

DOI: 10.5846/stxb202207262138

卢洁, 焦胜, 胡加琦, 蔡勇, 欧林之. 基于多尺度协同的长沙市生态网络构建与层级优化. 生态学报, 2023, 43(15): 6332-6344.

Lu J, Jiao S, Hu J Q, Cai Y, Ou L Z. Construction and hierarchical optimization of Changsha ecological network based on multi-scale collaboration. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6332-6344.

基于多尺度协同的长沙市生态网络构建与层级优化

卢洁¹, 焦胜^{1,2,*}, 胡加琦¹, 蔡勇¹, 欧林之¹

¹ 湖南大学 建筑与规划学院, 长沙 410082

² 丘陵地区城乡人居环境科学湖南省重点实验室, 长沙 410082

摘要: 城市化背景下人类与自然环境的矛盾呈现出多尺度、层级化特征, 而传统生态网络的构建方式较少考虑不同尺度下生态要素的关系, 无法从区域落实到中心城区, 难以形成系统性的解决方案。研究在综合梳理各尺度生态网络构建方法的基础上, 以长沙市为例, 基于形态学空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)、景观连通性原理和生态斑块重要性评价识别生态源地, 并通过多层次生态阻力面的确定, 综合运用最小费用路径(Least-cost path method, LCP)、电路理论、层级传导理论、尺度嵌套等方法对市域、都市区、中心城区的生态网络进行了协同构建和层级优化, 最后基于不同尺度生态网络的特点应用并落实到多层次的国土空间规划体系中。研究结果表明: (1) 长沙市域生态网络和都市区生态网络具有较好的层级嵌套特征; 共识别两尺度生态叠合源地 14 个、生态叠合廊道 15 条, 主要通过中心城区内的湘江、浏阳河和捞刀河部分河段与外围生态绿圈相衔接, 形成“外环内楔”的空间格局。(2) 确定市域重要廊道、市域潜在廊道、生态叠合廊道、都市区重要廊道、都市区潜在廊道的核心保护面积共 501.14 km², 并提取位于生态廊道核心保护范围内的生态夹点和生态障碍点, 以进一步落实生态保护修复策略。(3) 得到具有重要生态连通功能的中心城区生态绿道长度 441.2 km, 生态修复单元 56 个, 并结合生态阻力值划分为 5 级进行针对性修复。(4) 基于不同尺度生态网络的衔接、嵌套, 最终构建“市域总体生态安全格局—都市区城市生态空间发展格局—以城市绿道为基础的中心城区生态修复单元”, 并与不同层级的国土空间规划体系相对应。研究结果将为以大城市为中心的跨尺度生态系统修复和生态安全格局构建提供科学参考。

关键词: 生态网络构建; 多尺度协同; 尺度嵌套; 景观连通性; 层级优化; 长沙市

Construction and hierarchical optimization of Changsha ecological network based on multi-scale collaboration

LU Jie¹, JIAO Sheng^{1,2,*}, HU Jiaqi¹, CAI Yong¹, OU Linzhi¹

¹ School of Architecture and Planning, Hunan University, Changsha 410082, China

² Hunan Key Laboratory of Sciences of Urban and Rural Human Settlements in Hilly Areas, Changsha 410082, China

Abstract: In the context of urbanization, contradictions between human beings and the natural environment have shown the characteristics of multi-scale and hierarchy. While the traditional construction of ecological network paid little attention on the relationship between ecological elements at different scales which could not be implemented from the region to the central city. So it was difficult to form a systematic solution to these problems. Based on a comprehensive review of ecological network construction methods at different scales, taking Changsha City as an example, we identified ecological sources through Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA), landscape connectivity theory and the evaluation of the importance of ecological patches. After determining the multi-level ecological resistance surfaces, we used the least cost path method (LCP), circuit theory, hierarchical transmission theory, scale nesting and other methods to study the coordinated

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1101304); 湖南省重点研发计划项目(2020SK2095, 2019SK2101)

收稿日期: 2022-07-26; **采用日期:** 2022-10-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiaosheng2008@163.com

construction and hierarchical optimization of ecological networks in the urban area, metropolitan area and central urban area. Finally, based on the characteristics of ecological networks at different scales, the research results were applied to the multi-level land spatial planning system. The results showed that: (1) the urban ecological network and metropolitan ecological network had good hierarchical nesting characteristics. The number of ecological overlapping sources and corridors on the two scales were 14 and 15, respectively, which were mainly connected with the peripheral ecological green circles through the Xiangjiang River, Liuyang River and Laodao River in the central urban area, forming the spatial pattern of "outer ring and inner wedge". (2) The core protection area of important corridors in the urban area, potential corridors in the urban area, ecological overlapping corridors, important corridors in the metropolitan area, and potential corridors in the metropolitan area was 501.14 km², from which we extracted ecological pinch points and ecological barriers for further ecological protection and restoration. (3) The length of ecological greenway in the central urban area with important ecological connectivity functions was 441.2 km. And the number of ecological restoration units was 56, which was divided into 5 levels combined with the ecological resistance value for the targeted restoration. (4) Based on the connection and nesting of ecological sources, corridors and node patches at different scales, we finally constructed the overall ecological security pattern of the urban area-the urban ecological spatial development pattern of the metropolitan area-the ecological restoration unit of the central urban area based on the urban greenways, which corresponded to the land spatial planning system at different levels. The research results could provide a scientific reference for the cross-scale ecosystem restoration and ecological security pattern construction centered on large cities.

Key Words: ecological network construction; multi-scale collaboration; scale nesting; landscape connectivity; level optimization; Changsha City

城市化是一个在多尺度发挥作用的过程^[1],由于不同尺度层面人类系统和自然系统占据的空间主体具有内在差异性,人类系统构建的活动网络与生态系统发生的关系、作用随空间尺度的变化也呈现出明显的规律性特征^[2]。近年来,随着城市与自然矛盾的日益激烈,国家对“生态安全格局构建优化”的重视度不断提高^[3],并进一步强化了对生物多样性的保护措施^[4]。在新的国土空间规划体系下,基于城市化扩散特点和不同空间尺度生态分异规律,构建以层级传导和自然资源整体保护为特征的多尺度、系统性生态网络,对于城市化背景下区域内部复杂生态矛盾缓解以及自然生态系统质量的整体改善具有重要作用。

生态网络的思想起源于 19 世纪的欧美国家^[5],并不断运用于生物多样性保护^[6]、绿道规划^[7-8]、生态系统修复^[9]等诸多领域。20 世纪 90 年代以后,我国开始进行生态网络的研究^[10],也取得了丰硕成果。总结既有研究可以发现,国内外生态网络构建方法主要包括:景观连通性分析^[11-12]、MSPA 分析^[13-14]、网络结构分析^[15-17]、MCR 模型^[18-20]、电路理论^[21-22]等,基本上形成了“源地选取—阻力面确定—廊道识别—节点优化—网络构建”这一研究范式,并运用到了省域^[23]、城市群^[24]、市县域^[25-26]、中心城区^[27]等不同空间尺度,为整体生态安全格局构建和自然生态系统的完整性修复奠定了基础。而随着人类社会系统对自然生态环境影响的不断深入,生态网络研究的主要趋势也逐渐从“针对某一具体物种的生态迁徙廊道构建”转向“自然生境的连通和生物多样性的整体保护”^[28],部分学者开始从多尺度的视角出发进行生态网络研究,并提出了“尺度嵌套”、“叠合廊道”等概念^[29-31],为系统性生态网络的构建提供了新思路。但经过进一步分析可以发现,现有关多尺度的研究多集中在都市区、中心城区两个尺度的自然生态要素上,较少考虑人类要素特别是城市空间发展与自然生态网络的关系,忽略了人类系统与自然系统在景观构成、作用机制等方面的内在差异性和二者之间的动态变化性,同时对各尺度生态网络间的协同构建和衔接缺少深入探究,难以系统解决由人类社会扩张而造成的自然生态环境斑块化、破碎化问题,因此在尺度选取、构建方法、具体落实等方面都亟待优化。本文选择人类活动对自然环境干扰较频繁的大城市及其周边地区作为研究对象,针对市域、都市区和中心城区尺度上的生态问题和景观基底的差异性来进行多尺度协同的生态网络构建,并通过进一步的尺度嵌套

和调整优化,实现生态网络在空间层面的具体落实,从而为城市化背景下区域内部复杂生态环境问题的解决提供有效路径和方法。

综上所述,本文结合现有研究基础,以长沙市为例,基于 LCP、电路理论、层级传导理论等方法,提出多尺度协同的城市生态网络构建与层级优化方案;在大尺度上构建区域整体生态安全格局;中观尺度上注重协调自然—城市发展矛盾以及不同尺度生态网络层级之间的关系,明确城市生态空间发展格局;小尺度上衔接、优化城市绿地生态网络系统,确定生态修复单元。并通过生态源地—廊道—斑块—空间基底的有机耦合,来实现“市域—都市区—中心城区”多尺度生态网络的整体协同优化。研究结果可为市域—中心城区系统性的城市生态网络构建提供科学参考。

1 研究区概况

长沙市位于 $111^{\circ}53'—114^{\circ}15'E$, $27^{\circ}51'—28^{\circ}41'N$ 之间,是湖南省省会、长株潭城市群中心城市。地处湖南东部偏北,东西两侧山地环绕,中部趋于平缓,生物多样性较为丰富。近年来,随着城市的扩张,原来的河谷平原城市已发展成为具有复杂地形地貌特征的丘陵城市,城市尺度的变化导致长沙市区生态系统内部的矛盾更加复杂,中心城区人口密度增大、环境污染加剧,城市近郊生境破碎化严重,远郊地带随着交通、聚落的发展生态系统完整性和稳定性下降。基于此,长沙市政府出台了相关生态保护政策,而构建多尺度协同的生态网络将对其整体生态环境改善具有重要作用。本文根据《长沙市国土空间总体规划(2021—2035 年)》,将研究区划分为 3 个尺度(图 1),其中市域尺度总面积为 11816 km^2 ,包括芙蓉区、天心区、开福区、雨花区、岳麓区、望城区、长沙县、宁乡市和浏阳市(6 区 3 县(市));都市区面积 3903 km^2 ,位于市域中部,含芙蓉区、天心区、岳麓区、开福区、雨花区、望城区和长沙县地区(6 区 1 县);中心城区面积约为 1143 km^2 ,主要为都市区中部的城市建设用地集中区。

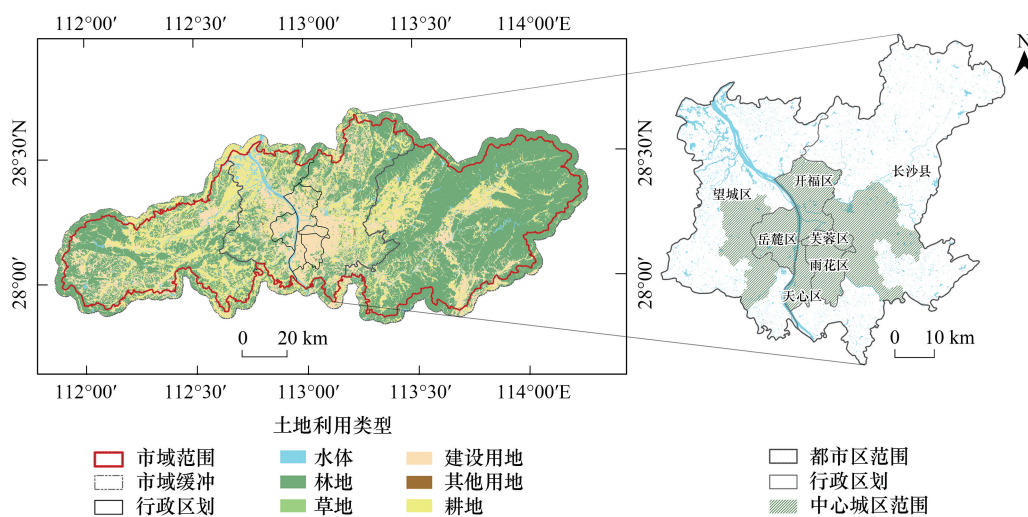


图 1 研究区范围

Fig.1 The location of the study area

2 数据与研究方法

2.1 数据来源

主要基础数据包括:(1)2020 年长沙市土地利用数据,空间分辨率为 30 m,源自地理空间数据云:<http://www.gscloud.cn>,通过 ENVI 5.3 软件结合目视解译法获得;(2)长沙市道路数据,来源于 OpenStreetMap:<http://www.openstreetmap.org>;(3)DEM 高程数据,来源于地理空间数据云平台:<http://www.gscloud.cn>;(4)归

一化植被指数,采用 Landsat 8 影像数据,基于 ENVI 5.3 处理获得;(5)夜间灯光数据,来源于珞珈一号夜光遥感卫星:<http://59.175.109.173:8888/app/login.html>; (6)长沙市相关规划资料,来源于长沙市人民政府网站(<http://www.changsha.gov.cn>)、长沙市自然资源与规划局及文献查阅。

2.2 研究方法

2.2.1 生态源地的分层识别

(1) 市域生态源地识别

市域生态源地对于区域内部生态总量的把控、生态系统稳定性的维持和生物多样性保护具有重要作用。在各类土地利用类型中,大面积水体和林地是生物的集中栖息地^[32-33],常作为生态源地备选区。为保证上一层级尺度的连续性并消除行政区域对生态系统服务功能的影响,参考 Koen 等^[34]的研究,对市域外部设置 3 km 的缓冲区作为市域源地的综合选择范围,并采用“MSPA+Conefor 连通性检验”的方法对市域生态斑块进行筛选^[35]。MSPA 是利用数学形态学原理对栅格图像进行空间格局功能类型划分的一种方法,能够从空间形态和连通性角度识别重要斑块,从而为生态源地的选取提供科学依据^[36-37]。首先通过 MSPA 分析,结合研究区基本现状,初步筛选出面积排名前 30 的生态斑块作为市域尺度的备选源地;接下来参考相关文献^[25,37]并结合研究区实际,运用 Conefor 2.6 软件将连通距离阈值设置为 1500 m,连通概率设为 0.5,对其进行斑块连通性指数(dPC)计算。其中,dPC 大于 0.5 的生态斑块作为市域一级生态源地,dPC 小于 0.5 的生态斑块作为市域二级生态源地。

(2) 都市区生态源地识别

都市区生态源地更侧重于对跨尺度的层级传导和城市整体生态安全的保护,需综合考虑生态流通性、空间布局均衡性、整体生态效益和生态需求等因素。结合尺度推绎理论^[38],位于都市区内的市域生态源地是都市区生境质量最高、面积最大且连通性最好的生态斑块^[39],因此首先利用 ArcGIS 10.5 软件中的“距离选择”工具,提取出都市区内的市域生态源地(即两尺度间的生态叠合源地)作为都市区一级生态源地。在都市区二级生态源地选取上,以 100 hm²作为源地提取的最小面积阈值剔除零碎斑块,结合都市区生态斑块功能的特殊性并参考相应文献^[29-30],选取斑块形状指数 S、市域源地的成本加权距离(Cost Weighted Distance, CWD)、夜间灯光数据、斑块连通性指数(dPC)进行生态斑块的重要性评价;按照“自然断点法”分类并等价相加得到生态斑块的重要性分级,选取“重要”、“较重要”两级生态斑块作为都市区的二级生态源地,最后通过实地调研进一步论证结果准确性。其中,斑块形状指数可以用来计算斑块形状复杂程度^[38],见公式(1);市域源地成本加权距离(CWD)是指每个像元距离最近源地的成本加权距离^[40],可在空间上反映出都市区生态流通成本的分布情况;经计算,市域源地成本加权距离(CWD)结合夜间灯光数据能较好反映出都市区内部的生态需求情况;斑块连通性指数可计算斑块的生态连通性。

斑块形状指数计算公式如下:

$$S = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (1)$$

式中,S 为斑块形状指数,P 为斑块周长(m),A 为斑块面积(m²)。斑块形状指数 S 的值越小,表明斑块越规则,斑块重要性越突出。

2.2.2 生态阻力面的层级构建

生态阻力面能直观反映出区域内生态因子整体流通情况。由于尺度效应的存在,不同尺度下的自然环境条件和人类活动强度会存在差异,影响物种迁移的因子也会发生相应变化,因此,生态阻力面构建既有区域整体环境的相通性,又有随尺度变化的差异性。在从市域往中心城区尺度推绎的过程中,随着人类活动逐渐增强,生态阻力不断加大,影响其主要构成因子也不尽相同,需要考虑不同尺度间的联系来进行阻力面的层级构建。研究参考诸多学者对不同尺度生态阻力因子的选取和赋值情况^[16-23],分别得到单个尺度层面阻力因子的主要类型和影响权重,通过进一步分析、运算,在整合、梳理上一层级整体生态阻力情况和目标层级其他阻

力因子基础上进行综合构建(图2);并结合研究区实际,拟定出市域—中心城区不同尺度下的生态阻力值(表1),最终通过权重计算,得到不同层级尺度下的生态阻力面。

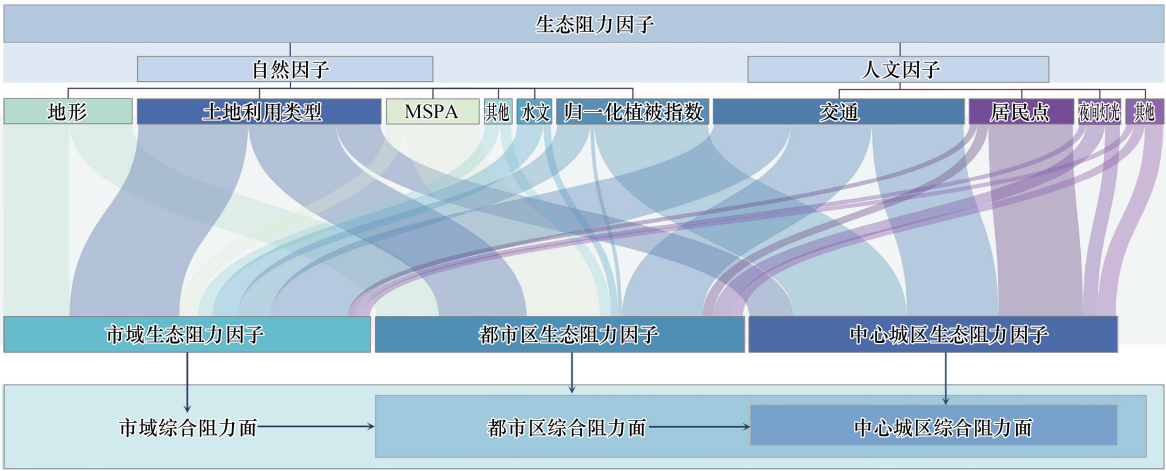


图2 市域—中心城区生态阻力因子构成分析

Fig.2 Analysis on the composition of ecological resistance factors from urban area to central urban area

表1 市域-中心城区生态阻力因子等级及其权重

Table 1 factor grade and its weight of ecological resistance factors from urban area to central urban area

尺度 Scale	阻力因子 Resistance factor	指标分级(阻力值) Index classification(Resistance value)	权重 Weight
市域尺度 Urban scale	高程/m	<300(10分);300—600(30分);600—900(50分);900—1200(70分);>1200(100分)	0.13
	坡度/°	<5(10分);5—12(30分);12—25(50分);25—35(70分);>35(100分)	0.12
	土地利用类型(市域)	林地(1分);水域(20分);草地(50分);耕地(80分);建设用地(100分)	0.50
	距市域交通/m	>1500(10分);900—1500(20分);600—900(50分);300—600(70分);<300(100分)	0.25
都市区尺度 Metropolitan scale	市域生态阻力面	——	0.21
	土地利用类型(都市区)	林地(1分);水域(20分);湿地(30分);草地(40分);耕地(60分);未利用地(80分);建设用地(100分)	0.38
	MSPA	核心区(1分);桥接区(20分);环道区(30分);分支(40分);孤岛(60分);边缘区、穿孔(80分);背景(100分)	0.16
	距都市区交通/m	>900(10分);600—900(30分);300—600(50分);150—300(70分);<150(100分)	0.25
中心城区尺度 Central urban scale	都市区生态阻力面	——	0.25
	归一化植被指数	大于0.8(10分);0.6—0.8(30分);0.4—0.6(50分);0.2—0.4(70分)小于0.2(100分)	0.26
	城区道路	铁路(100分);高速公路(80分);一级道路(60分);二级道路(50分)其他地区(10分)	0.16
	建筑层数	0(10分);1层—6层(30分);7层—18层(50分);19层—36层(70分);36层以上(100分)	0.33

2.2.3 多尺度协同的生态网络构建与层级优化

(1) 基于 LCP 和电路理论的市域、都市区生态廊道综合模拟

由于不同空间尺度下的生态阻力面不同,生态廊道的计算方法也存在一定差异。在市域和都市区空间尺

度下,考虑到自然基底对相应区域的贡献度相比于城市基底仍占较大优势,因此其廊道的构建方法具有一定的相似性。经过不同计算方法的运算和比较,市域和都市区层面采用 LCP 和电路理论的方法,通过 Circuitscape 工具中的 Linkage Mapper 插件来进行生态廊道的综合模拟。Linkage Mapper 插件结合电路理论能够模拟物种随机游走的特性,并计算出生态迁徙的多种可能性和最优路径^[41-42],避免了操作过程中的复杂性和数据冗余性。同时,其 Pinchpoint Mapper 模块和 Barrier Mapper 模块可分别反应路径上生态夹点和生态障碍点的总体情况。其中,生态夹点指的是生物在廊道迁徙中通过的可能性较高或者无其他代替路径的区域^[43];生态障碍点是指生态要素在廊道运动中易受到阻碍、通过合理修复其连通性会大大增强的区域^[44]。利用 Linkage Mapper 插件对生态廊道、生态夹点和生态障碍点的综合计算,能够反应研究区内生物的总体迁徙情况,从而为多尺度协同的生态网络构建和优化提出针对性策略。

(2) 市域、都市区协同的生态网络嵌套与层级优化

通过将市域、都市区生态网络有机衔接,能够形成不同尺度的“空间嵌套体”^[45],实现整体生态空间格局的优化和跨尺度生态效能的传递。由于本文在进行生态源地的选取、生态阻力面的构建上较好考虑了尺度推绎和空间传导,因此在进行生态网络嵌套时具有较好的匹配性。研究首先利用 ArcGIS 10.5 软件提取出市域和都市区生态网络中互相穿插、叠合的生态廊道作为跨尺度基础上的生态叠合廊道,并结合不同尺度下不同宽度廊道的生物流通特性^[46],赋予市域廊道核心保护宽度 600 m、生态叠合廊道 400 m、都市区廊道 100 m。同时,通过对市域、都市区尺度生态夹点和生态障碍点运算结果进行分类提取,选择数值最大的一类斑块作为生态夹点和生态障碍点,并与两尺度生态廊道核心保护范围叠置,以识别出生态核心保护廊道上的生态夹点和生态障碍点进行重点保护和修复。另外,考虑到部分生态斑块间的生态廊道距离较长,在实际过程中受周边干扰因素影响容易发生断裂,将与生态廊道相交的生态斑块作为生态节点进行针对性保护。最后,通过对两尺度生态要素有机整合,实现在不同空间尺度下由“点—线—面”抽象生态网络系统向“斑—廊—基”实体生态网络系统的跨越,并为中心城区绿地生态网络构建打下基础。

(3) 基于层级传导与生态阻力的中心城区绿地生态网络构建

中心城区绿地生态网络是对市域、都市区生态网络的延续,又具有人化的特点;与纯自然生态网络相比,中心城区绿地生态网络主要服务于人类城市^[47],且受城市基质环境间的相互影响而呈现出非稳定状态^[48],生态阻力较大,生态物种迁移主要以适城性动植物为主,在空间上缺乏连续性。因此,中心城区绿地生态网络的构建需要结合上一层级的自然生态网络和城市内部空间结构综合探讨。研究基于生态过程中能量与物质流动的连续性和生态系统服务功能的辐射效应^[49],通过 ArcGIS 10.5 距离选择工具,识别出与上层生态廊道相交的城市道路,并结合现有绿色基础设施和中心城区空间结构进行筛选、衔接,得到中心城区绿地生态网络和重要生态绿道;进而通过重要生态绿道划分中心城区内部生态修复单元,同时结合中心城区生态阻力面,利用 ArcGIS 10.5“以表格显示分区统计”工具提取生态修复单元内部的平均生态阻力值,并对其进行等级划分;最后,结合上一层级生态廊道在中心城区的生态障碍点和生态夹点进一步落实、优化。

3 结果与分析

3.1 市域、都市区生态源地识别

结合 MSPA 分析和 Conefor 连通性检验,共提取市域生态源地 30 个,总面积为 4706 km²,占市域缓冲区范围的 33%。其中,市域 1 级生态源地 14 个,2 级生态源地 16 个。提取出与都市区相交的市域生态源地共 14 个,作为都市区 1 级生态源地(生态叠合源地),面积约占都市区总面积的 11.9%;通过生态斑块重要性评价(图 3),共获得都市区 2 级生态源地 22 个,总面积约为 111.7 km²,约占都市区总面积的 2.86%。整体来看,市域 1 级生态源地主要分布在浏阳市中东部地区和宁乡市西侧,生态源地连通性较好;市域 2 级生态源地主要分布在市域中部,受人类活动的影响整体破碎程度较高,需加强生态保护和修复。都市区 1 级生态源地主要分布在都市区四周,承担着市域—都市区尺度间的生态连通功能和尺度传导功能,对维持都市区内部生态系

统的完整性和可持续性具有重要意义;都市区 2 级生态源地受城市用地扩张的影响,主要以单独的自然山体或水体斑块存在,与生态源地连通性较弱,但对城区生态服务功能较强,需要在重新恢复生态连通性的基础上,结合城市发展的需求重点进行生态修复和保护(图 4)。

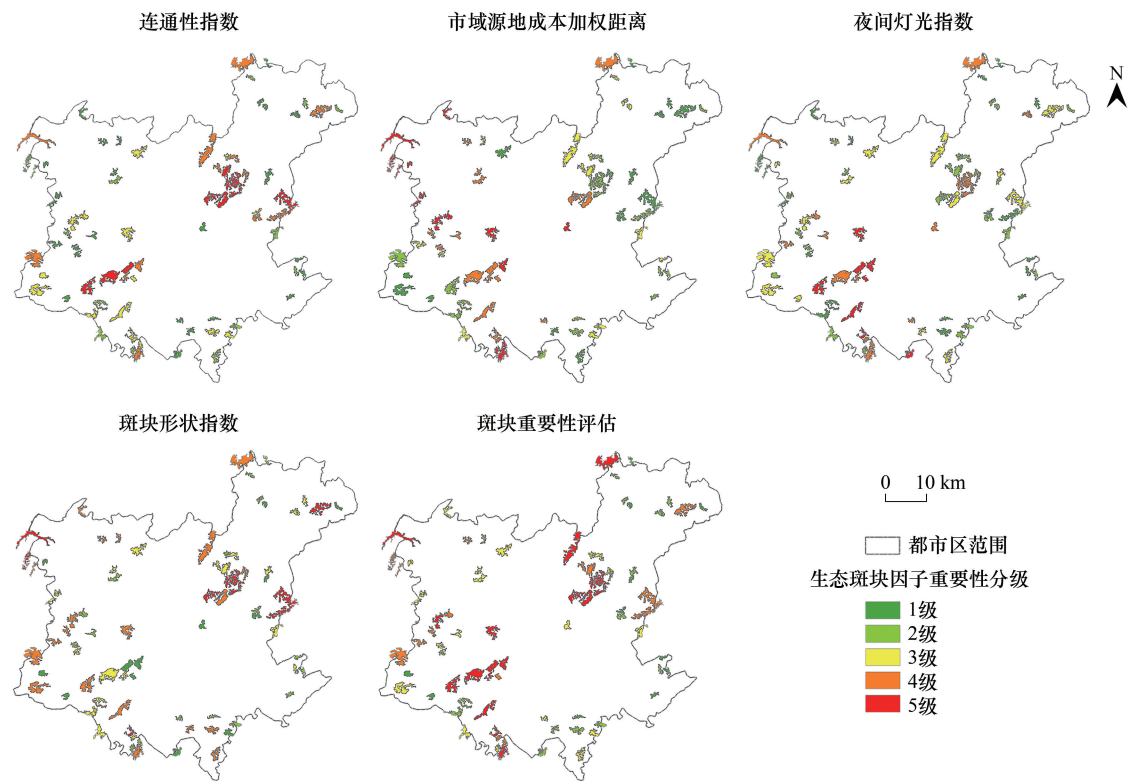


图 3 都市区生态斑块综合评价
Fig.3 Comprehensive evaluation of ecological patches in metropolitan area

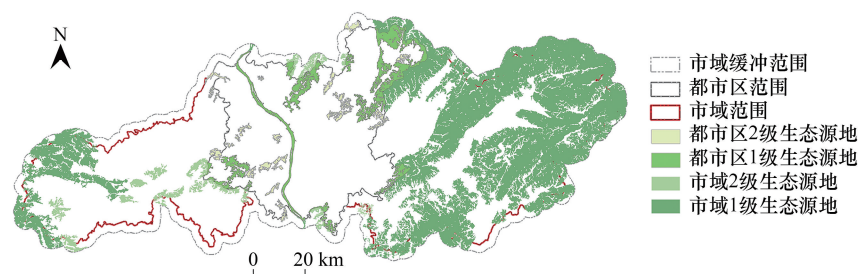


图 4 市域、都市区生态源地识别
Fig.4 Extraction of ecological sources in urban area and metropolitan area

3.2 生态阻力面构建

通过对各层级单因子阻力值进行分析、计算,并结合自然断点法将结果划分为“高、较高、中、较低、低”五级,分别得到市域、都市区、中心城区三个空间尺度的生态阻力面(图 5)。从图中可以看出,市域—中心城区尺度推绎过程中,生态阻力总体上不断加大,人类活动强度增加。其中,市域生态阻力面主要反映人类活动与自然生态环境间的关系,乡村和城市聚落生态阻力值较大;山林地带生态阻力值整体较低,但仍存在由交通等因素导致的带状高阻力区。都市区阻力面侧重于体现城市在扩张过程中与周边自然生境的矛盾,高阻力区主要集中在都市区内部的中心城区以及受交通等因素影响的周边地区;而低阻力区破碎化严重。中心城区阻力

面整体反映了城区内部生态需求程度,低阻力区呈点状分布在城区周边;越往城区内部,其生态阻力值越大,生态需求度越高,越需要采取相应的生态环境改善措施。

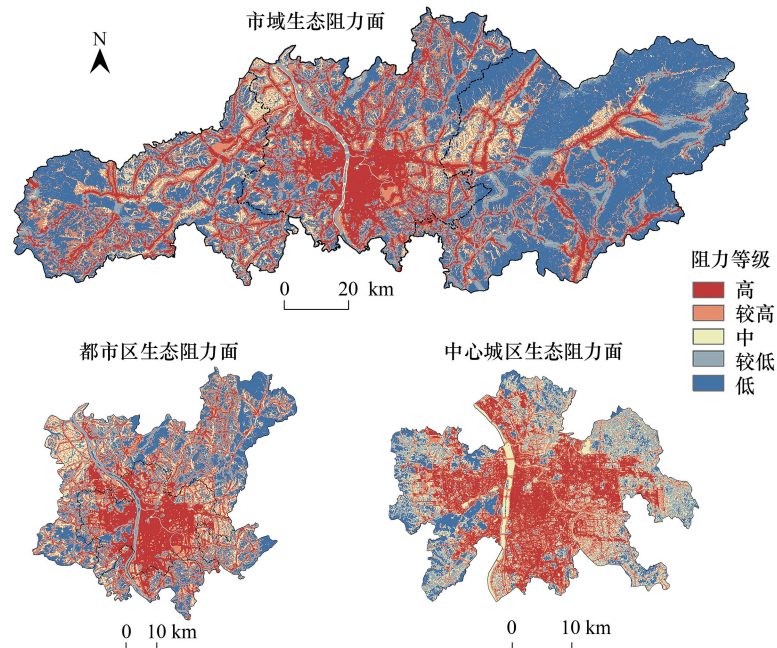


图5 市域、都市区和中心城区生态阻力面

Fig.5 Ecological resistance surfaces of the urban area, metropolitan area and central urban area

3.3 多尺度生态网络协同构建与优化

(1) 市域—都市区生态廊道构建

结合 Linkage Mapper 进一步计算,共得到市域重要生态廊道 59 条、潜在生态廊道 13 条;都市区重要生态廊道 82 条、潜在生态廊道 43 条(图 6);叠合市域和都市区生态廊道可知,两尺度生态廊道存在较好的空间嵌套性。得到两尺度生态夹点聚集区主要呈狭长带状分布,用地类型为街头绿地、滨河绿带等周围受人类影响较大的地区;生态障碍点整体数量较多,多集中在设施用地、工业用地等地表硬质化程度较高、人类活动较多的区域,对生态廊道干扰和破坏性较大,需进一步优化生态廊道内部节点来提升其连通性能(图 7)。

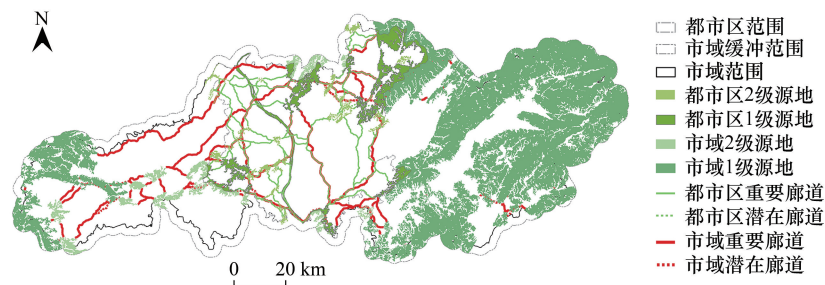


图6 市域和都市区生态廊道

Fig.6 Ecological corridors in urban area and metropolitan area

(2) 市域—都市区生态网络体系构建与层级优化

在梳理市域、都市区生态廊道基础上,共提取出生态叠合廊道 15 条,主要集中在城市中心区外围的城郊地区和湘江、浏阳河部分河段,呈现出“外环内楔”的空间格局。通过赋予各尺度廊道相应宽度,得到市域重

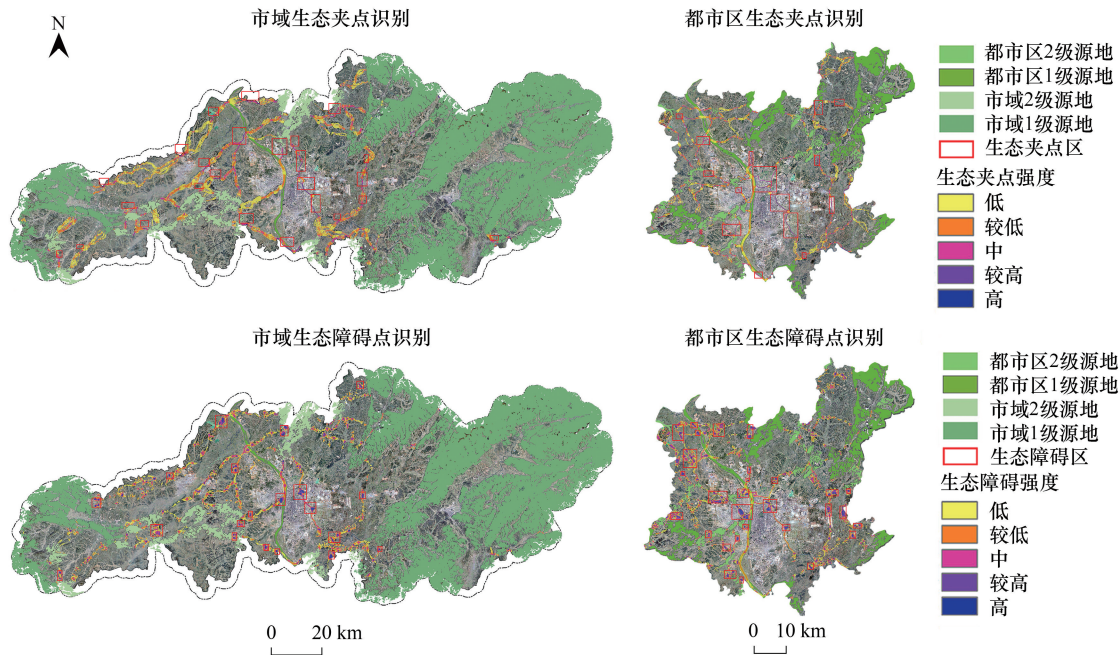


图 7 市域、都市区生态夹点和生态障碍点识别

Fig.7 Identification of ecological pinch points and barrier points in urban area and metropolitan area

要廊道、市域潜在廊道、生态叠合廊道、都市区重要廊道、都市区潜在廊道核心保护面积分别为 215.52、127.39、113.31、31.25、13.67 km²,共 501.14 km²,约占市域总面积的 4.2%。得到位于生态廊道核心保护区范围内的市域生态夹点共 122 个、都市区 176 个、两尺度叠合生态夹点 71 个,市域生态障碍点 121 个、都市区 130 个、两尺度叠合障碍点 54 个(图 8)。其中,面积较大的生态夹点主要分布在中心城区的浏阳河、捞刀河河段,需进一步扩宽滨河绿带,进行河岸修复。生态障碍点主要分布在中心城区,受硬质地表、交通设施、建构筑物等影响,应结合中心城区绿地生态网络进一步修复或补充新的生态踏脚石。同时,识别与生态廊道相交的生态斑块作为生态节点进行重点保护。



图 8 市域—都市区生态网络体系构建与优化

Fig.8 Construction and optimization of ecological network system from urban area to metropolitan area

(3) 中心城区绿地生态网络构建

结合区域生态网络、道路和现有绿色基础设施,得到与上层生态廊道相衔接的中心城区绿地生态网络和重要生态绿道,其中位于中心城区范围内的重要生态绿道长度为 441.2 km。将重要生态绿道与中心城区空间基底衔接,共划分为 56 个生态修复单元,平均面积为 20.4 km²,平均阻力值在 34.05—73.21 之间,按照自然断点法将其分成 5 类,并与上层生态网络嵌套,得到中心城区生态修复单元(图 9)。整体来看,5 类生态修

复单元在空间上存在较为明显的规律性特征,与上层级生态网络、中心城区生态本底相契合,能够较好反映中心城区生态环境现状。其中,第1类生态修复单元主要分布在河东商务区、星马副中心片区等城市中心地带,无上层级生态廊道穿过,建筑密度较大、楼层较高,绿地较少,生态修复难度最大,需重点增加绿地空间;第2—3类生态修复单元分布在第1类周边,修复难度相比第1类小,但有市域、都市区重要生态廊道穿过,应加强对生态夹点和生态障碍点的保护和修复;第4—5类主要为城市新开发区或预备开发区,建筑整体密度较低,且存留了大量自然斑块,但与周边自然生境的矛盾较为激烈,需合理处理与生态空间的关系,并重点保护生态网络体系和修复关键节点。

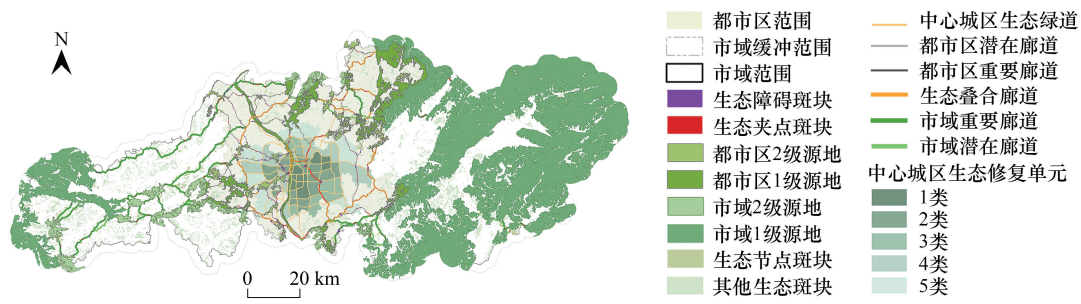


图9 市域—中心城区多尺度协同的生态网络体系构建

Fig.9 Construction of multi-scale collaborative ecological network system from urban area to central urban area

3.4 长沙市多尺度生态网络空间保护与修复建议

基于不同层级下自然生态环境与人类活动的矛盾,通过对长沙市不同尺度生态源地、廊道和节点斑块的衔接、嵌套,得到长沙市多尺度协同的生态网络构建体系,并提出了长沙市多尺度生态网络空间保护和修复建议(图10):

(1) 长沙市域通过自然本底中生态总量的把控,重点构建市域总体生态安全格局,保护涵盖浏山山系、九岭山系、连云山系和湘江河段等在内的长沙市域大面积生态源地,并结合国家森林公园、自然保护区等划定生态保护范围和缓冲区范围,加强对豹、黑熊、牙獐、角雉等重要生态物种的保护。同时,通过构建生态廊桥或隧道等方式恢复由于人类交通网络割裂的重要生物通道,并保护廊道内部的自然生境斑块,以促进生态源地之间的连通,从而维持市域生态系统的稳定和区域内部生物的多样性。

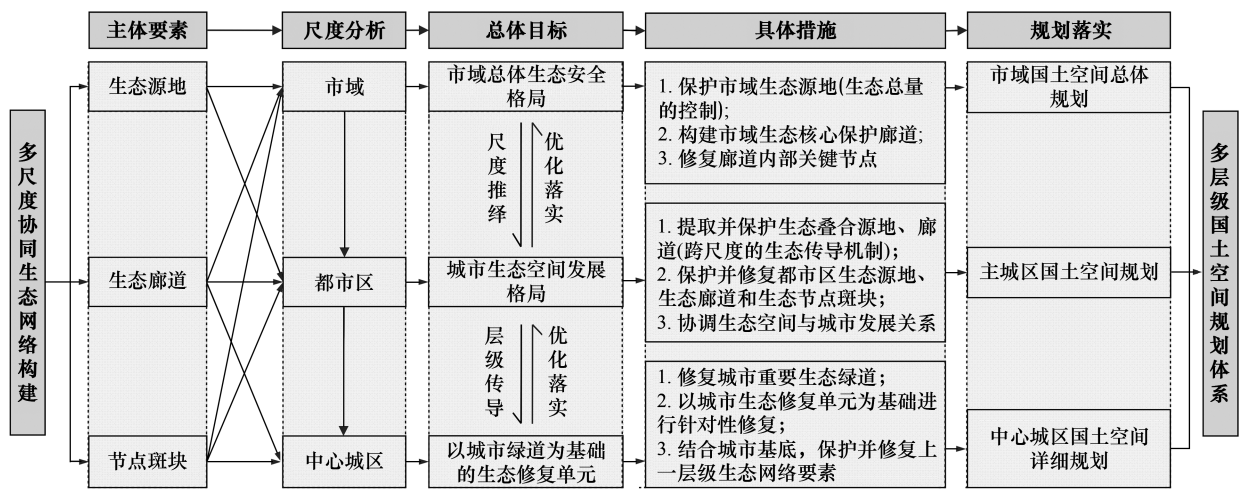


图10 长沙市多尺度生态网络空间保护与修复建议

Fig.10 Suggestions on the protection and restoration of multi-scale ecological network space in Changsha

(2)长沙市都市区重点协同自然生态本底和人类空间发展之间的关系,通过生态网络的构建划定城市生态空间发展格局,从而控制中心城区的无序扩张。重点保护跨尺度的生态叠合源地和生态叠合廊道,包括幕阜山系、黑麋峰国家森林公园、长株潭绿心、大石坝森林公园、象鼻窝森林公园以及浏阳河、捞刀河水系等;同时加强对都市区内部其他生态网络的保护和修复。

(3)长沙市中心城区结合市域、都市区生态廊道,构建绿地生态网络修复内部生态空间。重要生态绿道主要包括长沙绕城高速、二环路等交通干道周边的防护绿带和道路绿地,交通干扰较大,需加宽干道两侧绿带,恢复绿道内部生态物种,并串联其周边公园、湿地等生态要素,进而完善生态绿地网络。生态修复单元应采取增加屋顶花园、立体绿化、街头绿地以及恢复自然生境等方式进行针对性改善,其中生态修复单元级别越高、生态阻力越大的地区,需进行重点修复。中心城区内部大型生态障碍斑块主要分布在谷山—岳麓山片区,在结合城市生态修复单元和空间结构的基础上,应增加绿道、开敞空间等“踏脚石”斑块来提升廊道的连通性;同时保护和恢复存在大型生态夹点斑块的浏阳河、捞刀河及其他水系的自然河岸。

4 讨论

区域景观环境现状以及生态系统服务功能的差异会对生态网络的构建产生重要影响^[50—51],而我国城市化进程的推动加剧了区域内部不同尺度上景观过程和功能的分异^[52—53],因此,系统性生态网络的研究既需要打破传统生态网络在行政边界和空间尺度上的制约,针对不同尺度上的景观特征进行适应性构建,又需要注重不同网络层级之间的衔接以最终形成完整的生态修复体系^[54]。本文通过对长沙市域不同尺度的分析,基于不同手段对其进行了多尺度生态网络的协同构建和层级优化。与同类型的研究相比,本文的创新点如下:(1)结合市域—中心城区不同景观特征进行多尺度协同的生态网络构建。论文通过对城市化扩散所导致的景观差异进行分析,在市域、都市区尺度上分别采用“MSPA+景观连通性分析”、斑块重要性评价等方法进行生态源地识别,并结合不同尺度下生态阻力的构成因素进行多尺度阻力面的层级嵌套,最后将不同层级自然生态网络和中心城区的人工生态网络相结合,有利于系统解决由城市化导致的自然生境破碎化问题。(2)基于逐级的尺度推绎和层级传导来实现各尺度间生态网络的衔接和优化。研究考虑了影响上下级生态网络连通的关键性要素,通过对尺度间生态叠合要素的分析构建了市域—都市区生态叠合网络;并以都市区生态网络为基础,识别出与都市区生态网络相衔接的城市生态绿道,来实现从市域—都市区自然生态网络向中心城区人工生态网络的转变。(3)与多层级国土空间规划结合来进行多尺度生态网络的具体落实。研究通过各尺度生态廊道核心保护宽度的赋予和生态要素的有机整合,基于不同尺度生态网络的特点应用并落实到多层级的国土空间规划体系中,从而为国土空间规划体系下系统性的生态修复和国土空间保护新格局的构建提供借鉴和思考。

经过进一步研究,本文仍存在以下需要完善的地方:在生态网络的构建上,研究考虑了部分重要水系对生态网络构建的影响,但并未将整个水系网络纳入,后期可结合流域单元形成更加完整的生态网络;同时,对于中心城区绿地生态网络的构建,目前仅从与上层级生态网络的衔接和片区的生态修复上进行了探讨,未来可在此基础上结合生态空间效益和需求进一步完善。

5 结论

多尺度协同的生态网络构建是基于人类活动在不同空间尺度上对自然生态系统造成的破坏而采取的综合性解决方案。论文从以自然本底为主的市域尺度出发,通过逐级的尺度推绎和网络的协同构建,最后落实到以人工基底为主的中心城区生态修复单元,实现了多尺度协同的生态网络构建和层级优化。研究共识别长沙市域生态源地 30 个、都市区 36 个,其中生态叠合源地 14 个,叠合面积 464 km²,主要位于中心城区外围,承担着尺度间重要的生态连通功能;识别市域生态廊道 72 条、都市区 125 条,通过两尺度嵌套与层级优化提取生态叠合廊道 15 条;确定市域重要廊道、市域潜在廊道、生态叠合廊道、都市区重要廊道、都市区潜在廊道的

核心保护面积分别为 215.52、127.39、113.31、31.25、13.67 km²,并结合生态廊道核心保护范围提取生态夹点和生态障碍斑块;提取中心城区重要生态绿道长度 441.2 km,结合生态阻力面构建中心城区 5 级生态修复单元。最后结合多层级的国土空间规划体系和多尺度的生态网络空间,构建市域总体生态安全格局、都市区城市生态空间发展格局和以城市绿道为基础的中心城区生态修复单元,从而为自然—人工系统的协同发展以及系统性的城市生态网络构建提供科学参考。

参考文献(References):

- [1] (丹麦)S.E.约恩森. 生态系统生态学. 北京: 科学出版社, 2017: 414-418.
- [2] 韩宗伟, 焦胜, 胡亮, 杨宇民, 蔡青, 黎贝, 周敏. 廊道与源地协调的国土空间生态安全格局构建. 自然资源学报, 2019, 34(10): 2244-2256.
- [3] 樊杰. 我国国土空间开发保护格局优化配置理论创新与“十三五”规划的应对策略. 中国科学院院刊, 2016, 31(1): 1-12.
- [4] 黄润秋. 共建地球生命共同体 为全球生物多样性保护贡献中国方案. 环境保护, 2022, 50(10): 11-13.
- [5] Dútilo W, Rico-Gray V. Ecological networks in the tropics. Cham, Switzerland: Springer, 2018.
- [6] Jongman R H G. Nature conservation planning in Europe: developing ecological networks. Landscape and Urban Planning, 1995, 32(3): 169-183.
- [7] Linehan J, Gross M, Finn J. Greenway planning: developing a landscape ecological network approach. Landscape and Urban Planning, 1995, 33(1/2/3): 179-193.
- [8] Jongman R H G, Külvik M, Kristiansen I. European ecological networks and greenways. Landscape and Urban Planning, 2004, 68(2/3): 305-319.
- [9] Fremier A K, Kiparsky M, Gmur S, Aycrigg J, Craig R K, Svancara L K, Goble D D, Cosens B, Davis F W, Scott J M. A riparian conservation network for ecological resilience. Biological Conservation, 2015, 191: 29-37.
- [10] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. 生态学报, 1999, 19(1): 8-15.
- [11] C. Correa, M. Mendoza, A. Etter, D. Pérez. Habitat connectivity in biodiversity conservation: a review of recent studies and applications. Progress in Physical Geography, 2016, 40(1): 7-37.
- [12] Correa Ayram C A, Mendoza M E, Etter A, Salicrup D R P. Effect of the landscape matrix condition for prioritizing multispecies connectivity conservation in a highly biodiverse landscape of Central Mexico. Regional Environmental Change, 2019, 19(1): 149-163.
- [13] Modica G, Praticò S, Laudari L, Ledda A, Di Fazio S, De Montis A. Implementation of multispecies ecological networks at the regional scale: analysis and multi-temporal assessment. Journal of Environmental Management, 2021, 289: 112494.
- [14] 于亚平, 尹海伟, 孔繁花, 王晶晶, 徐文彬. 基于 MSPA 的南京市绿色基础设施网络格局时空变化分析. 生态学杂志, 2016, 35(6): 1608-1616.
- [15] 卢卓. 省域生态廊道构建方法优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [16] 王正伟, 王宏卫, 杨胜天, 刘勤, 高一薄, 衡嘉尧, 张惠婷. 基于生态系统服务功能的新疆绿洲生态安全格局识别及优化策略——以拜城县为例. 生态学报, 2022, 42(1): 91-104.
- [17] Hashemi R, Darabi H. The review of ecological network indicators in graph theory context: 2014-2021. International Journal of Environmental Research, 2022, 16(2): 1-26.
- [18] Ye H, Yang Z P, Xu X L. Ecological corridors analysis based on MSPA and MCR model—a case study of the tomur world natural heritage region. Sustainability, 2020, 12(3): 959.
- [19] 杨凯, 曹银贵, 冯喆, 耿冰瑾, 冯漪, 王舒菲. 基于最小累积阻力模型的生态安全格局构建研究进展. 生态与农村环境学报, 2021, 37(5): 555-565.
- [20] 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.
- [21] Kong F H, Wang D, Yin H W, Dronova I, Fei F, Chen J Y, Pu Y X, Li M C. Coupling urban 3-D information and circuit theory to advance the development of urban ecological networks. Conservation Biology, 2021, 35(4): 1140-1150.
- [22] 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.
- [23] 彭建, 杨咏, 谢盼, 刘焱序. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区. 生态学报, 2017, 37(13): 4562-4572.
- [24] 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. The Science of the Total Environment, 2021, 754: 141868.

- [25] 郭家新, 胡振琪, 李海霞, 刘金兰, 张雪, 赖小君. 基于 MCR 模型的市域生态空间网络构建. 农业机械学报, 2021, 52(3): 275-284.
- [26] 汤峰, 王力, 张蓬涛, 付梅臣. 基于生态保护红线和生态网络的县域生态安全格局构建. 农业工程学报, 2020, 36(9): 263-272.
- [27] 王博娅, 刘志成. 城市更新背景下北京市中心城区生态网络的优化策略. 城市发展研究, 2022, 29(1): 113-120.
- [28] Lu Z G, Li W, Wang Y D, Zhou S Y. Bibliometric analysis of global research on ecological networks in nature conservation from 1990 to 2020. Sustainability, 2022, 14(9): 4925.
- [29] 朱捷, 苏杰, 尹海伟, 孔繁花. 基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建. 自然资源学报, 2020, 35(8): 1986-2001.
- [30] 范春苗, 王志泰, 汤娜, 邓国平. 基于形态学空间格局和空间主成分的贵阳市中心城区生态网络构建. 生态学报, 2022, 42(16): 6620-6632.
- [31] 丁成呈, 张敏, 束学超, 彭鹏. 多尺度的城市生态网络构建方法——以合肥市主城区生态网络规划为例. 规划师, 2021, 37(3): 35-43.
- [32] Rinaldo A, Gatto M, Rodriguez-Iturbe I. River networks as ecological corridors: a coherent ecohydrological perspective. Advances in Water Resources, 2018, 112: 27-58.
- [33] 杨志广, 蒋志云, 郭程轩, 杨晓晶, 许晓君, 李潇, 胡中民, 周厚云. 基于形态空间格局分析和最小累积阻力模型的广州市生态网络构建. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3367-3376.
- [34] Koen E L, Bowman J, Sadowski C, Walpole A A. Landscape connectivity for wildlife: development and validation of multispecies linkage maps. Methods in Ecology and Evolution, 2014.
- [35] 王雪然, 万荣荣, 潘佩佩. 太湖流域生态安全格局构建与调控——基于空间形态学-最小累积阻力模型. 生态学报, 2022, 42(5): 1968-1980.
- [36] 陈竹安, 马彬彬, 危小建, 曾令权, 姜晓桦. 基于 MSPA 和 MCR 模型的南昌市生态网络构建与优化. 水土保持通报, 2021, 41(6): 139-147.
- [37] 李红波, 黄悦, 高艳丽. 武汉城市圈生态网络时空演变及管控分析. 生态学报, 2021, 41(22): 9008-9019.
- [38] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [39] 吴静, 黎仁杰, 程朋根. 城市生态源地识别与生态廊道构建. 测绘科学, 2022, 47(4): 175-180.
- [40] 宋利利, 秦明周. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3344-3352.
- [41] 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.
- [42] 单楠, 周可新, 潘扬, 唐夫凯. 生物多样性保护廊道构建方法研究进展. 生态学报, 2019, 39(2): 411-420.
- [43] 苏冲, 董建权, 马志刚, 乔娜, 彭建. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护修复优先区识别——以四川省华蓥山区为例. 生态学报, 2019, 39(23): 8948-8956.
- [44] 曹秀凤, 刘兆顺, 李淑杰, 高振君, 孙贝雯, 李莹雪. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以吉林省松原市为例. 中国环境科学, 2022, 42(6): 2779-2787.
- [45] 岳邦瑞, 刘臻阳. 从生态的尺度转向空间的尺度——尺度效应在风景园林规划设计中的应用. 中国园林, 2017, 33(8): 77-81.
- [46] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度. 生态学报, 2005, 25(9): 2406-2412.
- [47] 刘滨谊, 吴敏. 基于空间效能的城市绿地生态网络空间系统及其评价指标. 中国园林, 2014, 30(8): 46-50.
- [48] 李晓曼, 谷康. 扬州市中心城区绿地空间格局优化策略研究. 广东园林, 2018, 40(4): 36-44.
- [49] 郝月, 张娜, 杜亚娟, 王熠辉, 郑艳东, 张长春. 基于生境质量的唐县生态安全格局构建. 应用生态学报, 2019, 30(3): 1015-1024.
- [50] 赵文武, 傅伯杰, 陈利顶. 尺度推绎研究中的几点基本问题. 地球科学进展, 2002, 17(6): 905-911.
- [51] Yu H R, Wang Y Z, Chan E M, Fan X, Rong Y J, Zhang Q, Liang Z. Construction of ecological network based on multi-scale conversion and nesting. Water, 2021, 13(9): 1278.
- [52] 郭诗怡. 基于生态网络构建的海淀区绿地景观格局优化[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [53] 侯鹏, 王桥, 申文明, 翟俊, 刘慧明, 杨旻. 生态系统综合评估研究进展: 内涵、框架与挑战. 地理研究, 2015, 34(10): 1809-1823.
- [54] Yang Y, Feng Z, Wu K N, Lin Q. How to construct a coordinated ecological network at different levels: a case from Ningbo City, China. Ecological Informatics, 2022, 70: 101742.