部存在大面积源地缺失，以针阔叶林为主。各

海拔指示物种鸟类生态源地基本位于所在海拔区域。

3.2　鸟类阻力面构建

3 种鸟类的阻力值分布与其生境偏好及海拔梯度适应性密切相关（图 3）。红嘴相思鸟作为偏高海拔林灌生境代表物种，低阻力区主要位于高海拔连续林灌区域，高阻力区多分布于低海拔农田和建设用地。白冠长尾雉主要活动于中海拔至中高海拔山地森林，低阻力区多对应阔叶林、针阔混交林及林缘地带，破碎化农耕区阻力较高。黄胸鹀偏好低海拔开阔湿润生境，低阻力区集中于水系周边及农田—草甸交错地带，高阻力区多与高海拔封闭森林和城市化区域相关。

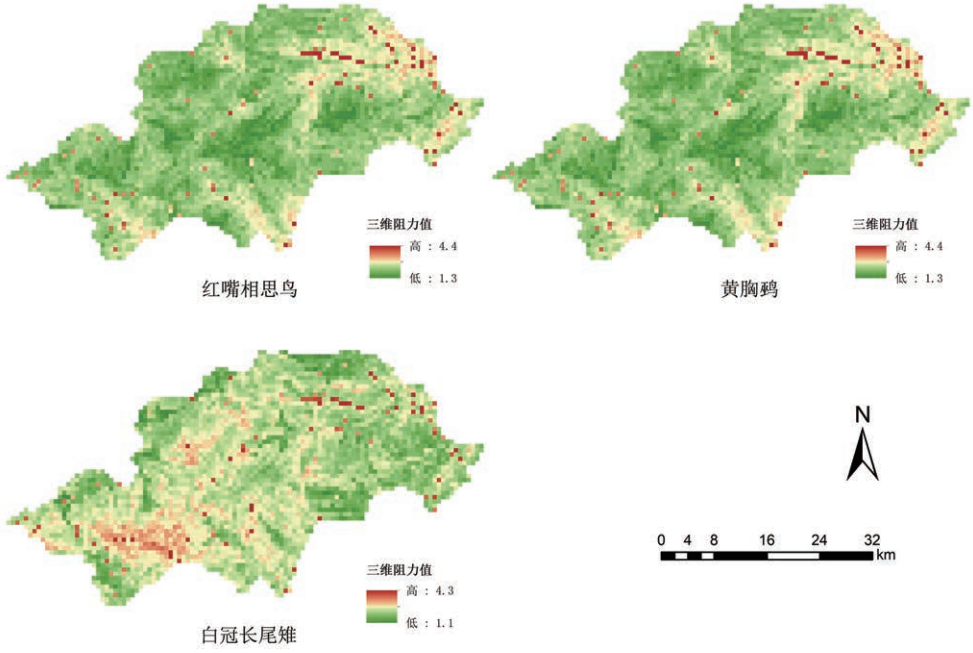


图 3　神农架林区鸟类阻力面分布

3.3　基于最小阻力模型的鸟类生态廊道识别

MCR 模型模拟结果显示，黄胸鹀生态廊道共 115 条，白冠长尾雉生态廊道 234 条，红嘴相思鸟生态廊道 148 条（图 4）。不同海拔梯度物种的生态廊道格局存在差异：黄胸鹀的生态廊道主要分布于海拔 1 000 m 以下，沿水系辐射状分布，反映其对开阔生境与水系连通性的依赖。白冠长尾雉的生态网络呈现典型的中海拔（1 000～2 000 m）分布格局，通过山谷和森林边缘连接生态源地，展现出对复杂地形的高度适应性。红嘴相思鸟的生态廊道则集中分布于海拔 2 000 m 以上的高海拔森林生态系统，走向与山脊线及连续林带基本吻合，其迁移主要受地形与植被连续性影响。

3.4　鸟类生态廊道优化建议

3.4.1　实施鸟类生境的分区保育

依据海拔梯度与物种廊道分布特征，对神农架林区的鸟类潜在栖息地实施差异化保育。低海拔区域（<1 000 m）以湿地、草甸及农田交错带为主，是黄胸鹀等开阔生境依赖型鸟类的关键栖息地，但受农业扩张与旅游开发影响，存在湿地退化和生境破碎化问题，应重点推进湿地生态修复与生态缓冲带建设，恢复水文连通性与连续栖息地。中海拔区域（1 000～2 000 m）以常绿落叶阔叶混交林为主，为白冠长尾雉等林鸟提供核心生境，面临道路切割与旅游设施建设导致的森林破碎化，建议通过植被恢复与生态通道建设提高连通性。高海拔区域（>2 000 m）以针阔混交林与高山灌丛为主，生境原生性较强，是红嘴相思鸟等高山鸟类的主要分布区，对气候变化与人为干扰极为敏感，应禁止大规模开发，重点保护山脊线，维护垂直迁移路径的畅通。

3.4.2　构建鸟类生态网络优先保育区

研究发现，海拔 1 000～1 500 m 的生态过渡带内，黄胸鹀与白冠长尾雉的生态廊道存在空间重叠（图 5），集中于中南部河谷及山麓地带。该区域生境异质性高，能同时满足不同物种的觅食

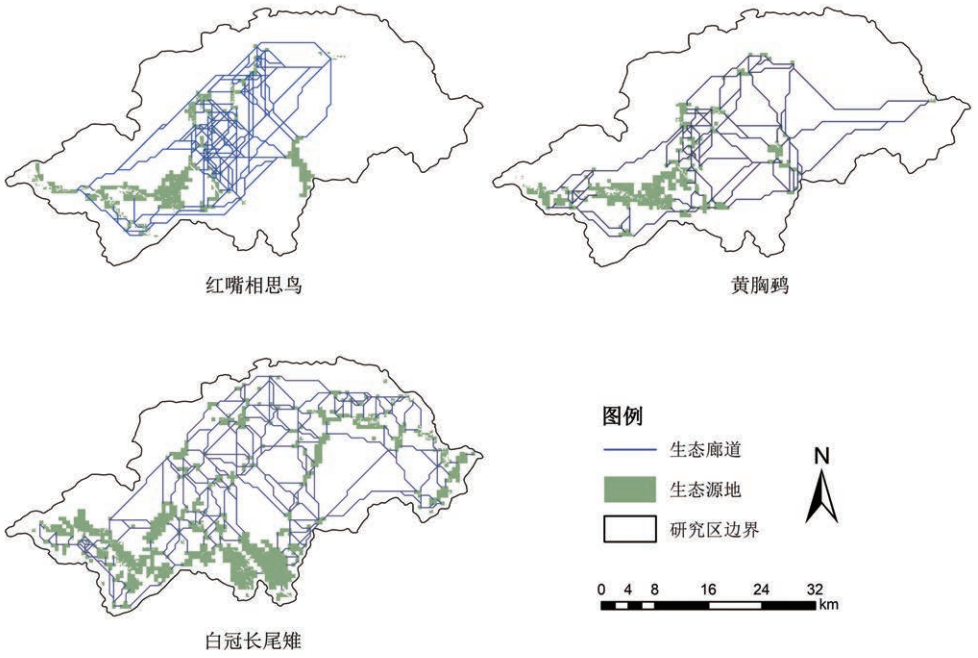


图 4 神农架林区 3 种焦点物种鸟类生态廊道分布

与停歇需求，在维持区域鸟类多样性中发挥重要作用。建议将此重叠区设为生态保育优先区，通过人工促进天然林更新、林分结构优化及廊道拓宽连接，提升其生物多样性维持功能。红嘴相思鸟的高海拔廊道与中低海拔廊道重叠较少，主要沿山脊线与连续林带分布，反映出物种对山地垂直生境资源的差异化利用。廊道重叠区域兼具物种共栖潜力与跨海拔生态流维持功能，应在保护规划中优先考虑。

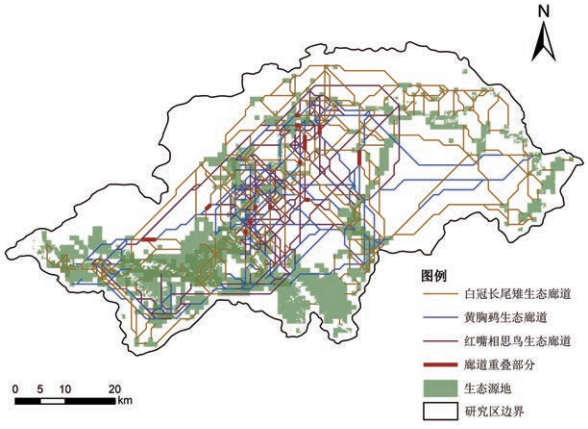


图 5 神农架林区 3 种焦点物种鸟类生态廊道重叠分布

3.4.3 协同生态廊道与自然保护地体系

将生态源地和廊道与现有自然保护区进行空间对照（图 6）。黄胸鹀的低海拔栖息地与廊道多数位于保护区外，尤其是西南部湿地灌丛交错带，存在保护空缺。白冠长尾雉的中海拔生态源地与保护区重叠较高，表明当前保护体系对该物种具有一定效力，但其部分生态廊道延伸至保护区外，面临人为干扰风险。红嘴相思鸟的源地与廊道虽与高海拔保护区匹配较好，但东部连通性较弱，存在生境断裂隐患。总体而言，现有保护地体系有效覆盖了中高海拔森林生态系统，但对低海拔过渡带及边缘连续生境的保护不足。建议将识别出的关键廊道，特别是低海拔空缺区和跨边界迁移通道，纳入生态保护红线或通过 OECMs 实施严格管控，并通过修复退化栖息地及建设生物通道等措施，增强整体网络的连通性。

4 讨论

4.1 三维阻力面在山地区域廊道构建中的适用性

在复杂山地生态系统中，传统二维阻力面模型难以量化地形起伏与海拔变化对鸟类飞行的真实阻碍。当前多数区域尺度的廊道研究以二维土地覆盖为核心构建阻力面[11-12]。虽有研究将高程、建筑高度等因子纳入阻力模型，如在城市环境中引入建筑高度模拟林鸟的规避行为[13]，或在沿海迁徙研究中利用三维景观识别飞行路径[16]，但多聚焦于城市、海岸或相对平缓的流域。在神农架这类地势陡峭、垂直带谱完整的山地生态系

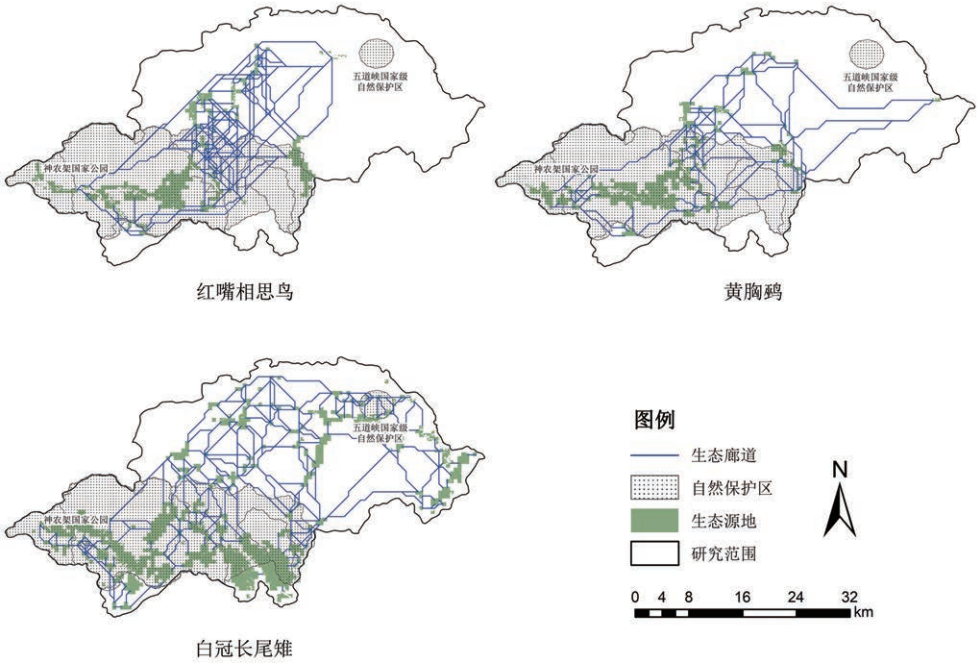


图 6　神农架林区 3 种焦点物种鸟类生态廊道与自然保护区重叠图

统中，鸟类的迁移更易受到海拔、坡度、地形起伏度等地形因子的制约。本研究以海拔梯度为核心，整合多项地形因子构建三维阻力面，以量化地形对不同海拔偏好物种扩散的差异性影响。基于该阻力面识别的潜在通道多沿山谷、山脊等自然地形延伸，表明三维阻力面能有效弥补二维方法在山区的路径偏差。

4.2　展望

本研究仍存在一定局限。首先，物种分布数据主要源于公共数据库和观鸟记录，存在空间采样偏差。其次，MaxEnt 模型虽能有效预测潜在分布，但未考虑种间相互作用和气候变化的动态影响。最后，识别出的廊道尚未通过野外调查进行实地验证。未来可结合高分辨率遥感、GPS 追踪等数据及动态模型进一步优化廊道识别，并结合野外验证研究，量化廊道实际使用率，提升研究的科学性与实用性。

5　结论

本研究通过构建多海拔梯度的三维阻力面模型，揭示了神农架林区鸟类生态网络随海拔呈现的垂直带谱规律。研究发现，自然地形是驱动物种扩散路径分异的核心要素，不同物种通过对山脊、河谷等地形特征的差异化利用实现生境连通，而海拔 1 000~1 500 m 的过渡带是维持区域垂直连通性的关键枢纽。针对当前保护体系在中高海拔覆盖较好、低海拔及跨海拔通道存在空缺的现状，建议重点加强西南部湿地灌丛带与中南部河谷山麓的保护力度，并统筹东部连通薄弱区的生境修复与林分结构优化。通过实施分区保育与跨海拔廊道修复策略，促进生态网络与自然保护地体系的协同，优化山地生物多样性的保护格局。

参考文献

[1]武晶,刘志民.生境破碎化对生物多样性的影响研究综述[J].生态学杂志,2014,33(7):1946-1952.

[2]刘梦瑶,杨荣华,周燕.基于生物多样性的重庆三峡库区鸟类生境网络构建[J].人民长江,2025,56(2):49-57.

[3]吴未,胡余挺,范诗薇,等.不同鸟类生境网络复合与优化:以苏锡常地区白鹭、鸳鸯、雉鸡为例[J].生态学报,2016,36(15):4832-4842.

[4]林源,徐雪怡,伊剑锋,等.基于 MaxEnt 模型的广西黑颈长尾雉潜在栖息地预测与保护空缺分析[J].四川动物,2017,36(3):328-333.

[5]HUANG G,HU W J,DU J G,et al.Identification and scenario-based optimization of ecological corridor networks for waterbirds in typical coastal wetlands[J].Ecological Indicators,2025,171:113147.

[6]ZHANG X L,ZHANG Z.Identification and optimization of urban avian ecological corridors in Kunming:framework construction based on multi-model coupling and multi-scenario simulation[J].

Diversity,2025,17(6):427.
[7]李波,杜春兰,李毅.基于鸟类廊道功能的城市生态网络构建途径探讨[J].园林,2019,36(9):80-84.
[8]高滢,苏毅.基于 MSPA 和电路理论的县域生态网络构建[J].中国城市林业,2025,23(2):115-122.
[9]李晖,刘彦,黄伊琳,等.基于 Maxent 模型的深圳湾鸟类热点生境判别及修复研究[J].中国园林,2022,38(12):14-19.
[10]吕环鑫,夏少霞,顾婧婧,等.基于 MaxEnt 模型的仙居县大型兽类和珍稀鸟类栖息地适宜性评价[J].生态学杂志,2023,42(11):2797-2805.
[11]张萍,全佑铭,胡越然,等.东北地区湿地水鸟生态廊道的识别研究[J].生态科学,2024,43(2):30-41.
[12]YANG H H,XU W Z,CHEN Z Y,et al.Ecological network construction for bird communities in high-density urban areas:a perspective of integrated approaches[J].Ecological Indicators,2024,158:111592.
[13]李波,贺萌,彭琳,等.基于林鸟迁移扩散的重庆市高密度城区生态网络构建研究[J].中国园林,2023,39(7):35-39.
[14]曹瀚文,祝明建,祝诗榕,等.基于水鸟飞行阻碍的粤港澳大湾区生态廊道的构建与复合[J].中国城市林业,2025,23(1):168-178.
[15]XU C L,YU Q,WANG F,et al.Identifying and optimizing ecological spatial patterns based on the bird distribution in the Yellow River Basin,China[J].Journal of Environmental Management,2023,348:119293.
[16]LIU Z H,HUANG Q D,TANG G P.Identification of urban flight corridors for migratory birds in the coastal regions of Shenzhen city based on three-dimensionall and Landscapes[J].Landscape Ecology,2021,36(7):2043-2057.
[17]YANG X T,LIU W,LI S S,et al.Restoration of urban waterbird diversity: a case study of the construction of a waterbird ecological corridor in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area,Southern China[J].Global Ecology and Conservation,2022,39:e02277.
[18]LIANG D,PAN X Y,LUO X,et al.Seasonal variation in community composition and distributional ranges of birds along a subtropical elevation gradient in China[J].Diversity and Distributions,2021,27(12):2527-2541.
[19]单楠,周可新,潘扬,等.生物多样性保护廊道构建方法研究进展[J].生态学报,2019,39(2):411-420.
[20]胡望舒,王思思,李迪华.基于焦点物种的北京市生物保护安全格局规划[J].生态学报,2010,30(16):4266-4276.
[21]DOS ANJOS L,URBANO M R,OLIVEIRA H S,et al.The functional importance of rare and dominant species in a Neotropical forest bird community[J].Journal for Nature Conservation,2023,72:126361.
[22]CHEN R N,CARRUTHERS-JONES J,CARVER S,et al.Constructing urban ecological corridors to reflect local species diversity and conservation objectives[J].Science of the Total Environment,2024,907:167987.
[23]张留栓,刘芳,姬云瑞,等.基于 MaxEnt 模型的神农架国家公园体制试点区的亚洲黑熊适宜生境研究[J].陆地生态系统与保护学报,2024,4(5):14-24.
[24]SWETS J A.Measuring the accuracy of diagnostic systems[J].Science,1988,240(4857):1285-1293.
[25]马星,王浩,余蔚,等.基于 MaxEnt 模型分析广东省鸟类多样性热点分布及保护空缺[J].生物多样性,2021,29(8):1097-1107.
[26]CAI G,XIONG J F,WEN L S,et al.Predicting the ecosystem service values and constructing ecological security patterns in future changing land use patterns[J].Ecological Indicators,2023,154:110787.
[27]廖剑威,闫淑君,叶佳伟,等.基于 MSPA-Linkage Mapper 的福州滨海长乐区生态网络构建与优化[J].西北林学院学报,2023,38(5):243-251.
[28]党伟洋,张廷斌,易桂花,等.横断山区珍稀鸟类生态网络识别与优化[J].地理研究,2025,44(8):2103-2120.
[29]韦宝婧,苏杰,胡希军,等.基于“HY-LM”的生态廊道与生态节点综合识别研究[J].生态学报,2022,42(7):2995-3009.