

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.020.

张福庆, 危小建, 谢名睿, 等. 基于不同尺度源地综合识别的南昌市生态网络嵌套分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 408-418.

Zhang Fuqing, Wei Xiaojian, Xie Mingrui, et al. Multi-scale Nesting Analysis of Ecological Network in Nanchang City Based on Comprehensive Sources Identification[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 408-418.

基于不同尺度源地综合识别的南昌市生态网络嵌套分析

张福庆^{1,2}, 危小建^{1,2}, 谢名睿², 钟世彬³, 陈文波^{1,2}, 夏元平²

(1. 自然资源部大湖流域国土空间生态保护修复工程技术创新中心, 南昌 330013; 2. 东华理工大学测绘与空间信息工程学院, 南昌 330013; 3. 江西省国土空间调查规划研究院, 南昌 330025)

摘要: [目的] 探究南昌市和环南昌城市圈两个尺度下生态网络的空间结构与尺度嵌套特征, 以为区域生态安全保护提供参考。[方法] 以环南昌城市圈为研究区, 分南昌市和环南昌城市圈两个尺度, 基于“功能-属性-结构”源地综合识别框架提取源地, 通过 MCR 模型构建生态网络, 并对两个尺度的廊道、生态夹点与障碍点进行了嵌套分析。[结果] (1) 南昌市的综合生态系统服务显著低于环南昌城市圈, 两个尺度在前 35% 的综合生态系统服务有显著的断层, 结合结构与属性特征, 在南昌市尺度提取生态源地 56 个, 源地分布存在东西较为割裂的特征, 而在环南昌市尺度提取生态源地 78 个, 源地空间分布较为均匀; (2) 南昌市尺度下构建生态廊道 77 条, 连接南昌市东西源地的廊道脆弱, 环南昌城市圈尺度构建生态廊道 310 条, 其中用于连接南昌市与周边县区生态源地的廊道 29 条, 南昌市与周边县区的生态源地有较强的交互与联系; (3) 南昌市和环南昌城市圈两个不同尺度的生态过程紧密相关, 两个尺度下重叠廊道 26 条, 共计 611.78 km, 重叠生态夹点 4 个, 重叠障碍点 8 个, 生态夹点在南昌市西北部和东部差异明显, 障碍点在南昌市东北部和西南部存在较为明显的差异。[结论] 南昌市生态网络具有一定的稳定性, 两个尺度重叠的生态网络的廊道、生态夹点和障碍点较多, 是生态保护与修复的关键, 对重叠要素进行修复可强化城市东西两侧的生态网络连接, 有利于维护城市整体生态网络安全与稳定。

关键词: 生态网络; 多尺度; 生态源地识别; 嵌套分析; 南昌市

中图分类号: X321

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0408-11

Multi-scale Nesting Analysis of Ecological Network in Nanchang City Based on Comprehensive Sources Identification

Zhang Fuqing^{1,2}, Wei Xiaojian^{1,2}, Xie Mingrui², Zhong Shibin³, Chen Wenbo^{1,2}, Xia Yuanping²

(1. Technology Innovation Center for Land Spatial Ecological Protection and Restoration in Great Lakes Basin, MNR, Nanchang 330013, China; 2. School of Surveying and Geoinformation Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 3. Jiangxi Institute of Land and Space Survey and Planning, Nanchang 330025, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to investigate the spatial configuration and scale nesting characteristics of ecological networks under the two scales of Nanchang City and Nanchang City Circle, and to provide reference for regional ecological security protection. [Methods] Nanchang City Circle was taken as the research area. Based on the comprehensive sources identification framework of ‘Function-Attribute-Structure’, the ecological sources were extracted under the two scales of Nanchang City and Nanchang City Circle, and the ecological network was constructed by the Minimum Cumulative Resistance (MCR) model. Simultaneously, nested analysis of ecological corridors, ecological pinch points, and barrier points at two scales were conducted to identify similarities and differences across different scales. [Results] (1) The

收稿日期: 2023-09-13

修回日期: 2023-10-04

资助项目: 自然资源部大湖流域国土空间生态保护修复工程技术创新中心开放课题基金(JXYJY2023006); 国家自然科学基金(42377472, 42174055, 52168010); 江西省自然资源科技创新项目(ZRKJ20232406)

第一作者: 张福庆(1967—), 男, 江西余干人, 博士, 教授, 主要从事生态评价研究。E-mail: 631000872@qq.com

通信作者: 危小建(1988—), 男, 江西南昌人, 博士, 副教授, 主要从事城市景观生态变化研究。E-mail: weixiaojian1988@ecut.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

comprehensive ecosystem services in Nanchang City were significantly lower than those in the Nanchang City Circle. There were significant faults in the top 35% of the comprehensive ecosystem services at the two scales. Combined with the structure and attribute characteristics, 56 ecological sources were extracted at the scale of Nanchang City, and the distribution of the ecological sources was more fragmented from the east to the west, while 78 ecological sources were extracted at the scale of Nanchang City Circle, and the spatial distribution of the ecological sources was more uniform. (2) At the scale of Nanchang City, 77 ecological corridors were constructed, and the corridors connecting the east and west sources of Nanchang City were fragile. At the scale of Nanchang City Circle, 310 ecological corridors were constructed, of which 29 were used to connect the ecological sources of Nanchang City and surrounding counties and districts. The ecological sources in Nanchang City and those in surrounding counties and districts of Nanchang City had strong interaction and connection. (3) The ecological processes of two different scales in Nanchang City and Nanchang City Circle were closely related. There were 26 overlapping corridors under the two scales, a total of 611.78 km, 4 overlapping ecological pinch points and 8 overlapping barrier points. The ecological pinch points were significantly different in the northwest and east of Nanchang City, and the barrier points were significantly different in the northeast and southwest of Nanchang City. [Conclusion] Nanchang's ecological network is relatively stable. There are many overlapping features of corridors, ecological pinch points, and barrier points in the ecological network at two scales, and they are essential for ecological conservation and restoration. The repair of overlapping elements can increase the link of the ecological network on the east and west sides of the city, as well as help to maintain the general safety and stability of the city's ecosystem.

Keywords: ecological network; multi-scale; ecological source identification; nested analysis; Nanchang City

改革开放以来,伴随着剧烈的城镇化进程,城市周边的生境被持续蚕食,导致景观破碎化、生物多样性降低等问题,给城市的生态安全与可持续发展带来巨大危害^[1]。构建基于“源地-廊道”的生态网络(ecological network, EN)被认为是一种可以促进区域生物、物质、能量流通,有效保护区域景观连通和生态安全,缓和城市化与生态安全的矛盾,增进人类福祉的有效方法^[2]。

目前,生态网络涉及的理论主要有景观生态学理论、斑块-廊道-基质理论、电路理论、图论等,涉及的研究内容主要有生态网络构建^[3]、生态网络评价^[4]、生态网络规划^[5]与优化等^[6],已形成相对完备的理论体系以及以“生态源地识别-阻力面创建-生态廊道提取”为基础的成熟规划模式与操作流程。已有的研究内容多以单个尺度为研究视角,涉及省^[7]、市^[8]、县^[9]等不同尺度,近年来越来越多的学者关注多尺度生态网络研究。具体而言,郭熠栋^[10]、刘思^[11]分别对武汉和芜湖,构建了市、区、中心城区3个尺度的生态网络,并对其优化给出了建议。朱捷等^[12]则构建了徐州市都市区和主城区两个尺度的生态网络,为多尺度生态网络构建与优化提供了参考。已有研究指出进行多尺度生态网络嵌套分析有助于识别空间结构错位脱节位置。但需要指出的是,已往的嵌套分析通过

生态系统服务识别源地时,缺乏考虑幅度范围变化对生态系统服务分位数阈值的作用^[13],进而影响了源地的识别提取,此外,从廊道、障碍点和夹点不同方面对不同尺度的生态网络进行嵌套分析的研究也较少。

因此,本研究以南昌市为基本尺度,以南昌市及其周边的12个区县(环南昌城市圈)为上级尺度,构建“功能-结构-属性”的源地提取模型,综合筛选源地,基于最小累计阻力(MCR)模型,构建两个尺度的生态网络,嵌套分析两个尺度生态网络的重叠廊道、障碍点和夹点,提出有效的优化建议与方案,实现南昌市生态网络在不同尺度上的结构嵌套与功能衔接。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

南昌市位于江西省北部(115°27'—116°35'E, 28°10'—29°11'N),赣江下游,鄱阳湖西南岸,亚热带季风气候。全境以鄱阳湖平原为主,西部与东南部为丘陵,地势呈现出U型,整体山、丘、岗、平原相间,水网密布,湖泊众多。在近20年的发展过程中,南昌市的生态环境所承受的压力越来越大,为了保障自然资源与人居环境质量,亟需对南昌市的生态网络进行科学的保护与规划。研究区及土地利用现状如图1所示。

1.2 数据来源

数据来源详情见表1。本研究使用来自于中国

科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)的 2020 年环南昌市土地利用数据,采用中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)的二级土地利用分类体系,考虑到不同未利用地的属性对研究结果影响不大,仅对未利用地进行重分类合并,最终包含:水田、旱地,有林地等 17 个地类(表 2);对 OpenStreetMap(<https://www.openstreetmap.org/>)提供的 2020 年研究区路网进行欧氏距离分析;并对地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)中的高程数据与其他来源的 NDVI、土壤、降雨等空间数据集,通过 ArcGIS 10.2 的工具箱,经过重采样、裁剪等预处理,将栅格数据转换至相同投影坐标系,并统一处理为分辨率为 30 m×30 m 的栅格。

2 研究方法

研究方法由生态源地综合识别、生态网络构建和不同尺度生态网络嵌套分析 3 部分组成。

2.1 生态源地综合识别

生态源地作为生物栖息的重要区域,应当具备优质的自然地理物质条件与空间位置。因此,本文构建生态源地“功能-属性-结构”综合识别框架。具体而言,以生态功能(以生态系统服务代表其功能强弱)为基础,以南昌市为中心,900 m 为半径向外扩展,做 20 个缓冲区,识别南昌市及缓冲区区域的前 5%~50%

生态系统服务综合重要性(ESI)的重叠比例,以确定合适的 ESI 分位数阈值。在此基础上,利用不同面积源地斑块占生态源地总面积的累积比例关系初步提取源地。在初步源地的基础上,结合斑块形状指数(源地属性)与可能连通性指数(源地结构),分别归一化后等权相加,综合识别生态源地。

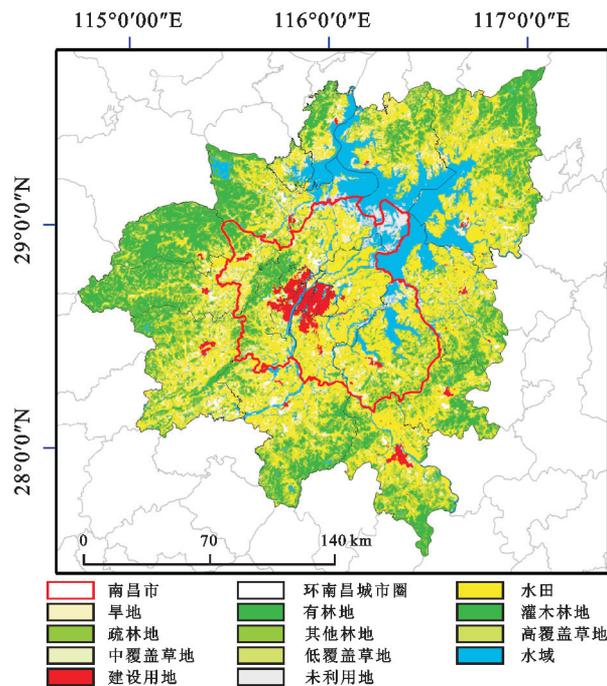


图 1 研究区土地利用及其区位

Fig. 1 Location and land cover of the study area

表 1 数据信息来源

Table 1 Source of data information

数据名称	数据说明	来源
2020 年土地利用	栅格分辨率 30 m×30 m	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
高程图	栅格分辨率 30 m×30 m	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
路网图	Shapefile	OpenStreetMap(https://www.openstreetmap.org/)
土壤数据	栅格分辨率 1 km×1 km	联合国粮农组织(FAO)(https://data.apps.fao.org)
NDVI 数据	栅格分辨率 250 m×250 m	NASA 地球数据平台(https://search.earthdata.nasa.gov/search)
降雨数据	栅格分辨率 1 km×1 km	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/)
蒸散量数据	栅格分辨率 1 km×1 km	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/)
夜间灯光数据	栅格分辨率 130 m×130 m	珞珈一号夜光遥感卫星数据(http://59.175.109.173:8888/index.html)

(1) 基于生态系统服务的源地功能识别。生态系统服务(ES)是区域提供给人类的所有惠益总和,是区域生态功能的表征,广泛应用于源地的选取。其中,生境质量(habitat quality)可以代表区域生态系统环境供给质量的优劣,土壤侵蚀(sediment delivery ratio)与水源涵养(water yield)则可以反映区域生态系统的稳定性与自我调节能力的强弱,碳存储(carbon storage and sequestration)则可以反映生态系统物质能量供给的强弱。因此,通过 invest 模型,计算生境质量、土壤侵蚀、水源涵养、碳存储 4 个生态系统

服务进行源地功能评估,将各评估结果采用归一化方法,等权叠加为生态系统服务综合重要性(ESI),以此代表源地综合生态功能的强弱。各模型公式原理见公式(1)~(4):

生境质量计算公式^[14]如下:

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \quad (1)$$

式中: Q_{xj} 为第 j 种景观类型 x 栅格的生境质量; H_j 为第 j 种景观类型的生境适宜性大小; D_{xj} 为第 j 种景观类型 x 栅格的生境退化程度; k 为半饱和常数; z

为尺度常数。

土壤保持力计算公式^[15]如下:

$$A=R \times K \times LS \times (1-C \times P) \quad (2)$$

式中: A 为土壤保持力; R 为降雨侵蚀因子; K 为土壤可蚀因子; LS 为地形的坡长因子与坡度因子的乘积; C 为植被覆盖因子; P 为侵蚀控制因子。

水源涵养计算公式^[15]如下:

$$Y(x)=\left[1-\frac{AET(x)}{P(x)}\right] \times P(x) \quad (3)$$

式中: $Y(x)$ 为栅格单元 x 的产水量; $AET(x)$ 为栅格单元 x 的年实际蒸散量; $P(x)$ 为栅格单元 x 的实际年降雨量。

碳存储计算公式^[17]如下:

$$C_{total}=C_{above}+C_{below}+C_{soil}+C_{dead} \quad (4)$$

式中: C_{total} , C_{above} , C_{below} , C_{soil} , C_{dead} 分别为总固碳量、地上植被固碳量、地下植被储碳量、土壤碳储量和生物腐化碳储量。

(2) 基于斑块形状的生态源地属性识别。景观形状指数是斑块的固有物理属性,可以有效反映斑块形状特征。Hardt 等^[18]和 Forma^[19]指出斑块形状会影响区域的生态过程,诸如植物的蔓延扩张,甚至影响动物觅食策略。选择以斑块周长与相同面积的圆之间的偏离程度来测量其形状复杂程度,公式如下:

$$LSI=\frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (5)$$

式中: LSI 为形状指数; P 为斑块周长; A 指斑块面积。

(3) 基于连通性的生态源地结构识别。源地的空间结构对生物、能量的流动至关重要。景观连通性分析可以从空间结构上反映出物质、能量流通的障碍程度,对生物多样性的保护与生态系统的稳定性具有重要意义。其中,可能连通性指数(PC)是被诸多学者^[20-21]所接受,可以较好地反映生态源地结构重要性的指标。参考前人研究^[22],采用 Conefor 2.6 软件,设置连通阈值为 5 km,连通性概率为 0.5 进行景观连通性分析,公式如下:

$$PC=\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j p_{ij}^*}{A_L^2} \quad (6)$$

式中:PC 为可能连通性指数; n 为斑块数; a_i 和 a_j 为斑块 i 和斑块 j 的面积; A_L 为景观总面积; p_{ij}^* 为斑块 i 与斑块 j 之间扩散的最大可能性。

2.2 生态网络构建方法

2.2.1 阻力面构建与优化 景观阻力面可以反映生物在不同景观类型中迁移的难易度。为了充分考量自然因素与人类活动对景观阻力面的影响,选取土地

利用类型、高程等因素构建景观阻力面。考虑到南昌市与其周边县区在自然条件与人类活动上并无太大差别,因此对不同尺度的阻力不做区分讨论,均采用统一标准。同时参考凌子燕等^[23]对阻力面的设置,将所有潜在影响因素阻力赋值 10~1 000 不等,并基于专家打分法为每一种因素确定权重。阻力面因子构成详情及权重见表 2。

表 2 阻力面因子构成详情及权重
Table 2 Composition details and weight of resistance surface factors

阻力因子	分类指标	阻力值	权重
土地利用类型	水田	50	0.4
	旱地	100	
	有林地	10	
	灌木林地	30	
	疏林地	50	
	其他林地	50	
	高覆盖草地	50	
	中覆盖草地	80	
	低覆盖草地	150	
	河流	400	
	湖泊	350	
	水坑塘库	200	
	滩涂	350	
	城镇建设用地	800	
乡村居民地	500		
工矿用地	1000		
未利用地	200		
高程	<50 m	50	0.15
	50~150 m	100	
	150~350 m	200	
	350~500 m	350	
	>500 m	550	
坡度	0°~5°	20	0.15
	5°~10°	50	
	10°~15°	100	
	15°~20°	150	
	>20°	250	
道路	0~1 km	1000	0.3
	1~2.5 km	500	
	2.5~5 km	100	
	>5 km	10	

采用夜间灯光数据对阻力面进行修正,可以进一步区分人类活动对不同地类的影响。珞珈一号夜光遥感卫星数据比 DMSP-OLS 夜间灯光数据精度更高,参考相关研究^[24],采用珞珈一号夜光遥感卫星数据对阻力面进行修正,修正公式如下:

$$R'=\frac{TLI_i}{TLI_a}R \quad (7)$$

式中: R' 为修正后景观阻力; TLI_i 为栅格 i 的夜间灯光指数; TLI_a 为栅格 i 所属土地利用类型的平均夜间灯光值; R 为初始景观阻力值。

2.2.2 基于 MCR 的生态廊道构建 生态廊道是生态要素在不同生态源地流动的有效路径,对保障生态网络的连通性与维持区域生态网络具有重要意义^[25]。在最小累计阻力模型(MCR)中,生态源地被视为节点,节点与节点之间依靠生态廊道相连,依靠点(源地)与线(廊道)形成生态网络^[26]。MCR 模型可以依据阻力面确定两节点之间生态要素流动的最小累计阻力路径(即生态廊道),被诸多学者所接受与应用。参考前人研究^[27],本研究按照 5 000 加权成本距离设置生态廊道宽度,以 200 000 加权成本距离作为潜在廊道宽度。MCR 模型公式如下:

$$MCR = F_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (8)$$

式中:MCR 为两生态源地之间的最小累计成本;F 为反映任一点最小累积阻力与其到源的距离和景观特征的正相关函数; D_{ij} 为网格 i 到网格 j 的累计距离; R_i 为网格 i 的景观阻力。

2.3 不同尺度生态网络嵌套分析

生态廊道之间客观上存在着重要性的差异,而区分这种差异对维护区域的生态安全,优化生态网络具有重要价值。与传统的通过重力模型分析廊道的差异不同,Linkage Mapper 插件提供了 Linkage Priority 工具,它综合考虑源地的形状、面积、间距;廊道的长度、平均阻力等因素,对廊道的差异识别具有更高的科学性。因此,参考相关研究^[28],将最低气候模拟比设置为 1.15,目标比率的相对优先级设置为 1,廊道权重 0.33 识别所构生态廊道的重要性,并按照自然断点法将结果分成 3 类,以确定廊道等级。

基于电路理论,不同区域间的生态交互过程被视为电路连接,其中电流密大的区域具有较低的生态阻力,物种通过的可能性也越大,是生态夹点(pinch point)。已有研究表明^[29],MCR 模型中廊道宽度并不影响廊道的连接,而电路理论中廊道宽度设置得越大,电流密度将越小,生态夹点也就越少。因此参考前人研究^[30],利用 Linkage Mapper 插件中的 Pinchpoint Mapper 模块,设置 30 000 加权成本距离作为廊道宽度。基于移动窗口理论,识别单位最小费用距离改善值大的区域作为廊道中的障碍点(barriers point),考虑到南昌市廊道附近绿地与人造地表成相间分布,且破碎的高质量生态系统服务功能区之间的平均距离不大,实施大规模生态修复的潜在收益不高,因此通过 Barrier Mapper 模块,以 200 m 为最小搜索半径、200 m 为搜索步长,1 km 为最大搜索半径。将 Pinchpoint Mapper 模块和 Barrier Mapper 模块的结果按自然断点法分成 7 类,提取最高一类作

为生态夹点和障碍点。最后,叠置分析南昌市与环南昌城市圈两个尺度中重合的生态廊道、生态夹点以及障碍点,分析其重合占比,研判生态网络嵌套关系。

3 结果与分析

3.1 生态源地提取结果

3.1.1 基于生态系统服务的源地识别 图 2 显示了单一和综合的生态系统服务重要性空间分布。从单一生态系统服务功能空间分布上看,环南昌城市圈整体生境质量与碳存储空间分布较为均匀,具有较高的空间一致性。生境质量与碳存储能力较高的区域主要集中于奉新县、靖安县、永修县、鄱阳县、丰城市 5 个县境内;而南昌市境内高生境质量与碳存储能力区域较少,以新建区中北部的梅岭、安义县西部与进贤县东南部区域为主,空间分布跨度大且不均匀。土壤保持能力较高的区域集中分布于奉新县、靖安县、永修县、庐山市等区域;南昌市境内仅安义县西部与新建区中部的梅岭区域有较高的抗侵蚀能力。高水源涵养功能的区域空间分布不均,主要集中于奉新县、靖安县、庐山市;而南昌市内水源涵养功能以中心城区为中心,向城市边缘递减,呈环带结构。

基于分位数分类法,将环南昌城市圈综合生态系统服务功能重要性分成 5 类:极重要生态系统服务区(前 20%)、高度重要生态系统服务区(前 20%~40%)、中等重要生态系统服务区(前 40%~60%)、较重要生态系统服务区(前 60%~80%)和一般重要生态系统服务区(前 80%~100%)。南昌市的综合生态系统服务功能显著低于周边县区。具体而言,极重要生态系统服务功能区主要分布于鄱阳县、靖安县和丰城市(面积分别为 1 200.38, 919.91, 881.74 km²),而南昌市境内的极高生态系统服务功能区面积仅为 872.34 km²,占极高生态系统服务功能区面积的 11.29%,且空间分布不均匀,主要集中分布于梅岭、安义县与进贤县境内,呈西多东少、东西分隔的格局。环南昌城市圈内一般重要与较重要生态系统服务功能区则主要分布于南昌市中部与丰城市和高安市境内,南昌市内的一般重要生态系统服务功能区、较重要生态系统服务功能区与中等重要生态系统服务功能区面积为 2 947.34, 2 052.78, 2 429.27 km²(占南昌市总面积的 31.61%, 22.02%, 26.05%)。

南昌市尺度与环南昌城市圈尺度下的 ESI 累计占比结果如图 3A 所示,通过对比 ESI 数量结构,可以发现两个尺度下前 30% 综合生态系统服务功能重要性保持较高的一致性,而在前 30%~60% 段出现了明显差异,说明尺度效应与区域间的生态系统服务

功能结构在这一阈值内存在较为显著的差异。为了进一步确定具体阈值,通过识别南昌市向外的 20 个缓冲区前 50% 的 ESI 的重叠面积,结果如图 3B 所

示,发现在前 35% 的 ESI 时,分位数阈值的极差变化减缓,重叠面积比例差异为 67.72%。因此,考虑筛选前 35% ESI 区域为生态源地。

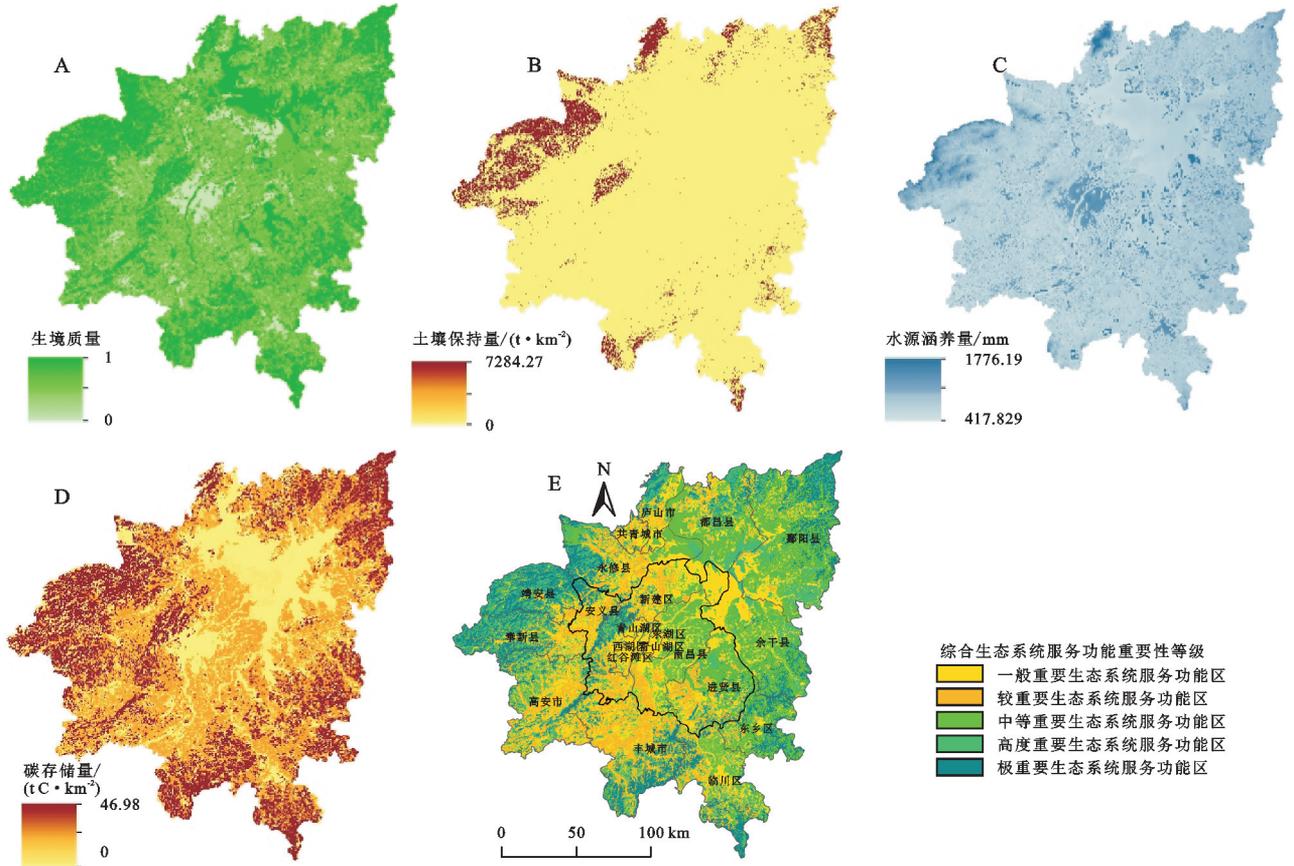


图 2 生态系统服务重要性空间分布

Fig. 2 Importance of regional ecosystem services

以前 35% ESI 区域筛选生态源地后,考虑斑块数量-面积-占比关系来进一步筛选生态源地(图 3C—D)。在南昌市尺度下,面积大于 2 km² 的区域占有所有斑块总面积的 68.09%,数量为 68 个;在环南昌城市圈尺度下,面积阈值大于 8 km² 的斑块累计面积占比 66.32%,斑块数量 145 个,占有所有斑块数量的 0.89%。因此,在南昌市境内以 2 km²,在环南昌城市圈尺度上以 8 km² 为阈值进一步筛选源地。

3.1.2 生态源地综合识别结果 图 4 展示了南昌市和环南昌城市圈两个尺度下初步筛选的生态源地的 PC 值和形状指数以及最终提取的生态源地。通过计算初步筛选生态源地的综合生态系统服务、PC 值与形状指数等权叠加,南昌市尺度提取前 82.35%,共筛选出生态源地 56 个。环南昌市尺度提取前 88.9%,筛选出生态源地 78 个,其中 21 个在南昌市境内(包含部分在南昌市境内),57 个在南昌市周边县区。从源地提取的结果看,南昌市城市东西两侧的生态源地较为分割,且西部生态源地的形状指数与连通性显著高于东部;而在环南昌城市圈尺度下提取的生态源地

在空间分布上较为均匀。总而言之,南昌市境内周边存在大量优质的生态源地,意味着南昌市与环南昌城市圈之间可能存在着紧密的生态流。

3.2 生态网络构建结果

基于 MCR 模型,构建了两种不同尺度下的生态网络,其中图 5A, B 分别为南昌市和环南昌城市圈尺度下生态网络。

在南昌市尺度下,共构建生态廊道 77 条,总长度达 898.21 km,所构廊道形成闭环,可以基本满足南昌市的生态需求;其中 30 条长廊道(大于 10 km),受南昌市中心城区扩张的影响,这些长廊道向城市边缘偏移,将南昌市东西分割、严重破碎的源地进行了连接,构成了南昌市生态网络的骨架;小于 10 km 的生态廊道则主要位于安义县、进贤县境内,将其内部的小源地连接至大源地上,构成南昌市生态网络的脉络。但仍需指出的是,随着南昌市城区向南北扩张,连接东西两侧的生态网络势必会持续向城市边缘移动,存在潜在廊道断裂的可能性,亟需引起重视和加强保护。

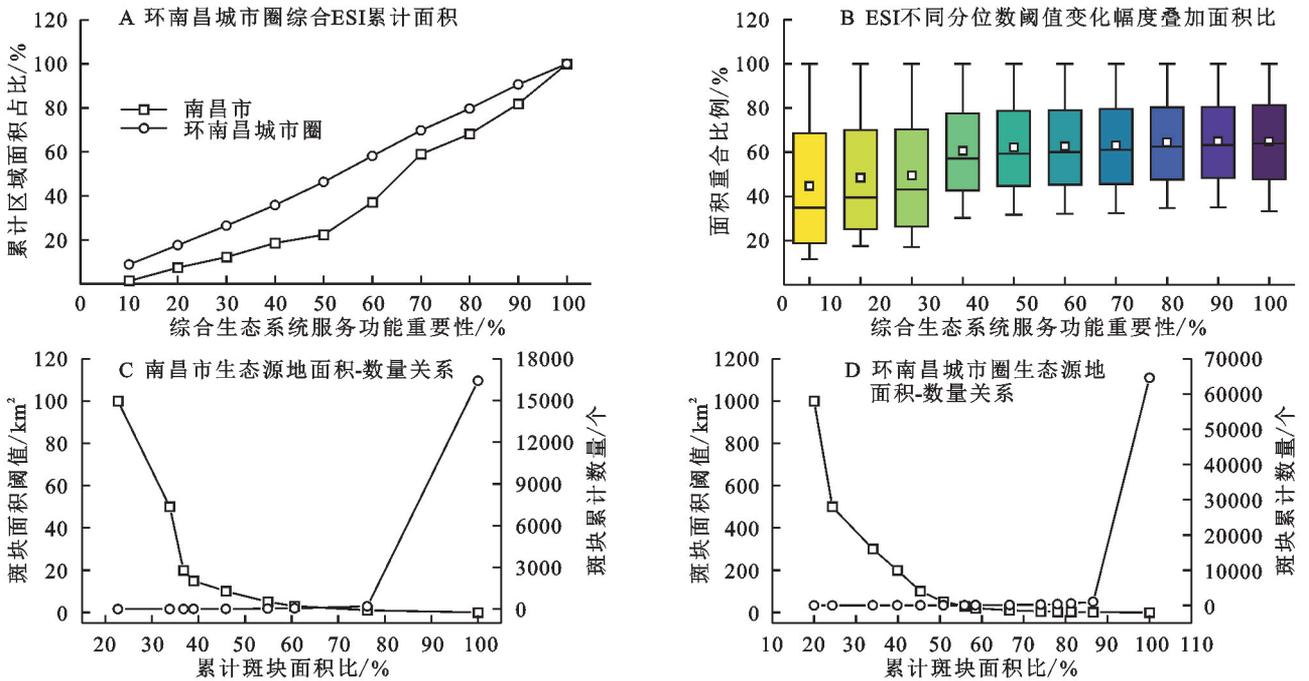


图 3 生态系统服务功能重要性筛选与面积阈值分布

Fig. 3 Recognition of high ESI region and its area threshold distribution

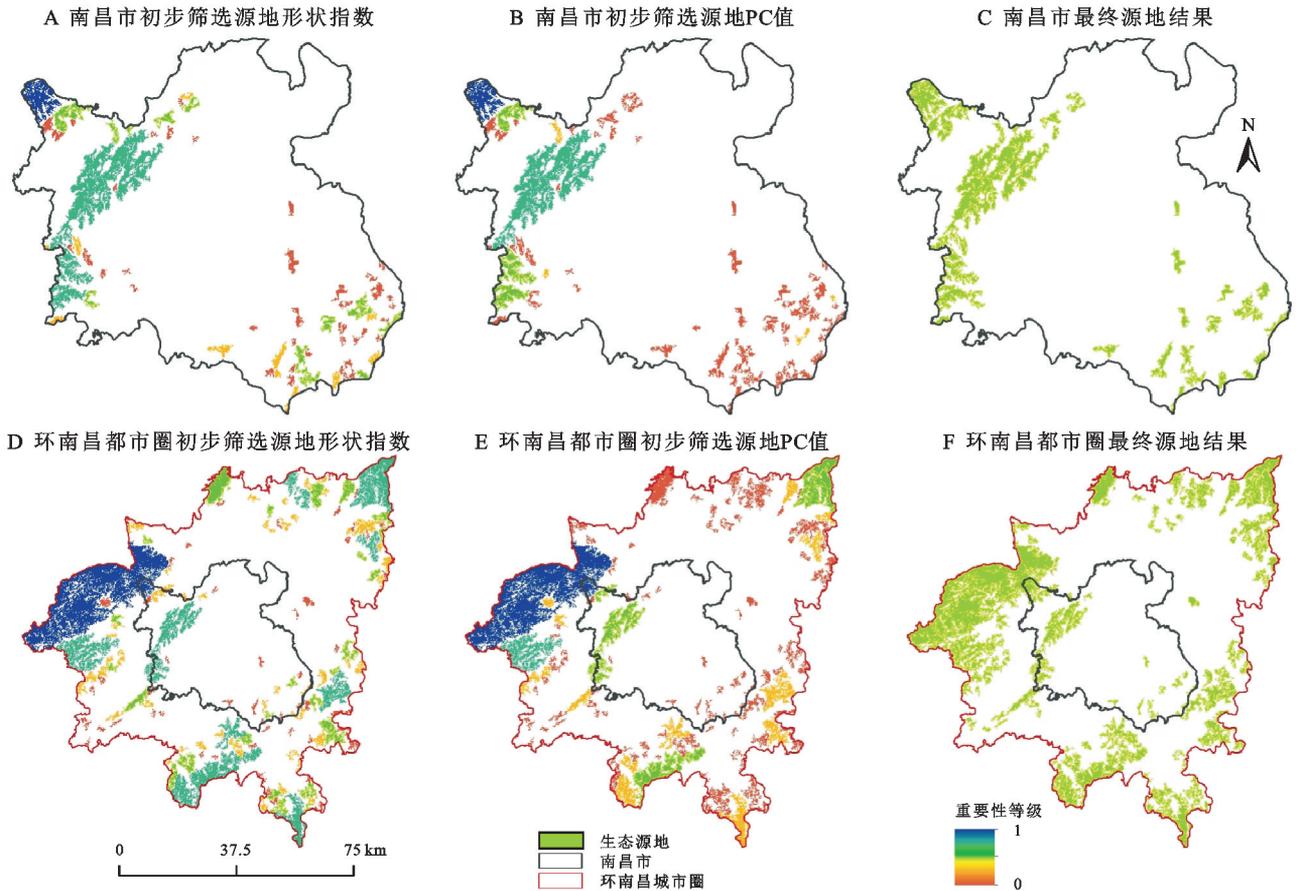


图 4 生态源地综合识别结果

Fig. 4 Comprehensive Identification Results of Ecological Source

在环南昌城市圈尺度下,构建生态廊道 310 条,主要存在于南昌市周边县区,其中用于连接南昌市与周边县区生态源地的廊道有 29 条,说明南昌市与周

边县区存在较强的连接性,在构建网络时不能忽视南昌市与周边县区的互动性。此外,在进贤县与南昌市北部区域廊道宽度显著高于其他区域,意味着这部分

区域有较强的生态修复潜力,可以作为未来生态修复的重点区域。

尽管南昌市尺度下生态网络与环南昌城市圈尺度下的生态网络重叠廊道和生态源地较多,在空间结构上有很高的一致性,但不同尺度间的生态网络仍旧存在不少差异。在环南昌城市圈尺度下,南昌市东北部连接东西源地的廊道显著的向城市外部偏移。

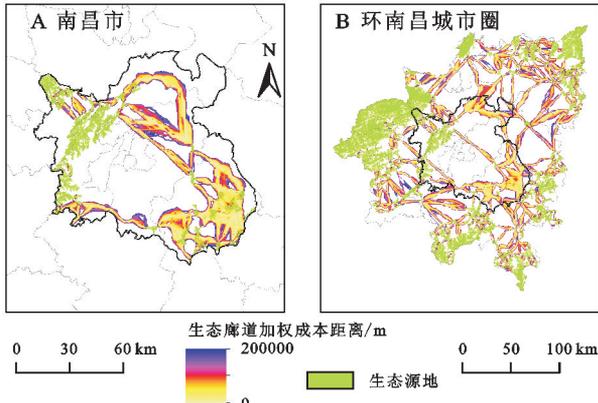


图 5 不同尺度下的生态网络

Fig. 5 Ecological networks at different scales

3.3 生态网络嵌套分析结果

3.3.1 廊道嵌套分析 通过 linkage priority 工具将生态廊道划分成 3 个等级(图 6)。通过对南昌市尺度下与环南昌城市圈尺度下两个生态网络进行嵌套分析(表 3),可以发现在两个尺度下生态廊道在进贤县、南昌县、新建区与安义县境内有重叠部分,重叠廊道有 26 条(包含部分重叠廊道),累计重叠长度 611.78 km,占南昌市生态廊道总长度的 68.11%,这些重合廊道是连接上下尺度,实现生态交互的关键。此外,通过进一步对廊道重要分级重叠分析发现,进贤县境内廊道大多为核心廊道,且有部分廊道在两个尺度下均为核心廊道,生态网络结构十分稳定;而从南昌市整体看,用于连接南昌市东西两侧源地的廊道均为脆弱廊道,城市东西两侧生态网络存在潜在断裂的风险,说明南昌市整体的生态网络结构并不稳定,亟需加强新建区北部和南部、南昌县北部附近生态廊道修复,以维护南昌市东西生态网络之间的连接。

南昌市尺度和环南昌城市圈尺度识别的廊道等级总体呈现核心廊道集中分布在南昌市西南部,脆弱廊道分布在南昌市中部的特征,也存在的较为明显的差异,南昌市西北部安义县境内的生态廊道在不同尺度下表现出不同的重要性等级。

3.3.2 夹点嵌套分析 基于 Pinchpoint Mapper 工具,分别在不同尺度下提取出南昌市生态夹点(图 7)。在环南昌城市圈尺度下,识别与南昌市相关的生态夹点 12 个,其中有 8 个在南昌市境内,4 个位于南

昌市周边区域;而在南昌市尺度下构建的网络中,识别的生态夹点 9 个;不同尺度下,重叠生态夹点 4 个,呈狭长条带状分布。结合南昌市遥感影像发现,所识别的夹点土地利用现状大多为耕地、河岸公园、零散绿地等具有一定生态承载能力的地块。同时,重叠生态夹点有 3 个为连片耕地,而梅岭北侧的重叠生态夹点为零散绿地。

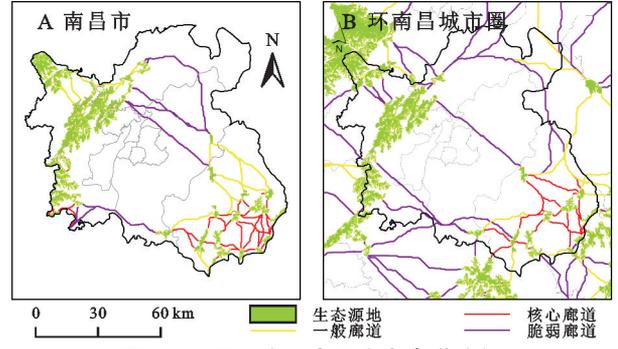


图 6 不同尺度下南昌生态廊道分级

Fig. 6 Classification of ecological corridors in Nanchang City at different scales

表 3 南昌市与环南昌城市圈尺度下重叠廊道信息

Table 3 Overlapping corridors at the scale of Nanchang City and surrounding Nanchang City circle km

南昌市尺度下廊道	环南昌城市圈尺度下南昌市区廊道			总计
	核心廊道	一般廊道	脆弱廊道	
核心廊道	147.49	1.74	3.01	152.25
一般廊道	120.74	53.48	46.30	220.52
脆弱廊道	0.00	26.06	212.95	239.01
总计	268.23	81.28	262.26	611.78

南昌市尺度和环南昌城市圈尺度识别的生态夹点也存在较为明显的不同。南昌市尺度下生态夹点在南昌市西北部较为集中,而环南昌城市圈尺度生态夹点在南昌市西北部则有两个位于南昌市行政区外。且在南昌市东边,生态夹点分布差异也较为明显,环南昌城市圈尺度下在南昌市东部存在更多的生态夹点。

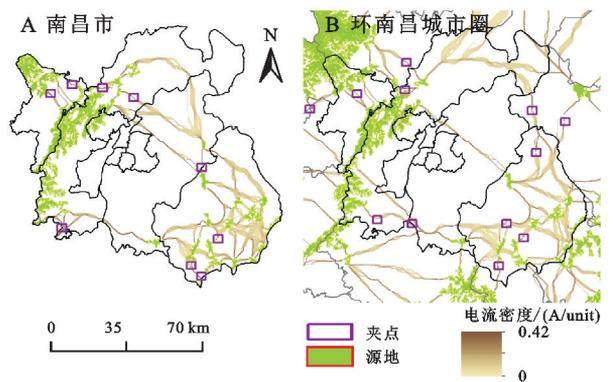


图 7 不同尺度下南昌市生态夹点识别

Fig. 7 Multi scale identification of ecological pinch points in Nanchang

3.3.3 障碍点嵌套分析 图 8 展示了基于 Barriers

Mapper 工具,提取出的障碍点。在南昌市尺度下,识别障碍点 12 个,大多分布于南昌市边缘区域;在环南昌城市圈尺度下,识别南昌市区域障碍点 11 个;在两个不同尺度下,重叠障碍点 8 个,在南昌市尺度与环南昌城市圈尺度下南昌市区域的障碍点的比例分别高达 66.67%,72.73%。说明两尺度间的生态网络结构具有良好的衔接性,生态过程相关性显著。

南昌市尺度和环南昌城市圈尺度识别的障碍点在南昌市西北部较为相似,在南昌市东北部和西南部则存在较为明显的差异,总体呈现出在南昌市尺度下表征为障碍点,而在环南昌城市圈尺度下则不是的特征。

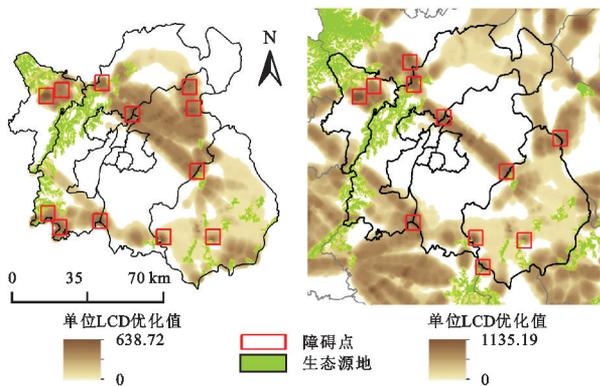


图 8 不同尺度下南昌市障碍点识别

Fig. 8 Multi scale identification of ecological barrier points in Nanchang

4 讨论与结论

4.1 讨论

尺度是景观生态学的三大关键之一,不同尺度的生态网络往往不一致,而这种不一致容易破坏生态系统的连续性,割裂了区域内部与外部的客观联系。本研究通过优化源地提取模型,构建基于“功能-结构-属性”的多尺度生态网络,通过对不同尺度生态网络的嵌套分析发现生态廊道、障碍点和生态夹点既存在共性,也存在差异。

不同尺度下生态网络的共有要素是不同尺度生态过程交互的核心区域。一旦重叠区域被破坏,对两个尺度的生态过程均具有重要的影响。因此,应当优先针对重叠的区域进行保护或修复,以保障不同尺度生态网络的交互。南昌市与环南昌城市圈两个尺度下共重叠廊道长度 611.78 km,共重叠脆弱廊道 262.26 km,对脆弱廊道附近的潜在生态用地进行修复,增加踏脚石,以加强生态网络连接强度。不同尺度下重叠生态夹点 4 个,这 4 个生态夹点在两个尺度间均有重要价值,应当优先进行保护,以维护不同尺度的生态网络安全和保障区域生态稳定。重叠障碍点 8 个,这些障碍点增加了源地之间交互的成本,不利于上下两个尺度的生态网络衔

接与生态交互,所以,应当优先考虑对这些区域进行修复,以增加不同尺度间生态网络的联系。

关注不同尺度生态网络之间的差异对多尺度生态网络结构与功能优化有重要价值。南昌市与环南昌城市圈的生态廊道在南昌市东北部存在显著差异。主要是因为南昌市东北部的阻力面高于相邻县区导致廊道向周边县区偏移,这种廊道偏移会增加源地的生态交互成本,不利于生态网络的稳定性,因此未来的生态修复应重点在南昌市东北部实施。同时,南昌市西部的生态廊道在不同尺度下表现出不同的重要性等级,说明该区的生态廊道在更大的尺度下,存在潜在的破坏风险,应当予以保护和重视。生态夹点在南昌市西北部和东部差异明显,障碍点在南昌市东北部和西南部差异明显,说明南昌市内这些生态夹点和障碍点可以通过南昌市行政区外的生态廊道进行连接,保护南昌市西北部和东部的生态夹点和修复东北部和西南部的障碍点的意义不如其他生态夹点和障碍点。

4.2 结论

(1) 南昌市高质量生态系统服务区域集中于西部的梅岭与东部进贤县境内,结构较为分散,环南昌城市圈境内高质量生态系统服务区域呈“回”字结构,空间分布较为均匀。南昌市高质量生态系统服务区域面积远低于环南昌城市圈,且两个尺度在前 35% 的综合生态系统服务有显著的断层,通过初步筛选生态源地的综合生态系统服务、PC 值与形状指数等权重叠加,南昌市尺度提取生态源地 56 个,环南昌市尺度提取生态源地 78 个,在南昌市境内,两个尺度下提取的源地具有较高的一致性。

(2) 在南昌市尺度下,共构建生态廊道 77 条,总长度达 898.21 km,所构廊道形成闭环,大于 10 km 长廊道将南昌市东西分割的源地连接起来;而在环南昌城市圈尺度下,构建生态廊道 310 条,其中用于连接南昌市与周边县区生态源地的廊道有 29 条,说明南昌市与周边县区存在紧密的生态联系。不同尺度生态廊道差异较为明显,主要集中在南昌市东北部。

(3) 南昌市和环南昌城市圈两个尺度的生态网络在结构与生态过程上具有紧密的联系,两个不同尺度下重叠廊道有 26 条(包含部分重叠廊道),累计重叠长度 611.78 km,重叠生态夹点 4 个,呈狭长条带状分布,重叠障碍点 8 个。此外,不同尺度下生态网络也存在较为明显的差异,在南昌市西北部安义县境内的生态廊道在不同尺度下表现出不同的重要性等级,生态夹点在南昌市西北部和东部差异明显,障碍点在南昌市东北部和西南部存在较为明显的差异。

参考文献(References):

- [1] Bathiany S, Dakos V, Scheffer M, et al. Climate models predict increasing temperature variability in poor countries [J]. *Science Advances*, 2018,4(5): eaar5809.
- [2] Bennett A F. Habitat corridors and the conservation of small mammals in a fragmented forest environment[J]. *Landscape Ecology*, 1990,4(2):109-122.
- [3] 陈竹安,马彬彬,危小建,等.基于 MSPA 和 MCR 模型的南昌市生态网络构建与优化[J].*水土保持通报*, 2021,41(6):139-147.
Chen Z A, Ma B B, Wei X J, et al. Construction and optimization of ecological network of Nanchang City based on MSPA and MCR model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021,41(6):139-147.
- [4] 傅强,顾朝林.基于生态网络的生态安全格局评价[J].*应用生态学报*, 2017,28(3):1021-1029.
Fu Q, Gu C L. Delineation of ecological security pattern based on ecological network [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017,28(3):1021-1029.
- [5] 彭建,吕丹娜,董建权,等.过程耦合与空间集成:国土空间生态修复的景观生态学认知[J].*自然资源学报*, 2020,35(1):3-13.
Peng J, Lyu D N, Dong J Q, et al. Processes coupling and spatial integration: Characterizing ecological restoration of territorial space in view of landscape ecology [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020,35(1):3-13.
- [6] 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[J].*地理学报*, 2018,73(4):701-710.
Peng J, Li H L, Liu Y X, et al. Identification and optimization of ecological security pattern in Xiong'an New Area [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018,73(4):701-710.
- [7] 周小丹,胡秀艳,王君欽,等.江苏省土地生态网络规划中源地的选取研究[J].*长江流域资源与环境*, 2020,29(8):1746-1756.
Zhou X D, Hu X Y, Wang J X, et al. Study on the selection of source sites in the land ecological network planning of Jiangsu Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020,29(8):1746-1756.
- [8] 陈艳,马月伟,潘健峰,等.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[J].*生态学报*, 2023,43(17):7060-7071.
Chen Y, Ma Y W, Pan J F, et al. Ecological network construction of mountainous cities considering rocky desertification sensitivity: A case study of Qujing City, Yunnan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(17):7060-7071.
- [9] 武子豪,张金懿,帕茹克·吾斯曼江,等.县域生态网络构建与优化研究:以河北省曲周县为例[J].*中国农业大学学报*, 2022,27(7):221-234.
Wu Z H, Zhang J Y, Wusimanjiang P, et al. Construction and optimization of county ecological network: A case study of Quzhou County in Hebei Province [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022,27(7):221-234.
- [10] 郭熠栋.武汉市多尺度绿色网络规划研究[D].武汉:华中科技大学,2019.
Guo Y D. Research on Multi-Scale Green Network Planning in Wuhan[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [11] 刘思.芜湖市多尺度生境网络构建研究[D].南京:东南大学,2017.
Liu S. The Study of Multi-Scale Habitat Network Planning of Wuhu City[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [12] 朱捷,苏杰,尹海伟,等.基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建[J].*自然资源学报*, 2020,35(8):1986-2001.
Zhu J, Su J, Yin H W, et al. Construction of Xuzhou ecological network based on comprehensive sources identification and multi-scale nesting [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020,35(8):1986-2001.
- [13] Dong J Q, Peng J, Xu Z H, et al. Integrating regional and interregional approaches to identify ecological security patterns [J]. *Landscape Ecology*, 2021,36(7):2151-2164.
- [14] 魏文飞,包玉,王志泰,等.喀斯特多山城市生境质量对土地利用变化的时空响应:以贵阳市为例[J].*生态学报*, 2023,43(10):3920-3935.
Wei W F, Bao Y, Wang Z T, et al. Spatio-temporal responses of urban environment quality to land use change in mountainous cities of Karst areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(10):3920-3935.
- [15] 王欠鑫,曹巍,黄麟.青藏高原生态系统功能稳定性演化特征及分区[J].*地理学报*, 2023,78(5):1104-1118.
Wang Q X, Cao W, Huang L. Evolutionary characteristics and zoning of ecosystem functional stability on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023,78(5):1104-1118.
- [16] 徐静,杨桂山,许晨,等.湖库水源地流域生态系统服务权衡与多目标优化:以天目湖流域为例[J].*长江流域资源与环境*, 2023,32(1):62-70.
Xu J, Yang G S, Xu C, et al. Trade-offs and multi-objective optimization among ecosystem services in headwater catchments: A case study in Tianmu lake catchment [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,

- 2023,32(1):62-70.
- [17] 毛永发,周启刚,王陶,等.耦合 PLUS-InVEST-Geodector 模型的三峡库区碳储量时空变化及其定量归因[J].长江流域资源与环境,2023,32(5):1042-1057.
Mao Y F, Zhou Q G, Wang T, et al. Spatial-temporal variation of carbon storage and its quantitative attribution in the Three Gorges Reservoir Area coupled with PLUS-InVEST Geodector model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(5):1042-1057.
- [18] Hardt R A, Forman R T T. Boundary form effects on woody colonization of reclaimed surface mines [J]. Ecology, 1989,70(5):1252-1260.
- [19] Forman R T T. Some general principles of landscape and regional ecology[J]. Landscape Ecology, 1995,10(3):133-142.
- [20] Saura S, Estreguil C, Mouton C, et al. Network analysis to assess landscape connectivity trends: Application to European forests (1990—2000)[J]. Ecological Indicators, 2011,11(2):407-416.
- [21] 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[J].生态学报,2022,42(5):1968-1980.
Wang X R, Wan R R, Pan P P. Construction and adjustment of ecological security pattern based on MSPA-MCRC Model in Taihu Lake Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(5):1968-1980.
- [22] 史芳宁,刘世梁,安毅,等.城市化背景下景观破碎化及连接度动态变化研究:以昆明市为例[J].生态学报,2020,40(10):3303-3314.
Shi F N, Liu S L, An Y, et al. Changes of landscape fragmentation and connectivity with urbanization: A case study of Kunming City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(10):3303-3314.
- [23] 凌子燕,蒋卫国,李金崑,等.桂林市典型喀斯特区湿地生态网络研究[J].湿地科学,2022,20(6):739-746.
Ling Z Y, Jiang W G, Li J W, et al. Wetland ecological network of typical Karst area in Guilin City[J]. Wetland Science, 2022,20(6):739-746.
- [24] 李程蓉,陈天.缓解城市热环境的多层级“源-汇”景观网络构建[J].生态学报,2023,43(8):3068-3078.
Li C R, Chen T. Construction of multi-level “source-sink” landscape network to alleviate urban thermal environment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(8):3068-3078.
- [25] Haddad N M, Brudvig L A, Clobert J, et al. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth’s ecosystems[J]. Science Advances, 2015,1(2):e1500052.
- [26] Santos J S, Leite C C C, Viana J C C, et al. Delimitation of ecological corridors in the Brazilian Atlantic Forest[J]. Ecological Indicators, 2018,88:414-424.
- [27] 魏家星,宋轶,王云才,等.基于空间优先级的快速城市化地区绿色基础设施网络构建:以南京市浦口区为例[J].生态学报,2019,39(4):1178-1188.
Wei J X, Song Y, Wang Y C, et al. Urban green infrastructure building for sustainability in areas of rapid urbanization based on evaluating spatial priority: A case study of Pukou in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(4):1178-1188.
- [28] 李欣鹏,李锦生,侯伟.区域生态网络精细化空间模拟及廊道优化研究:以汾河流域为例[J].地理与地理信息科学,2020,36(5):14-20,55.
Li X P, Li J S, Hou W. Research on refined simulation of regional ecological network and corridor optimization: A case study of Fenhe River Basin[J]. Geography and Geo-Information Science, 2020,36(5):14-20,55.
- [29] 宋利利,秦明周.整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J].应用生态学报,2016,27(10):3344-3352.
Song L L, Qin M Z. Identification of ecological corridors and its importance by integrating circuit theory [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10):3344-3352.
- [30] 黄丽萍,向芳芳,陈荣清.基于生态安全格局的县域国土空间生态保护修复关键区域识别:以抚州市宜黄县为例[J].环境工程技术学报,2023,13(4):1334-1344.
Huang L P, Xiang F F, Chen R Q. Identification of key areas for ecological protection and restoration of county territorial space based on ecological security pattern: A case study in Yihuang County of Fuzhou City[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023,13(4):1334-1344.