

DOI: 10.20103/j.stxb.202504291041

陈春谛, 冯伟, 高婧格, 张哲, 张涵. 面向生物多样性保护的生态网络研究: 2004 年以来中国研究进展. 生态学报, 2026, 46(4): 2182-2195.

Chen C D, Feng W, Gao J G, Zhang Z, Zhang H. Ecological networks for biodiversity conservation: research trends and prospects in China since 2004. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(4): 2182-2195.

## 面向生物多样性保护的生态网络研究: 2004 年以来中国研究进展

陈春谛<sup>1</sup>, 冯伟<sup>1</sup>, 高婧格<sup>1</sup>, 张哲<sup>1</sup>, 张涵<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> 西南交通大学建筑学院, 成都 610000

<sup>2</sup> 西南交通大学环境科学与工程学院, 成都 610000

**摘要:** 生态网络构建是区域生物多样性保护的重要策略, 其技术特点在于能够整合物种迁徙扩散的生态过程, 同时评估人类活动对生态系统的影响, 其研究进展与方法创新对完善生物保护具有重要理论与实践意义。基于 CNKI 和 Web of Science 核心合集数据库, 检索并筛选 2004—2024 年我国生物多样性保护领域的生态网络文献 300 篇(中文 143 篇, 英文 157 篇)。采用文献计量法, 从地理空间分布、空间尺度、生态系统类型、焦点物种及网络构建技术等方面系统回顾, 旨在揭示研究热点与方法局限, 为生态网络研究的理论发展与技术优化提供科学依据。研究表明: 1) 生态网络研究总体呈现显著增长趋势。空间分布上集中于云南、四川等旗舰物种密集区及京津冀、长三角等科研集聚区, 研究尺度多聚焦于市县级中小尺度(72.8%), 城市生态系统占比最高(53%)。2) 约半数研究未界定焦点物种; 在明确物种的研究中, 哺乳动物占 53.62%, 同时 69.57% 的研究聚焦珍稀/保护物种, 例如, 大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)、亚洲象(*Elephas maximus*) 等。3) 研究方法普遍遵循“源地识别-阻力面构建-廊道提取-生态网络优化”的框架, 其中廊道提取以最小累积阻力模型(63.3%) 和电路理论(32.3%) 为主流。网络优化策略多依靠识别与修复生态夹点(Pinch point) 和断裂点(Barrier points) 以强化连通性, 在开展网络评价的研究(86 篇) 中, 以基于图论的网络结构评价(44.19%) 和景观格局指数评价(31.40%) 为主。研究发现, 现有研究存在焦点物种选择单一(忽略普通物种)、焦点物种数据缺失及保护成效验证薄弱等问题, 建议未来在生态网络构建与优化中拓展焦点物种范围, 建设“珍稀/保护物种+普通物种”的复合保护网络, 尤其在城市生态系统中更多关注中小型乡土物种; 同时, 探索生成式人工智能(Generative artificial intelligence, GenAI) 技术, 以丰富焦点物种数据库, 进一步整合公民科学、众包数据及自动监测系统等低成本新技术, 构建多物种动态监测系统, 为形成我国生物多样性保护生态网络、完善区域保护政策提供科学依据。

**关键词:** 生物多样性; 生态网络; 焦点物种; 廊道提取; 文献计量

## Ecological networks for biodiversity conservation: research trends and prospects in China since 2004

CHEN Chundi<sup>1</sup>, FENG Wei<sup>1</sup>, GAO Jingge<sup>1</sup>, ZHANG Zhe<sup>1</sup>, ZHANG Han<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> School of Architecture, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610000, China

<sup>2</sup> School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610000, China

**Abstract:** Constructing ecological networks was a crucial strategy for regional biodiversity conservation. Its technical strength lay in integrating ecological processes like species migration and dispersal while assessing the impacts of human activities on ecosystems. Research advancements and methodological innovations in this field held significant theoretical and practical importance for enhancing biological conservation. Based on the CNKI and Web of Science Core Collection

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(52078346); 四川省科学技术厅重点研发计划区域创新(2024YFHZ0100); GEF7 中国绿色与碳中和城市项目成都项目(CD-CS3)

收稿日期: 2025-04-29; 网络出版日期: 2025-11-13

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanghan@home.swjtu.edu.cn

(WoSCC) databases, this study retrieved and screened 300 papers (143 in Chinese, 157 in English) addressing ecological network research in China's biodiversity conservation from 2004 to 2024. Through bibliometric analysis, we systematically reviewed geographical distribution patterns, spatial scale classifications, ecosystem type differentiation, focal species selection, and network construction technologies. The aim was to reveal research hotspots and methodological limitations, providing a scientific basis for theoretical development and technological optimization in ecological network research. Key findings included: 1) Ecological network studies demonstrated significant growth trends, concentrated in flagship species-rich regions (e.g., Yunnan, Sichuan) and research-intensive urban clusters (e.g., Beijing-Tianjin-Hebei (BTH), Yangtze River Delta (YRD)). 72.8% of studies focused on county/municipal-level medium-small scales (1000—50000 km<sup>2</sup>), with urban ecosystems predominating (53%). 2) Approximately half of the reviewed literature failed to define focal species. Among studies specifying focal species, mammals constituted 53.62%, and 69.57% prioritized rare/protected species, such as the giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*) and Asian elephant (*Elephas maximus*). 3) Methodology generally followed the “habitat identification-resistance surface construction-corridor extraction-ecological network optimization” framework. Corridor extraction primarily employed the Minimum Cumulative Resistance model (MCR, 63.3%) and Circuit Theory (32.3%). Network optimization often relied on identifying and restoring ecological pinch points and barrier points to enhance connectivity. Among the 86 studies conducting network evaluation, graph theory-based structural analysis (44.19%) and landscape pattern indices (31.40%) were predominant. This study identified existing limitations, including narrow focal species selection (neglecting common species), deficiencies in focal species data, and insufficient verification of conservation effectiveness. We recommended future efforts to: (1) broaden the scope of focal species in network construction and optimization, establishing composite conservation networks integrating “rare/protected species+common species”, particularly focusing more on small-to-medium-sized native species in urban ecosystems; (2) explore generative artificial intelligence (GenAI) technologies to enrich focal species databases; and (3) further integrate low-cost novel technologies such as citizen science, crowdsourced data, and automated monitoring systems to build multi-species dynamic monitoring systems. These advancements would provide a scientific basis for forming China's biodiversity conservation ecological network and refining regional conservation policies.

**Key Words:** biodiversity; ecological networks; focal species; corridor extraction; bibliometrics

生物多样性是生态系统稳定的基础,在维护生态平衡、保护区域环境以及促进可持续发展方面发挥着关键作用<sup>[1]</sup>。2021年《“十四五”规划纲要》<sup>[2]</sup>提出实施生物多样性保护重大工程,通过构筑生态网络、加强重点保护及珍稀物种栖息地修复等措施,全面提升生态系统质量。由此可见,生态网络建设不仅是国土空间生态修复的关键路径,更是维护区域生态安全格局<sup>[3]</sup>及生物多样性<sup>[4]</sup>的基础保障。因此,系统回顾生态网络在生物多样性保护方面的研究现状与发展趋势,揭示研究热点与方法局限,对于区域生物多样性保护、自然保护区的优化管理以及生态规划编制具有重要理论与实践意义<sup>[3]</sup>。

生态网络能够为物种提供栖息地和迁徙通道并促进基因交流,维持生态系统的完整性。通过规划、构建和修复生态网络,可维持和增强那些因生境破碎化而受到威胁的生物多样性<sup>[5]</sup>。依托景观生态学原理,生态网络研究在长期发展过程中已逐步构建起“生态源地识别-阻力面构建-廊道提取-生态网络优化”的研究框架:研究者往往首先通过景观连通性评价<sup>[6]</sup>、生态敏感性评估<sup>[7]</sup>、景观格局模拟<sup>[8]</sup>、生境适宜度预测<sup>[9]</sup>以及生境质量评价<sup>[10]</sup>等指标体系针对性地识别生态源地,其次使用熵权法、层次分析法等模型辅助阻力面的构建,并将最小累积阻力模型<sup>[11]</sup>、电路理论<sup>[12]</sup>、图论<sup>[13]</sup>等方法应用于廊道提取过程中,并在最后进行生态网络优化与评价。其中,各个环节之间的理论方法的组合使用使得网络构建思路日益多元<sup>[14]</sup>。然而,现有综述多聚焦于普适性生态网络的构建过程,对生物多样性保护领域的特殊需求与挑战关注不足。因此,亟需总结现有面向生物多样性保护的生态网络构建研究存在的异质性与局限性,以支撑生态网络构建理论体系完善与实践优化。

本文聚焦于面向生物多样性保护的生态网络领域的研究进展,系统回顾并回答以下核心问题:(1)2004年以来,我国针对生物多样性保护的生态网络研究在地理空间分布、尺度选择、生态系统类型和焦点物种选择上表现出哪些特征?(2)现有研究在面向生物多样性保护的生态网络构建与优化的关键流程中选用了哪些模型与方法,这些方法/模型各自有何特点?最后,对研究现状与不足进行讨论,并展望未来研究重点,以期为我国面向生物多样性保护生态网络的理论研究与应用实践提供科学依据。

## 1 数据来源

基于 CNKI 和 Web of Science (WOS) 核心数据库,选择经过同行审议后发表的期刊论文作为文献数据。英文检索主题为“TS = ((“focal species” OR “habitat suitability” OR “resistance surface” OR “Landscape connectivity” OR “circuit theory” OR “distance threshold” OR “least-cost path” OR “ecological network”) AND (“Biodiversity conservation”));中文以(“生物多样性”)和(“生态网络”或“生态廊道”或“景观连接度”或“距离阈值”或“最小费用模型”或“电路理论”)为检索主题词,研究区域限制在中国(含港澳台地区),检索时间范围设为 2004 年至 2024 年。根据设定检索条件,初步得到中文文献 1743 篇,英文文献 2433 篇。结合研究目标,对检索文献进行筛选,具体标准如下:(1)剔除理论研究、综述和不涉及具体研究案例的文献。(2)剔除涉及生物多样性保护但未构建生态网络的文献。(3)剔除所构建网络并不是面向生物多样性保护的文献。经过筛选后,共获得中文文献 143 篇,英文文献 157 篇,共 300 篇文献。并对文献属性信息进行统计(表 1)。

表 1 文献主要统计信息

Table 1 General statistical information of literature

统计信息类别 Category of the information	具体内容 Detail contents	描述 Description
基本信息 General information	题目	文献名称
	发表年份	发表时间
	写作机构	第一作者及通信作者所属研究机构
研究区 Study area	来源期刊	文献刊载期刊
	研究区所属省级行政区	研究区所属省、自治区、直辖市或特别行政区
	研究区尺度	全国尺度、区域级尺度、省域尺度、市域尺度、区(县)尺度
焦点物种 The focal species	研究区所属生态系统类型	城市生态系统、淡水生态系统、森林生态系统、湿地生态系统、农田生态系统、草原生态系统、其他生态系统
	焦点物种	根据焦点物种类型:哺乳动物、爬行动物、两栖动物、鱼类、鸟类、植物; 根据保护重要性:珍稀/保护物种、普通物种; 根据保护目标:单一物种、多种/全部物种
研究方法 Research methodology	生态源地识别	识别生态源地的具体方法和指标等
	阻力面构建	阻力因子选取、权重及阻力赋值的方法和依据以及修正方法等
	生态廊道提取	提取方法、廊道宽度确定的方法等
	生态关键区域识别	生态节点、生态夹点、生态障碍点、生态断裂点等
	生态网络优化与评价方法	关键优化区域识别相关模型以及具体优化策略、生态网络评价具体方法

## 2 文献数据分析与统计

### 2.1 文献变化趋势

科技文献的数量变化直接反映该主题或领域的科学知识量变化和研究趋势。面向生物多样性保护的生态网络研究论文发表趋势如图 1 所示。从各年份文献发表的数量变化趋势来看,可将我国面向生物多样性保护的生态网络研究大致分为 3 个阶段:2014 年以前文献量小于 5;2015—2020 年文献量在 10—16 篇浮动;从 2021 年进入快速增长阶段,68.00%的文献发表于 2021—2024 这 4 年间,年均发文量相较于最初 5 年的发文量增长 66 倍。尤其是 2024 年,发表文献 70 篇,达到近 20 年来的峰值。

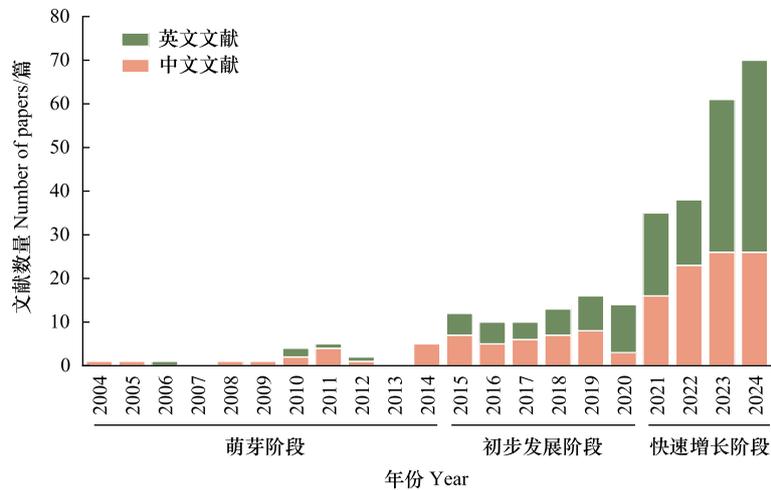


图 1 2004—2024 年生物多样性保护的生态网络研究发文量

Fig.1 Number of publications on ecological network studies for biodiversity conservation, 2004—2024

## 2.2 研究区域

考虑到研究区域差异性与多样化特点,本文采用三种不同分类方式对研究区进行划分,包括研究区地理空间分布、空间尺度与生态系统类型。

### 2.2.1 研究区地理空间分布

统计各文献中研究区域所涉省级行政单元的出现频次,采用自然断点法(Natural Breaks)将其划分为五个等级,其中等级 1 代表最低出现频率,等级 5 对应最高出现频率(图 2)。统计发现,旗舰物种活动区域或自然保护区集中省份成为研究热点区域。例如,亚洲象和金丝猴分布广泛的云南省(39 次),大熊猫分布集中的四川省(35 次),拥有祁连山和三江源国家公园的甘肃省(24 次)和青海省(23 次)等。此外,科研机构聚集的省份也成为研究的热点,如北京(28 次)、江苏(28 次)、湖北(26 次)、广东(25 次)等。

### 2.2.2 研究区空间尺度

本文采用两种不同的空间尺度划分方式对文献数量进行统计。首先依据政治和自然界限划分,统计发现(图 3)超过 60%的研究依据政治界限划定研究区,其中多聚焦于市级或以下范围,对于省级和省级以上区域关注度较低。少数研究依据自然界限划定研究区,即自然保护区(11.3%)、流域(9.3%)和山脉(6%)等。其次,从研究区覆盖面积来看,差异极大。面积最小区域为贵州省荔波县西南部的洞塘乡板寨村河头<sup>[15]</sup>,面积仅有 0.86km<sup>2</sup>,最大为中国全境。因此,依据面积覆盖范围将其划分为七个尺度(图 3)。当前,学者们多聚焦于 1000—50000km<sup>2</sup>(72.8%)的中小尺度研究。这一尺度可能是多数焦点物种活动的最佳范围。

### 2.2.3 研究区生态系统类型

本文借鉴 Odum<sup>[16]</sup>的生态系统分类原则,将生态系统分为 7 类。据图 3 可知,目前国内对城市生态系统的关注度最高,相关文献共发表 159 篇,占总量的 53.00%。其次为森林生态系统 71 篇,占文献总量的 23.67%。湿地生态系统(沼泽、盐泽、泥炭地等)、淡水生态系统(河流、溪流、湖泊和池塘等)、农田生态系统和草原生态系统占比均较低,不足 10%。其他生态系统中以极地与高山生态系统(3.00%)和荒漠生态系统(1.67%)为主。总体来看,我国现有研究多针对城市生态系统构建生态网络,旨在缓解生物多样性保护与人类社会之间的矛盾。

## 2.3 焦点物种

在 300 篇文献中,共有 138 篇具体提及焦点物种,其类型占比如表 2 所示。焦点物种一般选取研究区域所属生态系统的代表性物种,并以哺乳类动物为主。例如选取水鸟绿头鸭(*Anas platyrhynchos*)<sup>[17]</sup>、林鸟丝光

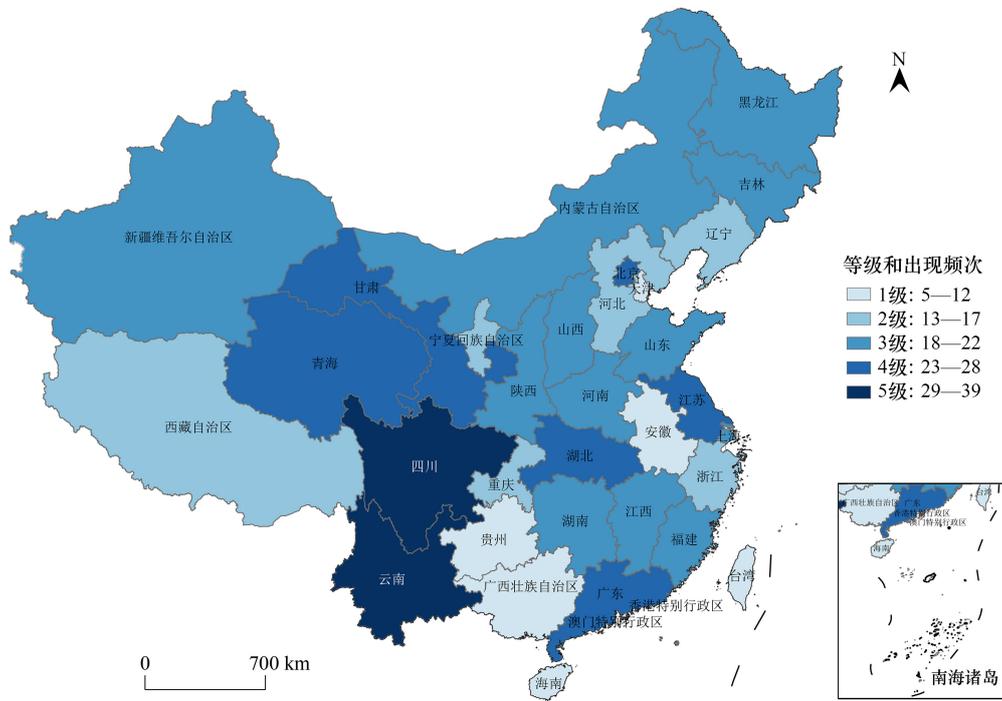


图 2 研究区地理空间分布

Fig.2 Geospatial distribution of the study area

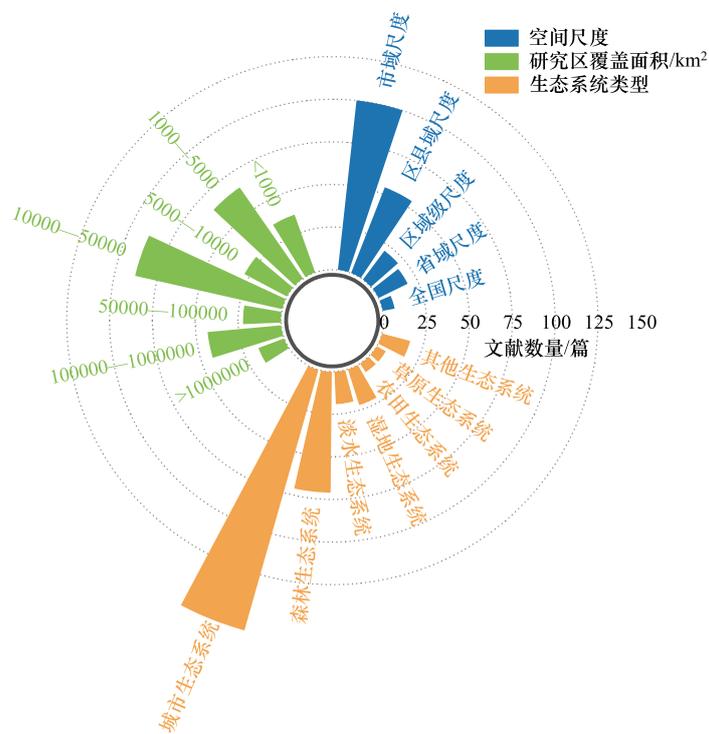


图 3 研究区空间尺度、覆盖面积和生态系统类型

Fig.3 Spatial scale, area coverage and ecosystem types in the study area

棕鸟 (*Sturnus sericeus*)<sup>[18]</sup> 和开阔地鸟灰斑鸠 (*Streptopelia decaocto*)<sup>[19]</sup> 分别作为以水体、林地和开阔地为主要生境的焦点物种,其栖息地需求能够涵盖相同生态空间中其他物种的需求。其次,部分研究关注生态系统中

扮演重要角色的物种,如顶级捕食者、关键传粉者等<sup>[20]</sup>;通过保护、维持关键传粉者等物种来间接保护与之相关的其他众多物种。最后,珍稀/保护物种也常被作为焦点物种(96 篇),其中有 31 篇针对具有较大公众影响力的旗舰种展开研究,如大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)<sup>[21]</sup>、亚洲象(*Elephas maximus*)<sup>[22]</sup>、东北虎(*Panthera tigris altaica*)<sup>[23]</sup>、川金丝猴(*Rhinopithecus roxellana*)<sup>[24]</sup>等。从焦点物种的物种数量来看,针对单一物种的文献 73 篇,约占总量的 52.90%;针对鸟类、猿猴类等多个焦点物种的研究 65 篇,其余的为针对保护区全部生物或未提及。

表 2 焦点物种类型

Table 2 Type of species in focus

分类标准 Standard of classification	类型 Type	细分 Subdivide	篇数 Number of articles	总数据/篇 Total data	占比/% Proportion
物种类型 Types of species	哺乳动物	猴类(金丝猴 10、黑叶猴 2、猕猴 1)	13	74	53.62
		大熊猫	8		
		羚羊类(瞪羚 3、山羊 1 等)	8		
		鹿类(马鹿 2、麋鹿 1、梅花鹿 1 等)	5		
		虎豹类(东北虎 4、豹 1)	5		
		野猪	5		
		松鼠(灰松鼠 2、帕拉斯松鼠 1、赤腹松鼠 1)	4		
		貂(黄喉貂 2、雪貂 1)	3		
		穿山甲	3		
		獐	2		
		刺猬	2		
		兔(华南兔 1、草兔 1)	2		
		鼬(黄鼬 1、臭鼬 1)	2		
		其他(狍、果子狸等)	12		
	爬行动物	蛇类	2	3	2.17
		鳄鱼(扬子鳄)	1		
	两栖动物	蛙类(黑斑蛙 2、金线蛙 1 等)	4	5	3.62
		其他	1		
	鱼类	海水鱼类	3	4	2.89
		淡水鱼类	1		
鸟类	水鸟类(白鹭 8、黑水鸡 1 等)	27	40	29.98	
	林鸟类(山雀 2、白鹡鸰 1 等)	12			
	开阔地鸟(灰斑鸠 1)	1			
植物	乔木	2	2	1.45	
保护重要性 Importance of protection	涉及多物种		10		7.25
	珍稀/保护物种		96		69.57
	普通物种		42		30.43
	针对目标 Targeted target	针对单一物种(如大熊猫、亚洲象等旗舰物种)	73		52.90
	针对多种/某类型(如鸟类、鱼类等)	65		47.10	

### 3 生态网络构建

#### 3.1 生态源地识别

生态源地是区域物种或生态事件向外扩散和维持的源区<sup>[25]</sup>,对区域生态过程与功能起决定作用,是担负重要辐射功能的生境斑块。当前生态源地主要通过两类方法进行识别(表 3):1)基于研究区域实地特征直接

识别(101篇):基于野外调查、遥感影像解译等方法,将景观斑块直接作为生态源地。其中,通过野外实地调查获取数据并结合植被图与生境质量图来识别生态源地的方式<sup>[26]</sup>,可以避免仅依赖遥感影像或已有数据可能带来的误差<sup>[27]</sup>,提升了结果的真实性和准确性。2)根据模型或构建指标体系进行识别(108篇):使用生态敏感性<sup>[7]</sup>、景观连通性<sup>[6]</sup>、生态适宜性<sup>[28]</sup>等指标构建体系考察斑块重要性,有助于针对性地筛选出与焦点物种相匹配的生态源地。其中形态学空间格局分析(MSPA)(34篇)、最大熵模型(MaxEnt模型)(23篇)和生态系统服务综合评估模型(InVEST模型)(20篇)等方法模型较为广泛地使用。另有91篇研究将以上两类方法结合使用,以得到更为准确的识别成果。

表3 生态源地识别方法对比

Table 3 Comparison of ecological source identification methods

识别类型 Identified type	主要方法 Method	方法特点 Characteristics	典型案例 Typical case
直接识别 Direct identification	基于野外调查识别源地 基于遥感影像解译识别源地 基于现有资料直接识别源地	真实度高,直观快捷,但容易忽略斑块内部生态环境状况,且样本数量影响精度	[26—27]
构建模型或指标体系识别 Construction model or index system identification	多因子评价法:生态敏感性、生态韧性、生态恢复力等	可实现敏感性、韧性等分级,但忽略斑块对于生态网络连接度的贡献	[7,28]
	形态学空间格局分析(MSPA)	能够精确分辨景观类型与结构,但对输入数据的质量要求较高,并存在明显的尺度效应	[29—30]
	生态系统服务评估(InVEST模型)	对于斑块内在生态功能考虑充分,具有较高的区域适应性,但量化方式较多,缺乏统一标准	[31—32]
	物种分布和生境适宜度预测: 最大熵模型(MaxEnt模型)	适宜大尺度范围,数据样本过少会导致结果精确度较低	[33—34]

MSPA:形态学空间格局分析 Morphological Spatial Pattern Analysis;InVEST模型:生态系统服务和权衡的综合评估模型 Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs;MaxEnt模型:最大熵模型 Maximum Entropy Model

### 3.2 阻力面构建

阻力面是指对现实环境中物种迁移难易程度进行模拟的模拟面<sup>[35]</sup>,其大小可以反映生物在不同生境间迁移的难易程度<sup>[36]</sup>。阻力面构建主要分为三步:阻力因子选取、因子权重赋值和阻力值确定。

在阻力因子的选择上,有216篇文献将土地利用/覆被类型(LUCC)作为主要影响因子,其中有192篇文献在此基础上考虑海拔、坡度等自然因素,并有37篇文献使用夜间灯光数据<sup>[37]</sup>等系数对分配的生态阻力面进行修正,以得出更精准的评估结果,研究常用的阻力因子如表4所示。针对不同焦点物种类型与特点,部分研究也会把与物种扩散密切关联的特殊因子纳入阻力面构建体系中,如研究焦点物种黑冠长臂猿(*Nomascus concolor*)时,将树木的平均高度、平均胸围和密度纳入物种迁移过程中面临的阻力因素<sup>[38]</sup>。

表4 阻力因子分类方法

Table 4 Resistance factor classification method

类型 Type	细分 Subdivide	具体因子 Specific factor
自然因素 Natural conditions	自然环境因素 生态风险因素	地形条件、地表绿度、地质条件、植物特征等 岩性和土壤厚度、地质灾害地点的密度等
人为因素 Human conditions	交通可达性 社会经济因素	与铁路之间的距离、与公路之间的距离等 GDP、夜光遥感指数、与污染源的距離等

GDP:国内生产总值 Gross domestic product

将确定阻力因子权重的方法进行分类,其中通过参考他人研究、专家打分等方法归为经验值法(145篇),将熵权法、层次分析法等模型计算方法归为定量计算法(122篇),随着时间推移,经验值法的应用减少而定量

计算法的应用增加。另有 33 篇文献将经验值法和定量计算法结合使用以确保结果的科学性。在阻力值确定上,通过动物跟踪数据<sup>[22]</sup>来估计阻力值的研究极少(4 篇),其余 294 篇文献采用赋予相对阻力值来评估动物的扩散和迁移能力<sup>[39]</sup>。

### 3.3 生态廊道提取

300 篇文献共识别出 5 种廊道提取方法与模型(图 4),包括最小累积阻力模型(63.3%)、电路理论(32.3%)、图论法(3%)和组合模型(5%)等。组合模型是指耦合两种或两种以上的理论方法对廊道进行提取。考虑到廊道提取方法的适用范围和应用频率,我们对使用最广泛的前三种廊道提取方法进行细化分析(表 5)。

表 5 三大生态廊道提取方法比较

Table 5 Comparison of three major ecological corridor extraction methods

廊道提取方法 Method	最小累积阻力模型 Minimum cumulative resistance model	电路理论 Circuit theory	图论法 Graph theory
输入数据 Input data	生态源地(矢量)数据;阻力面(栅格)数据;	生态源地(矢量)数据;阻力面(栅格)数据;	生态源地(矢量)数据;阻力面(栅格)数据(可选);源地间距离数据
主流平台 Platform	Corridor Design; ArcGis	Circuitscape	Conefor Graphab
适用情景 Suitable scenario	焦点物种在全面掌握景观先验信息的前提下,会以最小化已知栖息地间迁移成本的目标进行空间移动 <sup>[32]</sup> ;如焦点物种在熟悉的生境斑块(或栖息地)间的移动。	焦点物种缺乏景观先验信息,带有一定目标导向,在空间中进行随机扩散 <sup>[32]</sup> ;如焦点物种的出生扩散或繁殖扩散。	聚焦于焦点物种栖息地斑块或廊道的重要性评价 <sup>[40]</sup>
优点 Advantages	(1)合考虑景观格局的空间异质性 (2)基于 GIS 平台,廊道模拟结果直观,操作简单	(1)充分考虑物种运动的随机性 (2)为焦点物种提供的廊道方案不唯一	(1)具有强大的空间表达能力,能将复杂的网络结构关系通过直观简明的图形(点和线)进行表达 (2)拓展了廊道连通性的定量分析方式。
缺点 Limitations	(1)阻力赋值主观性问题 (2)单一路径问题	(1)阻力赋值主观性问题 (2)不适于具有固定迁徙路线的鸟类	(1)忽略下垫面因素对焦点物种的影响 (2)栖息地(节点)之间的连接只能通过欧式距离进行计算
典型案例 Typical case	[18,43]	[31,46]	[49—50]

GIS:地理信息系统 Geographic information system

#### 3.3.1 最小累积阻力模型

最小累积阻力模型源自对物种扩散过程的研究<sup>[41]</sup>,认为物种需要克服一定的“阻力”(resistance)或消耗一定的“成本”(cost)才能在迁徙、扩散等过程中穿越异质景观空间,而最小累积阻力或最低累积成本的通道则是最优通道。这一方法的其他名称还包括最小成本距离(least cost distance, LCD)<sup>[42]</sup>、最小成本路径模型(least cost path)<sup>[36]</sup>。在目前搜集到关于生物多样性保护的生态网络研究中,最小累积阻力模型是最常用的廊道提取方法。

面向生物多样性保护的生态网络构建中,最小累积阻力模型在应用中不断拓展其理论框架,研究者通过整合多维度空间数据或融合多学科方法,显著提升了生态廊道提取的精度和科学性。例如,在中国沿海研究中<sup>[20]</sup>,利用人为干扰和气候干扰估算阻力面,并根据斑块大小估算关键生境和海洋保护区对阻力面的抵消,在此基础上利用最小累积阻力模型模拟出海洋物种可能的最佳迁徙走廊。以武汉市为研究区<sup>[18]</sup>,首先通过加权叠加三类关键阻力因子-土地覆被穿越成本(CI)、人为干扰规避成本(Cad)和基础设施建设成本(Cc),建立多维阻力评价体系,构建鸟类和小型哺乳动物综合成本曲面图,接着通过最小累积阻力模型模拟出生态廊道,最后通过核密度估计(KDE)方法提取高密度廊道形成骨干网络。在北京市生物多样性保护导向的生态

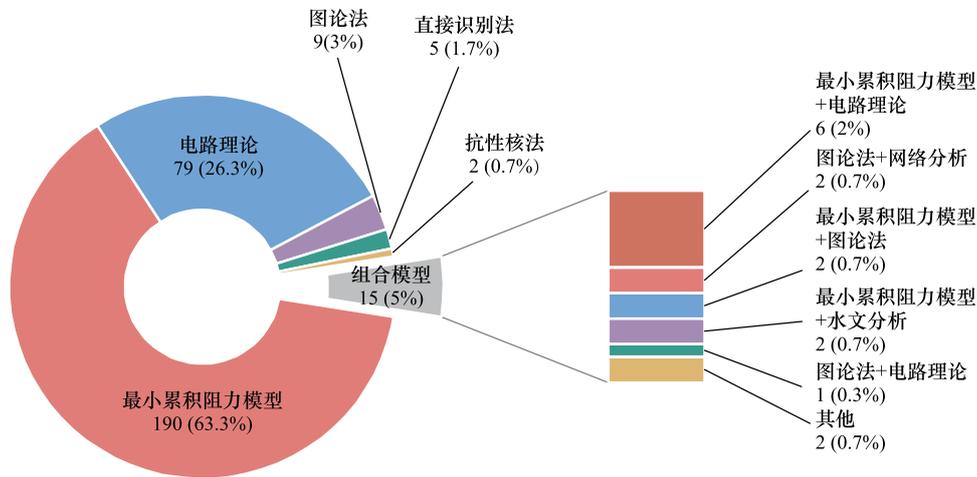


图 4 生态廊道提取方法篇数(比例)

Fig.4 Number of articles on ecological corridor extraction methods (proportion)

网络构建中<sup>[43]</sup>,首先基于 InVEST 模型开展生境质量定量评估与生态源地识别,继而根据地形条件和人类活动强度构建综合阻力面,最后通过最小累积阻力模型结合空间连续小波变换(SCWT)和核密度估计确定生态廊道方向及范围。

### 3.3.2 电路理论

电路理论在三大主要廊道提取方法中出现最晚,但近年已成为热门方法。与此方法相关的软件平台也已发展得较为成熟<sup>[44]</sup>。电路理论将异质景观视为导电表面,将物种视为随机游走者,依据焦点物种习性赋予不同土地利用类型差异化的电阻值,将景观中物种的迁移运动视为电流,电流值越大,廊道使用频率越高,表明源地间连通性越好<sup>[45]</sup>。目前已被普遍应用于模拟大中型哺乳类物种(如华北豹 *Panthera pardus japonensis*<sup>[46]</sup>、亚洲黑熊 *Ursus thibetanus*<sup>[31]</sup>)的生态网络。例如,为促进中国华北豹保护<sup>[46]</sup>,将 MaxEnt 模型提取出的生态源和 20 个华北豹的孤立保护区分别作为两套不同的生态源数据,用预测生境适宜性概率图建立阻力层,再用电路理论识别出生态源之间的生态廊道。基于海拔、坡度、地形粗糙度和土地利用类型构建阻力面,并结合亚洲象的体型及生理特征,模拟构建适用于亚洲象<sup>[22]</sup>保护的生态网络。在亚洲野山羊(*Capra aegagrus*)生态网络构建中<sup>[47]</sup>,研究者利用布尔叠加和加权线性组合方法,划定了核心荒野斑块,基于荒野质量指数构建阻力面,接着使用电路理论模拟出亚洲野山羊的荒野生态网络,并评估其对生物多样性保护的贡献。

### 3.3.3 图论法

图论法基于拓扑学原理<sup>[48]</sup>,首先将焦点物种的生境斑块进行拓扑结构抽象,将其转化为网络节点;其次将斑块间潜在迁移路径量化为节点间的拓扑连接边,由此形成表示物种迁移过程的拓扑网络模型。在此基础上,通过计算功能连接度指数等指标,并融合  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$  多样性梯度验证方法,综合识别维持生态网络结构稳定性的核心生境斑块与关键迁移廊道。例如,在大洼区西安镇以绿翅鸭(*Anas crecca*)为焦点物种<sup>[49]</sup>,通过构建基于图论的引力交互模型模拟其生态网络,并利用  $\gamma$  指数和  $\alpha$  指数评价出理想状态下和受人为影响的生境绿道网络景观连接度差异,最终确定支撑绿翅鸭种群扩散的关键生境节点及具有优先修复价值的潜在廊道空间分布。基于 InVEST-图论模型模拟出西双版纳州亚洲象生境网络<sup>[50]</sup>,从“源地-廊道”角度定量化分析西双版纳州国家级亚洲象保护区的连通性缺口,进而提出自然保护区优化建议。

### 3.4 廊道宽度

生态廊道宽度由许多因素决定,包括焦点物种、植被状况、廊道功能、周边土地利用和廊道长度等。在 300 篇文献中,已确定生态廊道宽度的文献共 60 篇(图 5),所使用廊道宽度确定方法主要有(根据使用频次

从高到低):经验值法(37 篇),如依据前人研究中不同廊道宽度对各焦点物种类型的适宜性来确定<sup>[51]</sup>;土地利用结构变化法(9 篇),如基于不同宽度廊道的土地利用结构变化特征,筛选建设成本最低的优化方案<sup>[8]</sup>;电路理论法(5 篇),如通过电路理论获得的电流密度,来确定生态廊道空间范围<sup>[52]</sup>;第四类为公式-模型-指标评价法(4 篇),如川西高原<sup>[53]</sup>和上海市生态廊道宽度<sup>[54]</sup>的确定分别使用了 IEW-TOPSIS 评价方法与廊道形态模型;其他方法包括通过累积阻力提取(2 篇)、以栅格大小为廊道宽度(2 篇)、通过缓冲区分析合并临近廊道以得到廊道宽度(1 篇)。

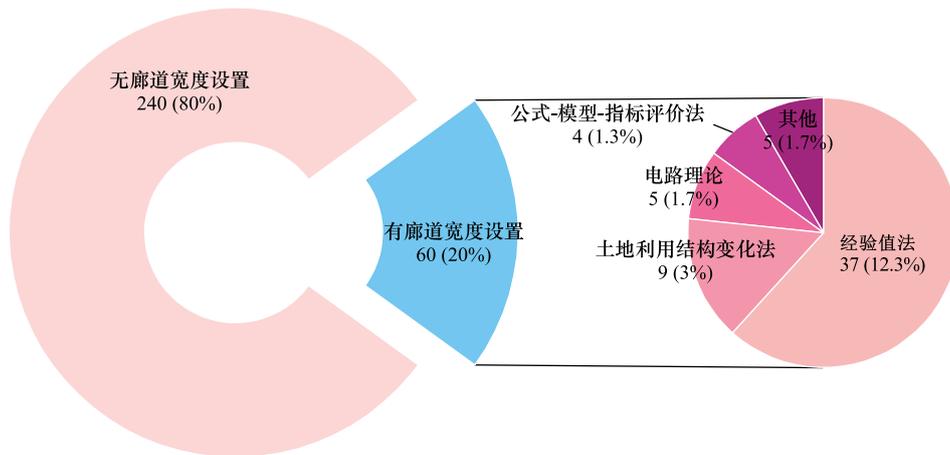


图 5 生态廊道宽度设置及确定方法篇数(比例)

Fig.5 Number of articles on ecological corridor width settings and determination methods (proportion)

## 4 生态网络优化与评价

### 4.1 生态网络优化

生态网络构建完成后,192 篇文献在此基础上进一步优化网络。生态网络优化能够通过调整其结构来增强生态系统的稳定性,并提升生态网络的功能连通性,这对于生物多样性保护目标具有极为重要的意义<sup>[55]</sup>。生态网络优化主要分为判别关键优化区域和确定具体优化策略两个步骤。关键优化区域判别主要包括生态节点识别和廊道重要性区分,84 篇文献借助基于电路理论的 Linkage Mapper 工具完成对生态夹点、障碍点的识别<sup>[56]</sup>;55 篇文献将生态廊道的交汇点、转折处或与阻力面“山脊线”的交点<sup>[57-58]</sup>视为关键生态节点;13 篇文献通过图论方法和网络分析软件识别生态网络中的关键节点;此外,7 篇文献基于生态流的汇集特征,运用水文分析原理来确定生态节点的位置<sup>[59]</sup>。共有 140 篇文献进行廊道的重要性评估,主要使用到的模型/方法分别有:基于重力模型(64 篇)、基于电路理论(37 篇)和基于图论的功能连接度指数(8 篇)。研究在识别与筛选原理上体现出对高概率区域的重视与破碎化区域的优化<sup>[60]</sup>,以求在大多数物种的可行性与连通性需求之间取得平衡,最大效益地提高生态网络整体连通性和稳定性。在具体优化策略使用上(192 篇),84 篇文献通过修复生态夹点与生态断裂点,加强景观连通性,保证生态网络中正常的物质能量流动;58 篇文献通过增加踏脚石来增强生态网络的稳定性;15 篇文献通过实施生态廊道的差异化保护来增强生态网络的服务功能。总体而言,优化策略的制定通常需要根据研究区具体特征,选择并应用相应的生态网络优化方法。

### 4.2 生态网络评价

生态网络评价能够识别生态网络中的薄弱环节,提高生态网络在生态保护和景观规划中的实际应用价值。统计发现,基于图论方法的网络结构评价占比最高(38 篇),通常使用  $\gamma$  指数、 $\beta$  指数和  $\alpha$  指数作为指标计算生态网络连接度<sup>[61]</sup>。有 27 篇文献借助基于图论的景观格局指数,例如平均斑块面积、斑块内聚度(Patch cohesion)以及景观形状指数(Landscape shape index)等,对景观格局特征进行分析<sup>[62]</sup>,并从中筛选出

最优的生态网络格局。借助 Conefor Sensinode 软件或 Graphab 软件(共 6 篇),通过运用生态流通指数(flux F)、整体连通性指数(IIC)以及可能连通性指数(PC)等指标,不仅可以反映景观的连通性,还能量化各关键点(或斑块)对景观连通性的贡献,进而评价景观生态连接度并开展效应分析<sup>[62]</sup>。有 15 篇文献从生态网络的用地比例、布局、功能以及管理等多个维度构建了城市生态网络的综合评价指标体系,并运用整体连通性指数、网络密度、效能鲁棒性等指标进行评估,以筛选出综合性能最佳的生态网络。另外,有 38 篇文献不仅优化了生态网络,而且对构建后的生态网络进行验证<sup>[63]</sup>,以促进优化后的生态网络能够有效完成生态源地与生态节点之间的物种迁移、信息传递和能量流动。

## 5 讨论与展望

### 5.1 研究趋势

生态网络作为缓解生境破碎化的空间策略,通过连通离散生境斑块促进物种基因交流与关键生态过程,一定程度上缓解人类活动导致的生境丧失,为维持区域生物多样性提供了重要的空间解决方案。本文基于 CNKI 和 Web of Science(WOS)核心数据库,对我国 2004—2024 年生物多样性保护导向的生态网络研究领域文献开展系统分析,发现如下研究趋势:(1)生态网络研究呈现指数型增长,自 2021 年进入快速增长阶段。研究区主要分布在云南、四川和甘肃等旗舰种活动频繁区域以及北京、江苏和湖北等科研机构集聚省份。(2)67%的研究依据政治界限划定研究区,其中多聚焦于市级或以下的区域,对省级及以上区域关注较少。研究面积跨度为 0.86—9600000km<sup>2</sup>,其中 1000—50000km<sup>2</sup>的中小尺度占比最高(72.8%)。生态系统类型中城市生态系统占比超半数(53%)。(3)在 138 篇明确焦点物种的文献中,哺乳动物占比最高(53.6%),以猴类(9.42%)、大熊猫(5.80%)和羚羊类(5.80%)为主;鸟类次之(30.0%);植物类最少(1.45%)。且超半数(69.57%)聚焦珍稀/保护物种。针对单一物种的研究占主体(52.9%)。生态网络构建中焦点物种的遴选标准经历了从无到有、由单一物种向多类群复合体系的发展,当前筛选对象以珍稀/保护物种或旗舰物种为主。(4)随着技术手段不断更新,生态网络构建及优化各步骤的科学性也随之提升,并且将研究区及焦点物种相匹配的生态过程融入实际应用中的研究越来越多。2020 年《“十四五”规划纲要》<sup>[2]</sup>将生态网络构建列为生物多样性保护重大工程的核心内容,使国家重点保护与珍稀物种栖息地的系统性保护修复获得政策支持。这一政策导向可能与 2021 年以来相关研究文献量指数级增长密切相关,特别是该领域研究普遍聚焦珍稀物种保护这一关键方向,并且也可能间接解释云南、四川和甘肃等省份成为研究热点区域的原因。

### 5.2 存在问题与展望

尽管我国生物多样性保护的生态网络研究已取得一些成果,但在应对复杂生态系统保护需求方面仍存在理论与实践的双重挑战。本文基于已有研究,总结当前研究中的关键问题,提出展望。

当前,超过半数研究未界定焦点物种,导致模拟的生态网络缺乏针对性<sup>[64]</sup>,减弱生物多样性保护以及生态系统的稳定性。即便在明确焦点物种的研究中,选择也多集中于大熊猫、金丝猴和亚洲象等珍稀/保护物种或旗舰物种,存在选择单一化问题,且忽略普通物种,然而已有研究指出普通物种(如青蛙、蟾蜍等)也是生态系统中的关键指示者,能及时反应环境变化,利用其构建生态网络有利于本土生态系统的保护及修复<sup>[65]</sup>。因此,本文提议扩大焦点物种多样性,在选择时加强对普通物种的关注,并根据不同物种的生态习性和迁移路径,尝试建设“珍稀/保护物种+普通物种”的多物种复合保护网络。其次,由于一半以上研究(53.00%)针对城市生态系统,而城市栖息地具有面积局促、高度破碎化的特征,因此焦点物种选择时,相比于活动范围广、对连续栖息地依赖较高的大型哺乳动物,一些适应性强、生命周期短、对环境变化响应迅速的中小型乡土物种(如虎纹蛙 *Hoplobatrachus rugulosus*<sup>[66]</sup>、鼬獾 *Melogale moschata*<sup>[67]</sup>或鸟类<sup>[19]</sup>)更适合作为城市生态网络中的焦点物种。

生态网络模型构建技术面临若干挑战。普遍较少焦点物种基础数据是当前研究的主要瓶颈之一。具体而言,与焦点物种生活习性、空间分布及长期动态相关的野外观测数据往往难以获取,尤其是可靠的实地样本

数据。这些数据的缺失不仅会直接影响模型的模拟精度,更会削弱据此构建的生态网络对焦点物种的实际保护效果。为应对这一挑战,本文建议将生成式人工智能(Generative artificial intelligence, GenAI)引入生态网络构建体系,GenAI 在生态学领域展现出巨大潜力,尤其擅长扩充稀缺数据集、预测动物运动轨迹以及提高生态数据的可获取性<sup>[68]</sup>。其创新应用具体体现在拓展焦点物种数据源并提升数据质量:在整合现有数据(如 GPS 定位、动物追踪数据<sup>[69]</sup>)与新兴数据(如公民科学数据、生物众包数据,例如 GBIF 平台 <https://www.gbif.org/>)的基础上,使用 GenAI 进行数据扩增得到真实度高的合成数据,这不仅能有效丰富焦点物种的生活习性 & 空间位置等信息,还能降低数据获取成本。多数研究缺乏构建后生态网络对焦点物种实际保护效果的检验。对此,本文提议构建一个融合机器人及自主化系统与 GenAI 的动态监测系统。通过引入机器人及自主化系统,可有效突破传统监测在人员可达性与环境耐受性方面的限制<sup>[70]</sup>。在 GenAI 的支持下,构建动物运动轨迹预测模型,形成多物种动态监测系统,为科学评估生态网络对焦点物种的实际保护效果提供有力支撑。

为深化生物多样性保护导向的生态网络理论发展,本文也抛砖引玉,提议未来研究可寻求突破的关键方向:第一,加强焦点物种关键性状(特别是扩散相关性状)与生态网络拓扑结构之间的关系分析,从个体特征出发,探究物种如何在网络中实现扩散、定殖与维持,从而揭示潜在的扩散路径、扩散限制和种库效应。第二,整合基于种群时空动态的复合群落生态学理论与物种保护的生态网络研究,实现二者相互验证,并系统评估优化后生态网络对种群动态平衡的影响,重点验证其提升关键生态功能(如促进物种扩散、定殖和衰退之间平衡)的实际效果。第三,促进保护生物学、群落生物学、景观生态学等学科在生态网络研究中进一步发展,探索新兴交叉领域发展(如上述提到的动态监测平台)。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, da Fonseca G A B, Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, 403 (6772): 853-858.
- [ 2 ] 全国人民代表大会. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要. (2021-03-23) [ 2024-04-18 ]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202103/P020210323538797779059.pdf>.
- [ 3 ] Bruinderink G G, Van Der Sluis T, Lammertsma D, Opdam P, Pouwels R. Designing a coherent ecological network for large mammals in northwestern Europe. *Conservation Biology*, 2003, 17(2): 549-557.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] Hilty J, Worboys G L, Keeley A, Woodley S, Lausche B J, Locke H, Carr M, Pulsford I, Pittock J, White J W, Theobald D M, Levine J, Reuling M, Watson J E M, Ament R, Tabor G M. Guidelines for conserving connectivity through ecological networks and corridors. IUCN, International Union for Conservation of Nature, 2020.
- [ 6 ] 宋利利, 夏艺菲. 基于 MSPA 的郑州市城区绿地生态网络构建及优化. *中国城市林业*, 2022, 20(6): 57-63.
- [ 7 ] 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): 7060-7071.
- [ 8 ] Nie W B, Shi Y, Siaw M J, Yang F, Wu R W, Wu X, Zheng X Y, Bao Z Y. Constructing and optimizing ecological network at county and town Scale: The case of Anji County, China. *Ecological Indicators*, 2021, 132: 108294.
- [ 9 ] Chen R N, Carruthers-Jones J, Carver S, Wu J Y. Constructing urban ecological corridors to reflect local species diversity and conservation objectives. *Science of The Total Environment*, 2024, 907: 167987.
- [ 10 ] 王晓玉, 冯喆, 吴克宁, 林倩. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护与修复. *生态学报*, 2019, 39(23): 8725-8732.
- [ 11 ] Dai L, Liu Y B, Luo X Y. Integrating the MCR and DOI models to construct an ecological security network for the urban agglomeration around Poyang Lake, China. *Science of The Total Environment*, 2021, 754: 141868.
- [ 12 ] Peng J, Yang Y, Liu Y X, Hu Y N, Du Y Y, Meersmans J, Qiu S J. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns. *Science of The Total Environment*, 2018, 644: 781-790.
- [ 13 ] 张利, 何玲, 闫丰, 陈亚恒. 基于图论的两栖类生物栖息地网络规划——以黑斑侧褶蛙为例. *应用生态学报*, 2021, 32(3): 1054-1060.
- [ 14 ] 蔡国俊, 袁桂香, 符辉. 基于文献计量分析的生态网络研究现状和趋势. *生态环境学报*, 2022, 31(8): 1690-1699.
- [ 15 ] 谢苗苗, 李超, 刘喜韬, 付梅臣. 喀斯特地区土地整理中的生物多样性保护. *农业工程学报*, 2011, 27(5): 313-319, 398.
- [ 16 ] Odum E P. *生态学基础*: 第 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [ 17 ] 赵志强, 方昊, 袁青, 吴妍. 松花江百里生态长廊生境网络构建研究. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(4): 261-270.
- [ 18 ] Teng M J, Wu C G, Zhou Z X, Lord E, Zheng Z M. Multipurpose greenway planning for changing cities: a framework integrating priorities and a

- least-cost path model. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(1): 1-14.
- [19] Li X X, Ou X Y, Sun X Y, Li H R, Li Y X, Zheng X. Urban biodiversity conservation: a framework for ecological network construction and priority areas identification considering habit differences within species. *Journal of Environmental Management*, 2024, 365: 121512.
- [20] Kang Y Y, Lin Y X, Chen Z X, Zhang X Y, Li Y. Framing seascape connectivity modeling to prioritize marine conservation effort in China's coastal sea. *Frontiers in Marine Science*, 2024, 10: 1322001.
- [21] Wang M, Wang G M, Huang G P, Kouba A, Swaisgood R R, Zhou W L, Hu Y B, Nie Y G, Wei F W. Habitat connectivity drives Panda recovery. *Current Biology*, 2024, 34(17): 3894-3904.e3.
- [22] Jiang X, Liu H J, Jiang Z Y, Ni R P. Identifying migration routes of wild Asian elephants in China based on ecological networks constructed by circuit theory model. *Animals*, 2023, 13(16): 2618.
- [23] 李维平, 包衡, 张明海. 中国东北虎栖息地分析与潜在生态廊道构建. *兽类学报*, 2017, 37(4): 317-326.
- [24] 张宇, 李丽, 张于光, 李佳, 薛亚东, 李迪强. 人为干扰对神农架川金丝猴连通性及遗传多样性的影响. *生态学报*, 2019, 39(8): 2935-2945.
- [25] 吴茂全, 胡蒙蒙, 汪涛, 凡宸, 夏北成. 基于生态安全格局与多尺度景观连通性的城市生态源地识别. *生态学报*, 2019, 39(13): 4720-4731.
- [26] Zhang C, Fan Y W, Chen M H, Xia W C, Wang J D, Zhan Z J, Wang W L, Khan T U, Wu S H, Luan X F. Identification of conservation priority areas and a protection network for the Siberian musk Deer (*Moschus moschiferus* L.) in Northeast China. *Animals*, 2022, 12(3): 260.
- [27] 屠越, 刘敏, 高婵婵, 孙彦伟, 蔡超琳, 苏玲. 大都市区生态源地识别体系构建及国土空间生态修复关键区诊断. *生态学报*, 2022, 42(17): 7056-7067.
- [28] 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.
- [29] Xie Y T, Ying J X, Zou J, Li R H, Zhang H X, Shi Q, Li Y H. Habitat protection in urban-rural fringes through coordinated ecological network construction and territorial planning. *Land*, 2024, 13(7): 935.
- [30] 韩阳媚, 王锦, 于世涛, 程顺, 李玉灵. 塞罕坝地区生态网络构建及优化. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(5): 112-121.
- [31] Dai Y C, Huang H Q, Qing Y, Li J T, Li D Y. Ecological response of an umbrella species to changing climate and land use: Habitat conservation for Asiatic black bear in the Sichuan-Chongqing Region, Southwestern China. *Ecology and Evolution*, 2023, 13(6): e10222.
- [32] Wade A A, McKelvey K S, Schwartz M K. Resistance-surface-based wildlife conservation connectivity modeling: summary of efforts in the United States and guide for practitioners; RMRS-GTR-333. Ft. Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2015; RMRS-GTR-333.
- [33] 朱高红, 胡大志, 马堆芳, 张俊涛, 王东武, 张广文, 阿诚, 王亮, 马晨迪, 戴强, 王义弘. 祁连山国家公园甘肃片区雪豹栖息地廊道研究. *动物学杂志*, 2024, 59(4): 493-504.
- [34] 沈舟, 尹海伟, 孔繁花, 苏杰, 孙辉, 李久林. 基于生境组团化分析与景观廊道模拟的南京市白鹭生境网络构建与优化. *生态学报*, 2024, 44(8): 3303-3316.
- [35] 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.
- [36] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 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] Tong H L, Shi P J. Using ecosystem service supply and ecosystem sensitivity to identify landscape ecology security patterns in the Lanzhou-Xining urban agglomeration, China. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(11): 2758-2773.
- [38] Wu J C, Delang C O, Li Y J, Ye Q, Zhou J, Liu H, He H M, He W M. Application of a combined model simulation to determine ecological corridors for western black-crested Gibbons in the Hengduan Mountains, China. *Ecological Indicators*, 2021, 128: 107826.
- [39] 陈春娣, 贾振毅, 吴胜军, 童笑笑, 周文佐, 陈若漪, 张超林. 基于文献计量法的中国景观连接度应用研究进展. *生态学报*, 2017, 37(10): 3243-3255.
- [40] 滕明君, 周志翔, 王鹏程, 吴昌广, 徐永荣. 基于结构设计与管理绿色廊道功能类型及其规划设计重点. *生态学报*, 2010, 30(6): 1604-1614.
- [41] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1-16.
- [42] 刘吉平, 吕宪国, 杨青, 王海霞. 三江平原东北部湿地生态安全格局设计. *生态学报*, 2009, 29(3): 1083-1090.
- [43] Dong J Q, Peng J, Liu Y X, Qiu S J, Han Y N. Integrating spatial continuous wavelet transform and kernel density estimation to identify ecological corridors in megacities. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 199: 103815.
- [44] McRae B H, Shah V B, Edelman A. Circuitscape: modeling landscape connectivity to promote conservation and human health. *The Nature Conservancy*, 2016
- [45] McRae B H, Dickson B G, Keitt T H, Shah V B. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. *Ecology*, 2008, 89(10): 2712-2724.
- [46] 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.
- [47] Hu F X, Wanghe K Y, Guo X L, Ahmad S, Fu A H, Deng M H, Lin S W, Luan X F. Wilderness networks contributed the efforts of existing protected area networks: The cost-effective comparison among multiple conservation scenarios. *Global Ecology and Conservation*, 2024, 54: e03102.

- [48] Urban D, Keitt T. Landscape connectivity: a graph-theoretic perspective. *Ecology*, 2001, 82(5): 1205.
- [49] 唐强, 闫红伟. 基于图论的大洼县西安镇水禽生境绿道网络规划. *广东农业科学*, 2012, 39(9): 158-161.
- [50] 魏雯, 唐安琪. 基于 InVEST-图论模型的西双版纳亚洲象生境网络评价. *生态学报*, 2024, 44(12): 5206-5218.
- [51] 张玥, 许端阳, 李霞, 张晓宇, 王小博, 王绍强. 中-老交通走廊核心区生态廊道构建与关键节点识别. *生态学报*, 2020, 40(6): 1933-1943.
- [52] Wang J, Bai Y, Huang Z D, Ashraf A, Ali M, Fang Z, Lu X. Identifying ecological security patterns to prioritize conservation and restoration: a case study in Xishuangbanna tropical region, China. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 444: 141222.
- [53] Luo Y, Chen D P, Luo X Y, Yu H, Luo X. Construction of ecological corridors in complex terrain areas based on the 'cost-function-ecological benefit' model. *Ecological Indicators*, 2024, 166: 112312.
- [54] 达良俊, 陈克霞, 辛雅芬. 上海城市森林生态廊道的规模. *东北林业大学学报*, 2004, 32(4): 16-18.
- [55] 张远景, 俞滨洋. 城市生态网络空间评价及其格局优化. *生态学报*, 2016, 36(21): 6969-6984.
- [56] 吴楠, 王甜, 程鹏, 陈凝, 张浏, 宋婷. 基于电路理论的扬子鳄保护区块间生态廊道和节点识别研究. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(6): 1228-1238.
- [57] 孙贤斌, 刘红玉. 基于生态功能评价的湿地景观格局优化及其效应——以江苏盐城海滨湿地为例. *生态学报*, 2010, 30(5): 1157-1166.
- [58] 肖华斌, 张慧莹, 郭妍馨, 王玥. 服务高效导向下泰山区域山水林田湖草生命共同体生态网络构建研究. *中国园林*, 2021, 37(8): 103-108.
- [59] 韦宝婧, 苏杰, 胡希军, 徐凯恒, 朱满乐, 刘路云. 基于“HY-LM”的生态廊道与生态节点综合识别研究. *生态学报*, 2022, 42(7): 2995-3009.
- [60] 姜广顺, 张明海, 马建章. 黑龙江省完达山地区马鹿生境破碎化及其影响因子. *生态学报*, 2005(7): 1691-1698.
- [61] 肖笃宁, 李秀珍, 高峻, 常禹. *景观生态学*. 北京: 科学出版社, 2003.
- [62] 秦贤宏, 段学军, 杨剑. 基于 GIS 的城市用地布局多情景模拟与方案评价——以江苏省太仓市为例. *地理学报*, 2010, 65(9): 1121-1129.
- [63] 汪金梅, 雷军成, 王莎, 吴婕, 梁屹, 陈永林, 熊星, 王军围. 东江源区陆域生态网络构建与评价. *生态学杂志*, 2020, 39(9): 3092-3098.
- [64] Fan J P, Wang Q, Ji M, Sun Y J, Feng Y G, Yang F S, Zhang Z. Ecological network construction and gradient zoning optimization strategy in urban-rural fringe: a case study of Licheng District, Jinan City, China. *Ecological Indicators*, 2023, 150: 110251.
- [65] Chen C D, Meur C D, Jia Z Y, Lv M Q, Wu S J, Jia J S. Incorporating landscape connectivity into household pond configuration in a hilly agricultural landscape. *Landscape and Ecological Engineering*, 2017, 13(1): 189-204.
- [66] Ma Q W, Yu L, Xu L H, Yuan J J, Yang Y J. Can ecological networks established through interactions of multi-species conservation priorities maintain biodiversity and contain urban development. *Journal for Nature Conservation*, 2025, 84: 126853.
- [67] Qian M Y, Huang Y T, Cao Y R, Wu J Y, Xiong Y M. Ecological network construction and optimization in Guangzhou from the perspective of biodiversity conservation. *Journal of Environmental Management*, 2023, 336: 117692.
- [68] Rafiq K, Beery S, Palmer M S, Harchaoui Z, Abrahms B. Generative AI as a tool to accelerate the field of ecology. *Nature Ecology & Evolution*, 2025, 9(3): 378-385.
- [69] Nathan R, Monk C T, Arlinghaus R, Adam T, Alós J, Assaf M, Baktoft H, Beardsworth C E, Bertram M G, Bijleveld A I, Brodin T, Brooks J L, Campos-Candela A, Cooke S J, Gjelland K Ø, Gupte P R, Harel R, Hellström G, Jeltsch F, Killen S S, Klefoth T, Langrock R, Lennox R J, Lourie E, Madden J R, Orchan Y, Pauwels I S, Říha M, Roeleke M, Schlägel U E, Shohami D, Signer J, Toledo S, Vilc O, Westrelin S, Whiteside M A, Jarić I. Big-data approaches lead to an increased understanding of the ecology of animal movement. *Science*, 2022, 375(6582): eabg1780.
- [70] Pringle S, Dallimer M, Goddard M A, Le Goff L K, Hart E, Langdale S J, Fisher J C, Abad S A, Ancrenaz M, Angeletto F, Auat Cheein F, Austen G E, Bailey J J, Baldock K C R, Banin L F, Banks-Leite C, Barau A S, Bashyal R, Bates A J, Bicknell J E, Bielby J, Bosilj P, Bush E R, Butler S J, Carpenter D, Clements C F, Cully A, Davies K F, Deere N J, Dodd M, Drinkwater R, Driscoll D A, Dutilleul G, Dyrmann M, Edwards D P, Farhadinia M S, Faruk A, Field R, Fletcher R J, Foster C W, Fox R, Francksen R M, Franco A M A, Gainsbury A M, Gardner C J, Giorgi I, Griffiths R A, Hamaza S, Hanheide M, Hayward M W, Hedblom M, Helgason T, Heon S P, Hughes K A, Hunt E R, Ingram D J, Jackson-Mills G, Jowett K, Keitt T H, Klopper L N, Kramer-Schadt S, Labisko J, Labrosse F, Lawson J, Lecomte N, de Lima R F, Littlewood N A, Marshall H H, Masala G L, Maskell L C, Matechou E, Mazzolai B, McConnell A, Melbourne B A, Miriyev A, Nana E D, Ossola A, Papworth S, Parr C L, Payo-Payo A, Perry G, Pettorelli N, Pillay R, Potts S G, Prendergast-Miller M T, Qie L, Rolley-Parnell P, Rossiter S J, Rowcliffe M, Rumble H, Sadler J P, Sandom C J, Sanyal A, Schrodt F, Sethi S S, Shabrani A, Siddall R, Smith S C, Snep R P H, Soulsbury C D, Stanley M C, Stephens P A, Stephenson P J, Struebig M J, Studley M, Svátek M, Tang G, Taylor N K, Umbers K D L, Ward R J, White P J C, Whittingham M J, Wich S, Williams C D, Yakubu I B, Yoh N, Zaidi S A R, Zmarz A, Zwerts J A, Davies Z G. Opportunities and challenges for monitoring terrestrial biodiversity in the robotics age. *Nature Ecology & Evolution*, 2025, 9(6): 1031-1042.