

DOI: 10.20103/j.stxb.202212283685

李权荃, 金晓斌, 宋家鹏, 杨帆, 周寅康. 基于尺度嵌套与复合功能视角的高强度城市化地区生态网络体系研究——以江阴市为例. 生态学报, 2023, 43(22): 9133-9147.

Li Q Q, Jin X B, Song J P, Yang F, Zhou Y K. Ecological network system of highly urbanized area based on scale nesting and composite function: A case study of Jiangyin City. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9133-9147.

# 基于尺度嵌套与复合功能视角的高强度城市化地区生态网络体系研究

——以江阴市为例

李权荃<sup>1,2</sup>, 金晓斌<sup>1,2,3,\*</sup>, 宋家鹏<sup>1,2</sup>, 杨帆<sup>1,2</sup>, 周寅康<sup>1,2,3</sup>

1 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

2 自然资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210023

3 江苏省土地开发整理技术工程中心, 南京 210023

**摘要:** 城市化进程带来经济社会快速发展的同时, 也造成资源环境耗损和生态系统退化, 对区域生态系统长久稳定产生威胁, 针对性构建区域生态网络对缓解城市化的负面生态影响, 提升区域生态安全水平具有重要意义。通过解析不同情形生态网络构建目标, 以及高强度城市化地区生态需求和生态网络构建要点, 基于尺度嵌套与复合功能视角, 以江苏省江阴市为例, 与环太湖地区和无锡市形成尺度嵌套生态网络, 统筹考虑热岛效应、雨洪调节及景观游憩服务供给构建复合功能生态网络, 形成高强度城市化地区生态网络体系。研究结果表明: (1) 在尺度嵌套生态网络方面, 江阴市核心生态源地共 4 个, 保育生态源地共 26 个, 两类生态源地总面积占比 4.76%, 大多分布于江阴市北部和中部; 完全位于江阴市范围内的基础生态廊道共 39 条, 通过与江阴市外部生态源地形成内外联结的无锡-江阴生态廊道共 11 条, 环太湖-江阴生态廊道共 3 条, 生态廊道总体分布均匀; (2) 在复合功能生态网络方面, 江阴市共有 11 个复合功能生态源地, 总面积 4755.31hm<sup>2</sup>, 占市域面积的 4.78%, 主要分布于北部长江沿线以及中部的定山、花山; 兼具复合功能的功能型生态战略点共 88 个; 所提取的三类单一生态功能网络要素包括, 热缓解生态源地 31 个, 热缓解生态廊道 51 条, 雨洪调节生态源地 26 个, 雨洪调节生态廊道 52 条, 游憩资源点 56 个, 景观游憩廊道 85 条; (3) 依托由尺度嵌套生态网络和复合功能生态网络构成的生态网络体系, 建议江阴市采取包含保护建设、管控维护以及联动修复等多方面的生态保护修复措施。研究作为高强度城市化地区进行差异化生态网络构建提供了思路, 可为相关地区开展国土空间生态修复工作借鉴参考。

**关键词:** 高强度城市化; 生态网络; 尺度嵌套; 复合功能; 江阴市

## Ecological network system of highly urbanized area based on scale nesting and composite function: A case study of Jiangyin City

LI Quanquan<sup>1,2</sup>, JIN Xiaobin<sup>1,2,3,\*</sup>, SONG Jiapeng<sup>1,2</sup>, YANG Fan<sup>1,2</sup>, ZHOU Yinkang<sup>1,2,3</sup>

1 School of Geographic and Oceanographic Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2 Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210023, China

3 Jiangsu provincial land development and consolidation technology and Engineering Center, Nanjing 210023, China

**Abstract:** The process of urbanization not only brings rapid economic and social development, but also causes resource and environment loss and ecosystem degradation, threatening the long-term stability of the regional ecosystem. Therefore, it is of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971234, 41971235)

收稿日期: 2022-12-28; 采用日期: 2023-06-02

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jinxb@nju.edu.cn

great significance to construct regional ecological network to alleviate the negative ecological impact of urbanization and improve the level of regional ecological security. This study analyzes the goal of ecological network construction under the guidance of differentiation and the key points of ecological demand and ecological network construction in high-intensity urbanization areas. This study was based on the perspective of scale nesting and composite function, and Jiangyin City of Jiangsu Province was selected as the research area. On the one hand, it formed scale nesting ecological network with Taihu Lake area and Wuxi City; on the other hand, it took overall consideration of heat island effect, rain-flood regulation and landscape recreation service supply to construct compound functional ecological network and formed ecological network system of high-intensity urbanization area. The results showed that: (1) In terms of scale-nested ecological network, there were 4 core ecological sources and 26 conservation ecological sources in Jiangyin, and the total area of the two types of ecological sources accounted for 4.76%, mostly distributed in the north and middle of Jiangyin. There were 39 basic ecological corridors completely located within the scope of Jiangyin City, 11 Wuxi-Jiangyin ecological corridors and 3 "Jiangyin - around Taihu Lake" ecological corridors connecting with the external ecological sources of Jiangyin City, with uniform distribution on the whole. (2) In the aspect of complex function ecological network, Jiangyin had 11 complex function ecological sources, with a total area of 4755.31hm<sup>2</sup>, accounting for 4.78% of the city area. They were mainly distributed along the Yangtze River in the north and Dingshan and Huashan in the middle. There were 88 functional ecological strategic points with multiple functions. Three types of single ecological function network elements were extracted, including 31 ecological sources for heat mitigation, 51 ecological corridors for heat mitigation, 26 ecological sources for rain-flood regulation, 52 ecological corridors for rain-flood regulation, 56 recreational resource points, and 85 landscape recreational corridors. (3) Based on the ecological network system composed of scale nested ecological network and composite functional ecological network, suggestions on ecological protection and restoration measures were put forward. The research provides ideas for the construction of ecological network in high-intensity urbanization areas, and can be used as reference for the restoration of territorial and spatial ecology in relevant areas.

**Key Words:** highly urbanized; ecological network; scale nesting; composite function; Jiangyin City

改革开放以来,中国城市化进程取得举世瞩目的成就<sup>[1]</sup>,但城市化过程中建设用地持续扩张带来栖息地破碎化<sup>[2]</sup>、人居环境破坏<sup>[3]</sup>和生态系统服务下降<sup>[4]</sup>等一系列问题,制约了城市的可持续发展。在高强度城市化地区,上述问题表现得更为突出,随着气候变化带来的极端灾害频发和经济发展与生态保护矛盾进一步加剧,区域生态安全面临严重威胁,区域整体生态保护效率有待进一步提升。为促进人与自然和谐共生,推进中国式现代化,依托国土空间布局优化和国土空间生态修复来改善生态环境,保障区域生态安全意义重大。生态网络通过识别景观中某些关键位置与要素,并构建其特定空间相互关系形成的格局,从而达到提升景观连通性,保护生态过程的目的<sup>[5-6]</sup>。《中共中央 国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》(中发[2019]18号文)明确提及保护生态屏障,构建生态廊道和生态网络,推进生态系统保护和修复。目前正在开展的国土空间规划编制中,各级规划也普遍将构建生态网络作为搭建区域生态保护修复骨架的重要支撑。

生态网络分析是基于景观生态学原理,通过识别提取关键景观要素解析利于保护生态系统结构功能的完整性、提升区域生态质量的空间格局的有效方法<sup>[7]</sup>,自20世纪90年代提出<sup>[5]</sup>以来不断丰富和完善,逐渐形成“生态源地识别-构建综合阻力面-生态网络生成”的基本范式<sup>[6,8]</sup>,常用方法包括最小累积阻力模型<sup>[9]</sup>、电路理论<sup>[10]</sup>以及形态学空间格局分析<sup>[11]</sup>等。近年来,学者们针对生态廊道宽度界定<sup>[12-13]</sup>、生态节点提取<sup>[14-15]</sup>以及面向多目标的复合生态网络<sup>[16-17]</sup>方面开展了一系列优化研究,并在多类型多尺度研究区域进行了探索<sup>[18-20]</sup>。在探索生态网络构建一般方法的基础上,特定区域问题及研究尺度决定了生态网络构建思路方法的差异性,面向高强度城市化地区这一热点区域,学者们从结合考虑生态源地未来需求<sup>[21]</sup>、生态廊道建设成本<sup>[2]</sup>、与现有规划衔接结合<sup>[22]</sup>以及动静态连通性耦合<sup>[23]</sup>等视角对生态网络构建进行了深化,对京津冀城市

群<sup>[22]</sup>、苏南地区<sup>[23]</sup>、深圳市<sup>[24]</sup>和上海市<sup>[2]</sup>等区域开展了实证分析。但当前研究一定程度上忽略了城市生态需求独特性以及为居民提供福祉的目标,在不同尺度生态网络的嵌套关系方面考虑不足,且围绕生态丰度低的县域单元开展的研究尚不多见,作为新型城镇化建设的重要载体,其生态保护修复也应得到重视,为强化这一类地区生态网络效能,有必要开展更具针对性和系统性的研究。

江苏省江阴市是中国乡镇企业的发源地、苏南模式的典型代表,一直蝉联全国百强县前三位,目前城镇化率达到 74.82%,市域内重要生态用地稀缺且分散,长江岸线开发强度高,传统制造业带来严重的环境污染,而江阴市生态保护对长江大保护以及太湖流域生态系统稳定具有重要作用,其也需要太湖等重要生态用地的生态功能支撑。本研究拟以江阴市为例,在解析高强度城市化地区生态需求及生态网络可发挥的功能的基础上,在江阴市范围内与环太湖地区生态网络、无锡市生态网络形成尺度嵌套生态网络,同时统筹考虑缓解热岛效应、雨洪调节与景观游憩服务供给构建复合功能生态网络,由尺度嵌套生态网络与复合功能生态网络共同构成江阴市高强度城市化地区生态网络体系,并提供针对性的生态保护修复策略,希冀为高强度城市化地区国土空间生态修复提供借鉴参考。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

江阴市地处江苏省南部、长江南部冲积平原地带,境内地势平缓,北邻长江,南近太湖,东接常熟、张家港,西连常州(图 1),是由无锡市代管的省辖县级市,位于北纬 31°40′—31°58′,东经 119°59′—120°35′之间,属亚热带季风气候。江阴地处苏锡常“金三角”几何中心,历史上就是长江下游南北交往的重要交通枢纽,素有“江尾海头”、“江海门户”之称。第七次全国人口普查数据显示,全市常住人口 177.95 万。2021 年江阴市实现地区生产总值 4580 亿元,蝉联全国县域经济与县域综合发展“十九连冠”和中国工业百强县(市)“五连冠”。

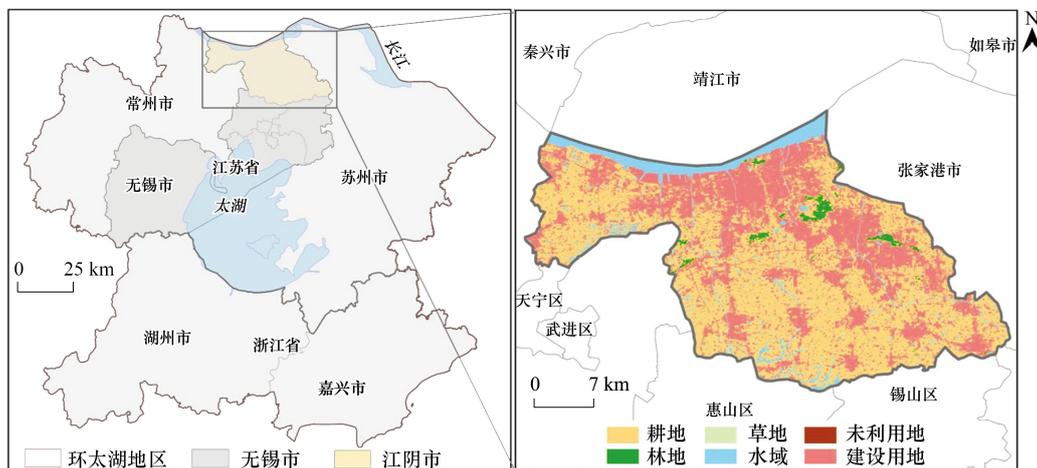


图 1 研究区区位与土地利用现状(2019)

Fig.1 Location and land use status of the study area (2019)

作为高强度城市化地区,江阴市面临复杂严峻的生态问题。根据第三次全国国土调查,全市建设用地面积占比达 40%,高不透水地表覆盖会加剧城市热岛和内涝风险,而林地、草地、水域等生态用地占比不足 30%,生态保护红线区仅为 1886hm<sup>2</sup>(占区域国土面积 1.91%),生态管控区面积为 10134.81hm<sup>2</sup>,生态丰度较低,且因城市开发建设活动被切割严重,连通性较差;公园绿地系统分布不均衡,难以满足大部分居民日常游憩需求。同时,江阴坐拥长江重要湿地等重要生态资源,作为全国和江苏省内较早开展长江生态保护工作和水系连通及水美乡村建设试点县,在保障太湖流域生态安全中发挥着重要作用。

## 1.2 数据来源

本研究所使用的数据包括土壤与土地利用数据、自然环境数据和社会经济与文化旅游数据。为便于空间数据分析,所有数据统一转换为高斯-克吕格投影,2000 国家大地坐标系。

土壤与土地利用数据:土地利用数据来自中国土地覆盖年度数据集 (CLCD) (30m)<sup>[25]</sup>;住宅用地和道路用地数据来自江阴市第三次国土调查数据库;基于 Google Earth Engine 云计算平台提取 NDVI 和地表温度的数据来源于 Landsat 8 OLI\_TRIS 遥感影像;不透水面数据来源于全球 30m 不透水地表动态数据集 (GISD30)<sup>[26]</sup>。土壤质地数据来源于国家青藏高原科学数据中心提供的基于世界土壤数据库 (HWSD) 的中国土壤数据集 (v1.1)。

自然环境数据:地形数据 (DEM, 30m) 来源于地理空间数据云平台,借助 DEM 计算得到地表粗糙度和地表起伏度;流域水系数据来源于国家地球系统科学数据共享服务平台提供的太湖流域 1:25 万三级水系分级数据集。

社会经济与文化旅游数据:人口密度数据来源于全球高分辨率人口计划项目 WorldPop 数据集 (<https://data.worldpop.org/GIS/Population/>) (100m);用于计算建筑密度的建筑轮廓矢量数据提取自百度地图;游憩资源点数据来自江阴市文化和旅游资源普查数据库。

## 2 研究方法

### 2.1 高强度城市化地区生态网络构建解析

#### 2.1.1 面向不同情形的区域生态网络构建目标

由于生态网络可以提升生态斑块景观连通性和区域整体生态系统功能,对不同情形生态保护需求有其适用性。随着“全域-全要素-全过程”国土空间生态修复工作开展,生态网络的研究对象从野生动物栖息地<sup>[27]</sup>等自然生境拓展到全域<sup>[20]</sup>,所发挥的作用也从保护物种迁徙<sup>[28]</sup>扩展到提升区域生态功能,保障区域生态安全<sup>[29]</sup>。已有研究表明<sup>[6]</sup>,生态网络构建方法选取需要考虑区域生态本底及尺度特征以确保结果的科学性,通过文献梳理<sup>[5,8,18,22,29]</sup>,结合相关规划编制指南,归纳不同情形区域生态网络构建的目标如表 1。结合区域特点,江阴市面向高质量发展要求与国土空间生态修复工作开展,生态网络构建具有多重目标。

表 1 面向不同情形的生态网络构建背景及发挥作用

Table 1 The background and function of ecological network construction for different conditions

生态网络构建情形 Ecological network construction situation	背景 Background	生态网络构建目标 Objective of ecological network construction	参考文献 References
物种保护单一目标 Single goal of species conservation	物种受气候变化等因素影响需要迁移,可借助景观规划手段保护物种多样性	对有利于物种栖息生存的生境斑块进行识别,并模拟物种迁移时遵循的路径,从而实现物种保护	[5]
重点区域生态保护需要(存在生态障碍或高质量发展要求) Ecological protection needs of key regions (with ecological barriers or high quality development requirements)	①生态脆弱区由于自身原因或受到周边人类开发活动的影响易发生退化;②面向高质量发展需求和重大战略,部分地区寻求可持续的国土空间开发保护格局	通过网络促进关键区域生态流运行以提升区域整体生态功能水平,针对生态空间结构优化布局,保障区域生态安全	[8,18]
生态修复规划关键环节 A key link in ecological restoration planning	为统筹山水林田湖草一体化保护和修复,逐步推进国土空间全域生态保护修复,各级行政单元编制生态保护修复规划	是规划形成国土空间生态修复总体格局的重要依据,国家级、省级更多体现控制性;市、县级结合实际满足具体生态需求	[22,29]

#### 2.1.2 高强度城市化地区生态需求及生态网络构建要点

城市化水平是区域发展的重要特征,表现为城市人口规模增加、城镇用地向外扩张延展的程度<sup>[4]</sup>,城市

化在促进区域经济发展的同时,也带来一系列生态环境影响,包括生态用地减少和破碎化、环境污染破坏等,进而导致区域生态系统受损,生态系统服务供需失衡,生态过程运行受阻。构建生态网络对缓解城市化带来的负面效应维持生态流正常运作具有重要作用,其通过廊道跨区域连通也在多层级生态保护修复体系中发挥着重要功能<sup>[20]</sup>。

不同城市化水平对区域生态问题的影响具有显著差异,高强度城市化地区的生态保护修复工作面临更为复杂的情形,相应生态网络构建思路也应具针对性(图2):(1)市县级生态保护修复既需落实和承载上级规划,也需统筹发挥稳定局部生态安全的作用,由于高强度城市化地区可支撑自身生态系统服务供给的大型生态斑块较少,经济发展带来用地矛盾进一步加剧,为进一步提升保护效率,故应借助更高尺度生态网络的优势,依靠更大范围的自然地理单元内重要生态用地的支撑作用,通过生态网络的尺度联动保障该区域生态安全水平;(2)相比于自然生境或中低程度城市化地区,高强度城市化地区生态系统特征和生态需求有其独特性,针对城市热岛效应突出以及极端气候带来的洪涝等自然灾害风险高等生态问题,生态网络构建需更加关注调节类生态系统服务,通过连通关键供给源充分发挥生态流的作用,增强城市应对自然灾害的能力;(3)城市建设用地扩张在一定程度上侵占了蓝绿空间,致使美学景观服务供给不足,难以充分地为居民提供优质生态产品,生态网络可以通过提升景观连通性和旅游资源的可达性为城市居民游憩需求提供便利,促使生态资源保护价值进一步转化为居民福祉。综上,本研究结合区域特点和生态保护形势构建生态网络:针对江阴市低生态丰度与县级尺度的特征,通过与环太湖地区生态网络、无锡市生态网络形成尺度嵌套生态网络以获得外部支撑,提升区域整体生态保护效率;面向气候变化等背景,针对城市区域多元生态需求,统筹考虑缓解热岛效应、雨洪调节与景观游憩服务供给构建复合功能生态网络,增强其应对自然灾害的能力,经过整合形成江阴市高强度城市化地区生态网络体系。

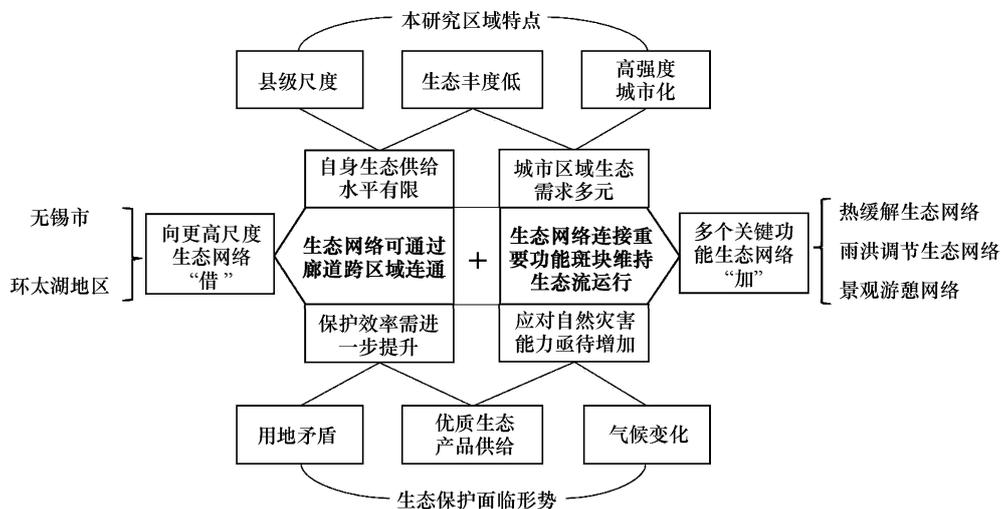


图2 高强度城市化地区生态网络构建要求及思路设计

Fig.2 Requirement and thought design of ecological network construction in high-intensity urbanization area

## 2.2 江阴市尺度嵌套生态网络构建

生态源地作为物种扩散和迁移、物质和能量流动传输的起源点,一般应具有良好的生态本底,并对维持区域景观连通性发挥控制性作用<sup>[5, 30]</sup>,形态学空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)基于腐蚀、膨胀等数学形态学原理从像元层面对栅格图像空间格局进行度量,侧重于结构型连接<sup>[31-32]</sup>对分析景观连通性具有有效性。本研究以林地、草地和水域为前景,基于 Guidos Toolbox 提取核心区,结合景观连通性指数识别环太湖地区生态源地。

景观阻力是指为物种、物质或能量等在空间中流动扩散受到的阻碍作用,参考已有研究<sup>[33]</sup>,同时考虑人

为干扰因素,选取景观类型、高程、植被归一化指数(NDVI)和人口密度作为阻力因子,依据表2构建综合阻力面。最小累积阻力模型(Minimum Cumulative Resistance, MCR)由 Knappen<sup>[34]</sup>提出,可用于提取源地间的最小成本路径,本研究基于该方法利用 Linkage Mapper 工具箱 Linkage Pathway 模块<sup>[35]</sup>,结合生态源地和综合阻力面提取环太湖地区生态廊道,生成环太湖生态网络。采用同样的方法构建无锡市生态网络,整合江阴市范围内的环太湖生态网络和无锡市生态网络,形成江阴市尺度嵌套生态网络。

表2 环太湖地区景观阻力指标因子

Table 2 Landscape resistance index factors of ecological network around Taihu Lake

阻力因子	分级指标	阻力值	权重	阻力因子	分级指标	阻力值	权重
Resistance factor	Grading index	Resistance value	Weight	Resistance factor	Grading index	Resistance value	Weight
景观类型 Landscape type	林地	5	0.3	植被归一化指数	>0.8	10	0.3
	草地	5		NDVI	0.6—0.8	30	
	水域	30			0.4—0.6	50	
	耕地	50			0.2—0.4	70	
	未利用地	70			<0.2	90	
	建设用地	90			人口密度	<50	
高程 Elevation	<100m	10	0.2	Population density	50—500	30	
	100—300m	30			500—1000	50	
	300—500m	50			1000—2000	70	
	500—1000m	70			>2000	90	
	>1000m	90					

NDVI: 植被归一化指数 Normalized difference vegetation index

### 2.3 江阴市复合功能生态网络构建

针对研究区多元生态需求,在遵循“识别生态源地-构建综合阻力面-生成生态网络”传统解析思路的基础上,基于景观生态学原理,结合区域自然资源本底和生态环境突出问题,从缓解热岛效应、雨洪调节和提供景观游憩三个生态功能方面构建江阴市复合生态网络,通过网络维持生态流正常运作。

#### 2.3.1 用于缓解热岛效应的生态网络

城市热岛(Urban Heat Island, UHI)是指城市地区温度高于周围农村地区的一种城市气候现象<sup>[36]</sup>,而水体、绿地等蓝绿景观与周围的热环境相比,温度相对较低,又称冷岛,将其通过廊道连接形成冷却网络,可以更稳定有效地缓解热岛效应<sup>[37]</sup>。

本文基于依托 Google Earth Engine 的 PSC APP 云平台解译 Landsat 8 影像得到地表温度数据<sup>[38—39]</sup>。选取相对热岛强度表征城市的热岛效应<sup>[40]</sup>。强度越高则对应热岛效应越明显,计算公式见式(1)。

$$H = \frac{LST_i - LST_{mean}}{LST_{mean}} \quad (1)$$

式中,  $H$  为相对热岛强度;  $LST_i$  为第  $i$  点的地表温度;  $LST_{mean}$  为平均地表温度。

参考已有研究<sup>[41]</sup>,将上述结果划分为 8 个等级,提取极强冷岛和中强冷岛,并进一步考虑冷岛规模效应和斑块景观连通性<sup>[32, 42]</sup>,筛选面积>50hm<sup>2</sup>且景观连通性指数处于前 75%的作为最终生态源地。

为保证缓解热岛效应的效果,考虑会加剧热环境影响或阻碍通风的因素<sup>[37, 43]</sup>,构建综合阻力面。参考已有研究<sup>[37, 41, 44—45]</sup>,选取反映地形、植被、土地利用以及建筑指数等与热岛效应或热交换密切相关的因子表征景观阻力,包括高程、坡度、植被归一化指数(NDVI)、土地利用和建筑密度 5 个阻力因子。阻力系数设定上,高程越大温度越低且空气流动性更强,对降温效应的阻力越小,而坡度越大,对热交换阻碍作用越强<sup>[37]</sup>;植被归一化指数越高更易对热岛扩展连片产生阻隔,促进冷岛源地的连通,故阻力越小;水体、林地、草地和耕地等用地可削弱热岛效应,阻力相对小,建设用地等则相反;建筑密度越高对空气流动阻力越大,且更容易成为热源,因而阻力越大。据此,对各因子分级并设置 1—9 的阻力系数如表 3,并为阻力因子赋予权重,加权得到综

合阻方面。基于最小累积阻力模型,利用 Linkage Mapper 工具箱的 Linkage Pathway 模块提取生态廊道,生成用于缓解热岛效应的生态网络。

表 3 热缓解阻力因子系数及权重设定表

Table 3 The coefficient and weight setting of cooling resistance factor

阻力因子 Resistance factor	分级指标 Grading index	阻力值 Resistance value	权重 Weight	阻力因子 Resistance factor	分级指标 Grading index	阻力值 Resistance value	权重 Weight
高程 Elevation	>200m	1	0.1	土地利用 Land use	林地	1	0.3
	100—200m	3			草地	1	
	50—100m	5			水域	1	
	<50m	7			耕地	4	
坡度 Slope	<3°	1	0.15		未利用地	6	
	3—5°	3			建设用地	9	
	5—10°	5		建筑密度 Building density	<5	1	0.25
	10—15°	7			5—10	3	
	>15°	9			10—30	5	
植被归一化指数 NDVI	>0.8	1	0.2		30—50	7	
	0.6—0.8	3			>50	9	
	0.4—0.6	5					
	0.2—0.4	7					
	<0.2	9					

### 2.3.2 用于雨洪调节的生态网络

地处平原河网地区的高强度城市化地区面临较强的洪涝灾害风险,而因建设用地快速扩张造成不透水面占比大,洪水调蓄能力相对薄弱<sup>[46]</sup>。城市生态系统主要通过植被冠层截流和土壤下渗影响径流方式进行雨洪调节<sup>[47]</sup>,将提供重要雨洪调节服务的斑块通过廊道连接起来,可形成影响区域整体雨水径流过程的网络。

本研究采用绿地空间径流调节率表征雨洪调节服务供给能力,利用 SCS-CN 水文模型模拟土壤中等湿度情景下地表产流,绿地空间径流调节率和地表产流计算方法见文献<sup>[47-48]</sup>,降雨强度依据江阴市洪涝灾害统计资料,设定为 160mm。其中,参数 CN 在 Fan 等<sup>[49]</sup>方法基础上,采用渔网分析工具,将研究区划分为 150m×150m 的正方形网格,对渔网内耕地、林地、草地、不透水面、水域和裸土 6 种土地利用覆被所占比例及其各自 CN 值加权计算得到各渔网单元的 CN 值。江阴土壤质地属于黏土类,结合土壤湿度情形得到对应的土壤水文组,参考已有研究<sup>[48-49]</sup>和美国国家工程手册 CN 值查算表确定各土地利用覆被类型 CN 值,分别设为 85、83、84、98、100 和 94。土壤下渗系数  $\lambda$  取值 0.2<sup>[50]</sup>。由于 SCS-CN 模型自身特点,水体不具有地表径流调蓄能力,但其具备汇流的能力对区域雨洪调节也具有重要作用,将绿地空间径流调节率结果按自然断点法分成五级,提取最高一级结果与 50hm<sup>2</sup> 以上面积的水体共同作为生态源地识别结果。

阻力面构建主要考虑洪涝灾害的影响因素,现有研究表明<sup>[51]</sup>,城市洪涝灾害受土地利用覆被、景观格局、降雨量以及城市地形地势和下垫面渗透性等因素影响,故选取降雨量、平均地表粗糙度、平均地表起伏度、平均不透水率、平均植被归一化指数(NDVI)以及 3 个类型水平景观格局指数,包括最大斑块面积比例(Largest Patch Index, LPI)、斑块聚集度指数(Patch Cohesion Index, COHESION)和景观破碎度指数(Landscape Division Index, DIVISION)作为阻力因子。景观格局指数在绿地、水域、不透水面和裸土 4 个类型水平上开展计算,平均地表粗糙度、平均地表起伏度、平均不透水率、平均植被归一化指数(NDVI)以小流域为单元统计,其中平均不透水率先计算 150m 渔网单元内不透水面占比。参考相关研究<sup>[51]</sup>以及各因子结果标准化值确定各因子阻力系数,地表起伏度、粗糙度越高,越利于雨水径流分散,故可对洪涝起到缓解作用,是负向阻力指标;城市中植被对雨水渗透性较好,植被覆盖越高,洪涝风险越小,因而也是负向指标;其余景观格局指数指标与洪涝总体呈现正相关关系<sup>[51]</sup>,故均为正向阻力指标。分别对各阻力因子分级并赋予 1—9 的阻力系数,各

阻力因子权重设定如表 4 所示,加权得到最终雨洪调节生态网络阻力面。生态廊道提取方法与热缓解生态网络相同,由此生成用于雨洪调节的生态网络。

表 4 雨洪调节阻力面阻力因子权重设定表

Table 4 The weight setting of resistance factor of rain-flood regulation resistance surface

阻力因子 Resistance factor	降雨量 Rainfall	平均地表 粗糙度 Average surface roughness	平均地表 起伏度 Average surface fluctuation	平均不 透水率 Impervious surface percentage	平均植被 归一化指数 NDVI	最大斑块 面积比例 LPI	斑块聚集 度指数 COHESION	景观破 碎度指数 DIVISION
权重 Weight	0.2	0.1	0.05	0.2	0.15	0.1	0.1	0.1

LPI:最大斑块面积比例 Largest patch index; COHESION:斑块聚集度指数 Patch cohesion index; DIVISION:景观破碎度指数 Landscape division index

### 2.3.3 用于景观游憩的生态网络

随着城市居民生活品质提高,城市扩张造成的生境破碎以及居住区与旅游资源之间的阻隔制约了城市居民享受休闲游憩文化生态系统服务<sup>[52]</sup>,通过廊道将旅游资源连接成网,可提升游憩空间的连通性以及可达性从而更好地满足居民休闲游憩的需求<sup>[53-54]</sup>。

选取江阴市著名旅游景点、公园、山丘及湿地等自然和人文景观共 56 处作为游憩资源点。构建游憩阻力面时,参考相关研究<sup>[54-55]</sup>,主要考虑所处位置居民到达难易程度、活动频率以及植被覆盖情况,选取坡度、距道路及成片住宅区的距离和植被归一化指数(NDVI)作为阻力因子,提取面积大于 5hm<sup>2</sup>的农村宅基地和城镇住宅用地为成片住宅区,由于住宅用地用途限制,成片住宅区范围内建设游憩廊道的阻力较大,住宅区域之外距离成片住宅区越近,居民游憩活动频率越高,阻力越小,而距离道路近不仅通行便利,也利于在现有道路用地邻近区域规划步行道和骑行道,故阻力较小;坡度也是影响居民步行或骑行的重要因素,坡度低,阻力小;对于植被归一化指数(NDVI),其值越高,生态环境越好,提供更好的休闲游憩体验。依据表 5 设定阻力系数并加权得到景观游憩综合阻力面。采用与热缓解生态网络相同的方法提取生态廊道,生成用于景观游憩的生态网络。

表 5 景观游憩阻力因子系数及权重设定表

Table 5 The coefficient and weight setting of landscape recreation resistance factor

阻力因子 Resistance factor	分级指标 Grading index	阻力值 Resistance value	权重 Weight
坡度 Slope	<3°	1	0.3
	3—5°	3	
	5—10°	5	
	10—15°	7	
	>15°	9	
距道路及成片住宅区距离 Distance from roads and residential blocks	距离道路用地 50m 以内或 距成片住宅区 500m 以内	1	0.4
	距成片住宅区 500—1000m	5	
	位于成片住宅区范围内	7	
	距成片住宅区 1000m 以外	9	
植被归一化指数 NDVI	>0.8	1	0.3
	0.6—0.8	3	
	0.4—0.6	5	
	0.2—0.4	7	
	<0.2	9	

### 3 研究结果

#### 3.1 江阴市尺度嵌套生态网络构建结果

通过基于 MSPA 的方法识别生态源地,并采用 MCR 的方法提取生态廊道,最终构建环太湖地区生态网络如图 3 所示,共识别出生态源地 188 个,总面积约为 588256.08hm<sup>2</sup>,面积占比 21.38%,生态源地分布呈现高度空间分异,大片生态源地主要集中分布于无锡市西部宜兴市、湖州市中西部的山区和整个太湖区域;在东北部和东南部除长江和钱塘江沿线几乎没有生态源地分布。景观阻力则呈现东北高西南低的分布特征,太湖以东的阻力水平总体高于太湖以西区域。生态廊道方面,共提取 437 条生态廊道,中部太湖附近以及西南部湖州市生态廊道数量较多,长度较短;北部长江沿线和东南部钱塘江沿线连接的生态廊道数量较少,长度更长。从生态网络结构看,环太湖地区中西部网络更密集,结构相对稳定;北部和东南部存在较大范围的盲区,网络结构更为脆弱。

为评估江阴在环太湖地区生态网络中发挥的作用,对生态源地面积进行叠加分析,由图 3 和表 6 可以看出,地处环太湖地区北部的江阴市是该区域典型的生态源地匮乏区,其生态源地面积占比远低于同一地区其他县级区和整体面积占比水平;同时,环太湖地区生态网络有 13 条生态廊道贯穿江阴市,这些生态廊道在直接与间接连接太湖斑块与长江斑块方面发挥了关键作用,由此可以看出江阴市在环太湖地区生态网络中具有 一定战略性作用,同时也需要环太湖地区这一更高尺度区域生态网络发挥带动作用,对江阴市生态系统服务供给提供支撑。

表 6 环太湖地区及江阴市生态源地面积占比对比分析

Table 6 Comparative analysis of ecological source area ratio between Taihu Lake area and Jiangyin City

项目 Item	江阴市生态源地占 地区面积比例 The proportion of ecological source area in Jiangyin City	环太湖地区县级区 域生态源地占比平均值 Average proportion of ecological source area in county-level region around Taihu Lake	环太湖地区生态源 地面积总占比 Total proportion of ecological source area around Taihu Lake
统计结果 Result	4.31%	12.27%	21.38%

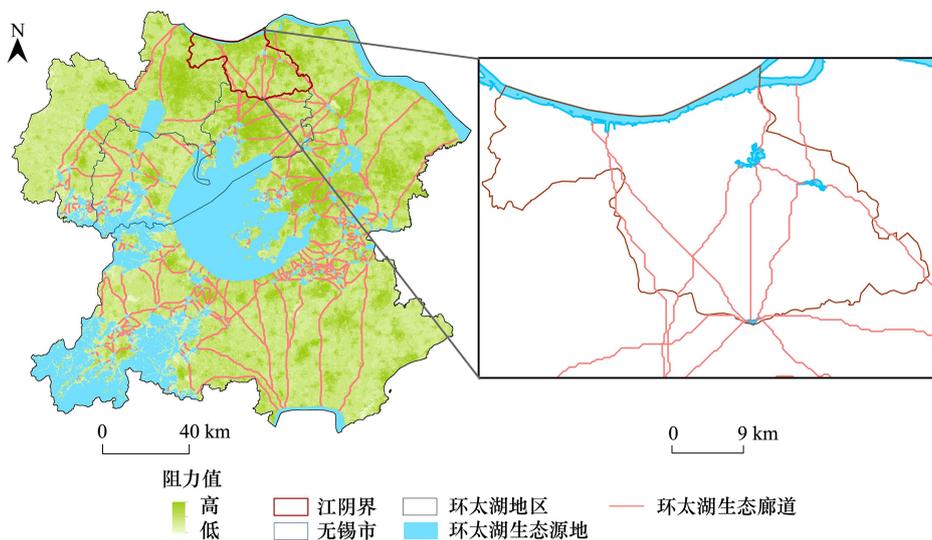


图 3 环太湖地区生态网络构建结果

Fig.3 Results of ecological network construction around Taihu Lake

在对江阴市与环太湖地区生态网络进行尺度嵌套分析的基础上,从图 3 可以看出,江阴市生态网络主要

通过无锡市域范围内的生态用地直接联结带动,由于环太湖地区北部总体生态源地分布较为稀疏,联结带动江阴市的跨县域生态廊道长度偏长,贯穿江阴市的生态廊道平均长度为 25.0km,且主要通过江阴市南部的一个生态斑块进行联结,网络结构相对脆弱。为保证尺度嵌套生态网络的稳定性,有必要进一步在无锡市范围内,在 MSPA 分析识别生态源地的基础上,通过缩小生态源地识别面积阈值的方式补充一部分生态保育型生态源地,并采用 MCR 的方法提取生态廊道,在江阴市与无锡市之间进一步形成生态网络的尺度嵌套。据此构建无锡市生态网络如图 4 所示,其中有 49 条生态廊道贯穿江阴市,可以看出通过增加生态保育型生态源地,江阴市在与无锡市生态网络尺度嵌套中可以与太湖等重要生态用地实现更好的间接性连通,尺度嵌套的生态网络不会因为局部生态源地破坏发生严重断裂,从而对江阴市生态保护修复起到更好的外部支撑作用。

将江阴市范围内的环太湖地区生态网络与无锡市生态网络进行整合,对环太湖地区生态网络中部分过长的生态廊道进行剔除,得到江阴市尺度嵌套生态网络(图 5)。生态源地方面,在两个生态网络中共同识别为生态源地的江阴市核心生态源地共 4 个,总面积约为 4303.58hm<sup>2</sup>,在与无锡市生态网络尺度嵌套中补充的江阴市保育生态源地共 26 个,总面积约为 431.86hm<sup>2</sup>,两类生态源地总面积占比 4.76%,大多分布于江阴市北部和中部;在两个生态网络中完全于江阴市范围内的江阴市基础生态廊道共 39 条,在无锡市生态网络中与江阴市外部生态源地形成联结的无锡-江阴生态廊道共 11 条,在环太湖地区生态网络中与江阴市外部生态源地形成联结的环太湖-江阴生态廊道共 3 条,生态廊道除在江阴市西部没有分布之外,总体分布均匀。

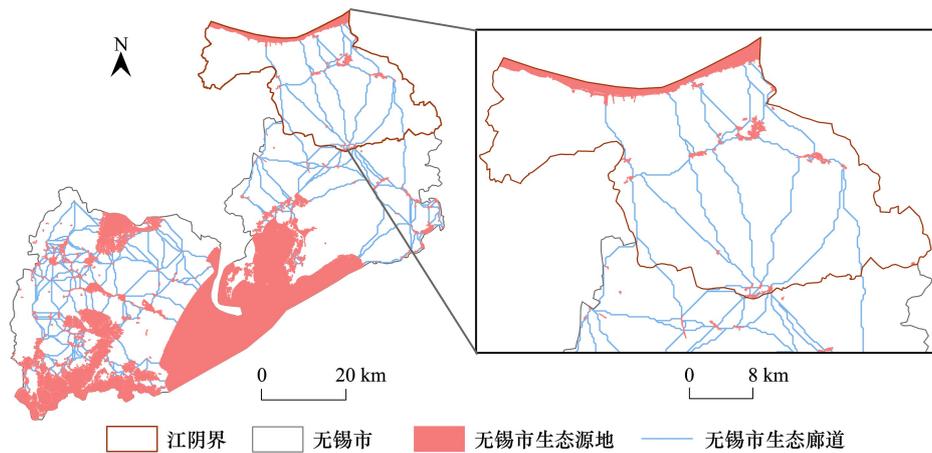


图 4 无锡市生态网络构建结果

Fig.4 Results of ecological network construction of Wuxi City

### 3.2 江阴市复合功能生态网络构建结果

#### 3.2.1 面向各单一功能的生态网络构建结果

用于缓解热岛效应的生态网络构建结果如图 6 所示,共包括 31 个生态源地、59 条生态廊道。江阴市热缓解阻力值总体偏低,高值主要分布于长江沿线以南以及建成区范围。生态源地除长江沿线所在斑块规模较大,达到 4230.8hm<sup>2</sup>,其余生态源地面积都偏小,空间分布呈现中部南部数量多,东部西部数量少的特征。生态廊道在江阴市中部及南部地区分布密集,东部和北部仅零星分布几条生态廊道。

用于雨洪调节的生态网络构建结果如图 7 所示,共包括 26 个生态源地,53 条生态廊道。与热缓解生态网络不同,江阴市雨洪调节景观阻力值以高值为主,多分布于建成区等不透水面分布密集区域,低阻力值仅分布区江阴市北部长江沿线和西侧区域。生态源地斑块规模除北部长江沿线斑块以外普遍偏小,分布零散;生态廊道分布较为均匀,多数交织成网状,仅东南部有一小片盲区,网络结构相对稳定。

用于景观游憩的生态网络构建结果如图 8 所示,共包括 56 个游憩资源点,117 条游憩廊道。生态网络呈现组团式分布,最大的组团分布于长江南部江阴要塞附近,此处锡澄运河公园、滨江公园带和应天公园等江阴

市市级公园聚集,游憩资源优质且丰富,廊道密布,网络结构极为复杂;其余小组团多以山体自然景观以及著名人文景点为核心。总体而言,江阴市景观游憩生态网络中部分布有较大面积的盲区,游憩资源点及廊道都鲜少分布,故整体网络分布并不均匀。

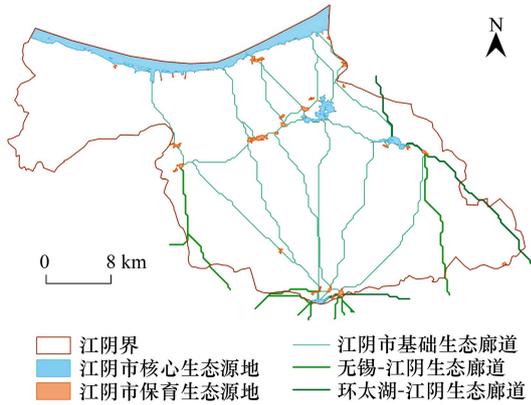


图5 江阴市尺度嵌套生态网络构建结果

Fig.5 Results of scale-nested ecological network construction of Jiangyin City

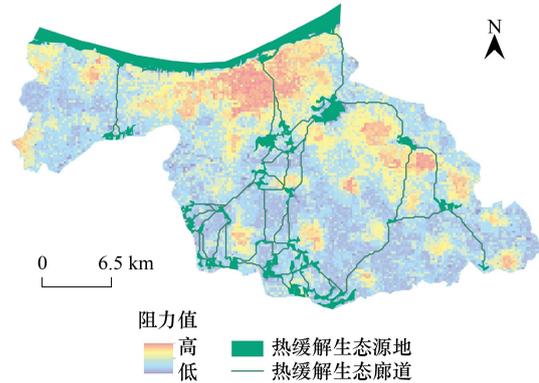


图6 用于缓解热岛效应的生态网络构建结果

Fig.6 Results of ecological network construction for mitigating heat island effect

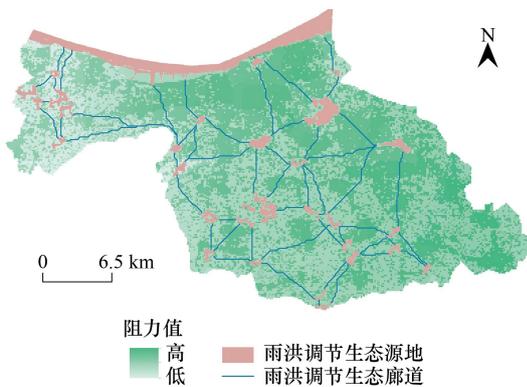


图7 用于雨洪调节的生态网络构建结果

Fig.7 Results of ecological network construction for rain flood regulation

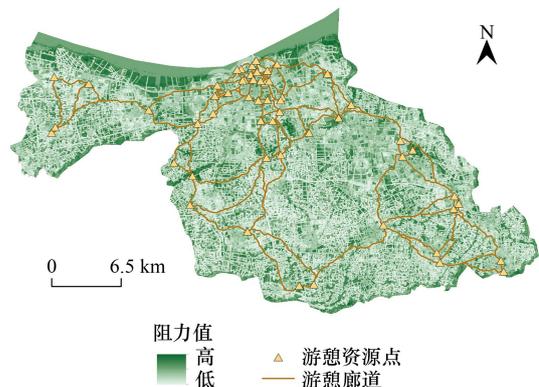


图8 用于景观游憩的生态网络构建结果

Fig.8 Results of ecological network construction for landscape recreation

### 3.2.2 复合功能生态网络结果

将用于缓解热岛效应的生态网络、用于雨洪调节的生态网络和用于景观游憩的生态网络构建结果进行整合叠加,对各功能廊道交织重叠程度较高的生态廊道与长度过长易发生断裂的游憩廊道进行剔除,生成最终的江阴市复合功能生态网络如图9所示。对兼具热缓解与雨洪调节功能,且斑块边界与游憩资源点中心最小距离<500m的斑块进一步识别为复合功能生态源地,共得到复合功能生态源地11个,面积4755.31hm<sup>2</sup>,占比4.78%;单一功能源地中,热缓解生态源地31个,面积8331.56hm<sup>2</sup>,雨洪调节生态源地26个,面积7662hm<sup>2</sup>,游憩资源点56个;生态廊道方面,共提取热缓解生态廊道51条,雨洪调节生态廊道52条,景观游憩廊道85条;生态节点方面,不同功能生态廊道的交点兼具多个生态功能,需要重点保护,对不同功能生态廊道进行相交分析,提取交汇点为功能型生态战略点,共提取88个功能型生态战略点。

从复合功能生态网络要素分布来看,复合功能生态源地主要分布于江阴市北部长江沿线的利港街道、澄江街道、城东街道等和中部的云亭街道定山、花山所在区域,不同的单一功能生态源地及廊道分布情况有所差异,其中,热缓解生态源地和生态廊道多分布于南部的青阳镇和徐霞客镇;雨洪调节生态源地主要分布于南部

青阳镇、西部璜土镇和利港街道,雨洪调节生态廊道分布在南部徐霞客镇最多;游憩资源点和游憩廊道则集中分布于北部澄江街道。功能型生态战略点在澄江街道和徐霞客镇分布最多,在东南部的新桥镇、顾山镇和长泾镇分布最少。由此可见,不同镇级区域在江阴市复合功能生态网络构建过程中发挥的作用并不相同。

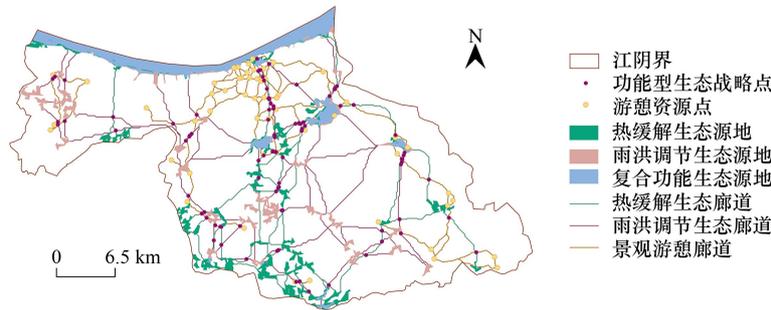


图 9 江阴市复合功能生态网络构建结果

Fig.9 Results of constructing composite function ecological network in Jiangyin City

### 3.3 基于高强度城市化地区生态网络体系的生态保护修复策略

江阴市尺度嵌套生态网络和复合功能生态网络共同构成江阴市生态网络体系(图 10),在国土空间生态修复实践中可依托该生态网络体系,针对不同生态网络要素采取一系列生态保护修复措施。其中,针对核心生态源地、复合功能生态源地,应当予以最高优先级的保护,适当建立缓冲区隔离周边人为活动带来的影响,充分发挥江阴市自身生态用地的关键作用;针对保育生态源地和不同单一功能生态源地,应尽可能进行生态管控,保证生态网络的效能;针对功能型生态战略点,建议采取重点保护建设措施,在生态源地之间起“跳板”或“踏脚石”作用;针对基础生态廊道和单一功能生态廊道,充分考虑廊道指示位置附近用地现状,因地制宜确定廊道具体范围,遵循基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS)理念开展保护建设与维护;针对跨行政区域的无锡-江阴生态廊道与环太湖-江阴生态廊道,应与相关地方部门积极沟通协调,通过区域联动保护修复以真正实现尺度嵌套生态网络带来的外部生态支撑与整体生态保护效率提升。

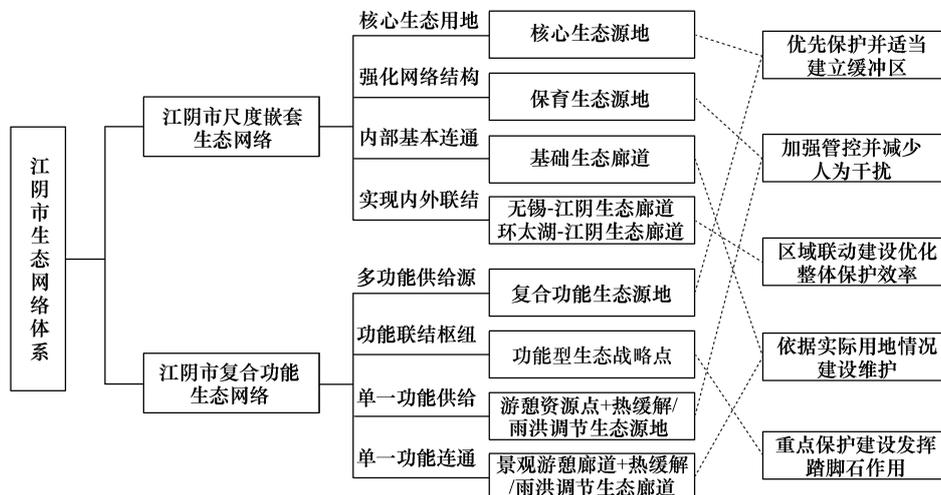


图 10 基于高强度城市化地区生态网络体系的生态保护修复策略

Fig.10 Ecological conservation and restoration strategies based on ecological network system in high-intensity urbanized areas

## 4 结论与讨论

本研究以县级尺度高强度城市化地区江阴市为例,首先对研究区生态需求及生态网络可发挥的功能进行

解析,在遵循“生态源地识别-构建综合阻力面-生态网络生成”传统范式基础上,有针对性地进行区域差异化导向下生态网络构建研究;针对江阴市低生态丰度与县级尺度的特征,通过与环太湖地区生态网络、无锡市生态网络形成可提供外部支撑的尺度嵌套生态网络;面向气候变化等背景及城市区域多元生态需求,统筹考虑缓解热岛效应、雨洪调节与景观游憩服务供给构建复合功能生态网络,由尺度嵌套生态网络与复合功能生态网络共同构成江阴市高强度城市化地区生态网络体系。结论如下:

(1) 尺度嵌套生态网络:通过构建整合江阴市范围内的环太湖地区生态网络和无锡市生态网络,形成江阴市尺度嵌套生态网络,得到核心生态源地共 4 个,总面积约为 4303.58hm<sup>2</sup>,保育生态源地共 26 个,总面积约为 431.86hm<sup>2</sup>,两类生态源地总面积占比 4.76%,大多分布于江阴市北部和中部;完全位于江阴市范围内的基础生态廊道共 39 条,在无锡市生态网络中与江阴市外部生态源地形成联结的无锡-江阴生态廊道共 11 条,在环太湖地区生态网络中与江阴市外部生态源地形成联结的环太湖-江阴生态廊道共 3 条,生态廊道除在江阴市西部没有分布之外,总体分布均匀。经过尺度嵌套,江阴市实现了生态用地规模总体不变的同时,通过与周边无锡市以及环太湖地区范围内生态网络进行衔接,借助太湖等江阴市外部重要生态斑块的生态支撑作用,有力提高了生态保护效率和区域生态系统服务供给水平。

(2) 复合功能生态网络:江阴市共有 11 个复合功能生态源地,面积 4755.31hm<sup>2</sup>,占市域面积的 4.78%,主要分布于北部长江沿线以及中部的定山、花山;兼具复合功能的功能型生态战略点共 88 个,主要分布于江阴市中部和西南部。提取三类单一生态功能网络要素包括,热缓解生态源地 31 个,热缓解生态廊道 51 条,雨洪调节生态源地 26 个,雨洪调节生态廊道 52 条;游憩资源点 56 个,景观游憩廊道 85 条。不同的单一功能生态源地及廊道分布情况有所差异,雨洪调节单一功能生态网络要素相较另外两个单一功能生态网络分布更加均匀,且不同镇级区域在江阴市复合功能生态网络构建过程中发挥的作用并不相同。复合功能生态网络通过连通提供生态功能的重要斑块,维护生态流正常运行,可针对性满足高强度城市化的多元生态需求,提高其应对自然灾害的能力。

(3) 基于江阴市高强度城市化地区生态网络体系,在国土空间生态修复实践中,遵循 NbS 理念和因地制宜的原则,采取包含保护建设、管控维护以及联动修复等多方面的生态保护修复措施,充分发挥生态网络独特优势以及所在区域的重要生态资源支撑作用。

本研究通过解析不同情形生态网络构建目标和高强度城市化地区生态需求及生态网络体系构建要点,厘清了国土空间生态修复背景下面向高强度城市化地区生态网络构建的实际需求,为研究区江阴市及与之特征类似的地区提供了区域差异化导向下基于尺度嵌套与复合功能视角的生态网络体系构建方案。本研究与以往研究做法的差异在于:①传统生态网络多服务于物种保护,而非以为人类这一城市的生活主体提供福祉为首要目标;②传统做法进行生态源地识别时重点考虑的生态系统服务多为自然生态系统主要供给类型,城市生态系统的自身特征及面向气候变化等背景下的生态需求决定了其主要生态系统服务需求的特殊性,本研究重点关注几个调节类和美学景观类生态系统服务,试图为提升城市应对自然灾害风险的能力提供解决方案;③传统做法多在研究区内部优化生态网络构建思路,本研究结合国土空间生态修复工作多尺度、多层级的要求,将尺度嵌套纳入研究区生态网络构建环节从而起到外部支撑作用,提升了区域生态保护效率;④本研究创新性地多个生态网络形成的区域生态网络体系视为一个整体用于指导具体生态保护修复实践。

本研究面向县级尺度高强度城市化地区江阴市,在充分考虑生态本底及实际需求的基础上,基于尺度嵌套与复合功能的视角构建生态网络体系,目前在与现有规划结合,包括对生态保护红线、生态管控区划定结果的运用方面存在不足;同时,在复合功能生态网络的景观阻力系数及权重设定方面存在一定主观性;且生态廊道宽度与功能型生态战略点具体范围的确定方面还需细化。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Liang L W, Chen M X, Lu D D. Revisiting the relationship between urbanization and economic development in China since the reform and opening-up. *Chinese Geographical Science*, 2022, 32(1): 1-15.

- [ 2 ] Wang Y J, Qu Z Y, Zhong Q C, Zhang Q P, Zhang L, Zhang R, Yi Y, Zhang G L, Li X C, Liu J. Delimitation of ecological corridors in a highly urbanizing region based on circuit theory and MSPA. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109258.
- [ 3 ] Ruan L L, He T, Xiao W, Chen W Q, Lu D B, Liu S C. Measuring the coupling of built-up land intensity and use efficiency: an example of the Yangtze River Delta urban agglomeration. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 87: 104224.
- [ 4 ] 杨宜男, 李敬, 王立, 王子豪, 姚晨心, 王原. 长三角地区城市化对典型生态系统服务供需的影响. *自然资源学报*, 2022, 37(6): 1555-1571.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] 李权荃, 金晓斌, 张晓琳, 韩博, 李寒冰, 周寅康. 基于景观生态学原理的生态网络构建方法比较与评价. *生态学报*, 2023, 43(4): 1461-1473.
- [ 7 ] 和娟, 师学义, 付扬军. 基于生态系统服务的汾河源头区域生态安全格局优化. *自然资源学报*, 2020, 35(4): 814-825.
- [ 8 ] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 胡熠娜, 杨旸. 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.
- [ 9 ] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 蔡接接. 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.
- [ 10 ] 潘竞虎, 王云. 基于 CVOR 和电路理论的讨赖河流域生态安全评价及生态格局优化. *生态学报*, 2021, 41(7): 2582-2595.
- [ 11 ] 许峰, 尹海伟, 孔繁花, 徐建刚. 基于 MSPA 与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建. *生态学报*, 2015, 35(19): 6425-6434.
- [ 12 ] Dong J Q, Peng J, Liu Y X, Qiu S J, Han Y N. Integrating spatial continuous wavelet transform and kernel density estimation to identify ecological corridors in megacities. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 199: 103815.
- [ 13 ] Shen J K, Wang Y C. An improved method for the identification and setting of ecological corridors in urbanized areas. *Urban Ecosystems*, 2023, 26(1): 141-160.
- [ 14 ] Yu Q, Yue D P, Wang Y H, Kai S, Fang M Z, Ma H, Zhang Q B, Huang Y. 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.
- [ 15 ] 张晓琳, 金晓斌, 赵庆利, 任婕, 韩博, 梁鑫源, 周寅康. 基于多目标遗传算法的层级生态节点识别与优化——以常州市金坛区为例. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 174-189.
- [ 16 ] Shen Z, Wu W, Tian S Q, Wang J. A multi-scale analysis framework of different methods used in establishing ecological networks. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 228: 104579.
- [ 17 ] 陈江碧, 樊亚明. 国土空间规划背景下的城市绿色生态网络规划策略及实践. *规划师*, 2020, 36(8): 56-60.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] 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.
- [ 20 ] 冯舒, 唐正宇, 俞露, 郭晨, 汤沫熙, 杨志鹏. 城市群生态网络协同构建场景要素与路径分析——以粤港澳大湾区为例. *生态学报*, 2022, 42(20): 8223-8237.
- [ 21 ] Ding M M, Liu W, Xiao L, Zhong F X, Lu N, Zhang J, Zhang Z H, Xu X L, Wang K L. Construction and optimization strategy of ecological security pattern in a rapidly urbanizing region: a case study in central-south China. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108604.
- [ 22 ] Hou W, Zhai L, Walz U. Identification of spatial conservation and restoration priorities for ecological networks planning in a highly urbanized region: a case study in Beijing-Tianjin-Hebei, China. *Ecological Engineering*, 2023, 187: 106859.
- [ 23 ] Shen Z, Wu W, Chen S F, Tian S Q, Wang J, Li L J. A static and dynamic coupling approach for maintaining ecological networks connectivity in rapid urbanization contexts. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 369: 133375.
- [ 24 ] Wang S, Wu M Q, Hu M, Fan C, Wang T, Xia B. Promoting landscape connectivity of highly urbanized area: an ecological network approach. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107487.
- [ 25 ] Yang J, Huang X. The 30m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [ 26 ] Zhang X, Liu L Y, Zhao T T, Gao Y, Chen X D, Mi J. GISD30: global 30m impervious-surface dynamic dataset from 1985 to 2020 using time-series Landsat imagery on the Google Earth Engine platform. *Earth System Science Data*, 2022, 14(4): 1831-1856.
- [ 27 ] Liu F, McShea W J, Li D Q. Correlating habitat suitability with landscape connectivity: a case study of Sichuan golden monkey in China. *Ecological Modelling*, 2017, 353: 37-46.
- [ 28 ] 史芳宁, 刘世梁, 安毅, 孙永秀. 基于生态网络的山水林田湖草生物多样性保护研究——以广西左右江为例. *生态学报*, 2019, 39(23): 8930-8938.
- [ 29 ] 屠越, 刘敏, 高婵婵, 孙彦伟, 蔡超琳, 苏玲. 大都市区生态源地识别体系构建及国土空间生态修复关键区诊断. *生态学报*, 2022, 42(17): 7056-7067.

- [30] 张玥, 许端阳, 李霞, 张晓宇, 王小博, 王绍强. 中-老交通走廊核心区生态廊道构建与关键节点识别. *生态学报*, 2020, 40(6): 1933-1943.
- [31] Vogt P, Riitters K H, Estreguil C, Kozak J, Wade T G, Wickham J D. Mapping spatial patterns with morphological image processing. *Landscape Ecology*, 2007, 22(2): 171-177.
- [32] 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.
- [33] 张晓琳, 金晓斌, 韩博, 孙瑞, 梁鑫源, 李寒冰, 周寅康. 长江下游平原生态网络识别与优化——以常州市金坛区为例. *生态学报*, 2021, 41(9): 3449-3461.
- [34] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1-16.
- [35] McRae B H, Dickson B G, Keitt T H, Shah V B. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. *Ecology*, 2008, 89(10): 2712-2724.
- [36] Oke T R. *Urban climates*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2017.
- [37] Peng J, Cheng X Y, Hu Y X, Corcoran J. A landscape connectivity approach to mitigating the urban heat island effect. *Landscape Ecology*, 2022, 37(6): 1707-1719.
- [38] Wang M M, Zhang Z J, Hu T, Liu X G. A practical single-channel algorithm for land surface temperature retrieval: application to landsat series data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(1): 299-316.
- [39] Wang M M, Zhang Z J, Hu T, Wang G Z, He G J, Zhang Z M, Li H, Wu Z J, Liu X G. An efficient framework for producing landsat-based land surface temperature data using google earth engine. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 4689-4701.
- [40] 刘航, 申格, 黄青. 近 10 a 武汉市城市热岛效应演变及其与土地利用变化的关系. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(9): 1466-1475.
- [41] 高静, 龚健, 李靖业. “源-汇”景观格局的热岛效应研究——以武汉市为例. *地理科学进展*, 2019, 38(11): 1770-1782.
- [42] Yu Z W, Yang G Y, Zuo S D, Jørgensen G, Koga M, Vejre H. Critical review on the cooling effect of urban blue-green space: a threshold-size perspective. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 49: 126630.
- [43] Peng J, Jia J L, Liu Y X, Li H L, Wu J S. Seasonal contrast of the dominant factors for spatial distribution of land surface temperature in urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 215: 255-267.
- [44] 熊鹰, 章芳. 基于多源数据的长沙市人居热环境效应及其影响因素分析. *地理学报*, 2020, 75(11): 2443-2458.
- [45] 胡楠林, 任志彬, 董禹麟, 付尧, 郭玉洁, 毛之夏, 常馨悦. 中国城市群热岛效应时空演变及其影响因素分析. *地理科学*, 2022, 42(9): 1534-1545.
- [46] 周洋. 南方丘陵城市雨水生态网络规划研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [47] 李孝永, 匡文慧. 北京城市土地利用/覆盖变化及其对雨洪调节服务的影响. *生态学报*, 2020, 40(16): 5525-5533.
- [48] 马丽君, 王传涛, 王雯军, 张丽丽, 黄海平, 张升堂. 基于 SCS-CN 模型的郑州市区域产流特征研究. *水土保持通报*, 2022, 42(4): 203-209, 381.
- [49] Fan F L, Fan W, Weng Q H. Improving urban impervious surface mapping by linear spectral mixture analysis and using spectral indices. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2015, 41(6): 577-586.
- [50] 姚磊, 卫伟, 于洋, 肖峻, 陈利顶. 基于 GIS 和 RS 技术的北京市功能区产流风险分析. *地理学报*, 2015, 70(2): 308-318.
- [51] 吴健生, 张朴华. 城市景观格局对城市内涝的影响研究——以深圳市为例. *地理学报*, 2017, 72(3): 444-456.
- [52] 王甫园, 王开泳. 珠江三角洲城市群区域绿道与生态游憩空间的连接度与分布模式. *地理科学进展*, 2019, 38(3): 428-440.
- [53] 傅微, 俞孔坚. 基于生态安全格局的城市大规模绿化方法——北京百万亩平原生态造林. *城市规划*, 2018, 42(12): 125-131.
- [54] 时慧. 生态与游憩双重导向下的市域绿道网络选线方法研究——以海南省陵水黎族自治县为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [55] 成雨萍. 南方丘陵城市复合型生态网络构建研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.