

自然保护地连通网络构建与优化的方法及前瞻

姜虹, 彭建

(北京大学城市与环境学院 自然资源部生态系统一体化修复与可持续利用工程技术创新中心,
北京 100871)

摘要: 全球自然保护地的保护成效已被广泛认可,但仍面临覆盖面积、生态系统代表性和物种保护程度不足等问题;同时,多数自然保护地面积小、连通性差,且面临气候变化与人类活动威胁,迫切需要通过自然保护地扩张与连通性管理,系统提升自然保护地的稳定性及其保护成效。尽管已有研究尝试通过生态廊道实现自然保护地连通,但尚未形成统一的概念,且缺少构建与优化框架的普遍共识。本文系统梳理相关研究进展,提出了自然保护地连通网络的概念内涵和分类体系,以及连通网络构建与优化框架及常用方法。自然保护地连通网络根据保护目标可分为生物迁徙网络、结构稳定网络和气候连通网络,按照“自然保护地扩张—景观阻力面构建—生态廊道提取—连通网络优化”框架,基于不同方法进行构建与优化。当前自然保护地连通网络研究侧重静态视角下构建短期有效的连通网络,强调直接生态效益而忽视保护投入与社会价值。未来应使用长时序数据基于动态视角构建自然保护地动态连通网络;应对土地利用变化与气候变化威胁,保障自然保护地连通网络的长期有效;权衡多重保护目标,以及发展与保护的需求,基于成本—效益分析确定连通网络构建与优化的最佳方案;提升连通网络的社会附加价值以获得更多支持。

关键词: 自然保护地连通网络;生态廊道;生物迁徙;结构稳定;气候连通

DOI: 10.11821/dlxb202409002

1 引言

在土地利用变化与气候变化影响下,全球生物多样性丧失与生态系统退化风险持续加剧,威胁可持续发展目标的实现^[1-2]。自1872年美国黄石国家公园成立以来,在《生物多样性公约》等国际条约的推动下,自然保护地在全球范围内得到了广泛的关注,并在过去几十年的实践中取得了被广泛认可的保护成效,为保护生态系统和生物多样性、维护地质地貌景观多样性、保障自然生态系统健康稳定、提升生态系统服务、实现人与自然和谐共生作出了积极的贡献^[3-4]。随着相关工作的持续推进,全球自然保护地数量不断增加,但在覆盖面积、生态系统代表性和物种保护程度等方面仍有不足^[5-6]。《2020年后全球生物多样性框架》提出的“到2030年保护至少30%的陆地、海洋和淡水生态系统”目标的实现,需要更积极的全球自然保护地扩张行动。

尽管自然保护地实现人与自然和谐共生的突出作用得到了广泛的重视,但仍面临多重威胁,阻碍生物多样性和生态系统保护目标的实现^[7-8]。气候变化^[9]、土地利用变化^[10]、

收稿日期: 2023-11-27; 修订日期: 2024-08-24

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BEG03019) [Foundation: Key Research and Development Program of Ningxia, No.2021BEG03019]

作者简介: 姜虹(1997-),女,辽宁大连人,博士生,研究方向为景观生态学。E-mail: jiang_hong@pku.edu.cn

通讯作者: 彭建(1976-),男,四川彭州人,博士,教授,博士生导师,研究方向为景观生态与土地利用、区域生态持续性评估、综合自然地理学。E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn

2176-2190 页

物种入侵^[11]、人口增长与住房开发^[12-13]、能源利用与矿业开采^[14]等压力源对自然保护区的保护成效产生严峻威胁。同时,在景观破碎化现象不断加剧的背景下,占总数一半以上的自然保护区都因面积小和连通性不足而面临退化和不可持续管理的问题^[15-17]。上述问题的应对可以通过自然保护区扩张与连通性管理两种途径实现。其中,自然保护区扩张可以通过提高对濒危物种的覆盖度有效减少物种灭绝,并通过维持重要生态过程保障生态系统的稳定性,实现自然保护区的可持续管理^[18-19]。然而,人类活动的持续加剧导致剩余土地资源紧张,可用于自然保护区扩张的潜在区域存在面积不足、保护价值偏低和外部压力偏大等问题^[6]。因此,还需要采取措施提升自然保护区的连通性,通过规划更为灵活的生态廊道形成空间连通的保护网络,促进自然保护区间的生态流动,维持关键生态过程,防止孤立自然保护区的生态系统退化和保护价值丧失,提高自然保护区应对不断增大的外部压力、维持生态系统稳定性的能力^[20-22]。

自然保护区作为一种基于面积的保护措施,是在地理学空间视角下开展生态保护的重要途径;地理学为自然保护区扩张与连通策略的实现提供了有效的空间联系视角。具体来说,自然保护区扩张的潜在区域与连通路径识别,需要以景观的空间自相关性、空间异质性等空间特征为基础,以地理学的空间分析方法为手段,通过结构与功能有效连通的自然保护区维持重要的生态过程,提高自然保护区的稳定性^[23-24]。生态空间的连通性管理手段,如生态廊道^[25]、生态安全格局^[26]、生态网络^[27]、绿色基础设施^[28]等已有明确的定义与广泛的应用。然而,自然保护区的连通性管理尚无统一的概念界定和实现框架。尽管已有研究采用了“自然保护区网络”“自然保护区连通性”等表述,但这些表述的内涵并不统一。例如,“自然保护区网络”常被用于表示多个自然保护区的集合^[18, 29],缺乏对自然保护区之间连通性的关注;“自然保护区连通性”则常被用于衡量自然保护区内部斑块在景观尺度的连通性,而未能考虑通过生态廊道实现多个自然保护区之间的结构与功能连通^[30-31]。因此,考虑到对核心概念定义和分类的缺失将导致自然保护区的连通性管理难以有效推进,当前亟须系统梳理相关研究进展,明晰自然保护区连通网络的概念内涵与分类体系,梳理连通网络构建与优化的基本流程与主要方法,展望自然保护区连通网络的重点研究方向,以期从地理空间过程视角对不同保护对象与生态过程进行整合,通过提升景观的空间连通实现对自然保护区的长期有效保护。

2 自然保护区连通网络定义与分类

2.1 自然保护区连通网络定义

自然保护区连通网络是基于地理学的空间视角,为应对景观破碎化和生态系统退化风险,通过连通性管理的方式提升自然保护区结构与功能稳定性的一种空间组织形式。为应对全球、区域等大尺度景观破碎化问题,许多类似的空间规划策略都关注生态空间的连通性管理,尽管侧重点各有不同。例如,生态网络致力于促进不同种群之间的基因交流,从而增加受威胁物种生存机会,以生物多样性保护为目标^[32]。生态安全格局则关注生态系统健康及生态系统服务的可持续性,特别适用于人地矛盾突出的区域^[33]。绿色基础设施是由自然、半自然区域和开敞空间组成,具有内部连通性的绿色空间要素网络,在城市区域提供生态、社会与经济等多种复合功能,关注生态空间的保护^[34]。气候连通廊道是在气候变化驱动下使物种、种群能够向新的气候适宜区域移动的廊道,关注气候变化对物种迁徙的驱动^[35]。

类似地,自然保护区连通网络由多个自然保护区和起连通作用的生态廊道组成,以提升自然保护区结构与功能连通性的方式应对潜在的自然或人类威胁与风险。自然保护区

常被定义为“通过法律或其他有效手段得到承认、专用和管理的明确界定的地理空间, 以实现对具有相关生态系统服务和文化价值的自然的长期保护”^[36]。生态廊道则被定义为“明确界定的地理空间, 经过长期治理和管理, 以维持或恢复有效的生态连通性”^[37]。作为维持、加强和恢复景观连通性的途径, 生态廊道被广泛应用于生态空间的连通性管理^[24-26]。基于对上述相关概念的辨析, 以及对自然保护区连通性管理相关研究的梳理, 可以将自然保护区连通网络定义为: 由明确界定的多个自然保护区及连通其间的生态廊道组成的连通网络, 旨在通过串联邻近的自然保护区, 实现长期的空间连通, 促进物质、能量和信息流动, 应对气候变化和人类活动威胁, 有效维持自然保护区的结构与功能稳定性。

2.2 自然保护区连通网络分类

自然保护区连通网络可以根据其保护对象和目的的不同进行分类。一方面, 自然保护区的保护对象包括生物多样性、代表性生态系统、生态系统服务、文化景观和自然景观等^[38]; 相较而言, 文化景观和自然景观侧重就地保护, 而其他类型的自然保护区则大多需要通过空间连通实现更有效地保护。另一方面, 自然保护区的面积小和连通性不足导致了生态系统稳定性差、种群隔离和灭绝、气候变化适应性差等一系列问题。相应的, 生态廊道的作用包括促进物种迁徙和基因交流、维护生态过程、提高对气候变化的适应能力等。综合保护对象和目的, 自然保护区连通网络可以分为生物迁徙网络、结构稳定网络和气候连通网络3类(图1)。

生物迁徙网络旨在通过自然保护区为特定物种提供栖息地, 并通过生态廊道提供其不同栖息地(越冬地、繁殖地等)之间移动的通道, 或实现同一物种的多个空间隔离种群之间的基因交流, 以应对景观/生境破碎化导致的种群隔离问题^[39]。生物迁徙网络可以缓解人与野生动物之间日益加剧的冲突, 保护人与牲畜的安全, 进而减少对野生动物



图1 3类自然保护区连通网络的保护对象和目的

Fig. 1 Protection objects and purposes of three types of protected area connectivity network

的报复性猎杀^[40]。构建生物迁徙网络要重点考虑目标物种的生活习性、栖息地偏好、迁徙能力、威胁源等特征^[41]。

结构稳定网络的保护对象从特定物种延伸至生态系统这一整体，旨在保护特定生态系统的结构稳定性和生态过程的完整性，避免景观破碎化导致生态过程受阻，以及自然保护地的降级或失效^[42]。在人地矛盾突出、生态空间急剧收缩、生态系统退化严重的生态脆弱地区（如石漠化地区），尤其需要结构稳定网络的保护^[43]。构建结构稳定网络需要考虑人类活动对自然生态系统的干扰和对生态过程的阻碍程度^[44]。

气候连通网络是生物迁徙网络在时间尺度上的延伸，旨在关注气候变化的驱动，通过连接当前与未来合适的自然保护地，为物种追踪适宜气候提供移动通道，降低物种灭绝风险^[45]。气候变化会改变当前自然保护地的栖息地适宜性，使其无法实现生物多样性的长期有效保护^[46]。在这种威胁下，适应能力差的物种需要寻找新的栖息地，因此需要促进当前自然保护地与未来气候适宜地区的连通来实现对生物多样性的长期保护^[47]。构建气候连通网络需要减少迁徙过程中的气候威胁暴露，并要考虑物种的迁徙能力和可能发生的微进化^[48]。

3 自然保护地连通网络构建与优化方法

自然保护地连通网络的构建与优化主要包括自然保护地扩张、景观阻力面构建、生态廊道提取、连通网络优化4个步骤（图2）。根据保护目标的差异，不同类别自然保护地连通网络构建与优化的适用方法也存在差异。具体而言，自然保护地扩张以系统的现状评估为基础，结合当前自然保护地的差距分析，依据不同保护目标扩大现有自然保护地或设立新的自然保护地，实现整体覆盖面积的增加^[19]；景观阻力面反映景观对生态流的阻碍程度，是提取生态廊道的基础，需要根据具体保护目标设置^[42]；生态廊道是连接自然保护地、提升景观连通性的重要空间要素，通过实际观测或空间建模的方法提取^[49]；



图2 自然保护地连通网络构建与优化框架

Fig. 2 Construction and optimization framework of protected area connectivity network

连通网络优化面向空间决策,通过连通稳定性评价、要素优先性排序、关键区域与阈值识别、网络有效性验证为连通网络优化方案的制定和适应性管理提供依据。

3.1 自然保护地扩张

自然保护地需要覆盖一定面积的完整景观,才能实现长期有效地保护。从全球来看,现有自然保护地的覆盖面积与30%的目标还存在较大差距,且在保护成效、生态系统代表性、濒危物种覆盖度等方面都存在不足,需要进一步扩张^[5, 50-51]。为了最大化自然保护地的保护价值,需要对现状自然保护地的代表性、保护成效等开展多维度系统评估,分析现有自然保护地系统的不足与差距,以明确扩张目标。在此基础上,基于对潜在扩张区域的保护价值与所受威胁等方面的评估与优先性排序,合理确定扩张方案。自然保护地扩张的优先区识别以空间视角为基础,可以采用Zonation模型^[6]、多准则决策^[52]等方法进行选择。对于不同类型的连通网络,保护优先区识别的标准有所不同。面向生物多样性保护目标,(濒危)物种丰富度、生物多样性指数等指标常被用于保护优先区识别^[53]。此外,物种分布模型可以基于物种已知分布点位及环境因子估计物种在特定时空条件下的地理分布,以此确定保护优先区^[50]。由于模型参数的选择和阈值设定对结果存在较大影响,需要通过敏感性测试提高模型的可信度^[12]。栖息地适宜性作为生物多样性的代理指标,也可用于确定生物多样性保护优先区,常通过InVEST模型的生境质量模块评估^[54]。面向生态系统结构与生态过程的保护,景观完整性或自然度是重要指标,旨在保护荒野、森林、湿地等重要生态系统^[55]。另一方面,生态系统服务和生态系统健康等生态系统评估指标作为生态系统提供惠益和自身稳定性的表征,也常被用于保护优先区的识别^[56-57]。面向气候连通目标,自然保护地的扩张主要面向未来气候条件下的潜在栖息地,通过评估气候相似性和基于未来生物气候数据模拟物种分布来实现^[58]。

总体来看,不同目标导向下的自然保护地扩张方案存在空间不一致性,需要在实际决策中进行权衡,选择低投入产出比的方案^[19, 51]。除了权衡扩张目标,还要考虑管理强度的权衡,因为严格限制、一般限制和可持续利用等情景下的扩张成本和效益可能不同^[59]。兼顾多种目标或指标确定自然保护地扩张方案,可以降低单一目标或指标的不确定性和隐藏偏差,得到更具可实施性的方案。在此基础上,考虑人类活动压力、生态系统服务需求等社会指标能够进一步提升方案的可行性。

3.2 景观阻力面构建

景观阻力面作为提取生态廊道、构建连通网络的关键要素,其内涵与构建方法因连通网络的保护目标而异。生物迁徙网络的景观阻力面表征景观对生物移动过程的阻碍程度。考虑到物种间习性和迁徙能力的差异,以及人类活动对迁徙过程的干扰,景观阻力面通常基于人类干扰强度和栖息地适宜性确定。土地利用类型常被用于表征景观对生物迁徙的阻碍程度,但忽略了其他干扰因素的影响^[60]。在此基础上考虑目标物种的习性(如迁徙能力、适宜海拔、食物喜好、跨越河流能力等),以及道路等特定景观的威胁,可以提高景观阻力面构建的科学性^[61]。栖息地适宜性常被用作景观阻力的负向指标,通过取倒数^[62]、负指数变换^[63]、负线性变换^[64]等方法确定阻力值。栖息地适宜性的评价方法包括经验指标体系法^[65]和模拟物种分布与物种类型、个体属性、植被、人类活动等因素关系的方法^[22]。对于鸟类等非平面移动的物种,海拔、建筑高度等景观三维特征更为重要^[66]。

结构稳定网络的景观阻力面表征景观对生态流的阻碍程度,通常不考虑特定物种的需求,而关注景观的自然度和人类干扰强度,以及生态风险和生态脆弱性,认为稳定性高的自然生态系统对生态流的阻碍程度低^[44]。土地利用类型常被用作景观阻力的赋值依

据,并基于夜间灯光强度^[67]、不透水表面面积比例^[68]、生态敏感性^[69]、生态风险^[70]、地表起伏度^[52]等指标修正。对于特定的脆弱生态系统,则可以采用石漠化指数^[43]、地表湿润度指数^[71]等区域性指标修正。

气候连通网络的景观阻力面表征景观对生物适应气候变化而发生的迁徙过程的阻碍程度,需要在生物迁徙网络景观阻力面的基础上,考虑气候变化影响下可能发生的栖息地适宜性变化和物种微进化。温度和湿度条件及其变化速率是气候连通性的重要影响因素,常被用于构建气候连通阻力面^[72-73]。人类干扰强度表征人类活动对生物迁徙的影响,可以与气候指标结合,构建景观综合阻力面^[74]。

3.3 生态廊道提取

生态廊道提取方法包括轨迹记录与空间建模两类。轨迹记录方法适用于生物迁徙廊道,如基于GPS定位数据获取鸟类和哺乳动物的迁徙轨迹^[75],使用声学飞行路径重建方法确定蝙蝠的移动路线^[76]。然而,由于数据记录不足且获取难度大,只有少数物种的小尺度生态廊道能够根据实测数据确定^[55]。在实测数据不足的情况下,基于个体的扩散模型可以结合特定物种的扩散特征,设定感知范围、归巢行为、记忆水平等运动规则,模拟个体运动轨迹,从而确定生态廊道^[77]。

空间建模方法适用于3类连通网络的生态廊道提取。最小累积阻力模型(最小成本路径方法)通过确定两个自然保护区间阻力成本最低的连通路径提取生态廊道的走向,但无法识别其空间范围^[67]。提取气候连通廊道时,该方法旨在使生物迁徙过程中对不适宜气候条件的暴露最低^[72],实现工具包括ArcGIS软件的“创建最小成本路径”工具^[78]和“Linkage Mapper”插件^[79]以及Graphab^[80]、UNICOR^[63]、LSCORRIDORS^[81]等软件。电路模型将自然保护区看作电路的节点,将非自然保护区的景观作为电路支路中的电阻,由此可以计算任意两个节点间的电流,以支路电流值表示通过阻力截面的生态流量,确定生态廊道的方向和范围,一般通过Circuitscape软件^[64]和“Linkage Mapper”插件实现。最小生成树是一种基于图论的方法,通过在网络中找到使所有节点以最少的边数和最低的成本完全连接的树结构提取生态廊道,在Graphscape软件中实现^[82]。蚁群算法通过模拟蚂蚁觅食过程进行路径查找,根据信息素的分布确定生态廊道的空间范围^[83]。空间连续小波变换基于小波系数检测空间突变点,可以确定生态廊道的宽度^[84]。上述方法对三种连通网络都适用,但提取生物迁徙廊道时要考虑物种迁徙能力等指标^[62],提取气候连通廊道时则要考虑气候变化适应性^[74]。

除上述通用方法外,结构稳定廊道还可采用形态学空间格局分析方法从景观结构的角度提取,通过Guidos软件实现^[85]。此外,最小累积阻力模型的改进方法也被用于结构稳定廊道的提取,如基于生态系统服务^[70]、基于能值理论^[86]的改进方法。

3.4 连通网络优化

自然保护区连通网络是由自然保护区和生态廊道组成的复杂网络,结合实测、遥感等数据和空间建模的方法构建,在实践中可以进一步优化,以形成更可行的规划方案。连通网络优化主要包括连通稳定性评价、要素优先性排序、关键区域与阈值识别、网络有效性验证4个方面。

3.4.1 连通稳定性评价 自然保护区连通网络以稳定地提高自然保护区的连通性为目标,需要以此为评价标准确定最优的方案。基于图论可以将自然保护区连通网络抽象为“节点一边”的网络结构,使用表征网络环路出现程度的闭合度指数,表征网络节点数与廊道数之比的线点率,表征网络中实际廊道数与理论最大连接数比率的网络连接度,以及表征输入与输出关系的成本比,开展网络连通性定量评价^[87]。此外,等效连通性指数作为

自然保护区数量和连通性的综合衡量指标,也可以评价网络的连通稳定性^[60]。而网络韧性评价则通过评估连通性、聚集性、传递性、多样性等指标评价网络的结构与功能韧性^[88]。作为衡量网络连通稳定性的指标,网络鲁棒性也常被用于评价网络在模拟的冲击情景下保持稳定连通的能力^[89]。基于网络连通稳定性的评价结果,可以实现方案比选与优化。

3.4.2 要素优先性排序 确定自然保护区与生态廊道的保护次序对自然保护区连通网络的成功实施具有重要意义^[90]。自然保护区的优先性排序指标包括生态重要性^[64](如物种移动轨迹的密度^[63])和网络结构特征(如连通性概率、节点的度、平均路径长度、中介中心性、特征向量中心性等^[91-92])。此外,节点去除法通过模拟节点被破坏对网络结构的影响识别对网络连通贡献大的节点进行优先保护^[75]。而生态廊道的优先性排序一般基于功能重要性评价和威胁评估实现。其中,功能重要性的评价指标包括电路模型计算的生态廊道电流值^[93]、重力模型评价的节点间相互作用强度^[94]等;威胁水平包括人类干扰强度^[95]和人与自然冲突程度^[79]等,反映了保护的紧迫性,是避免生态廊道功能丧失的关注重点。

3.4.3 关键区域与阈值识别 自然保护区连通网络中容易被破坏的,或经过保护可以大幅提升网络效能的关键区域需要优先进行保护和修复,提升连通网络的保护成效^[22]。基于电路模型可以识别电流密度大的夹点,以及修复后对网络连通性提升显著的障碍点^[52]。基于空间连续小波变换和核密度估计方法可以定义修复系数识别关键修复区^[84]。同时,自然保护区连通网络的构建涉及了多项评价指标,其阈值的选择对于连通网络构建结果有着重要影响。生态廊道的宽度决定了廊道边缘对保护物种和生态过程的影响强度^[96],需要通过主观设置和客观分析的方法合理确定阈值^[95]。在应用物种分布模型、基于个体的扩散模型时,阈值的选择会影响建模结果,需要通过敏感性测试确定最佳阈值^[97]。

3.4.4 网络有效性验证 有效性验证对于生态保护修复措施的实施与调整意义重大。自然保护区连通网络的有效性验证包括自然保护区、生态廊道和连通网络整体的有效性评价。自然保护区的有效性通过管理有效性和对社会—生态系统的多重影响衡量^[3]。生物迁徙廊道的有效性可以借助定位或轨迹记录数据验证^[98]。然而,与生态廊道相关的监测数据难以获取,导致基于实测数据的验证较难实现。同时,结构连通廊道与气候连通廊道的有效性难以直接验证,因此有研究通过利益相关者问卷调查方法,基于设计、实施、投入、产出、效益等指标体系评估生态廊道的管理有效性^[99]。也有研究从生态廊道的结构、连通、气候变化适应层面验证其有效性^[100]。最后,连通网络整体有效性的验证通常借助土地利用模拟的方法,将连通网络实施作为情景的约束条件来实现^[101]。

4 自然保护区连通网络研究展望

自然保护区连通网络的构建旨在通过空间连通实现长期有效的保护。当前研究侧重静态视角下的短期有效连通网络构建,强调直接的生态效益而忽视投入与社会效益。在此基础上,未来还需要进一步关注连通网络的动态视角、保障连通网络的长期有效、权衡连通网络的投入产出、提升连通网络的社会价值,增强自然保护区连通网络构建与优化的科学性和可实施性(图3)。

4.1 关注连通网络的动态视角

自然保护区连通网络构建与优化多以生态系统当前的结构和功能为基础^[49]。尽管有研究构建了多期的连通网络并进行对比和变化分析,其本质仍是静态视角连通网络的整合^[87]。社会—生态系统要素和结构并不稳定,处于不断的变化之中,且会受极端气候事

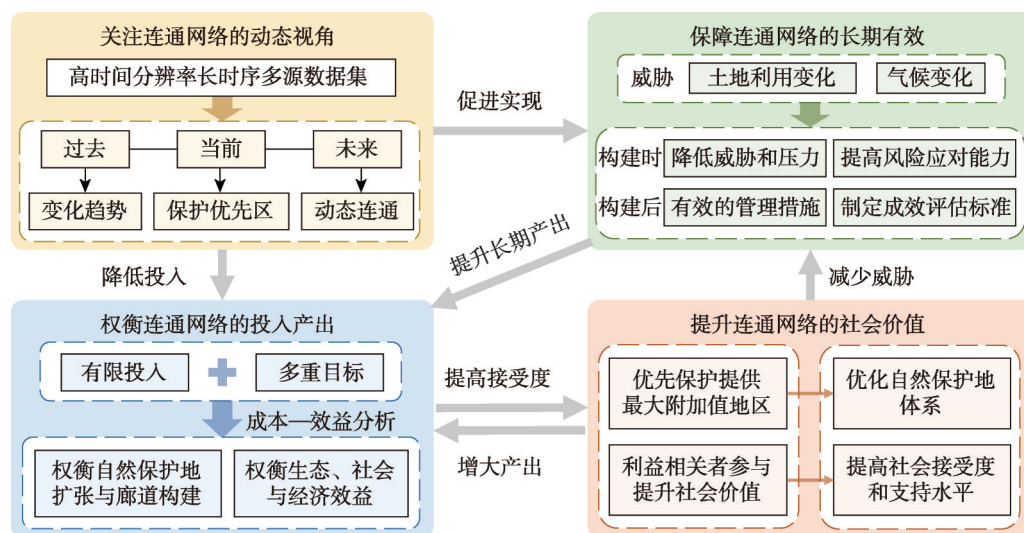


图3 自然保护区连通网络研究展望

Fig. 3 Research directions of protected area connectivity network

件、社会事件的影响发生突变^[102]。因此，静态视角下构建的连通网络难以在快速变化的气候条件和景观格局中表征动态连通性，无法有效地指导规划实践^[103]。未来的研究需要重点关注连通网络的动态视角，通过提高数据的时间分辨率，从地理学的时空视角准确刻画社会—生态要素的精细变化特征和空间差异，使用长时序的多源遥感与统计数据集，从过去、当前、未来三个时段对生态系统结构与功能进行系统评估与模拟，从动态连通视角构建具有动态适应性的自然保护区连通网络。具体来说，面向过去，分析生态系统结构与功能，以及主要威胁的长期变化趋势可以有效评价生态系统的退化或恢复态势；面向当前，综合多种指标评价生态系统现状特征有助于识别能稳定发挥生态功能的空间单元和具有高保护价值的区域；面向未来，需要评估气候变化对生态系统结构、过程和功能的影响，在合适的时间步长下模拟自然保护区保护价值和保护状态的变化，整合时空连通性评估方法设计动态连通网络^[104]。在此过程中，要注意连通性随时间变化的趋势、幅度、速率等特征，提高动态连通性模拟的准确性。

4.2 保障连通网络的长期有效

当前自然保护区连通性管理的研究集中在连通网络的构建与优化，而较少考虑可持续管理与长期有效性。然而，空间保护措施的有效实施需要事先明确可能存在的风险，进行及时的评估和调整。土地利用变化通过侵占生态空间和人类活动干扰降低自然保护区和重要生态廊道产生的惠益，甚至导致自然保护区和生态廊道范围内的生态系统退化^[22]。气候变化对自然保护区连通网络的威胁也是破坏其长期有效性的重要原因，表现为物种适宜性改变而迫使生物迁徙、自然保护区和生态廊道功能失效^[17, 105]。与土地利用变化相比，气候变化的机制更为复杂，并且会导致物种发生难以预测的微进化，因此威胁更大。为了应对土地利用变化和气候变化的影响，保障自然保护区连通网络的有效实施，需要在连通网络构建时与构建后采取行动^[106]。在连通网络构建时，为了使其持续发挥保护作用，可以结合土地利用变化模拟、气候变化预测等方法，模拟不同情景下生态系统结构与功能的时空变化，以及物种生活习性和生存范围的适应性变化，构建能够应对潜在威胁的连通网络^[107]。在连通网络构建后，一方面要采取有效的管理措施，通过立

法和执法等手段提高保护效率;另一方面要设计管理成效评估框架和指标,及时评估保护成效、预判风险,适时调整管理措施,维持连通网络的长期有效性。与自然保护地相比,生态廊道的管理更需要重视,因为生态廊道的建设、管理和评价尚无明确的标准。未来可以参考世界自然保护联盟绿色名录衡量自然保护地状况的标准,制定自然保护地连通网络成效指标,确定合理阈值,结合评估结果及时调整管理措施。

4.3 权衡连通网络的投入产出

生态保护修复的投入有限而目标宏大复杂,需要科学地分配投入以提高综合产出^[108]。当前自然保护地扩张的面积阈值和选择标准尚未统一,尽管最近的全球阶段性面积目标是30%,但也有研究认为应保护至少50%的面积^[109],强调了明确全球和区域范围内合理保护面积比例的重要性。同时,自然保护地有不同的保护目标和管理强度,需要进行合理的配置。未来需要综合总量评估与类别组合,设计合理的自然保护地体系。并且保护决策需要对不同保护目标,以及保护与发展目标进行权衡^[110]。具体来说,自然保护地扩张与关键生态廊道建设间存在权衡,因为关键廊道的建设成本较高但具有重要的生态保护成效^[97]。不同物种的保护也存在权衡,面向多物种保护目标构建的生态廊道对广生性物种的保护更有效,但不适合狭生性物种^[111]。针对单一物种设计的生态廊道成本效益比高,虽不利于实现多物种保护,但可能对濒危物种十分重要,因此要考虑保护的紧迫性、可行性以及不同物种的保护价值等,借助成本—效益分析方法权衡投入与产出。为了遴选最优的连通网络建设方案,需要设计多种备选方案,采用统一的评价标准借助生态系统生产总值核算、生态系统服务价值评估等方法量化连通网络的成本投入,以及生态、经济与社会效益,确保投入与产出可比。需要注意的是,景观破碎化的影响存在时间滞后效应,而保护措施的成效同样滞后于实施,因此量化投入产出时要在合理的时间尺度下开展。

4.4 提升连通网络的社会价值

尽管已有研究开始关注自然保护地的社会—生态复杂作用,但自然保护地连通网络的研究仍以生态本底与生态影响为关注重点。生态本底是设计连通网络的基础,但一味追求生态价值的提升而不考虑社会背景与社会价值会降低连通网络的支持力度与可持续性^[99]。例如,荷兰国家生态网络在设计时关注了文化和供给价值,使其更易被土地所有者接受^[112]。尽管如此,已有案例对连通网络社会价值的体现仍然不足,需要将利益相关者纳入决策过程。未来要借助问卷调查、社交媒体数据获取、参与式制图和参与式地理信息系统等方法,考虑区域差异,量化利益相关者的感知;综合考虑自然保护地连通性管理、可持续发展目标等战略需求,寻求生态保护价值与社会附加价值的综合最大化^[23]。在制定连通网络管理原则时应考虑生态适宜性、经济可行性和社会可接受性,综合考虑生态、社会、经济效益,提升保护战略的社会支持度,获取更多的社会关注和资金投入。在连通网络管理过程中,应通过设立法律法规承认本地居民的权利实现多元共治,在保护生态的同时正视社会公平,积极提升当地人类福祉^[113]。

参考文献(References)

- [1] Li G D, Fang C L, Li Y J, et al. Global impacts of future urban expansion on terrestrial vertebrate diversity. *Nature Communications*, 2022, 13: 1628. DOI: 10.1038/s41467-022-29324-2.
- [2] Trisos C H, Merow C, Pigot A L. The projected timing of abrupt ecological disruption from climate change. *Nature*, 2020, 580: 496-501.
- [3] Maxwell S L, Cazalis V, Dudley N, et al. Area-based conservation in the twenty-first century. *Nature*, 2020, 586: 217-227.
- [4] Gao Jixi, Xu Mengjia, Zou Changxin. Development achievement of natural conservation in 70 years of new China.

- Chinese Journal of Environmental Management, 2019, 11(4): 25-29. [高吉喜, 徐梦佳, 邹长新. 中国自然保护区70年发展历程与成效. 中国环境管理, 2019, 11(4): 25-29.]
- [5] Watson J E M, Dudley N, Segan D B, et al. The performance and potential of protected areas. *Nature*, 2014, 515: 67-73.
- [6] Cunningham C A, Crick H Q P, Morecroft M D, et al. Translating area-based conservation pledges into efficient biodiversity protection outcomes. *Communications Biology*, 2021, 4: 1043. DOI: 10.1038/s42003-021-02590-4.
- [7] Meng Z Q, Dong J W, Ellis E C, et al. Post-2020 biodiversity framework challenged by cropland expansion in protected areas. *Nature Sustainability*, 2023, 6: 758-768.
- [8] Xin Y S, Yang Z X, Du Y B, et al. Vulnerability of protected areas to future climate change, land use modification, and biological invasions in China. *Ecological Applications*, 2023, 34(1): e2831. DOI: 10.1002/eap.2831.
- [9] Coldrey K M, Turpie J K, Midgley G, et al. Assessing protected area vulnerability to climate change in a case study of South African national parks. *Conservation Biology*, 2022, 36(5): e13941. DOI: 10.1111/cobi.13941.
- [10] Zheng Yaomin, Zhang Haiying, Niu Zhenguo, et al. Protection efficacy of national wetland reserves in China. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(4): 207-230. [郑姚闽, 张海英, 牛振国, 等. 中国国家级湿地自然保护区保护成效初步评估. 科学通报, 2012, 57(4): 207-230.]
- [11] Gallardo B, Aldridge D C, González-Moreno P, et al. Protected areas offer refuge from invasive species spreading under climate change. *Global Change Biology*, 2017, 23(12): 5331-5343.
- [12] Wittemyer G, Elsen P, Bean W T, et al. Accelerated human population growth at protected area edges. *Science*, 2008, 321(5885): 123-126.
- [13] Radeloff V C, Stewart S I, Hawbaker T J, et al. Housing growth in and near United States protected areas limits their conservation value. *PNAS*, 2010, 107(2): 940-945.
- [14] Wanghe K Y, Guo X L, Hu F X, et al. Spatial coincidence between mining activities and protected areas of giant panda habitat: The geographic overlaps and implications for conservation. *Biological Conservation*, 2020, 247: 108600. DOI: 10.1016/j.biocon.2020.108600.
- [15] Volenec Z M, Dobson A P. Conservation value of small reserves. *Conservation Biology*, 2020, 34(1): 66-79.
- [16] Ward M, Saura S, Williams B, et al. Just ten percent of the global terrestrial protected area network is structurally connected via intact land. *Nature Communications*, 2020, 11: 4563. DOI: 10.1038/s41467-020-18457-x.
- [17] Zhang Mingwei, Lyu Hongda, Gao Shixin, et al. Evaluation of wetland conservation effectiveness based on landscape pattern in Zhalong National Nature Reserve. *Natural Protected Areas*, 2023, 3(3): 67-76. [张明微, 吕鸿达, 高世鑫, 等. 基于景观格局的扎龙国家级自然保护区湿地保护成效评估. 自然保护区, 2023, 3(3): 67-76.]
- [18] Sreekar R, Zeng Y W, Zheng Q M, et al. Nature-based climate solutions for expanding the global protected area network. *Biological Conservation*, 2022, 269: 109529. DOI: 10.1016/j.biocon.2022.109529.
- [19] Zeng Y W, Koh L P, Wilcove D S. Gains in biodiversity conservation and ecosystem services from the expansion of the planet's protected areas. *Science Advances*, 2022, 8: eabl9885. DOI: 10.1126/sciadv.abl9885.
- [20] Yu Fuqin, Zhang Baiping. Spatial pattern of natural protected areas in Qinling-Daba Mountains. *Natural Protected Areas*, 2023, 3(2): 34-43. [余付勤, 张百平. 秦巴山地自然保护区空间分布特征研究. 自然保护区, 2023, 3(2): 34-43.]
- [21] Zhao Zhicong, Wang Pei. Significance and key issues of protected area connectivity in China. *Landscape Architecture*, 2022, 29(7): 12-17. [赵智聪, 王沛. 中国自然保护区连通性的重要意义与关键议题. 风景园林, 2022, 29(7): 12-17.]
- [22] Brennan A, Naidoo R, Greenstreet L, et al. Functional connectivity of the world's protected areas. *Science*, 2022, 376(6597): 1101-1104.
- [23] Yoon H S, Vijay V, Armsworth P R. Accounting for spatial heterogeneity in the added conservation value of land protection when prioritizing protected areas. *Conservation Biology*, 2022, 36(5): e13960. DOI: 10.1111/cobi.13960.
- [24] Wang J X, Rienow A, David M, et al. Green infrastructure connectivity analysis across spatiotemporal scales: A transferable approach in the Ruhr Metropolitan Area, Germany. *Science of the Total Environment*, 2022, 813: 152463. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152463.
- [25] Wu J C, Delang C O, Li Y J, et al. 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. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107826.
- [26] Peng Jian, Li Huilei, Liu Yanxu, et al. Identification and optimization of ecological security pattern in Xiongan New Area. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 701-710. [彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 等. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. 地理学报, 2018, 73(4): 701-710.]
- [27] Jongman R H G, Külvik M, Kristiansen I. European ecological networks and greenways. *Landscape and Urban*

- Planning, 2004, 68(2-3): 305-319.
- [28] Zhang J, Feng X, Shi W, et al. Health promoting green infrastructure associated with green space visitation. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 64: 127237. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127237.
- [29] Kukkonen M O, Tammi I. Systematic reassessment of Laos' protected area network. *Biological Conservation*, 2019, 229: 142-151.
- [30] Saura S, Bertzky B, Bastin L, et al. Global trends in protected area connectivity from 2010 to 2018. *Biological Conservation*, 2019, 238: 108183. DOI: 10.1016/j.biocon.2019.07.028.
- [31] Thornton D, Branch L, Murray D. Distribution and connectivity of protected areas in the Americas facilitates transboundary conservation. *Ecological Applications*, 2020, 30(2): e02027. DOI: 10.1002/eap.2027.
- [32] Zhao Y F, Liu S L, Dong Y H, et al. Effect of fencing on regional ecological networks in the northern Tibetan Plateau. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1051881. DOI: 10.3389/fpls.2023.1051881.
- [33] Wei Jiaxing, Ni Yuchun, Shou Tianyuan, et al. Construction of ecological security pattern based on land-water coupling ecosystem services: A case study of Yangtze River Delta Ecological Greening Development Demonstration Area. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(13): 5305-5319. [魏家星, 倪雨淳, 寿田园, 等. 基于水—陆耦合生态系统服务的生态安全格局构建研究: 以长三角生态绿色一体化发展示范区为例. *生态学报*, 2023, 43(13): 5305-5319.]
- [34] Zhao Haixia, Gu Binjie, Wang Junqi, et al. Characteristics of green infrastructure supply-demand adaptation relationship and its pattern in Nanjing city. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(2): 463-475. [赵海霞, 顾斌杰, 王俊淇, 等. 绿色基础设施供需适配关系演进特征及其规律: 以南京市为例. *生态学报*, 2024, 44(2): 463-475.]
- [35] Nuñez T A, Lawler J J, McRae B H, et al. Connectivity planning to address climate change. *Conservation Biology*, 2013, 27(2): 407-416.
- [36] Dudley N. Guidelines for applying protected area management categories including IUCN WCPA best practice guidance on recognising protected areas and assigning management categories and governance types. Switzerland: IUCN, 2008: 1-6. DOI: 10.2305/IUCN.CH.2008.PAPS.2.en.
- [37] Hilty J, Worboys G L, Keeley A, et al. Guidelines for conserving connectivity through ecological networks and corridors. Switzerland: IUCN, 2020: 16-18. DOI: 10.2305/IUCN.CH.2020.PAG.30.en.
- [38] Ouyang Zhiyun, Du Ao, Xu Weihua. Research on China's protected area system classification. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(20): 7207-7215. [欧阳志云, 杜傲, 徐卫华. 中国自然保护区体系分类研究. *生态学报*, 2020, 40(20): 7207-7215.]
- [39] van den Bosch M, Beyer Jr D, Erb J, et al. Identifying potential gray wolf habitat and connectivity in the eastern USA. *Biological Conservation*, 2022, 273: 109708. DOI: 10.1016/j.biocon.2022.109708.
- [40] Mondal I, Habib B, Talukdar G, et al. Triage of means: Options for conserving tiger corridors beyond designated protected lands in India. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2016, 4: 133. DOI: 10.3389/fevo.2016.00133.
- [41] Joshi P K, Yadav K, Sinha V S P. Assessing impact of forest landscape dynamics on migratory corridors: A case study of two protected areas in Himalayan foothills. *Biodiversity and Conservation*, 2011, 20: 3393-3411.
- [42] Dickson B G, Albano C M, McRae B H, et al. Informing strategic efforts to expand and connect protected areas using a model of ecological flow, with application to the western United States. *Conservation Letters*, 2017, 10(5): 564-571.
- [43] Gao J B, Du F J, Zuo L Y, et al. Integrating ecosystem services and rocky desertification into identification of karst ecological security pattern. *Landscape Ecology*, 2021, 36: 2113-2133.
- [44] Barnett K, Belote R T. Modeling an aspirational connected network of protected areas across North America. *Ecological Applications*, 2021, 31(6): e02387. DOI: 10.1002/eap.2387.
- [45] Lawler J J, Rinnan D S, Michalak J L, et al. Planning for climate change through additions to a national protected area network: Implications for cost and configuration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2020, 375(1794): 20190117. DOI: 10.1098/rstb.2019.0117.
- [46] Fei S L, Desprez J M, Potter K M, et al. Divergence of species responses to climate change. *Science Advances*, 2017, 3: e160305. DOI: 10.1126/sciadv.1603055.
- [47] Auffret A G, Svenning J C. Climate warming has compounded plant responses to habitat conversion in Northern Europe. *Nature Communications*, 2022, 13: 7818. DOI: 10.1038/s41467-022-35516-7.
- [48] Carroll C, Parks S A, Dobrowski S Z, et al. Climatic, topographic, and anthropogenic factors determine connectivity between current and future climate analogs in North America. *Global Change Biology*, 2018, 24(11): 5318-5331.
- [49] Liang G F, Niu H B, Li Y. A multi-species approach for protected areas ecological network construction based on landscape connectivity. *Global Ecology and Conservation*, 2023, 46: e02569. DOI: 10.1016/j.gecco.2023.e02569.

- [50] Mi CR, Ma L, Yang M Y, et al. Global protected areas as refuges for amphibians and reptiles under climate change. *Nature Communications*, 2023, 14: 1389. DOI: 10.1038/s41467-023-36987-y.
- [51] Müller A, Schneider U A, Jantke K. Evaluating and expanding the European Union's protected-area network toward potential post-2020 coverage targets. *Conservation Biology*, 2020, 34(3): 654-665.
- [52] Yu H R, Gu X C, Liu G H, et al. Construction of regional ecological security patterns based on multi-criteria decision making and circuit theory. *Remote Sensing*, 2022, 14(3): 527. DOI: 10.3390/rs14030527.
- [53] Zhang Y B, Wang Y Z, Phillips N, et al. Integrated maps of biodiversity in the Qinling Mountains of China for expanding protected areas. *Biological Conservation*, 2017, 210: 64-71.
- [54] Zhao Xiaoqing, Shi Xiaoqian, Li Yuhao, et al. Spatio-temporal pattern and functional zoning of ecosystem services in the karst mountainous areas of Southeastern Yunnan. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(3): 736-756. [赵筱青, 石小倩, 李驭豪, 等. 滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区. *地理学报*, 2022, 77(3): 736-756.]
- [55] Cao Y, Yang R, Carver S. Linking wilderness mapping and connectivity modelling: A methodological framework for wildland network planning. *Biological Conservation*, 2020, 251: 108679. DOI: 10.1016/j.biocon.2020.108679.
- [56] Hou Peng, Yang Min, Zhai Jun, et al. Discussion about natural reserve and construction of national ecological security pattern. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 420-428. [侯鹏, 杨旻, 翟俊, 等. 论自然保护地与国家生态安全格局构建. *地理研究*, 2017, 36(3): 420-428.]
- [57] Peng J, Liu Y X, Wu J S, et al. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: A case study in Shenzhen city, China. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 143: 56-68.
- [58] Carroll C, Ray J C. Maximizing the effectiveness of national commitments to protected area expansion for conserving biodiversity and ecosystem carbon under climate change. *Global Change Biology*, 2021, 27(15): 3395-3414.
- [59] de Lima D O, Crouzeilles R, Vieira M V. Integrating strict protection and sustainable use areas to preserve the Brazilian Pampa biome through conservation planning. *Land Use Policy*, 2020, 99: 104836. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104836.
- [60] Sahraoui Y, Leski C D G, Benot M, et al. Integrating ecological networks modelling in a participatory approach for assessing impacts of planning scenarios on landscape connectivity. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 209: 104039. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2021.104039.
- [61] Zhang Minghai, Jin Yongchao, Jiang Guangshun. Spatial planning of ecological corridors among the protected areas of Amur Tiger in China. *Natural Protected Areas*, 2021, 1(3): 1-8. [张明海, 靳勇超, 姜广顺. 中国东北虎自然保护地生态廊道空间规划. *自然保护地*, 2021, 1(3): 1-8.]
- [62] Luo Y H, Wu J S, Wang X Y, et al. Understanding ecological groups under landscape fragmentation based on network theory. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 210: 104066. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2021.104066.
- [63] Kaszta Ž, Cushman S A, MacDonald D W. Prioritizing habitat core areas and corridors for a large carnivore across its range. *Animal Conservation*, 2020, 23(5): 607-616.
- [64] Diniz M F, Dallmeier F, Gregory T, et al. Balancing multi-species connectivity and socio-economic factors to connect protected areas in the Paraguayan Atlantic Forest. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 222: 104400. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2022.104400.
- [65] Muhammed K, Anandhi A, Chen G. Comparing methods for estimating habitat suitability. *Land*, 2022, 11(10): 1754. DOI: 10.3390/land11101754.
- [66] Kong F H, Wang D, Yin H W, et al. Coupling urban 3-D information and circuit theory to advance the development of urban ecological networks. *Conservation Biology*, 2021, 35(4): 1140-1150.
- [67] Jiang H, Peng J, Dong J Q, et al. Linking ecological background and demand to identify ecological security patterns across the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in China. *Landscape Ecology*, 2021, 36: 2135-2150.
- [68] Peng J, Pan Y J, Liu Y X, et al. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. *Habitat International*, 2018, 71: 110-124.
- [69] Xue Qiang, Lu Lu, Niu Ren, et al. Identification and restoration of key areas of ecological security pattern based on sensitivity to geological disasters: A case study of Jinan city. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(22): 9050-9063. [薛强, 路路, 牛韧, 等. 基于地质灾害敏感性的生态安全格局关键区识别与修复: 以济南市为例. *生态学报*, 2021, 41(22): 9050-9063.]
- [70] Li S C, Zhao Y L, Xiao W, et al. Optimizing ecological security pattern in the coal resource-based city: A case study in Shouzhou city, China. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108026. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108026.
- [71] Peng Jian, Jia Jinglei, Hu Yina, et al. Construction of ecological security pattern in the agro-pastoral ecotone based on surface humid index: A case study of Hangjin Banner, Inner Mongolia Autonomous Region, China. *Chinese Journal of*

- Applied Ecology, 2018, 29(6): 1990-1998. [彭建, 贾靖雷, 胡熠娜, 等. 基于地表湿润指数的农牧交错带地区生态安全格局构建: 以内蒙古自治区杭锦旗为例. 应用生态学报, 2018, 29(6): 1990-1998.]
- [72] Choe H, Thorne J H, Hollander A. From disappearing climates to climate hubs, the five classes of climate risk for wildlife refuges. *Landscape Ecology*, 2020, 35: 2163-2177.
- [73] Jin Qihao, Wang Qianmin, Li Yi, et al. Evaluation of landscape connectivity in China's coastal terrestrial nature reserves based on an improved minimum cumulative resistance model. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2830-2840. [金奇豪, 汪倩旻, 李艺, 等. 中国沿海陆地自然保护区景观连接度评价. 地理学报, 2021, 76(11): 2830-2840.]
- [74] Choe H, Keeley A T, Cameron D R, et al. The influence of model frameworks in spatial planning of regional climate-adaptive connectivity for conservation planning. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 214: 104169. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2021.104169.
- [75] Xu Y J, Si Y L, Takekawa J, et al. A network approach to prioritize conservation efforts for migratory birds. *Conservation Biology*, 2020, 34(2): 416-426.
- [76] Claireau F, Bas Y, Puechmaille S J, et al. Bat overpasses: An insufficient solution to restore habitat connectivity across roads. *Journal of Applied Ecology*, 2019, 56(3): 573-584.
- [77] Diniz M F, Cushman S A, Machado R B, et al. Landscape connectivity modeling from the perspective of animal dispersal. *Landscape Ecology*, 2020, 35: 41-58.
- [78] Guo Y Z, Liu Y Z. Connecting regional landscapes by ecological networks in the Greater Pearl River Delta. *Landscape and Ecological Engineering*, 2017, 13: 265-278.
- [79] Ghoddousi A, Bleyhl B, Sichau C, et al. Mapping connectivity and conflict risk to identify safe corridors for the Persian leopard. *Landscape Ecology*, 2020, 35: 1809-1825.
- [80] Foltête J C, Clauzel C, Vuidel G. A software tool dedicated to the modelling of landscape networks. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 38: 316-327.
- [81] Ribeiro J W, dos Santos J S, Dodonov P, et al. LandScape Corridors (Isccorridors): A new software package for modelling ecological corridors based on landscape patterns and species requirements. *Methods in Ecology and Evolution*, 2017, 8(11): 1425-1432.
- [82] Pomianowski W, Solon J. Modelling patch mosaic connectivity and ecological corridors with GraphScape. *Environmental Modelling & Software*, 2020, 134: 104757. DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104757.
- [83] Peng J, Zhao S, Dong J, et al. Applying ant colony algorithm to identify ecological security patterns in megacities. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 117: 214-222.
- [84] Dong J Q, Peng J, Liu Y X, et al. Integrating spatial continuous wavelet transform and kernel density estimation to identify ecological corridors in megacities. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 199: 103815. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2020.103815.
- [85] de Oliveira S N, de Carvalho Júnior O A, Gomes R A T, et al. Deforestation analysis in protected areas and scenario simulation for structural corridors in the agricultural frontier of Western Bahia, Brazil. *Land Use Policy*, 2017, 61: 40-52.
- [86] Yu Q, Yue D P, Wang Y H, et al. Optimization of ecological node layout and stability analysis of ecological network in desert oasis: A typical case study of ecological fragile zone located at Deng Kou County (Inner Mongolia). *Ecological Indicators*, 2018, 84: 304-318.
- [87] Huang X X, Wang H J, Shan L Y, et al. Constructing and optimizing urban ecological network in the context of rapid urbanization for improving landscape connectivity. *Ecological Indicators*, 2021, 132: 108319. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108319.
- [88] Wang T, Li H, Huang Y. The complex ecological network's resilience of the Wuhan metropolitan area. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108101. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108101.
- [89] Luo Y H, Wu J S, Wang X Y, et al. Can policy maintain habitat connectivity under landscape fragmentation? A case study of Shenzhen, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 715: 136829. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136829.
- [90] Keeley A T H, Basson G, Cameron D R, et al. Making habitat connectivity a reality. *Conservation Biology*, 2018, 32(6): 1221-1232.
- [91] Li S C, Xiao W, Zhao Y L, et al. Incorporating ecological risk index in the multi-process MCRE model to optimize the ecological security pattern in a semi-arid area with intensive coal mining: A case study in northern China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 247: 119143. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119143.
- [92] Qiu S, Yu Q, Niu T, et al. Restoration and renewal of ecological spatial network in mining cities for the purpose of enhancing carbon Sinks: The case of Xuzhou, China. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109313. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109313.

- [93] Wang Y J, Qu Z Y, Zhong Q C, et al. Delimitation of ecological corridors in a highly urbanizing region based on circuit theory and MSPA. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109258. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109258.
- [94] Yang J, Zeng C, Cheng Y J. Spatial influence of ecological networks on land use intensity. *Science of the Total Environment*, 2020, 717: 137151. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137151.
- [95] Liang C, Zeng J, Zhang R C, et al. Connecting urban area with rural hinterland: A stepwise ecological security network construction approach in the urban-rural fringe. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108794. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108794.
- [96] van Schalkwyk J, Pryke J S, Samways M J, et al. Corridor width determines strength of edge influence on arthropods in conservation corridors. *Landscape Ecology*, 2020, 35: 1175-1185.
- [97] Keeley A T H, Ackerly D D, Cameron D R, et al. New concepts, models, and assessments of climate-wise connectivity. *Environmental Research Letters*, 2018, 13: 073002. DOI: 10.1088/1748-9326/aac85.
- [98] Laliberté J, St-Laurent M. Validation of functional connectivity modeling: The Achilles' heel of landscape connectivity mapping. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 202: 103878. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2020.103878.
- [99] Cristina Carrillo Hernández A, Ortega-Argueta A, María Gama Campillo L, et al. Effectiveness of management of the Mesoamerican Biological Corridor in Mexico. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 226: 104504. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2022.104504.
- [100] Beita C M, Murillo L F S, Alvarado L D A. Ecological corridors in Costa Rica: An evaluation applying landscape structure, fragmentation-connectivity process, and climate adaptation. *Conservation Science and Practice*, 2021, 3(8): e475. DOI: 10.1111/csp2.475.
- [101] Tarabon S, Calvet C, Delbar V, et al. Integrating a landscape connectivity approach into mitigation hierarchy planning by anticipating urban dynamics. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 202: 103871. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2020.103871.
- [102] Qiang Y, Huang Q X, Xu J W. Observing community resilience from space: Using nighttime lights to model economic disturbance and recovery pattern in natural disaster. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 57: 102115. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102115.
- [103] Martensen A C, Saura S, Fortin M. Spatio-temporal connectivity: Assessing the amount of reachable habitat in dynamic landscapes. *Methods in Ecology and Evolution*, 2017, 8(10): 1253-1264.
- [104] Goicolea T, Mateo-Sánchez M C. Static vs dynamic connectivity: How landscape changes affect connectivity predictions in the Iberian Peninsula. *Landscape Ecology*, 2022, 37: 1855-1870.
- [105] Asamoah E F, Beaumont L J, Maina J M. Climate and land-use changes reduce the benefits of terrestrial protected areas. *Nature Climate Change*, 2021, 11: 1105-1110.
- [106] Dilts T E, Weisberg P J, Leitner P, et al. Multiscale connectivity and graph theory highlight critical areas for conservation under climate change. *Ecological Applications*, 2016, 26(4): 1223-1237.
- [107] Lu Z, Wang L J, Wang L X, et al. Consideration of climate change impacts will improve the efficiency of protected areas on the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2022, 8(1): 2117089. DOI: 10.1080/20964129.2022.2117089.
- [108] Liberati M R, Rittenhouse C D, Vokoun J C. Subdivision for conservation? *Landscape and Urban Planning*, 2020, 195: 103723. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2019.103723.
- [109] Dinerstein E, Olson D, Joshi A, et al. An ecoregion-based approach to protecting half the terrestrial realm. *BioScience*, 2017, 67(6): 534-545.
- [110] Adams V M, Iacona G D, Possingham H P. Weighing the benefits of expanding protected areas versus managing existing ones. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 404-411.
- [111] Gracanin A, Mikac K M. Evaluating modelled wildlife corridors for the movement of multiple arboreal species in a fragmented landscape. *Landscape Ecology*, 2023, 38: 1321-1337.
- [112] Van Der Windt H J, Swart J A A. Ecological corridors, connecting science and politics: The case of the Green River in the Netherlands. *Journal of Applied Ecology*, 2008, 45(1): 124-132.
- [113] Huang Baorong, Ma Yonghuan, Huang Kai, et al. Strategic approach on promoting reform of China's natural protected areas system with national parks as backbone. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(12): 1342-1351. [黄宝荣, 马永欢, 黄凯, 等. 推动以国家公园为主体的自然保护地体系改革的思考. 中国科学院院刊, 2018, 33(12): 1342-1351.]

Methods and prospects for the construction and optimization of protected area connectivity network

JIANG Hong, PENG Jian

(Technology Innovation Center for Integrated Ecosystem Restoration and Sustainable Utilization,
Ministry of Natural Resources, College of Urban and Environmental Sciences,
Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Global protected areas have been widely recognized for their conservation effectiveness, but are still facing problems such as insufficient coverage, ecosystem representation and species protected progress. At the same time, most of the protected areas are small, poorly connected and threatened by climate change and human activities. This highlights the urgent need to systematically improve the stability and conservation effectiveness of protected areas through the expansion and connectivity management of protected areas. Although some studies have tried to realize the connectivity of protected areas through ecological corridors, a unified concept has not been proposed, and a general consensus of the construction and optimization framework is lacking. Through a systematic review of relevant studies, the definition and classification system of protected area connectivity network, as well as the construction and optimization framework are put forward. According to the conservation objectives, protected area connectivity network can be divided into three categories, namely biological migration network, structural stability network and climate connectivity network. Different methods can be used to construct and optimize protected area connectivity network according to the framework of "expansion and optimization of protected areas - construction of landscape resistance surface-extraction of ecological corridors-connectivity network optimization". Current research focuses on constructing short-term effective network from a static perspective, emphasizing direct ecological benefits while ignoring conservation input and social value. In future research, dynamic connectivity network should be constructed from a dynamic perspective based on long time series data. The long-term effectiveness of the connectivity network should be safeguarded against the future threats of land use change and climate change. The optimal scheme of connectivity network construction and optimization should be determined based on cost-benefit analysis, considering the trade-off of different conservation objectives and social development. Finally, the social added value of the connectivity network should be enhanced to gain more support.

Keywords: protected area connectivity network; ecological corridor; biological migration; structural stability; climate connectivity