

# 基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建

朱捷<sup>1</sup>, 苏杰<sup>1</sup>, 尹海伟<sup>1</sup>, 孔繁花<sup>2</sup>

(1. 南京大学建筑与城市规划学院, 南京 210093; 2. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210023)

**摘要:** 传统生态网络构建时, 生态源地的辨识多考虑生境斑块的质量和面积, 较少考虑斑块生态系统服务功能与空间结构的影响; 且多从一个尺度在相对封闭的系统单元内进行网络构建, 缺乏尺度间的嵌套协调, 易导致其结构性错位。通过构建“属性—功能—结构”三位一体的源地综合识别指标体系, 基于最小费用路径、电路理论、移动窗口搜索法等方法, 构建并叠置分析徐州都市区和主城区两个尺度的生态网络, 并提出优化策略。结果表明: (1) 两尺度生态源地重合面积 79.85 km<sup>2</sup>, 廊道重合长度 158.42 km, 重合面积 45.68 km<sup>2</sup>, 重叠区域对多尺度生态网络衔接稳定至关重要, 需重点保护; 对都市区至关重要却缺乏主城区下垫面支撑的 8 条廊道要优先修复。(2) 识别都市区与主城区夹点分别为 17 处与 18 处, 重合 10 处; 障碍点 8 处与 10 处, 重合 5 处。生物迁移关键区域高迁移阻力与大优化潜力并存, 亟需优先修复。生物过程跨尺度的连续性要求采用多尺度级联框架协同应对生态问题。(3) 基于“斑块—廊道—基质”理论从“点—线—面”三个角度提出徐州多尺度嵌套生态网络的优化策略。研究结果可为区域生态安全格局构建、国土综合整治与生态系统修复提供决策参考。

**关键词:** 生态网络; 尺度嵌套; 尺度效应; 生态源地识别; 徐州市

快速城镇化进程中, 城乡土地利用方式的变化不断蚕食生境斑块<sup>[1]</sup>, 阻断生物迁徙廊道, 致使景观连通性降低, 生境破碎化现象日益明显, 严重削弱了生态系统的服务能力, 不利于城乡的可持续发展<sup>[2]</sup>。构建生态网络 (Ecological Network, EN) 是恢复维持生物连通性和生境连续性的重要策略<sup>[3]</sup>, 它利用生态源地与生态廊道恢复破碎化生境斑块间的连接, 形成整体稳定的生态系统功能网络, 实现物种栖息、繁衍、迁徙、扩散等生态过程, 达到以少量的生态用地保障区域生态安全的目的<sup>[4]</sup>。

20 世纪 90 年代以来, 国内外学者从景观生态学、城市生态学、城市规划等多种学科视角出发, 利用最小费用路径<sup>[5]</sup>、图论<sup>[6]</sup>、电路理论<sup>[7]</sup>与多元目标复合<sup>[8]</sup>等方法与模型, 根据研究需求尝试构建了局地、城市、区域、国家等多种尺度的生态网络<sup>[9-13]</sup>。大量研究为生态网络构建提供了较为成熟的规划模式与操作流程<sup>[11]</sup>, 为生态安全格局构建与生态规划战略部署提供了重要依据。但目前生态网络的构建缺乏尺度问题的考量<sup>[12]</sup>, 已有的研究内容多数仅以单个尺度为研究视角, 在相对封闭的系统单元内部进行生态网络构建<sup>[13-15]</sup>, 这既没有考虑到格局—过程互馈的域外效应<sup>[6]</sup>, 也缺乏对复合尺度间网络嵌套格局特征、尺度转换规律、交互作用关系的挖掘。

尺度问题是生态学研究的核心问题, 尺度效应使得景观现象特征、生态过程机制、总体格局结构随观测分析尺度变化产生分异<sup>[17]</sup>, 只有尺度选择与生态系统结构功能相符

收稿日期: 2019-11-01; 修订日期: 2020-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51478217)

作者简介: 朱捷 (1995-), 女, 四川乐山人, 硕士, 研究方向为城乡生态规划。E-mail: zhujianju@163.com

通讯作者: 尹海伟 (1978-), 男, 山东青州人, 博士, 副教授, 研究方向为城乡生态规划、城市与区域规划研究方法。E-mail: qyinhaiwei@163.com

合才能正确揭示格局—过程规律<sup>[18]</sup>，有效应对生态问题。但不同尺度研究的生态对象是一致的，生态过程和格局转化本质上具有跨尺度的连续性，尺度之间的衔接模式直接影响生态功能的发挥<sup>[19]</sup>。尺度嵌套是生态系统层级间重要的衔接模式，通过上下尺度主体结构包含与被包含的层级组织形式，延续上级尺度结构，支配调节下级尺度功能；下级系统作为相对独立单元能通过嵌套结构为上级系统提供结构组分，巩固支撑整体格局，这对生态系统稳定性有重要意义<sup>[20,21]</sup>。但若上下层级主体结构相互脱离，则会破坏系统的整体性，造成其内在机制作用不畅，影响其生态系统服务功能的有效发挥。

传统方法仅从局部着手构建生态网络，忽略了尺度嵌套结构，易出现上下级尺度间生态网络的错位脱节<sup>[22]</sup>，不仅无法利用尺度推绎层级联动解决下级尺度的生态问题，还不利于依靠尺度上推支撑巩固区域性生态格局<sup>[23]</sup>。网络结构错位脱节甚至会导致生态网络的系统性与优化路径的合理性受到质疑。因此，根据不同特征尺度中生态问题的特性与作用机制的差异性，针对性构建多层次生态网络，叠置分析找出不同尺度间网络的矛盾点与承接点，以大尺度生态安全格局为骨架，在小尺度落实调整实践方案与修复策略，优化生态网络的层级嵌套结构，实现景观生态结构—过程—功能的有机耦合，是目前多尺度生态网络规划亟需优化的方法路径。

基于此，本文以徐州为例，通过构建“属性—功能—结构”三位一体的生态源地识别框架提取生态源地，基于最小费用路径、电路理论、移动窗口搜索法等方法，构建“都市区—主城区”两个尺度的生态廊道，识别其生态夹点和障碍点，叠置对比分析两尺度生态网络的嵌套与协调程度，提出“点—线—面”相结合的优化方案。研究成果能够通过保护修复关键战略节点、调整优化要素布局，强化主城区与都市区生态网络的嵌套结构，巩固大尺度生态安全格局，推动区域生态系统功能协同优化。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

徐州市位于116°22′~118°40′E、33°43′~34°58′N之间，是淮海经济区的中心城市，也是徐州都市圈的核心，对于区域发展起辐射带动作用；属温带季风区，四季分明，雨热同期，水系发达；位于冲积平原，地形平坦，耕地广布但林地稀疏，受历史采煤挖矿与老工业基地建设开发影响，“山水林田湖草”生态系统受损较为严重，生态压力大。近年来在“生态文明”思想与“城市双修”建设的推动下，徐州市积极推进生态修复工作，优化城市山水格局，构建多层次绿地系统，生态基底有所恢复。本文根据《徐州总体规划（2011—2030年）》（2017年修订版）以徐州都市区作为大尺度研究范围，总面积为4156 km<sup>2</sup>；以《徐州市土地利用总体规划（2006—2020年）》（2014年修订版）中心城区范围控制线内地域为小尺度研究对象，总面积762 km<sup>2</sup>（图1）。

### 1.2 数据来源与预处理

使用的数据如表1所示。在经过投影变换、配准、裁剪等预处理后，将数据转换为分辨率30 m×30 m的栅格数据，并统一地理坐标和投影坐标系统。

### 1.3 研究方法

研究方法由三部分组成，即生态源地综合识别、生态网络构建、多尺度生态网络嵌套优化。技术路线如图2所示。

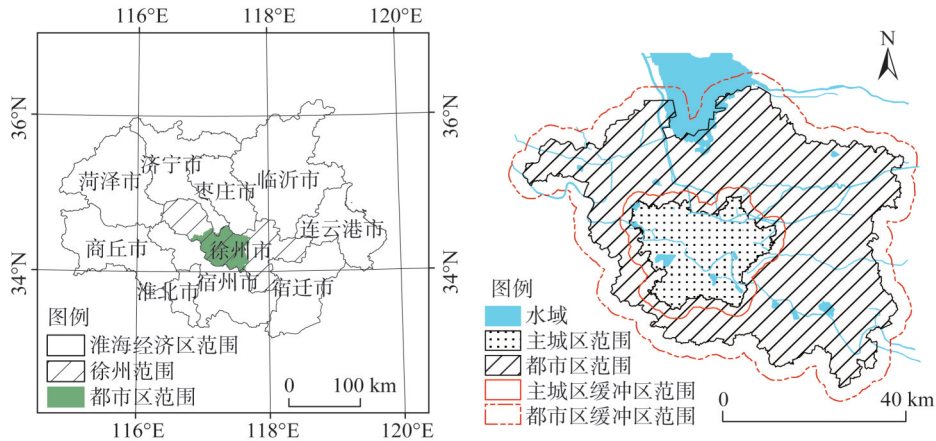


图1 研究区范围

Fig. 1 The location of the study area

表1 数据来源及预处理

Table 1 Data source and processing

数据类型	数据来源	数据处理
土地利用分类数据 (分辨率 2.4 m×2.4 m)	LocaSpace Viewer 2019年2月影像数据: <a href="http://www.locaspace.cn/LSV.jsp">http://www.locaspace.cn/LSV.jsp</a>	目视解译分为农用地、城乡建设用地、未利用地等3大类14小类
夜间灯光数据 (分辨 130 m×130 m)	珞珈一号夜光遥感卫星数据: <a href="http://59.175.109.173:8888/index.html">http://59.175.109.173:8888/index.html</a>	使用2018年11月夜间灯光数据
徐州相关规划专题图件	徐州市自然资源与规划局	提取徐州都市区、主城区行政区划边界
道路	OpenStreetMap: <a href="http://www.openstreetmap.org/">http://www.openstreetmap.org/</a>	道路矢量线性要素

1.3.1 生态源地的综合识别

生态源地在生境面积、斑块数量、生态系统服务功能、源地空间分布等方面的差异,会影响生态廊道构建与关键区域识别,对区域生物多样性保护与维系、生态安全格局构建产生重大影响<sup>[24]</sup>。根据岛屿生物地理学理论,斑块面积的大小与物种承载力、景观异质性成正比。面积越大,保育的物种种类与丰度越高<sup>[25]</sup>,但斑块数量会随面积增大迅速减少。本文根据遥感解译所得土地利用分类结果,提取林地、公园绿地、防护绿地作为生态要素。考虑到生态过程中能量与物质的连续性与流动性以及生态系统服务功能的空间辐射效应<sup>[26]</sup>,参考刘佳等<sup>[7]</sup>研究结果,对都市区、主城区分别设置3 km、2 km缓冲区,

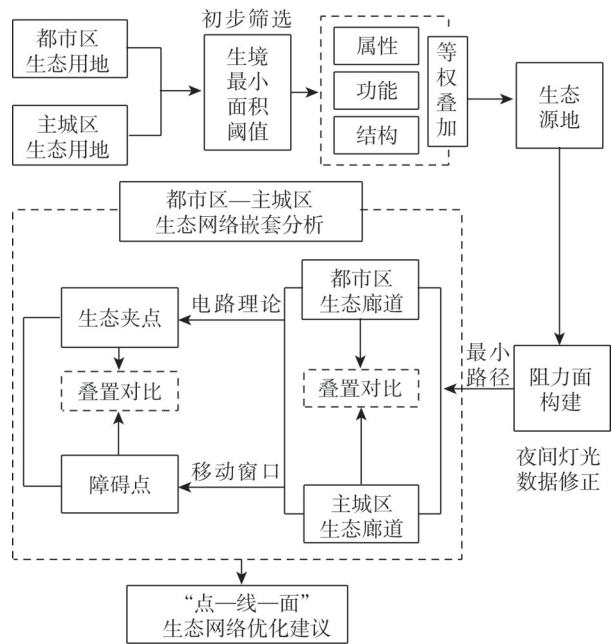


图2 技术路线

Fig. 2 Technical workflow

提取缓冲区范围内生态要素作为备选源地。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筛选剔除零碎斑块,根据生境“属性—功能—结构”三位一体的源地识别框架,对属性、功能、结构及其子因子等价赋权,标准化后以自然断点法将源地重要性等级分为五级,提取较为重要的四级作为生态源地。

### (1) 生境属性

本文以面积大小与斑块形状指数表征生境属性。形状指数以斑块形状与相同面积的圆之间的偏离程度来测量其形状复杂程度<sup>[27]</sup>,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 (km);  $A$  为斑块面积 ( $\text{km}^2$ )。值越小, 斑块越规则, 重要性越高。

### (2) 生境功能

选取生物多样性与水源涵养功能表征生境斑块的生态系统服务功能。生物多样性利用 InVEST 模型 Habitat-quality 模块依据现状土地利用类型敏感性及威胁因子的影响程度生成生境质量指数, 用以评价生境斑块的生态系统适宜物种生存繁衍的潜力<sup>[28]</sup>; 水源涵养功能首先依据谢高地等<sup>[29]</sup>制定的中国陆地生态系统单位面积生态服务价值表中的水源涵养价值当量因子, 确定生态用地水源涵养的基础值, 其次依据河流湖泊及其缓冲区重要性等级赋值作为水源涵养能力修正系数 (表 2)<sup>[15]</sup>, 评价生境斑块的水源涵养能力。

### (3) 生境结构

景观结构与生态过程具有有机互馈联系, 景观空间结构单元相互之间的连续性直接影响能量、物质在斑块间移动的便利程度, 决定生物物流运动的生态过程<sup>[30]</sup>。景观格局指数中可能连通性指数 ( $PC$ ) 与斑块重要性指数 ( $dPC$ ) 可以根据斑块自身属性、距离阈值和可能性阈值估算两个生境节点之间扩散承接生物迁移的可能性大小及移除斑块后景观结构与连通性水平变化程度, 计算斑块在生态网络连通中的重要性<sup>[25,31]</sup>。本文利用 Conefor 2.6, 参照前人研究<sup>[32]</sup>, 分别以 5000 m 和 3000 m 作为迁徙阈值, 连通概率设置为 0.5, 通过计算  $dPC$  值表征生境斑块对潜在生态网络结构的相对重要性。

## 1.3.2 生态网络构建

### (1) 景观阻力面构建及优化

物种水平空间运动的生态过程以及生态功能的流动与传递效率, 受到土地利用方式和人为干扰程度的影响<sup>[33]</sup>。源地生境与目标生境之间的生物活动适宜性越强, 其生态阻力越小, 成为动物迁徙路径的概率越高。本文生态廊道主要针对陆域动物迁移扩散, 将不同宽度面积水域作为不同程度的障碍性因素。参考诸多学者的研究成果<sup>[5,7,12]</sup>以及“三大类”分类标准, 拟定徐州都市区和主城区不同土地利用类型的物种迁移阻力值 (表 3)。

表 2 水源涵养重要性分类赋值表

Table 2 Assignment of the importance of water conservation

影响要素	缓冲区范围/m	重要性赋值
100 m 以上主干河流、 500 hm <sup>2</sup> 以上湖泊	200	1
	400	0.8
	600	0.6
	800	0.4
50~100 m 河流、 100~500 hm <sup>2</sup> 湖泊	200	0.8
	400	0.6
	600	0.4
20~50 m 河流、 50~100 hm <sup>2</sup> 湖泊坑塘	200	0.6
	400	0.4
20 m 以下河流、 50 hm <sup>2</sup> 以下坑塘	200	0.4

表3 徐州市都市区及主城区土地利用类型阻力值设定

Table 3 Resistance setting of land use types in Xuzhou metropolitan area and main urban area

大类	小类	细分	分类依据	都市区		主城区				
				分类划分	阻力值	分类划分	阻力值			
农用地	耕地	水田	—	—	50	—	50			
		旱地	—	—	100	—	80			
	林地	—	面积/hm <sup>2</sup>	>2000	1	>30	1			
				200~2000	10	10~30	10			
			<200	20	<10	20				
建设用地	商服公服用地	城市商服用地	—	—	600	—	800			
		农村商服用地	—	—	400	—	600			
	工矿用地	—	—	—	1000	—	800			
	公用设施用地	瞻仰景观休闲用地	公园绿地	—	—	30	公园绿地	30		
			防护绿地	—	—	50	防护绿地	10		
	住宅	城市居住用地	用地类型	一类居住	1000	一类居住	1000			
				二类居住	1000	二类居住	1000			
				三类居住	600	三类居住	600			
		农村居民点	面积/hm <sup>2</sup>	>50	1000	>50	1000			
				20~50	500	20~50	600			
				<20	300	<20	400			
	交通运输用地	交通场站	—	—	—	1000	—	600		
					铁路	—	—	800	—	1000
					高速	—	—	1000	—	900
公路					宽度/m	>40	800	>40	700	
				20~40	600	20~40	500			
				≤20	400	≤20	300			
未利用地	未利用土地	城区未利用地	面积/hm <sup>2</sup>	>10	500	>10	500			
				≤10	100	≤10	100			
		农村荒地	面积/hm <sup>2</sup>	>30	500	>10	500			
				≤30	200	≤10	200			
	其他土地	河流水面	宽度/m	>100	1000	>50	1000			
				50~100	500	30~50	500			
				<50	100	<30	100			
		湖泊水面	面积/hm <sup>2</sup>	>100	1000	>80	800			
				50~100	200	30~80	200			
				<50	20	<30	20			

传统景观阻力面构建主要依据不同土地利用方式赋值，忽略了同一土地利用类型在不同开发建设强度下对景观阻力值的影响。夜间灯光数据能够较好表征人类活动强度及空间分布状况，因而本文利用夜间灯光数据对基本景观阻力面进行了修正，计算公式为<sup>[14]</sup>：

$$R_i' = \frac{TLL_i}{TLL_a} \times R_i \quad (2)$$

式中： $TLL_i$ 为栅格*i*所在斑块的平均灯光指数； $TLL_a$ 为栅格*i*对应的区域内土地利用类型*a*的平均灯光指数； $R_i$ 为基于土地覆被类型赋值的栅格*i*的景观类型的基本阻力值。

### (2) 基于最小费用路径构建生态廊道

最小费用路径方法 (Least-cost path method, LCP) 能够计算物种在源地间迁徙经过不同阻力的景观面所克服的累计阻力值, 模拟选择最小费用路径。利用 Linkage Mapper Toolkit 工具在 ArcGIS 10.2 上提取物种迁移扩散的最小阻力廊道<sup>[34]</sup>, 按照 5000 加权成本距离设置生态廊道宽度, 以 20000 加权成本距离作为潜在生态廊道宽度。

### (3) 基于电路理论与移动窗口搜索法识别关键节点

电路理论借鉴物理学中电子在电路中随机游走的特性, 模拟生物在异质景观中迁移运动的过程<sup>[35]</sup>。电流密度越大的区域物种通过的可能性越大, 是生态廊道中的生态夹点 (Pinch Point)。这些关键节点即使出现小规模破坏也会对区域连通性产生极大影响。利用 Linkage Mapper 插件中的 Pinchpoint Mapper 模块, 选择 “all to one” 模式迭代运算。鉴于廊道宽度不会影响夹点位置与区域连通性<sup>[36]</sup>, 本文设置 30000 加权成本距离作为廊道宽度, 电流密度按自然断点法分为四类, 提取最高一类作为生态夹点。

移动窗口搜索法是将搜索窗口中心像元数值替换为源地之间最小耗费距离值, 用单位最小费用距离改善值表征障碍点移除后连通性的改善状况<sup>[37-39]</sup>, 数值大的区域即廊道中的障碍点 (Barriers Point), 修复后对实现源地间连通性作用越强。利用 Linkage Mapper 插件中的 Barrier Mapper 模块选择 “Maximum” 模式, 都市区以 300 m 为半径, 主城区以 100 m 为半径迭代运算。

### 1.3.3 多尺度生态网络嵌套格局构建与优化

有机联结不同尺度的生态网络能形成 “多尺度的空间嵌套体”<sup>[20]</sup>, 既能保证大尺度结构对小尺度的支配调节, 也能通过跨尺度共有关键要素传递生态效能。利用 ArcGIS 10.2 的空间分析和地理统计工具, 以都市区和主城区两个尺度中重合的生态源地数量及其占比、重要廊道数量占比及长度占比、夹点重合占比、障碍点重合占比为指标, 判读尺度间生态网络衔接嵌套关系与结构形态特征。

受土地利用方式与承载功能差异影响, 生态空间与生态要素在都市区与主城区范围内占比不同, 共有生态要素占比不能与两研究区面积比例关系直接比较。本文以共有生态要素占主城区范围内都市区生态要素的比例作为判断小尺度对大尺度功能结构延续的依据。共有要素占主城区范围内的都市区生态网络结构要素的比例越高, 表明小尺度对大尺度生态网络结构的功能传导性越好, 对区域生态格局的支撑力度越大, 优化小尺度生态网络对大尺度生态网络的完善作用越强。鉴于各关键要素的区位差异, 以大尺度生态网络骨架为前提, 在小尺度上根据地块具体问题提出应对策略, 从 “点—线—面” 三方面提出生态网络优化方案, 推动徐州构建符合生态系统发展规律的生态安全总体格局。

## 2 结果分析

### 2.1 生态源地综合提取

都市区与主城区的生态要素斑块占总源地面积的累计比例如图 3、图 4 所示。随斑块面积缩小, 斑块数量快速增加, 但对区域生态用地面积的贡献比例也快速下降。

都市区斑块面积从 0.002 hm<sup>2</sup>到 4817.44 hm<sup>2</sup>不等, 200 hm<sup>2</sup>以下 1248 个斑块对区域生态用地面积贡献不足 18%。主城区斑块面积从 0.002 hm<sup>2</sup>到 2180.49 hm<sup>2</sup>不等, 30 hm<sup>2</sup>以下

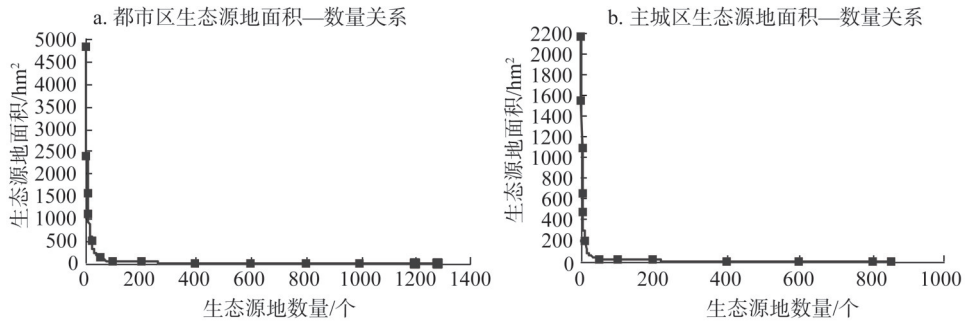


图3 生态源地面积—数量关系

Fig. 3 Area-quantity relation diagram of ecological source area

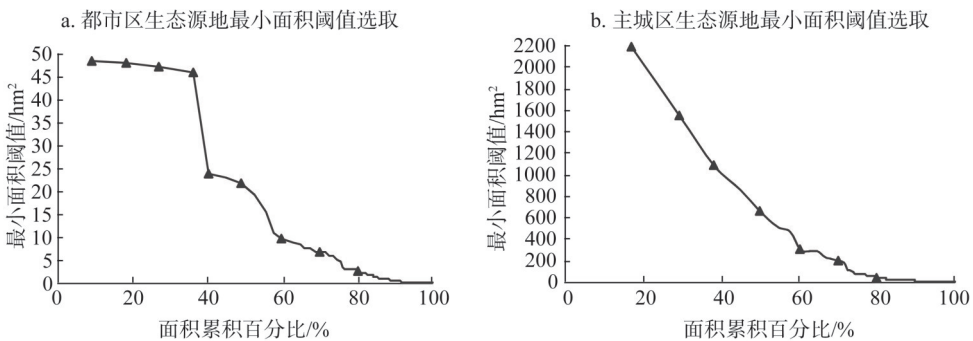


图4 生态源地最小面积阈值选取

Fig. 4 Selection of minimum area threshold of ecological source area

816个斑块对区域生态用地面积贡献亦不足18%。面积大小对生境异质性与物种承载力有决定性作用,零散小面积斑块对区域生态安全维护和生态系统功能发挥作用有限。本文以 $200\text{ hm}^2$ 和 $30\text{ hm}^2$ 为源地选取最小面积阈值剔除零碎斑块,再按照综合因子评级结果分别提取都市区与主城区生态源地各32个,总面积分别为 $41099.16\text{ hm}^2$ 、 $10064.99\text{ hm}^2$ ,单因子、层级因子和综合因子等级评估如图5、图6所示。

由图5可知,都市区生态源地围绕主城区外围,在西南、东南、东北三个方向相对集中呈楔形分布。微山湖湿地保护区、潘安湖生态区、大洞山森林自然保护区、汉王生态公益林、云龙湖风景名胜区、泉山森林公园、吕梁山风景区等大型源地植被覆盖率较高,生态系统服务功能明显。主城区内城市建设用地侵占蚕食生态空间导致大型源地缺乏,城郊地区则因农耕地未纳入源地范围而出现空白区域。

由图6可知,云龙湖风景名胜区、泉山森林公园、吕梁山风景旅游区、潘安湖生态区等大型源地分布在主城区边缘地带,受城市建设活动干扰较小,生境质量较高;五山公园、九里湖国家湿地公园、大龙湖景区等城市公园穿插于主城区中心地带,可充当“踏脚石”斑块以有效提升城区景观连通性;小型街头绿地、滨水景观湿地、防护绿带零散分布,对区域整体生态效能有限,但有利于增加局部城市空间的生态景观价值。

## 2.2 生态廊道构建

如图7a所示,都市区构建生态廊道84条,长度介于 $0.03\sim 33.89\text{ km}$ 之间,总长度达 $325.30\text{ km}$ ,覆盖面积为 $375.35\text{ km}^2$ 。西部廊道线性明显,但受源地面积大小与空间区位分布、建成区高阻力基底阻隔等因素影响,生态廊道狭窄曲折,围绕主城区外围呈环状

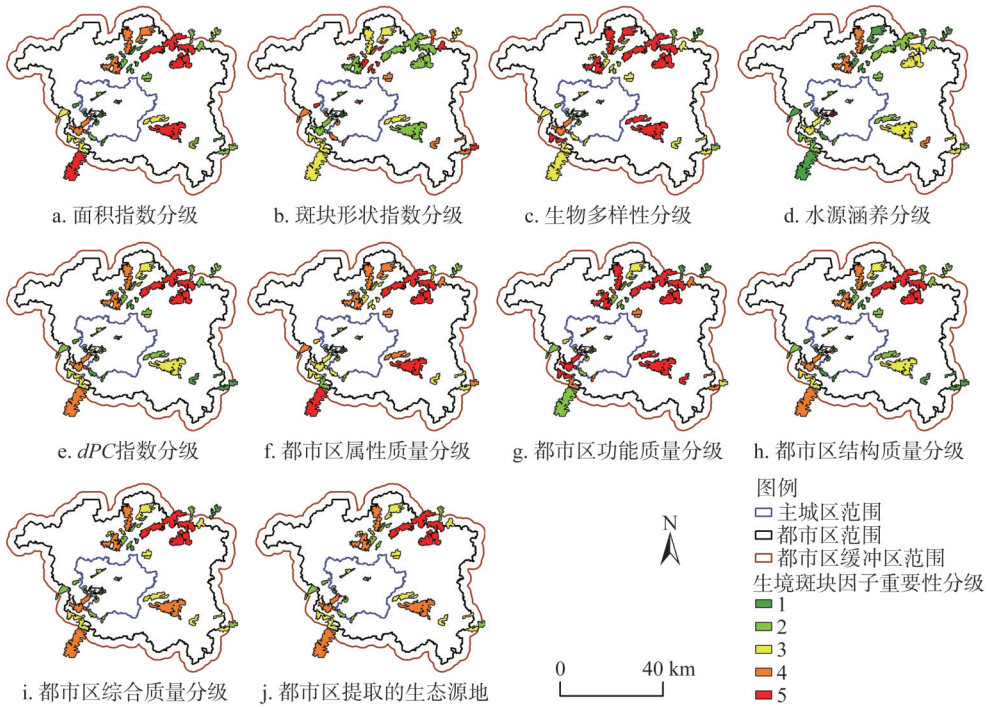


图5 都市区生境斑块因子评价与生态源地选取

Fig. 5 Factor evaluation of habitat patches and ecological source extraction in metropolitan area

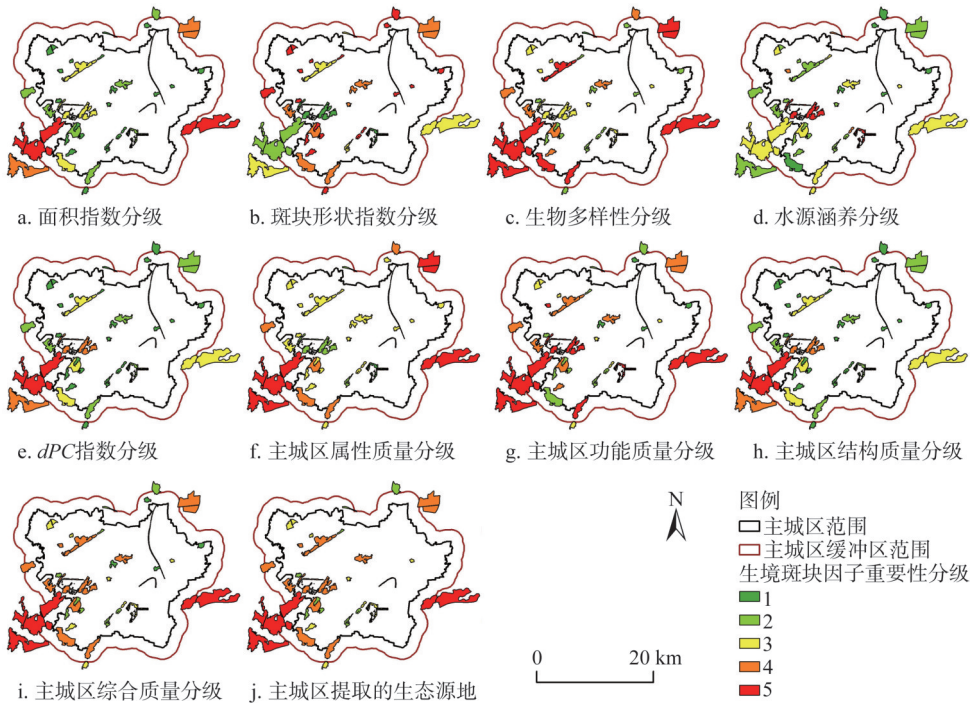


图6 主城区生境斑块因子评价与生态源地选取

Fig. 6 Factor evaluation of habitat patches and ecological source extraction in main urban area



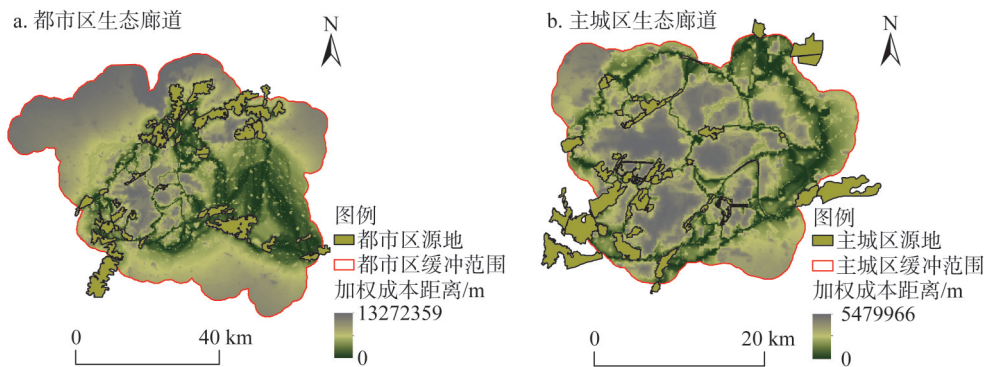


图7 都市区及主城区生态廊道

Fig. 7 Ecological corridors in metropolitan and main urban areas

分布；东部本底以低阻力值的农田为主，与吕梁山风景区辐射效应两相叠加，迁移路径无明显阻力低谷呈面状分布。

如图7b所示，主城区构建生态廊道167条，长度介于0.03~32.20 km之间，总长度250.35 km，覆盖面积为98.44 km<sup>2</sup>。主城区范围内，廊道宽度与分布密度与到中心区距离呈反比，中心地区廊道曲折狭窄，生境脆弱易发生断裂。受城市建成区阻隔影响，部分远距离源地间虽有潜在连接趋势，但未形成连通廊道；道路用地分割源地，1 km以下短距离连接廊道总计113条。

### 2.3 生态夹点与障碍点识别

都市区识别生态夹点17处，主城区识别生态夹点18处（图8a、图8b）。两尺度夹点集中分布在主城区范围内，现状用地主要为零散街头绿地、城市公园、滨河绿地、连片农田、小型坑塘湿地。关键夹点多呈狭长条带状分布，在地域空间上与主城区范围内主要廊道重合。通过构建生态网络，划定管控范围可以有效保护夹点区域生境质量。

都市区提取障碍点8处，主城区提取障碍点10处（图8c、图8d）。障碍点也多分布于主城区中心地带生态廊道范围内，现状用地为徐州东站与徐州站等交通场站用地、连片工业用地、大型居住社区。这些用地占地面积大且下垫面硬化程度高，对生境割裂性强。适当调整用地类型与规模、补充穿插小型“踏脚石”斑块弱化障碍点，能极大优化源地间的连通性。

### 2.4 尺度间生态网络嵌套分析与优化

#### 2.4.1 生态源地与生态廊道嵌套分析

叠置主城区与都市区的生态源地与廊道可知（图9a、图9b），两尺度共有源地个数11个，面积79.85 km<sup>2</sup>，重合源地占主城区与都市区源地总面积的79.34%和24.55%。两尺度间重合廊道虽仅有25条，但叠合长度158.42 km，面积45.68 km<sup>2</sup>，分别占主城区与都市区廊道长度的36.72%、28.26%，面积的53.60%、14.06%。这些重合源地与廊道是实现两尺度间生态过程连续的支撑性要素，需要重点保护优化。

共有源地和廊道对区域性生态网络的绝对贡献值较低，但共有源地与在主城区范围内的都市区源地完全重合，共有廊道占在主城区范围内都市区廊道总长度的52.85%，总面积的69.92%，表明两尺度间生境嵌套衔接基底较好，生物过程能够有效实现。由矿坑山体修复建设的五山公园和九里山湿地公园是形成贯穿主城区廊道的关键，需要重点管

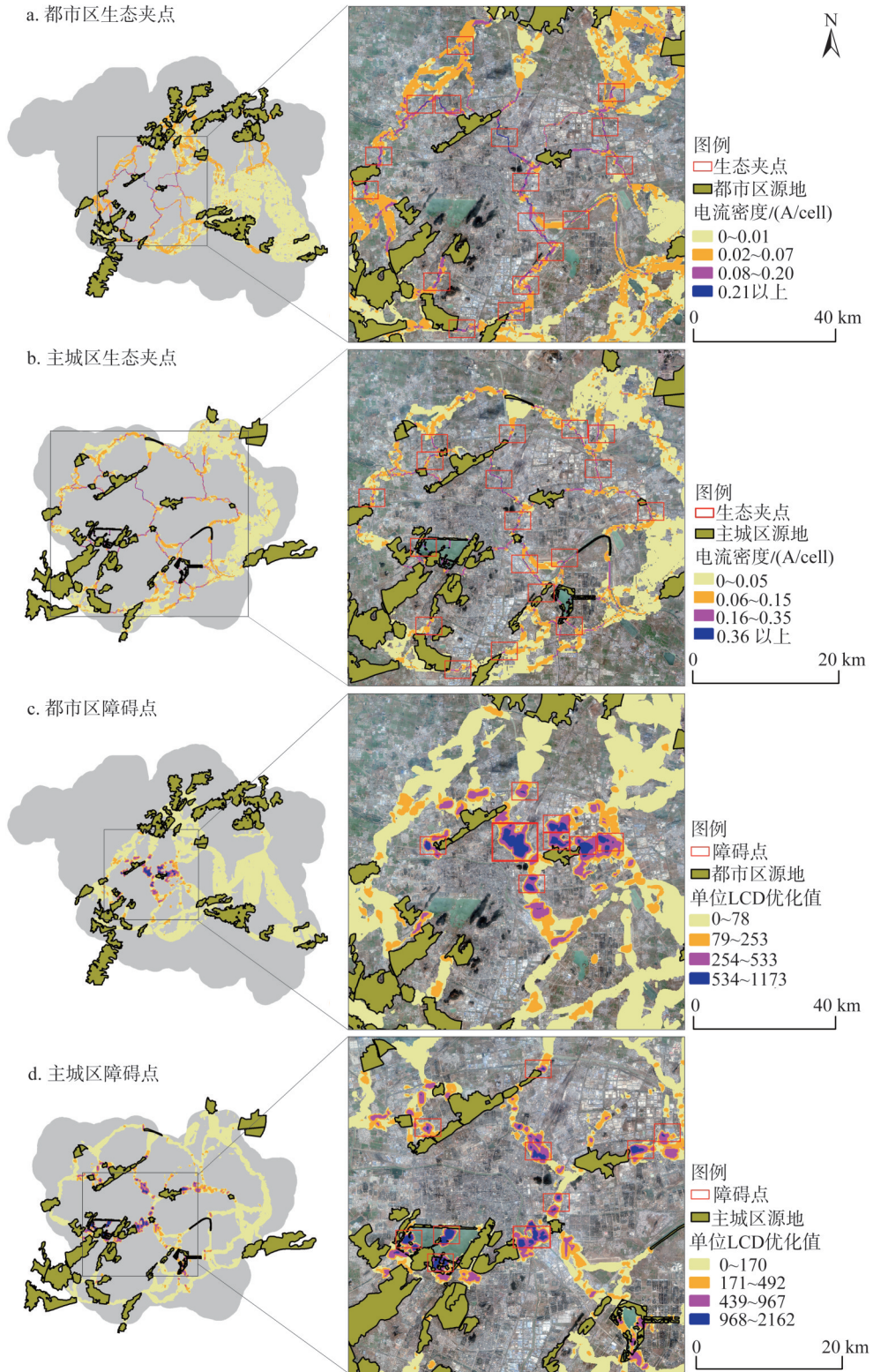


图8 不同尺度生态夹点、障碍点识别

Fig. 8 Identification of pinch points and barrier points at different scales

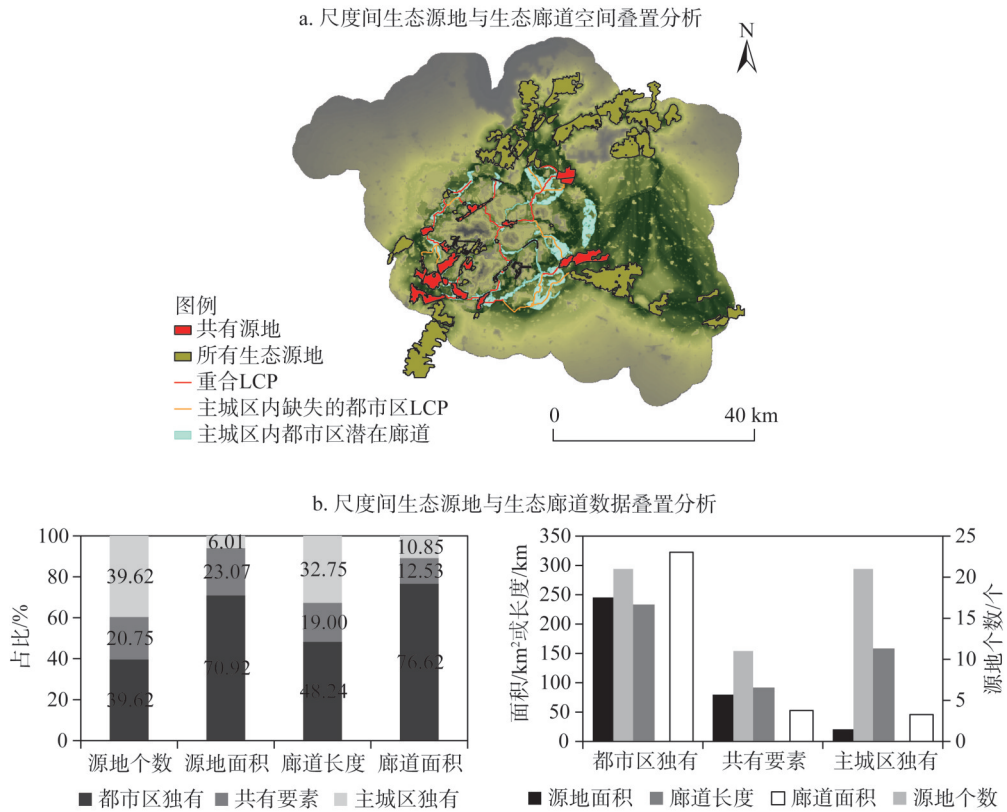


图9 不同尺度生态源地、廊道叠置分析

Fig. 9 Superposition analysis of ecological core areas and corridors of different scales

控提升功能。都市区在主城区范围内仍有8条廊道未与主城区廊道匹配衔接，但全部位于在主城区范围内都市区的潜在廊道区域，生态空间发展可挖掘潜力大。

### 2.4.2 生态夹点与障碍点嵌套分析

叠置两尺度生态夹点与障碍点可知(图10)，两尺度间重合夹点10处，重合障碍点5处，分别占都市区与主城区夹点数量的58.82%、55.56%，障碍点数量的62.50%、50.00%。重要节点跨尺度高度重合显示出嵌套式网络结构生态特征的一致性，两尺度间的生态过程显著相关。都市区生态问题解决与区域生态系统物质能量交换实现需要主城区支撑，主城区关键夹点保护与障碍点修复对保障整体生态网络的衔接、连通具有重要作用<sup>[40]</sup>。利用生态网络嵌套结构识别在两个尺度都发挥重要作用的关键节点，能有效指导生态保护修复资金的科学投放，优先修复这些关键区域能显著提高生态网络的各项生态服务功能。

此外，五山公园到九里山湿地公园、泉山森林公园、潘安湖湿地公园之间的三条生态廊道区域既是生态夹点也是障碍点的集中分布区域。重要生态廊道连通不畅表明徐州主城区当前生境状况依然比较严峻，若不能及时修复障碍点，小尺度环境因子的负效应会随尺度扩大不断累积，影响区域景观格局与生态功能。建议制定这些片区关键生态节点的修复计划，以较少成本投入获得大幅生态系统服务功能提升，亦有利于生物多样性的恢复与维系。

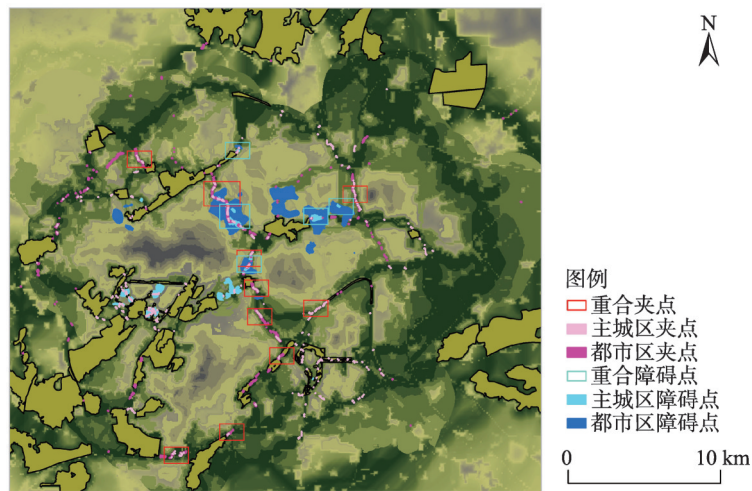


图10 生态夹点与障碍点的叠置对比分析

Fig. 10 Comparative analysis of the superimposed areas of pinch points and barrier points

### 2.4.3 徐州市生态网络优化建议

参照景观生态学原理中的“斑块—廊道—基质”模式，从“点—线—面”三个层面提出以下徐州生态网络修复的具体建议：

(1) “点”层面：率先修复城区与区域生态夹点与障碍点的重叠区域，调整局部生态过程带动区域景观格局优化。根据徐州土地利用方式存在的生态问题，强化交通场站用地周围防护与景观绿地建设，以沿街绿道、街头绿地串联大型用地内部散碎生境斑块。另外，需注重既有生态源地的保护与质量提升，管控人类活动对大型源地的内部扰动，丰富植被群落结构，提升小型斑块的生境质量。

(2) “线”层面：划定重要生态廊道控制范围，严格管控都市区与主城区重叠生态廊道内的用地建设强度与开发方式。根据生态廊道路径质量与建设情况，积极推动区域层面重要但在主城区范围内缺失廊道的建设，培育含有生态夹点的潜在廊道，强化未形成明晰路径的生态廊道，对部分过长廊道的脆弱点或易发生断裂处增加口袋公园、湿地水域等“踏脚石”斑块以提高源地联系强度，进而强化完善生态网络的整体结构。另外，徐州水网密布、水域较多，应促进陆生动物生态廊道与水域廊道相结合，打造蓝绿相间的生态网络体系。

(3) “面”层面：以区域生态网络结构为骨架，通过尺度转换与尺度推绎，有效指导主城区生态网络的结构布局与要素调整，确保区域景观格局与生态功能在主城区层面有效延续和发挥；主城区应修复问题区域、保护与优化重点区域，以期提高源地间的连通性，保障与支撑区域生态过程的实现。

## 3 结论与讨论

### 3.1 结论

本文选取徐州市都市区和主城区两个尺度为研究对象，构建“属性—功能—结构”框架筛选生态源地，借助最小路径方法、电路理论和移动窗口搜索法提取生态廊道、生态夹点和障碍点，构建了研究区两个尺度的生态网络，通过叠置两尺度生态要素对比分

析尺度间生态网络的嵌套衔接关系,并以生态网络的系统性、整体性优化为目标,基于“斑块—廊道—基质”理论,从“点—线—面”三个方面提出了生态网络的修复建议与优化策略,可为徐州区域生态安全格局优化提供参考。主要结论如下:

(1) 在基于“源地—廊道—关键节点”范式构建的都市区与主城区两个尺度的生态网络中,重合生态源地 79.85 km<sup>2</sup>,与都市区在主城区范围内的源地完全重合;重合廊道总长 158.42 km,面积 45.68 km<sup>2</sup>,占在主城区范围内的都市区廊道长度的 52.85%和面积的 69.92%。重合区域是实现区域整体生态安全格局稳定与生物过程连续的关键区域,需重点保护。对属于都市区重要廊道却缺乏主城区下垫面支撑的 8 条廊道,也需纳入廊道管控范围优先修复。

(2) 生态夹点与障碍点分别是源地间物种迁移通过可能性大与运动受阻强的区域,应优先保护与修复。识别都市区与主城区夹点 17 与 18 处,重合 10 处;障碍点 8 处与 10 处,重合 5 处。研究区两尺度上障碍点与生态夹点在尺度间的高度重合表明生物过程具有跨尺度的连续性;相互之间的高度重叠表明需要保护与修复的生态重要区域与生态问题区域高度一致且分布相对集中。构建多尺度级联框架、制定跨尺度格局优化协同方案能有效应对生态问题。

### 3.2 讨论

受尺度效应影响,景观格局和生态过程间的互动随尺度变化产生变异性<sup>[16]</sup>,在不同尺度上构建的生态网络存在差异。目前关于生态网络的构建与模拟大多以单一尺度为基准,未能很好考虑到不同尺度间生态网络结构的差异性与衔接性。尺度间网络结构的脱节错位会致使局部网络对区域网络的支撑功能有所降低,投入资金技术管控修复局部生态网络中的廊道和重要节点对区域整体性优化带动作用有限。本文基于综合源地识别框架构建了“源地—廊道—节点”生态网络结构,以多尺度间生态网络层级嵌套和整体性优化为目标,通过叠置识别城区尺度与区域尺度生态网络的重合要素,提出了将尺度间重合的生态源地与生态廊道,区域在城区尺度上缺失但有廊道培育潜力的区域,生态夹点与障碍点重叠的区域作为优先保护与修复对象的生态策略。这既可为国土空间规划中城市开发管控边界确定、生态红线划定、重要生态空间的辨识与保护修复提供科学依据与技术支撑,也能有效推动多尺度生态网络嵌套结构的合理构建与优化。

区域性生态网络贯穿了生态空间、生产空间、生活空间,不同空间区位承载的主要功能不同,需要生态网络发挥的功能具有显著差异。本文仅从物种迁移的生态功能角度出发构建生态网络,缺乏对游憩休闲、人文审美、经济发展等复合功能的考虑。在未来的城市与区域生态网络构建时,需要进一步综合考虑生态改善、经济发展、社会公平等多样化需求,优化源地选取因子与阻力面赋值标准,推动复合型生态网络的构建。

### 参考文献(References):

- [1] 尹海伟,孔繁花,祈毅,等.湖南省城市群生态网络构建与优化.生态学报,2011,31(10):2863-2874. [YIN H W, KONG F H, QI Y, et al. Developing and optimizing ecological networks in urban agglomeration of Hunan province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10): 2863-2874.]
- [2] YOUNG C H, JARVIS P J. Measuring urban habitat fragmentation: An example from the Black Country, UK. *Landscape Ecology*, 2001, 16(7): 643-658.
- [3] BENNETT A F. Habitat corridors and the conservation of small mammals in a fragmented forest environment. *Landscape Ecology*, 1990, 4(2): 109-122.
- [4] BROSE U. Improving nature conservancy strategies by ecological network theory. *Basic and Applied Ecology*, 2010, 11

- (1): 1-5.
- [5] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于MCR模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化. 自然资源学报, 2019, 34(4): 771-784. [HUANG M Y, YUE W Z, FENG S R, et al. Analysis of spatial heterogeneity of ecological security based on MCR model and ecological pattern optimization in the Yuexi county of the Dabie Mountain Area. Journal of Natural Resources, 2019, 34(4): 771-784.]
- [6] 刘歆, 角媛梅, 王梅, 等. 基于图论的哈尼梯田区河渠网络关键节点和廊道评价. 生态学杂志, 2018, 37(1): 287-294. [LIU X, JIAO Y M, WANG M, et al. Evaluation of key nodes and corridors of river and canal network in Hani Rice Terraces based on graph theory. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(1): 287-294.]
- [7] 刘佳, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化. 生态学报, 2018, 38(12): 4363-4372. [LIU J, YIN H W, KONG F H, et al. Structure optimization of circuit theory-based green infrastructure in Nanjing, China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4363-4372.]
- [8] 王晶晶, 尹海伟, 孔繁花. 多元价值目标导向的区域绿色基础设施网络规划: 以古黄河周边区域为例. 山东师范大学学报: 自然科学版, 2016, 31(3): 77-83. [WANG J J, YIN H W, KONG F H. Developing green infrastructure networks based on diverse value objectives: A case of the surrounding area of Ancient Yellow River. Journal of Shandong Normal University: Natural Science, 2016, 31(3): 77-83.]
- [9] CUNHA N S, MAGALHAES M R. Methodology for mapping the national ecological network to mainland Portugal: A planning tool towards a green infrastructure. Ecological Indicators, 2019, 104: 802-818.
- [10] 胡道生, 宗跃光, 许文雯. 城市新区景观生态安全格局构建: 基于生态网络分析的研究. 城市发展研究, 2011, 18(6): 37-43. [HU D S, ZONG Y G, XU W W. Research on the construction of landscape ecological security pattern in the new urban region development based on ecology network analysis. Urban Studies, 2011, 18(6): 37-43.]
- [11] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419. [PENG J, ZHAO H J, LIU Y X, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction. Geographical Research, 2017, 36(3): 407-419.]
- [12] 吴健生, 张理卿, 彭建, 等. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别. 生态学报, 2013, 33(13): 4125-4133. [WU J S, ZHANG L Q, PENG J, et al. The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 4125-4133.]
- [13] 李晖, 易娜, 姚文璟, 等. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划. 生态学报, 2011, 31(20): 5928-5936. [LI H, YI N, YAO W J, et al. Shangri-La county ecological land use planning based on landscape security pattern. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 5928-5936.]
- [14] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 等. 基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建. 地理研究, 2017, 36(3): 471-484. [CHEN X, PENG J, LIU Y X, et al. Constructing ecological security patterns in Yunfu city based on the framework of importance-sensitivity-connectivity. Geographical Research, 2017, 36(3): 471-484.]
- [15] 黄隆杨, 刘胜华, 方莹, 等. 基于“质量—风险—需求”框架的武汉市生态安全格局构建. 应用生态学报, 2019, 30(2): 259-270. [HUANG L Y, LIU S H, FANG Y, et al. Construction of Wuhan's ecological security pattern under the "quality-risk-requirement" framework. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2): 259-270.]
- [16] 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. 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. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 3-13.]
- [17] 侯鹏, 王桥, 申文明, 等. 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. [HOU P, WANG Q, SHEN W M, et al. Progress of integrated ecosystem assessment: Concept, framework and challenges. Geographical Research, 2015, 34(10): 1809-1823.]
- [18] 王云才, 吕东. 基于尺度转换与嵌套的生态网络规划研究: 以安徽省宣城市南漪湖地区为例. 见: 中国风景园林学会. 中国风景园林学会2015年会论文集. 南宁: 中国风景园林学会, 2015, 6: 308-313. [WANG Y C, LYU D. Research on the ecological network planning based in scale transform and nesting: A case study of Nanyi Lake region in Anhui Province. In: Symposium Proceedings of Chinese Society of Landscape Architecture, 2015. Nanning: Chinese Society of Landscape Architecture, 2015, 6: 308-313.]
- [19] 陈利顶, 吕一河, 傅伯杰, 等. 基于模式识别的景观格局分析与尺度转换研究框架. 生态学报, 2005, 26(3): 663-670. [CHEN L D, LYU Y H, FU B J, et al. A framework on landscape pattern analysis and scale change by using pattern recognition approach. Acta Ecologica Sinica, 2005, 26(3): 663-670.]

- [20] 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. [YUE B R, LIU Z Y. From ecological scale to spatial scale: Application of scale effect in landscape architecture planning and design. Chinese Landscape Architecture, 2017, 33(8): 77-81.]
- [21] ROHR R P, SAAVEDRA S, BASCOMPTE J. On the structural stability of mutualistic systems. *Science*, 2014, 345(6195): 1253497.
- [22] HUBER P R, GRECO S E, THOME J H. Spatial scale effects on conservation network design: Trade-offs and omissions in regional versus local scale planning. *Landscape Ecology*, 2010, 25(5): 683-695.
- [23] 吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法. 生态学报, 2000, 21(12): 2096-2105. [LYU Y H, FU B J. Ecological scale and scaling. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 21(12): 2096-2105.]
- [24] 赵军. 平原河网地区景观格局变化与多尺度环境响应研究. 上海: 华东师范大学, 2008. [ZHAO J. Landscape pattern change and its environmental response across multiple spatial scales in Tidal Plain. Shanghai: East China Normal University, 2008.]
- [25] 刘世梁, 侯笑云, 尹艺洁, 等. 景观生态网络研究进展. 生态学报, 2017, 37(12): 3947-3956. [LIU S L, HOH X Y, YIN Y J, et al. Research progress on landscape ecological networks. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(12): 3947-3956.]
- [26] 郝月, 张娜, 杜亚娟, 等. 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. [HAO Y, ZHANG N, DU Y J, et al. Construction of ecological security pattern based on habitat quality in Tang county, Hebei, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(3): 1015-1024.]
- [27] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2007. [WU J G. Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy. Beijing: Higher Education Press, 2007.]
- [28] 李国煜, 林丽群, 伍世代, 等. 生态源地识别与生态安全格局构建研究: 以福建省福清市为例. 地域研究与开发, 2018, 37(3): 120-125. [LI G Y, LIN L Q, WU S D, et al. Recognition of ecological source and ecological security pattern construction: A case study of Fuqing city. *Areal Research and Development*, 2018, 37(3): 120-125.]
- [29] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746. [XIE G D, ZHANG C X, ZHANG C S, et al. The value of ecosystem services in China. *Resources Science*, 2015, 37(9): 1740-1746.]
- [30] 陈春娣, 吴胜军, MEURK C D, 等. 阻力赋值对景观连接模拟的影响. 生态学报, 2015, 35(22): 7367-7376. [CHEN C D, WU S J, MEURK C D, et al. Effects of changing cost values on landscape connectivity simulation. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(22): 7367-7376.]
- [31] 侍昊, 徐雁南. 基于景观连通性的城市绿地核心区规划方法研究. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2011, 35(1): 51-56. [SHI H, XU Y N. Research on planning method of urban green space core region based on landscape connectivity. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science*, 2011, 35(1): 51-56.]
- [32] 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. 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(4): 1178-1188.]
- [33] 张玉虎, 李义禄, 贾海峰. 永定河流域门头沟区景观生态安全格局评价. 干旱区地理, 2013, 36(6): 1049-1057. [ZHANG Y H, LI Y L, JIA H F. Constructing landscape ecological security pattern in Yongding River Watershed: A case of Mengtougou Basin, Beijing. *Arid Land Geogreaphy*, 2013, 36(6): 1049-1057.]
- [34] Linkage Mapper User Guide. <http://code.google.com/p/linkage-mapper/>, 2011-05-06/2016-03-11.
- [35] MCRAE B H, BEIER P. Circuit theory predicts gene flow in plant and animal populations. *PNAS*, 2007, 104(50): 19885-19890.
- [36] 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. [SONG L L, QIN M Z. Identification of ecological corridors and its importance by integrating circuit theory. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(10): 3344-3352.]
- [37] MCRAE B H, HALL S A, BEIER P, et al. Where to restore ecological connectivity? Detecting barriers and quantifying restoration benefits. *PLoS ONE*, 2012, 7(12): e52604, Doi: 10.1371/journal.pone.0052604.
- [38] 王回茜, 李汉廷, 谢苗苗, 等. 资源型城市工矿用地系统修复的生态安全格局构建. 自然资源学报, 2020, 35(1): 162-173. [WANG H H, LI H T, XIE M M, et al. Construction of ecological security pattern for systematic restoration of industrial and mining land in resource-based cities. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 162-173.]
- [39] 倪庆琳, 侯湖平, 丁忠义, 等. 基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区: 以徐州市贾汪区为例. 自然资源学

报, 2020, 35(1): 204-216. [NI Q L, HOU H P, DING Z Y, et al. Ecological remediation zoning of territory based on the ecological security pattern recognition: Taking Jiawang district of Xuzhou city as an example. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 204-216.]

- [40] 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, (6): 905-911. [ZHAO W W, FU B J, CHEN L D. Some fundamental issues in scaling. Advance in Earth Sciences, 2002, (6): 905-911.]

## Construction of Xuzhou ecological network based on comprehensive sources identification and multi-scale nesting

ZHU Jie<sup>1</sup>, SU Jie<sup>1</sup>, YIN Hai-wei<sup>1</sup>, KONG Fan-hua<sup>2</sup>

(1. School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** The identification of ecological source in the traditional ecological network construction mostly considers the quality and area of habitat patches, but seldom considers the impact of ecosystem service function and spatial structure. Moreover, the traditional ecological network is mostly constructed in a relatively closed unit with only one scale, lacking nesting coordination, which will lead to the dislocation of ecological network structure between scales. To solve the above problems, an "Attribution-Function-Structure" index system is constructed to identify the ecological sources comprehensively. The Least-cost path method, the Circuit Theory and the Cyclic Window Search Method are adopted to form and identify ecological corridors, pinch points and barrier points respectively. From the Xuzhou metropolitan area and main urban area, two-scale ecological networks are constructed and overlapped to analyze its nested structure and coordination degree. The results showed that: (1) The coincident source areas at two scales is 79.85 km<sup>2</sup>, the overlapping corridors length is 158.42 km, and overlapping corridors area is 45.68 km<sup>2</sup>, which are important for the stability of the multi-scale ecological network connection and need to be protected. Meanwhile, 8 corridors that are vital to the metropolitan area but lack the underbelly support within the main urban area should be repaired as a priority. (2) A total of 17 and 18 pinch points are identified in the metropolitan area and the main urban area respectively, 10 of which overlapped; 8 and 10 barrier points are identified respectively as well, 5 of which overlapped. Contact ratio indicates that high migration resistance and large optimization potential coexist in key biological migration areas, which is in urgent need of repair. And the continuity of biological processes across scales need a multi-scale cascade framework to solve ecological problems coordinately. (3) Based on the theory of "Patch- Corridor- Matrix", a multi- scale nested ecological network optimization strategy is proposed from the three points about "Point-Line-Polygon". The research results can provide references for the regional ecological security pattern construction, land consolidation and ecosystem restoration.

**Keywords:** ecological network; scale nesting; scale effect; identification of ecological sources; Xuzhou city