

DOI: 10.20103/j.stxb.202504291042

王倩雯, 周航, 张芮嘉, 王宇宁, 赵广宇. 基于生态-文化多维价值复合的线性文化遗产跨层网络格局构建. 生态学报, 2025, 45(24): 12470-12483.  
Wang Q W, Zhou H, Zhang R J, Wang Y N, Zhao G Y. Construction of cross-layer network patterns for linear cultural heritage based on the integration of ecological-cultural multi-dimensional values. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(24): 12470-12483.

# 基于生态-文化多维价值复合的线性文化遗产跨层网络格局构建

王倩雯<sup>1</sup>, 周航<sup>2,\*</sup>, 张芮嘉<sup>1</sup>, 王宇宁<sup>1</sup>, 赵广宇<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 天津师范大学地理学部, 天津 300387

<sup>2</sup> 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

<sup>3</sup> 天津大学建筑设计规划研究总院有限公司文物保护所, 天津 300072

**摘要:** 构建生态-文化复合跨层网络是实现线性文化遗产多维价值协同表达的重要路径。以生态与文化价值嵌套特征显著的大运河天津段流经的行政区域为典型案例, 基于社会生态系统理论框架, 融合形态学空间格局分析、电路理论模型与社会网络分析等跨学科方法, 提出“识别-连接-耦合-优化”的跨层网络构建路径, 突破传统以物理结构整合为导向的单维建模范式, 推动网络研究从结构整合向价值整合转型。研究结果表明: (1) 大运河天津段流域生态源地在空间尺度上存在明显的规模差异与布局不均现象; 文化源地则沿大运河沿岸呈现大分散、小集中的分布特征。 (2) 区域内生态廊道呈现“东北部密集、西南与西北部稀疏”的总体格局, 且部分边缘区域的小型生态源地存在空间割裂与生态孤岛化的风险; 文化廊道网络以大运河为核心轴线呈放射状向外围拓展。 (3) 生态-文化复合价值的功能性子群呈现出明显的跨行政边界分布格局, 据此识别并构建 6 组、3 类 (潜力型、失衡型、示范型) 生态-文化多维价值复合的跨层网络结构。以此为依据, 分别提出单一网络与跨层网络格局优化策略, 旨在为线性文化遗产自然资源与文化遗产的融合保护、空间治理及规划管控提供科学依据与技术支持。

**关键词:** 跨层网络; 网络格局优化; 多维价值; 电路理论模型; 大运河天津段

## Construction of cross-layer network patterns for linear cultural heritage based on the integration of ecological-cultural multi-dimensional values

WANG Qianwen<sup>1</sup>, ZHOU Hang<sup>2,\*</sup>, ZHANG Ruijia<sup>1</sup>, WANG Yuning<sup>1</sup>, ZHAO Guangyu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Geography, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

<sup>2</sup> School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

<sup>3</sup> Tianjin University Research Institute of Architectural Design and Urban Planning Co., Ltd., Tianjin 300072, China

**Abstract:** The construction of ecological-cultural composite cross-layer networks represents a crucial pathway for realizing the synergistic expression of the multi-dimensional values embedded in linear cultural heritage. This study takes the administrative areas traversed by the Tianjin section of the Grand Canal as a representative case, notable for its pronounced nesting of ecological and cultural values. Grounded within the theoretical framework of social-ecological system, the research adopts an interdisciplinary methodology that combines morphology spatial pattern analysis, circuit theory model, and social network analysis. Through the integration of these diverse analytical tools, the research proposes a four-step cross-layer network construction pathway termed “identification-connection-coupling-optimization”. This innovative approach fundamentally transcends the limitations of conventional modeling paradigms that primarily focus on physical or structural

**基金项目:** 天津市哲学社会科学规划青年项目 (TJGLQN23-011)

**收稿日期:** 2025-04-29; **网络出版日期:** 2025-09-17

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 15023677347@163.com

connectivity, and instead pivots toward a value-centric model that integrates ecological function and cultural significance within a unified analytical framework. The results showed that: (1) the ecological source areas in the Tianjin section of the Grand Canal basin have obvious scale heterogeneity and an uneven layout on the spatial scale, while the cultural source areas are primarily distributed along the coast of the Tianjin section of the Grand Canal with the characteristics of large-scale dispersion and small-scale concentration. (2) The ecological corridors in the Tianjin section of the Grand Canal show a general pattern of “dense in the northeast, while sparse in the southwest and northwest”, and this imbalance highlights a tangible risk of spatial fragmentation and ecological isolation of small ecological sources in some peripheral or marginal areas; meanwhile, the network of cultural corridors is expanding radially to the periphery with the Tianjin section of the Grand Canal as the core axis, forming a spatial distribution characteristic of “wide in the southern reaches and narrow in the northern sections”. (3) The functional subgroups of ecological-cultural composite values show an obvious distribution pattern across administrative boundaries, highlighting the importance of multi-jurisdictional coordination. Based on the synergistic expression and spatial interaction of these values, 6 cross-layer network groups are identified and categorized into 3 distinct types: potential type, unbalanced type, and demonstration type. Corresponding optimization strategies are proposed for both single-layer and integrated network patterns. These strategies aim to enhance spatial coherence, reinforce ecological and cultural synergies, and inform the integrated conservation, spatial governance, and adaptive planning of linear cultural heritage systems. This study thus offers a robust scientific foundation and practical toolkit for promoting value-oriented, cross-scalar management of natural and cultural resources in complex heritage landscapes.

**Key Words:** cross-layer network; network pattern optimization; multidimensional value; circuit theory model; Tianjin section of the Grand Canal

线性文化遗产是以线性空间形态为载体,集物质与非物质文化遗产于一体的特殊文化景观类型<sup>[1]</sup>,具有各类要素时空连续性强、空间尺度延展广泛、多维价值复合显著等核心特征<sup>[2-3]</sup>。该区域作为人类社会活动与自然地理相互作用的产物,兼具历史文化遗产、生态功能维系和社会空间治理等多重功能<sup>[4-6]</sup>,已逐渐发展成为支撑区域可持续发展的重要基础与战略载体<sup>[7]</sup>。然而,受线性分布、尺度跨域以及系统脆弱等特征的影响,线性文化遗产区域普遍面临生态基底破碎化<sup>[8]</sup>与文化脉络断裂<sup>[9]</sup>的双重挑战。如何实现生态系统完整性与文化资源连续性的协同保护与统筹治理,成为当前亟需解决的核心科学问题与实践难题。

在此背景下,构建区域网络格局被视为优化系统结构和功能、统筹区域多维价值要素的有效路径<sup>[10]</sup>。当前,针对线性文化遗产的价值协同研究主要聚焦于生态与文化两大维度:生态网络构建已形成较为成熟的理论与技术体系,既有研究通常以生态系统服务价值评估<sup>[11]</sup>或“源-汇”<sup>[12]</sup>理论为基础,借助景观格局分析、最小累积阻力模型及电路理论模型等方法,系统识别生态源地、廊道与关键节点,构建“源地-廊道”二元结构的网络格局<sup>[13-15]</sup>,并广泛应用于生态安全格局优化与国土空间生态修复领域<sup>[16-17]</sup>;文化遗产网络构建则更多从社会属性或文化管理视角切入,依托遗产景观格局<sup>[18]</sup>与社会网络分析等框架,通过问卷访谈、历史路径模拟或社会属性分类识别等定性与定量结合的方法,探索遗产资源的空间关联性、保护适宜性及文化资源开发潜力<sup>[19-20]</sup>。从既有研究成果来看,生态网络与文化网络研究之间仍存在显著的学科分野与范式割裂。具体而言,生态网络多局限于自然要素分析(如生境质量、生态要素流动等),而文化遗产网络则强调文化资源的社会意义与治理路径。这种割裂在以线性文化遗产为代表的复合价值区域中尤为突出,导致区域综合治理过程中,生态保护与文化遗产目标间存在显著的协调障碍,影响协同效率与系统韧性。虽然有少数学者尝试通过“廊道叠加”<sup>[21]</sup>或属地管理导向的机械整合<sup>[22]</sup>方式初步构建生态与文化相互关联的网络体系,但传统单维网络构建范式或简单的物理合并难以有效表征线性文化遗产及其周边区域生态与文化系统的内在耦合机制,无法支撑协同保护与可持续利用的决策需求。

鉴于此,本研究以生态-文化多维价值复合特征显著的线性文化遗产及其关联区域为研究对象,基于社会

生态系统理论框架(Social-Ecological Systems, SES),将区域内的生态价值与文化价值视为相互嵌套、动态互动的复合系统<sup>[23]</sup>,探讨“生态-文化跨层网络格局”构建方法。以中国大运河天津段流经的七个行政辖区为典型案例,整合形态学空间格局分析、电路理论模型及社会网络分析等多学科交叉技术方法,提出“识别-连接-耦合-优化”的跨层网络建构框架。该框架旨在突破传统网络格局构建的单维局限及机械化物理合并思维,强调网络构建从“结构整合”向“价值整合”的范式转型,以促进多维价值体系的治理逻辑融入网络格局优化,并为线性文化遗产等特定区域的多维价值协同与综合治理提供理论支撑与方法示范。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

中国大运河是一项由国家主导建设、运营与维护的重要战略工程,其遗产价值不仅体现为规模宏大的历史文物和古迹群落,更构成了一条跨越时空、融汇多元文化并持续演进的线性文化景观,反映了人类社会与自然生态之间长期持续的互动关系。

其中,大运河天津段河道总长约 195.5 km,流经武清区、北辰区、红桥区、南开区、河北区、西青区和静海区等七个行政区,是运河沿线城市聚落体系的重要组成部分(图 1)。该区域历史演变具有独特的代表性,历经两千余年的动态演进,逐步形成了地域特征显著且空间连续的生态格局与文化遗产体系。一方面,在自然地理演替与人类活动长期交互作用下,区域内形成了以湿地、湖泊和河岸植被为代表的多样化生态景观,提供了水源涵养、生物栖息、气候调节等关键生态系统服务;同时,大运河亦对天津城市的兴起与区域社会经济发展产生了重要影响,沿线分布丰富的水利遗存、历史聚落、建筑遗址、非物质文化遗产等多类遗产要素,系统性地承载着技术、经济、社会与景观等多维度的综合价值。这种复合型价值体系体现了区域内生态系统与文化系统之间的高度耦合与相互依存关系。然而,在近年来快速城市化进程的影响下,该区域普遍存在生态系统退化与文化资源碎片化并发的双重挑战,对运河多维价值资源的空间连续性与系统完整性的维持构成严峻威胁。

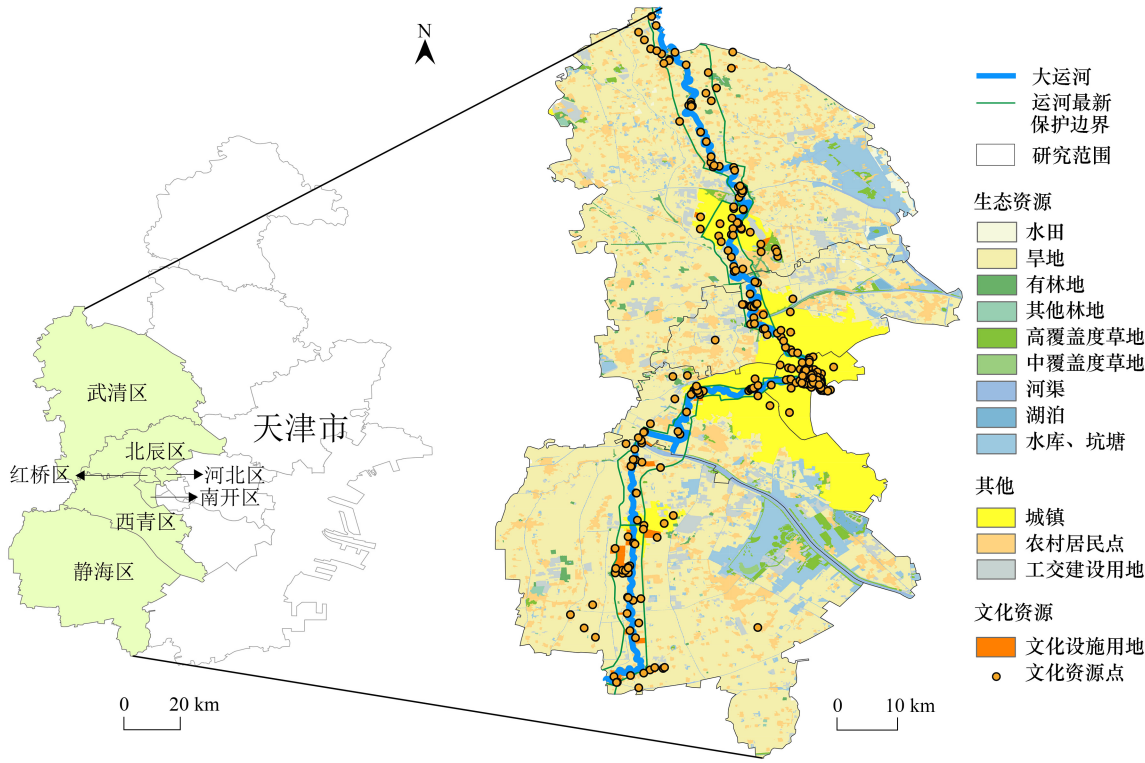


图 1 研究区域概况

Fig.1 The overview of research area

1.2 数据来源

本研究使用的数据类型包括土地利用数据、数字高程数据(Digital Elevation Model,DEM)、道路数据、人口数据、夜间灯光数据、兴趣点数据、生态系统服务价值数据、归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)等,数据来源和相关说明见表1。

表 1 数据来源  
Table 1 data sources

类别 Category	数据名称 Data name	描述 Description	分辨率 Resolution	数据来源 Data sources
土地利用数据 Land use data	土地利用数据	中科院 2020 年 30m 土地利用数据集	30m	中国科学院资源环境与数据中心 ( <a href="http://www.dsac.cn">http://www.dsac.cn</a> )
自然环境数据 Natural environment data	DEM	地理空间数据云 2020 年 30m 数字高程数据集	30m	地理空间数据云 ( <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a> )
	NDVI	2022 年天津市 NDVI 数据	1km	NASA 发布的 MOD13A3 数据集 ( <a href="https://www.earthdata.nasa.gov/">https://www.earthdata.nasa.gov/</a> )
社会经济数据 Socio-economic data	水体分布数据	天津市全部水体,包含河流、水库、人工湖、沟渠等	—	Open Street Map 开放街道地图 ( <a href="https://openstreetmap.us/">https://openstreetmap.us/</a> )
	人口数据	天津市 2020 年各区常住人口数据	100m	《天津市统计年(2021)》 ( <a href="https://stats.tj.gov.cn/">https://stats.tj.gov.cn/</a> )
	道路数据	2024 年全国道路交通数据	—	Open Street Map 开放街道地图 ( <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a> )
	夜间灯光数据	2023 年全国夜间灯光数据	500m	地理空间数据云 ( <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a> )
	兴趣点数据	2020 年科教文化服务设施分布,2021 年非物质文化遗产分布,居民点分布,政府分布,文旅局分布,规划与自然资源局分布,生态环境局分布	—	资源环境科学数据平台——不同年份 POI 数据、天津市 2020 年 POI 矢量数据集 ( <a href="https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=341">https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=341</a> )
生态系统服务价值数据 Ecosystem services value data	游憩价值	中国陆地生态系统服务价值空间分布数据集	1km	中国科学院资源环境与数据中心 ( <a href="http://www.resdc.cn/DOI">http://www.resdc.cn/DOI</a> )
文化资源数据 Cultural resource data	文化遗产点数据	运河沿岸遗产及历史遗产构成	—	《大运河天津段核心监控区国土空间管控细则(试行)》《天津市 A 级景区名录》《天津市文化保护单位名录》等

DEM:数字高程数据 Digital elevation model;NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

1.3 研究方法

SES 理论强调生态与社会系统并非独立运行,而是通过系统之间持续、动态的相互作用与耦合,形成具有整体性特征的复杂系统。该理论将生态资源、社会参与者及其相互依存关系抽象为社会生态网络的节点和链接,用于揭示自然资源与人类社会的复杂关系,并实现各类价值要素在特定地理空间中的融合。因此,其理论内涵主要体现在两个方面:(1)整体耦合性,即生态与社会系统各构成要素相互反馈、协同演化,形成具有整体稳定性与动态平衡的复合系统<sup>[24]</sup>;(2)多层互动性,即生态与社会系统之间存在多个空间尺度、时间维度或组织层面的复杂互动关系,为资源整合提供能量和信息基础<sup>[25]</sup>。

基于 SES 理论,结合大运河区域生态与文化价值的嵌套特征,本研究将“跨层网络”界定为生态与社会系统之间通过各构成要素的耦合协同形成的复合网络体系,强调不同要素跨领域、跨尺度、跨属性的关联关系与相互作用;该网络体系包含的“跨层节点”则为源地中能够通过自身的生态或文化功能,在两个系统之间发挥桥接作用的关键源地。采用多源数据融合与跨学科交叉方法,将 SES 理论的核心内涵转译为“识别-连接-耦合-优化”的跨层网络构建路径,具体步骤如下:(1)识别:基于相对成熟的“斑块-廊道”分析模式,采用形态学空间分析方法和连通性指数共同提取生态源地,依据各文化遗产名录筛选重要文化源地;(2)连接:根据既有研究成果和天津段流域生态与文化资源实际情况,选取影响生态交流和文化传播的阻力因素,分别构建生态阻力面和文化阻力面,并采用电路理论模型提取单一维度的生态、文化廊道;(3)耦合:通过构建融合社会属



性和自然属性的空间邻接矩阵,生成生态与文化价值协同的多维跨层联系网络;(4)优化:基于网络格局构建结果提出具有实践价值的优化策略(图2)。

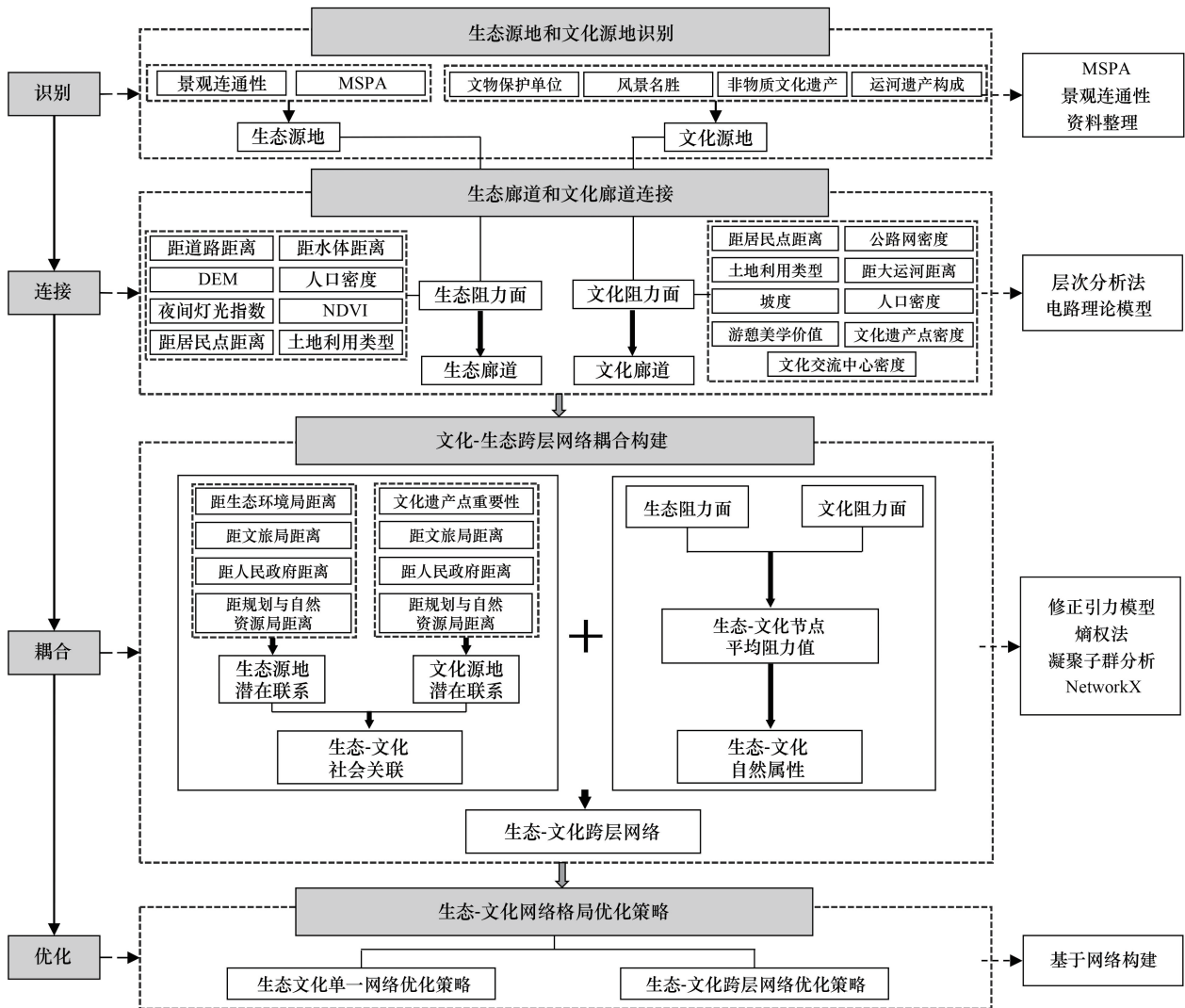


图2 跨层网络构建技术路线图

Fig.2 The research framework of network construction

MSPA:形态学空间格局分析 Morphological spatial pattern analysis

### 1.3.1 生态-文化源地识别

生态源地是区域内生态功能良好的重要斑块,对维护区域生态安全具有重要意义<sup>[26]</sup>。基于既有研究成果,采用形态空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)方法对生态源地进行识别<sup>[27]</sup>:首先,利用 ArcGIS 10.8 将土地利用类型进行重分类,提取城市绿地、林地、草地、水体等生态用地作为前景要素赋值为2,其它用地类型作为背景要素赋值为1;其次,采用 Guidos Toolbox 工具,对生成的二值栅格数据进行 MSPA 分析,识别出核心区、桥接区、孔隙、环线、支线、边缘区和孤岛7种不重叠的空间形态类型。基于运河流域生态功能与景观尺度的关系,提取面积大于50hm<sup>2</sup>的核心区生态斑块,并采用 Conefor 软件计算可能连通性指数(Probability of Connectivity, PC)、整体连通性指数(Integral Index of Connectivity, IIC)、归一化后的重要性指数(Normalized Importance Index, dI'),最终根据计算结果筛选区域生态源地。

文化源地的识别主要依据大运河天津段文化资源名录及其空间分布,综合考虑沿线各级文物保护单位、大运河遗产构成要素、天津市A级景区、古镇古村落、风景名胜地和国家级非物质文化遗产项目等多类型文

化资源,将其共同纳入潜在文化源地体系。根据各类名录中文化遗产要素的历史文化价值和保护级别,将遗产点划分为“非常重要”“重要”和“一般”三级,并通过历史文献和专家意见,选取其中“非常重要”和“重要”等级的文化遗产点作为区域文化源地,以确保选取的文化源地具备较高的历史文化价值及代表性。

### 1.3.2 阻力面构建

阻力面用于量化不同景观类型阻碍或促进物质迁移和交换的程度<sup>[28]</sup>。结合既有研究成果<sup>[29-30]</sup>、天津段流域生态与文化资源实际情况及文化传播的特殊性,分别构建生态与文化阻力面,以表征生态过程与文化传播过程所受到的空间阻碍效应。其中,生态阻力面选取人口密度、土地利用类型、DEM、夜间灯光指数、NDVI、距道路距离、距居民点距离、距水体距离 8 项阻力因子;文化阻力面选取坡度、距大运河距离、土地利用类型、人口密度、生态服务价值中的游憩美学价值、公路网密度、文化遗产点密度、文化交流中心密度、距居民点距离 9 项阻力因子,表征生态过程发生和文化信息传播时所受阻力的影响,并设定各阻力因子的阻力值。利用 ArcGIS 10.8 对各阻力因子图层进行自然断点分级与标准化处理,使得各因子阻力值范围统一为 1—5,其中阻力值越高代表物质迁移与交换难度越大。采用层次分析法确定各项因子权重,并通过加权叠加运算得到区域内生态过程与文化传播所面临的综合空间阻力特征分布(图 3)。

### 1.3.3 单一维度网络提取

电路理论模型(Circuit Theory Model)将物理电路的原理类比于生态景观的物质流动过程,利用电子在电路中的随机游走特性来模拟物种或物质在景观中的随机扩散行为,能够有效地反映异质性景观中物质扩散过程的随机性与不确定性<sup>[31]</sup>。电流强度较高的区域对应于较大的物质流量,表明此类区域在物质交流与扩散过程中发挥关键作用,可识别为景观廊道网络的核心组成部分<sup>[32]</sup>。本研究采用电路理论模型,借助 ArcGIS 10.8 中 Linkage Mapper 的 Linkage pathway 工具模拟连接源地间耗费阻力最小的路径,从而提取生态及文化源地间要素流动的最优廊道。

### 1.3.4 多维度跨层网络构建

基于 SES 理论框架,通过构建融合社会属性和自然属性的空间邻接矩阵,进而生成生态与文化价值协同的多维跨层联系网络。

在社会属性方面,鉴于政府机构的行政效能能够直接影响生态资源和文化遗产的管理水平,因而将生态源地距人民政府、文旅局、规划与自然资源局、生态环境局等 4 项空间可达性指标作为生态源地“质量”,将文化源地距人民政府、文旅局、规划与自然资源局等 3 项空间可达性指标以及文化遗产点重要性作为文化源地“质量”。首先,对传统引力模型进行适应性修正,以精准评估生态源地与文化源地间的空间关联强度。具体而言,改进的引力模型通过量化节点之间的相互作用潜能,反映源地之间耦合的可能性。节点之间的引力值越大,表明其联系程度越高<sup>[33]</sup>。其计算公式为:

$$C_{ij} = G' \frac{m_i m_j}{D_{ij}^2} \quad (1)$$

式中, $C_{ij}$ 表示*i*源地与*j*源地的联系强度, $D_{ij}$ 表示*i*源地与*j*源地之间的最短距离, $G'$ 为常数, $m_i$ 和 $m_j$ 分别表示*i*源地与*j*源地的“质量”。

其次,基于社会网络分析方法中的凝聚子群分析,进一步挖掘生态源地和文化源地间的属地管理、政策关联、功能协同、文化认同等社会关联特征。凝聚子群分析是一种经典的社会网络结构分析方法,能够有效识别网络中内部高度关联的节点集合,从而揭示网络内潜在的社会结构与相互作用模式<sup>[34]</sup>。本研究通过凝聚子群分析方法重新划分生态与文化源地的空间子群关系,阐明其内部社会联系的价值融合、功能关联等隐性特征。具体分析流程如下:①利用 UCINET 软件,以 CONCOR 算法处理空间关联矩阵;②将初始矩阵经标准化处理后输入算法,迭代计算各源地间的关联关系数值;③通过反复迭代运算,直至各源地间相关系数收敛至稳定的 1 或-1,从而实现子群结构的有效划分。

在自然属性方面,依据 2.3.2 节提出的复合阻力数据方案构建空间阻力矩阵,计算每对生态-文化源地之

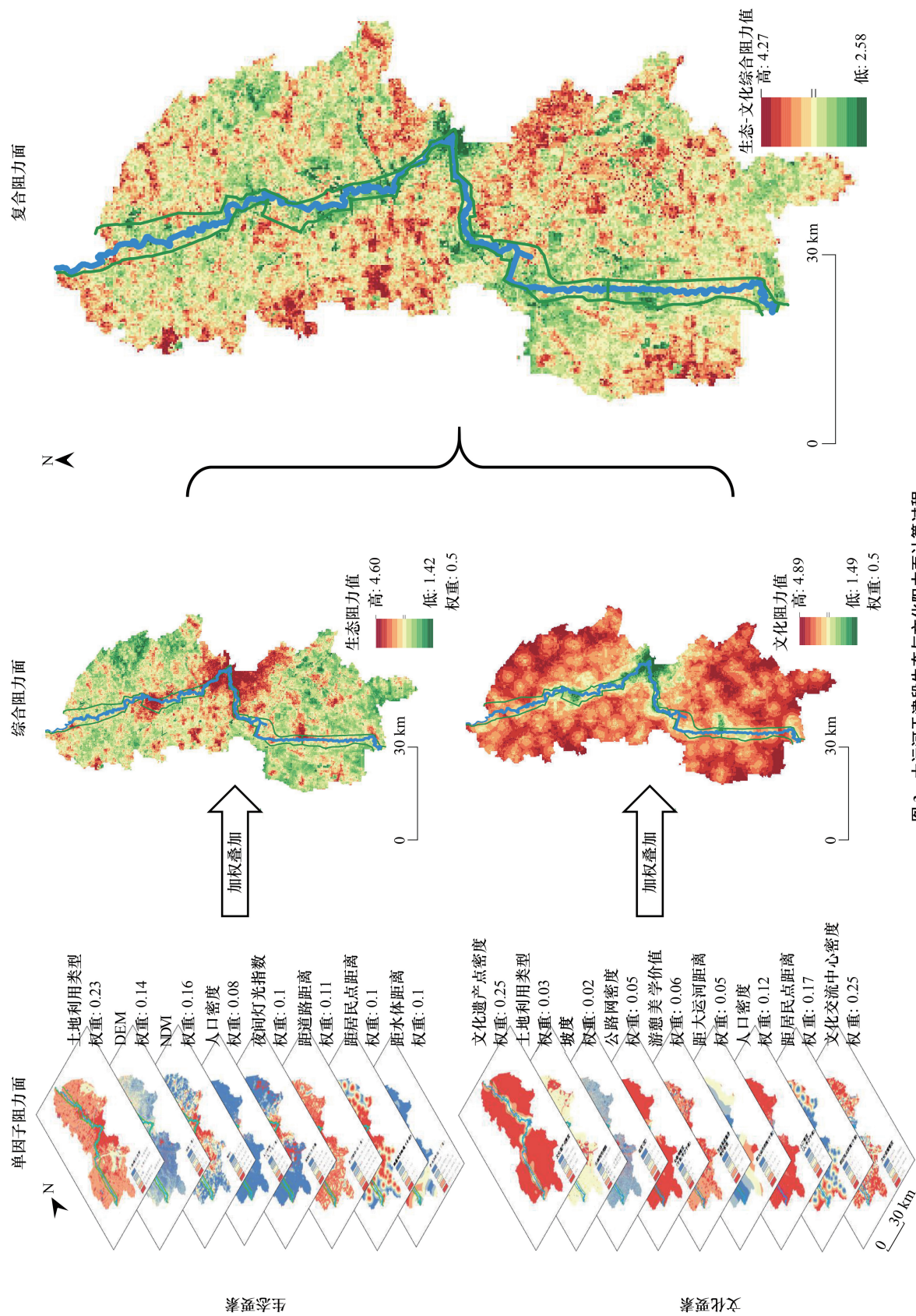


图3 大运河天津段生态与文化阻力面计算过程  
Fig.3 Calculation process of ecological and cultural resistance surface in Tianjin section of the Grand Canal



间的平均阻力值,并以此为基础构建空间阻力索引。根据综合阻力值的分布范围,合理设定阻力阈值(本研究设置为 3.2),从而明确节点之间潜在空间联系的可行条件。当节点间的阻力值小于阈值且所属同一社会属性时,则视为两节点之间存在有效空间联系,并据此建立跨层的邻接矩阵,以更全面地体现生态与文化资源的空间交互特征。

最后,采用 Python 语言的 NetworkX 库建立了生态-文化跨层网络模型,分别将生态节点与文化节点作为不同类型节点纳入网络中。以空间邻接矩阵定义节点间的跨层连接关系,生成完整的多维跨层网络体系。

## 2 结果与分析

### 2.1 生态源地与文化源地空间分布特征

基于 MSPA 景观要素分类结果,共识别出大运河天津段生态源地 50 处(图 4)。从空间分布格局来看,区域内的生态源地表现出显著的空间异质性特征,具体表现为生态源地的面积差距较大且布局不均衡,可能诱发生态网络的破碎化与稳定性降低的潜在风险。具体而言,生态源地主要分布于研究区域的东北部和东南部,其中以团泊洼水库和大黄堡湿地自然保护区为核心的生态区域规模最大,形成区域生态网络中的两个重要生态核心节点;其周边分布的生态源地数量较多但规模较小。从生态源地与行政属地的空间对应关系来看,位于天津核心建成区范围内的河北区、红桥区 and 南开区等地几乎不存在有效的生态源地,生态本底条件薄弱,生态支持能力严重不足,形成典型的生态洼地;而位于天津边缘区的武清区、北辰区、西青区和静海区等地,生态源地较为丰富。由于远离城市建成区,该区域范围内受人类活动干扰程度较低,生态承载力较强,在维系区域生态过程、物种迁徙和生物多样性保护方面发挥重要作用。然而,这种生态源地外围式布局也导致了生态服务供给与城市生态价值需求失配,制约了生态系统服务功能的有效传递。

根据各遗产名录中文化遗产的重要性,共筛选出文化源点 137 个(图 4),涵盖了河道、水工设施遗址、历史街区村镇、建筑遗址、非物质文化遗产等多种类型。从空间分布格局来看,文化源地沿大运河沿岸呈现大分散、小集中的分布特征,并形成了武清区北部、武清区城市建成区、西青区城市建成区、静海区南部和河北区-红桥区-南开区五个显著的空间组团。其中,河北区、红桥区、南开区是区域内文化源地密度最高的地区,文化源地数量占比高达 48.18%,主要以建筑遗址旧址和非物质文化遗产为主;静海区文化源地则以水工遗址和古历史遗址为主,占总比例的 22.63%;其他区域文化源点数量相对较少,但遗产类型呈现明显的多样化特征。此外,部分文化源地因与其他遗产空间距离较远,处于边缘化位置,难以形成有效的网络化联系,存在较高的衰退或消失风险。

### 2.2 生态廊道和文化廊道空间分布特征

基于电路理论模型计算结果,共识别出 92 条生态廊道,总长度为 1084.134km。其中,最长廊道长度为 42.663km,连接了区域内最大的生态源地——团泊洼水库与位于西堤头镇的小型绿地斑块,说明大斑块与小斑块生态源地间仍具备良好的生态连通性;最短的廊道长度为 0.582km,主要维系第二大的生态源地——大黄堡湿地自然保护区及其周边生态源地的生态连通性。从空间分布特征来看,研究区内生态廊道呈现“东北部密集、西南与西北部稀疏”的总体格局。其中,东北部生态廊道分布密集、长度短且路径复杂,表明该区域的生态网络结构较为稳定,具有较强的抵御外部扰动的能力;而西南部及西北部廊道则较为稀疏且多为长距离连接,生态通道的完整性极易受破坏。生态廊道网络主要由两个大型生态源地向外辐射,形成对区域内中小型生态源地的系统性连接;中部区域的小型源地斑块表现出显著的枢纽功能,在整体生态网络中发挥着桥梁和过渡的关键作用。然而,部分边缘区域的小型生态源地尚未与其他源地建立有效的生态通道,存在空间割裂与生态孤岛化的风险,可能对物种迁移及生态要素流动过程的连续性造成潜在影响(图 5)。

文化廊道在空间上实现了文化源地之间的有机连接,促进了区域内文化资源的整合与互动。基于电路理论模型,共识别出 316 条文化廊道,总长度为 1207.072km。其中,最长廊道长度为 37.178km;最短为 0.277km。从空间格局上看,文化廊道网络以大运河为核心轴线呈放射状向外延伸,形成“南部分散、北部集中”的空间





图 4 大运河天津段生态源地与文化源地分布

Fig.4 Distribution of ecological and cultural sources in the Tianjin section of the Grand Canal

结构,串联起沿线多个文化源地。中部与西南部区域文化廊道分布密集、交织复杂,网络结构较为稳固。相对而言,东南部与北部区域的文化廊道结构较为单一、节点联系松散,文化网络的连通性与稳定性较弱,易受外部因素影响而断裂。尽管部分文化源地地处远离运河主轴的边缘地带,但仍通过廊道实现了与主文化网络的有效连接,提升了孤立文化资源的空间整合度,拓展了整体文化网络的覆盖范围与影响力。从行政属地来看,河北区、红桥区与南开区内部文化廊道最为密集、连接路径复杂,表明上述区域内文化源地之间空间联系紧

密,具备良好的整体保护与协同管理基础,有利于推动文化遗产保护由点状向网络化、系统化转型(图 5)。

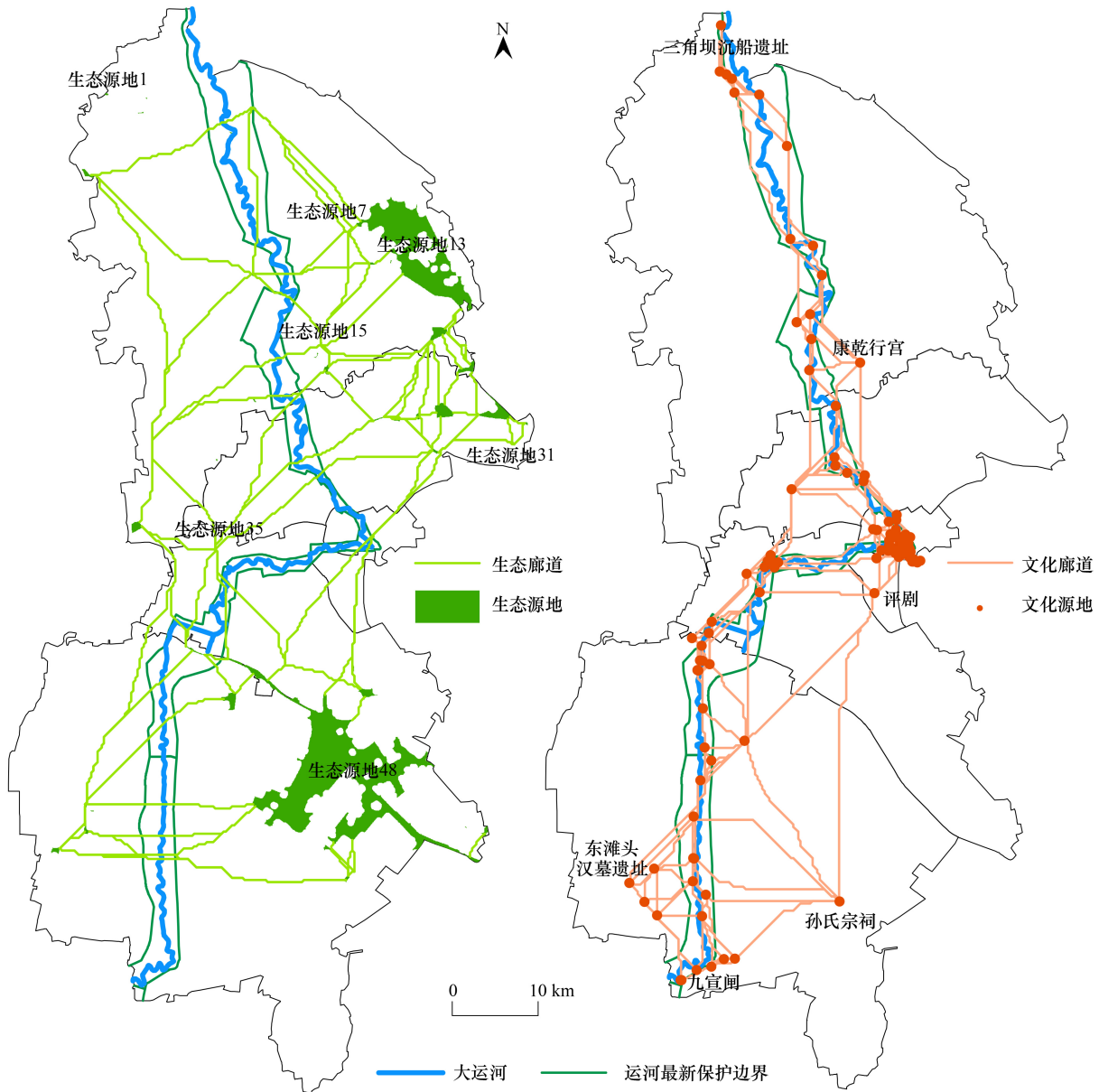


图 5 大运河天津段生态廊道与文化廊道

Fig.5 The ecological corridor and cultural corridor in the Tianjin section of the Grand Canal

### 2.3 生态-文化多功能耦合的跨层网络构建与空间分布特征

基于生态源地与文化源地的属地管理与内部社会联系,将生态源地与文化源地划分为 6 个具有生态-文化复合价值的功能性子群,实现了生态要素与文化要素同一子群范围内的深度融合。从空间组织特征看,子群呈现出明显的跨行政区分布格局,打破了以行政边界为主的传统资源管理单元(图 6)。

在此基础上,结合功能性子群划分结果与综合阻力面构建成果,进一步构建生态-文化的跨层网络结构(图 7)。从跨层节点特征来看,生态类跨层节点多归属于面积较大的生态源地,这些节点在生态系统的物质循环、能量流动与生境维持中发挥着关键作用;而文化类跨层节点则大多为位于运河核心监控区范围内的重要文化遗产地,是区域文化身份的核心体现。从不同子群内部跨层网络的连接形态来看,子群 1 和子群 6 的网络结构相对简单,仅少量源地形成跨层联系,说明该子群系统内部缺乏冗余连接,生态-文化网络结构较为

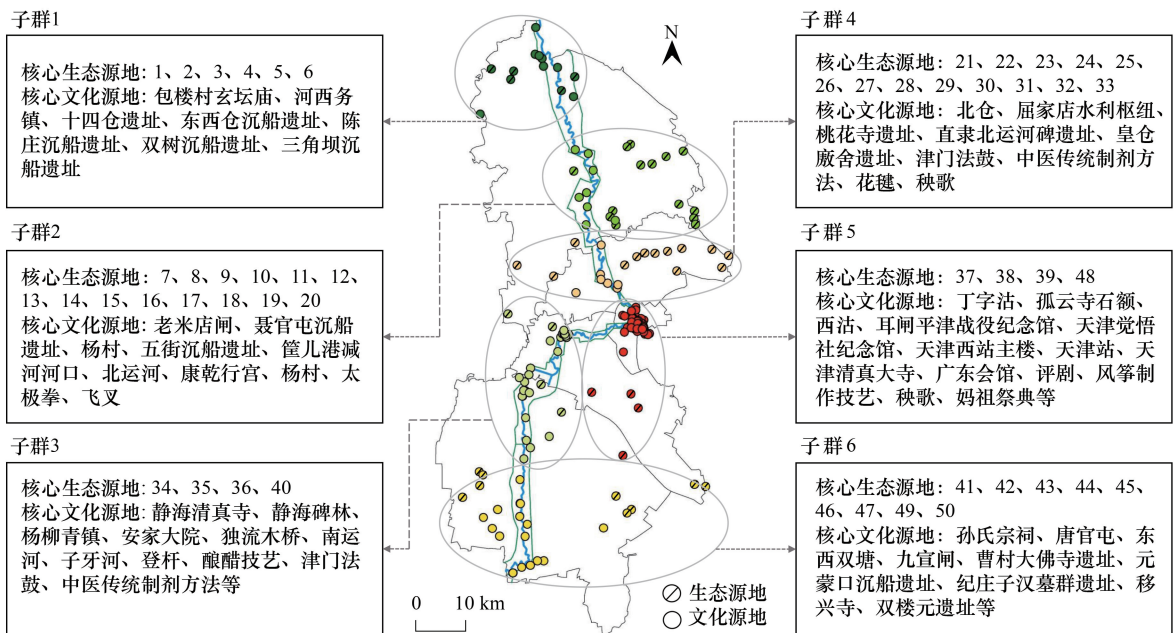


图6 大运河天津段生态-文化源地子群分布

Fig.6 Distribution of eco-cultural sources areas in the Tianjin section of the Grand Canal

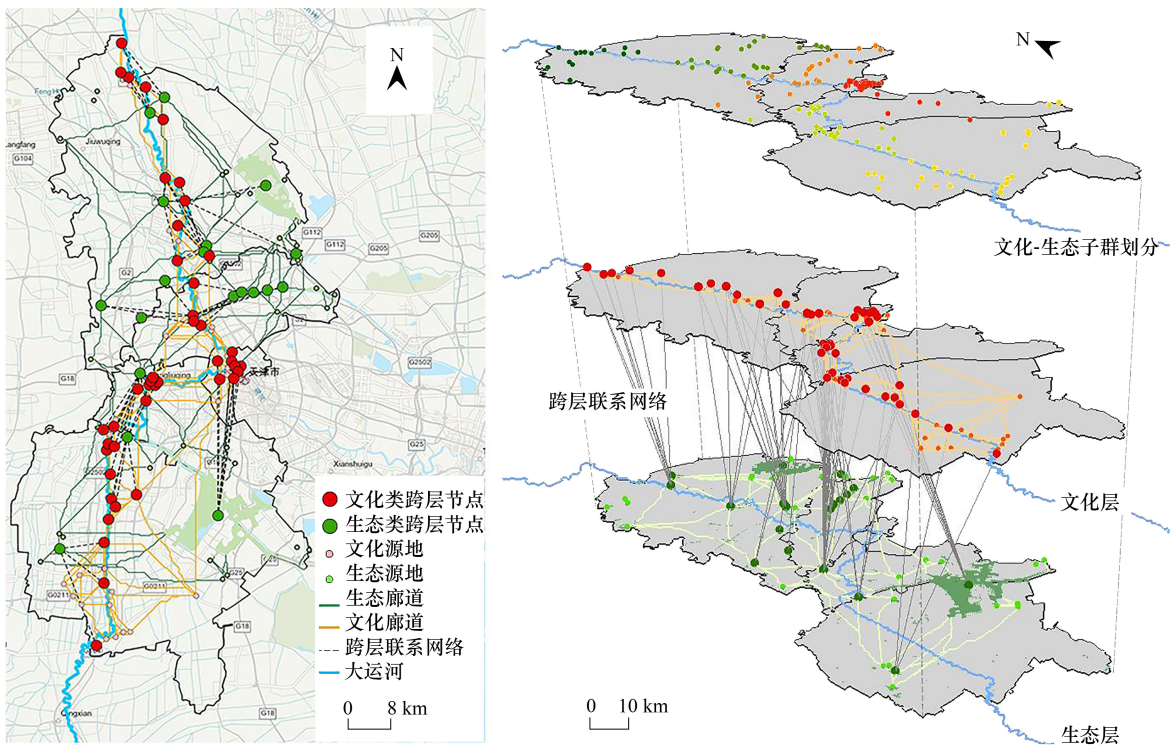


图7 大运河天津段生态-文化跨层网络格局

Fig.7 Eco-cultural cross-layer network in the Tianjin section of the Grand Canal

脆弱,面临较高的功能中断风险,区域资源潜力有待进一步发掘与激活;子群3和子群5虽同样构建起复杂的跨层联系,但呈现出文化源地数量远多于生态源地的结构性均衡格局,这种非均衡状态不仅加剧了生态源地的服务压力,也限制了区域内生态-文化价值融合效能的提升。相对而言,子群2和子群4跨层网络的节点类型多元、且连接路径高于其他子群,说明生态与文化源地间具备更高的连通度,二者不仅在地理空间上实现高



度耦合,也在功能层面具备协同运行的基础。

通过整合生态网络与文化网络的单维结构、功能性子群划分结果以及跨层网络建模成果,进一步构建大运河天津段流域多维价值复合的完整网络格局(图7)。

## 2.4 基于生态-文化多维价值复合的网络格局优化

### 2.4.1 生态与文化单一网络格局优化策略

基于对生态网络与文化网络结构特征的识别和特征分析发现,研究区域内的单一维度网络结构优化重点应在于提升网络结构的完整性与资源要素的协同性,从洼地补偿、边缘防护、通道连通三方面构建生态与文化网络的空间优化体系:

(1) 针对洼地实施源地补偿工程。依据生态源地识别结果,以生态安全底线为控制原则,在城市核心区新增嵌入式绿色基础设施(如“口袋公园”“空中绿廊”等),建立生态空间补偿体系,增强区域内生态服务能力的完整性;依据文化源地的识别结果,建立文化节点活化机制,优先对处于文化系统边缘或文化断裂带上的文化源地进行功能提升或空间激活。

(2) 针对区域边缘加强源地制度化保护。处于城市核心区边缘的源地,由于地理位置的特殊性,往往难以与区域内部源地构建起紧密且具备整体性的保护关联,进而导致源地形成孤立的格局。针对该类情景,建立以行政边界为参照的边缘源地分类保护制度,如针对大型生态源地建立自然保护区,保障其在大尺度区域的生态服务供给;针对小型生态源地和文化源地需建立精细化保护制度,避免因保护不当导致消亡。

(3) 在网络关键节点与连通薄弱区域,合理增设“踏脚石”。结合生态与文化廊道空间关系,优先在廊道的交汇或断裂处布设功能过渡节点(如生态绿斑或小尺度文化展示空间等)(图8)。通过增设“踏脚石”节点,强化网络内部的冗余连接性,促进生态资源与文化信息的流动与扩散。

(4) 构建网络结构差异化分级管理体系。基于跨层网络分析结果,明确源地与廊道等级结构,并实施差异化管理策略(图8)。针对一级源地与一级廊道,强化保护与系统运行监测,保障其在区域生态安全与文化传播中的核心支撑功能;对二级源地与二、三级廊道,侧重生态修复、功能提升与文化活化,引导其在网络体系

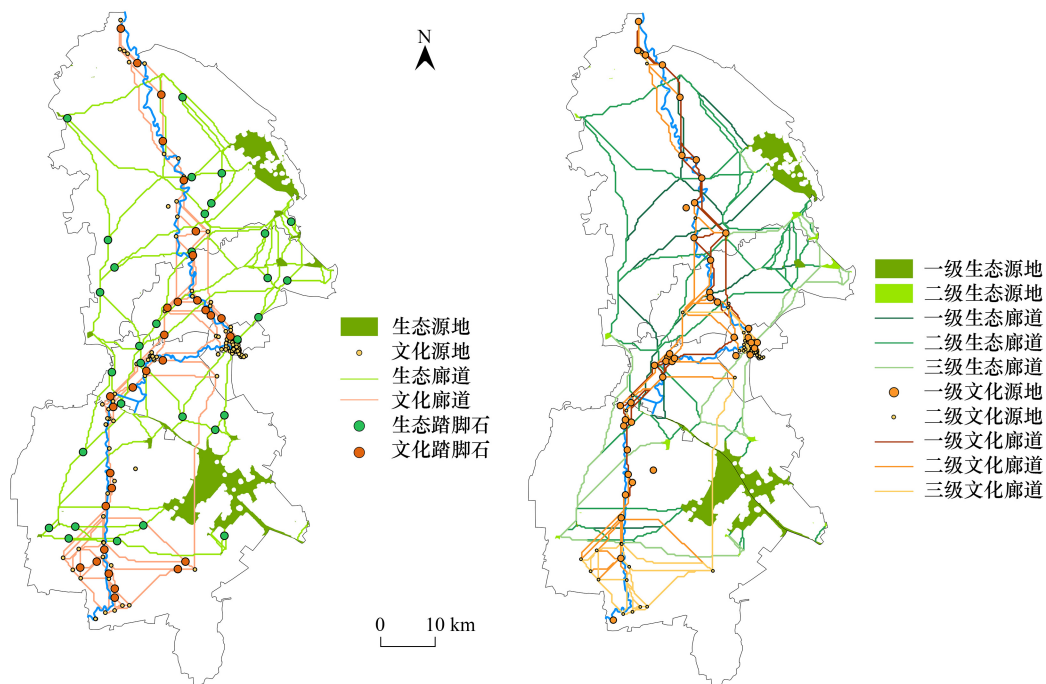


图8 大运河天津段“踏脚石”节点的增设及网络分级结构

Fig.8 Addition of “Stepping Stone” nodes and network hierarchical structure in the Tianjin section of the Grand Canal



中发挥补充与过渡作用,从而构建兼顾稳定性与灵活性的多层级网络治理体系。

#### 2.4.2 生态-文化跨层网络格局优化策略

在单一网络结构的基础上,通过分析运河流域构建生态和文化多维价值要素,构建价值复合的跨层网络结构。以此为依据,塑造生态要素与文化要素在不同层级间的协同机制,系统进行子群分类差异化管控、跨层节点精准保护、网络格局整体完善的综合管理策略,推动生态-文化复合系统的高效整合:

(1)推动子群分类治理,构建差异化协同策略体系。根据大运河天津段流域跨层网络结构表现与资源耦合状况、不同子群内部跨层网络的连接形态,将6组功能性子群划分为“潜力型(子群1/6)”“失衡型(子群3/5)”“示范型(子群2/4)”3类。其中,“潜力型”重点拓展生态源地与文化源地总量,通过生态修复、文化节点嵌套与新增中介节点等方式,提升空间连通性与功能聚合度;“失衡型”通过优化文化功能分布与疏解非核心文化节点压力,同时在生态薄弱区增设生态补丁,平衡系统资源分配,缓解生态节点过载风险,提升系统稳定性;“示范型”优先布局复合功能节点与生态文化展示带,打造区域生态-文化融合典范区,发挥其引领与辐射作用。

(2)强化跨层节点识别与精细化保护。针对生态类跨层节点,重点保护其生态过程完整性,划定生态红线、生态核心区、重要廊道控制带,构建生境保护网络;对文化类跨层节点,突出文化原真性与活态传承价值,建立多级文化遗产保护体系,强化其在地域文化表达中的核心作用;对生态-文化复合型节点,推动双功能协同、复合功能叠加的复合化建设模式,实现多要素共融、复合功能共生。

(3)构建多维网络协同治理体系。研究结果表明,跨层网络呈现跨行政区分布特征,传统以行政边界为单元的保护模式难以支撑网络整体性发展。因此,需从格局重构与机制建设等方面协同推进。例如,以现有子群结构为基础,强化核心区域廊道连通与边缘节点网络嵌套,提升整体空间协同性与鲁棒性,同时推动构建跨行政区资源协同保护机制,建立涵盖生态系统管理、文化遗产保护、土地利用协调的多方联动平台,实现空间一体化治理。

### 3 讨论与结论

线性文化遗产作为融合自然生态与人文历史的独特空间载体,其价值保护与传承需要从单一要素的孤立保护转向跨尺度、多维度的协同保护模式<sup>[35-36]</sup>。在《中国大运河保护条例》《大运河文化保护传承利用规划纲要》等政策与规划的支持下,构建生态-文化复合网络是打破生态保护与文化遗产保护的分割现状,促进区域内不同资源要素之间的高效连接与协同互动,实现线性文化遗产多维价值协同表达,提升区域整体可持续发展的重要路径。鉴于此,本文以生态与文化价值嵌套特征显著的大运河天津段为例,整合形态学空间格局分析、电路理论模型及社会网络分析等多学科交叉技术方法,在“斑块-廊道”生态空间结构和社会网络分析框架的基础上,整合大运河流域生态与文化价值内涵,构建价值协同的多维跨层联系网络,实现从传统以物理结构为主导的网络整合范式向注重生态与文化价值协同的复合网络范式转型,为区域生态安全与文化持续传承提供支撑。本文的创新点如下:(1)将网络构建的研究视角聚焦于具有多维价值属性的线性文化遗产区域,旨在为该区域价值整合与整体性保护提供创新思路;(2)在网络格局构建中系统引入跨层次、多类型价值要素的动态关联,尝试突破传统以物理结构整合为导向的单维建模范式的局限性。

然而,目前依然存在以下内容可进一步深化拓展研究:一方面,由于目前在大运河流域管理过程中尚未建立标准化数据体系,因此本研究在数据类型和数据质量上仍存在一定优化空间;另一方面,网络格局的构建可为区域韧性发展提供科学依据,未来可在本研究成果的基础上进一步探讨跨层网络结构的级联效应,剖析各价值要素的联动变化规律,精确识别区域内脆弱区域,以拓展网络格局构建的应用价值。

#### 参考文献(References):

- [1] 张飞,杨林生,何勋,石勇. 大运河遗产河道游憩利用适宜性评价. 地理科学, 2020, 40(7): 1114-1123.
- [2] Wu Z C, Ma J, Zhang H Q. Spatial reconstruction and cultural practice of linear cultural heritage: a case study of Meiguan historical trail,

- Guangdong, China. *Buildings*, 2023, 13(1): 105.
- [ 3 ] 任唤麟. 跨区域线性文化遗产类旅游资源价值评价——以长安-天山廊道路网中国段为例. *地理科学*, 2017, 37(10): 1560-1568.
- [ 4 ] 俞孔坚, 奚雪松, 李迪华, 李海龙, 刘柯. 中国国家线性文化遗产网络构建. *人文地理*, 2009, 24(3): 11-16, 116.
- [ 5 ] Jiang A H, Sun F Z, Zhang B L, Wu Q Y, Cai S S, Yang Z W, Chang Y, Han R Q, Yu S S. Spatiotemporal dynamics and driving factors of vegetation coverage around linear cultural heritage: a case study of the Beijing-Hangzhou Grand Canal. *Journal of Environmental Management*, 2024, 349: 119431.
- [ 6 ] 吴家龙, 李红举, 邓婷, 罗思华, 胡洁, 张子健, 牛丞禹, 王凯, 姜岩, 苏少青. 论全域土地综合整治与线性文化遗产保护利用: 衔接与融合——以广东省南粤古驿道梅关古道古田段为例. *热带地理*, 2024, 44(3): 379-392.
- [ 7 ] Zhang T Y, Chen X Y, Liu T Q. Linear cultural heritage eco-cultural spatial system: a case study of the Great Tea Route in Shanxi. *Frontiers of Architectural Research*, 2025, 14(4): 1063-1075.
- [ 8 ] 霍童, 张序, 周云, 陈伟. 基于暴露-敏感-适应性模型的生态脆弱性时空变化评价及相关分析——以中国大运河苏州段为例. *生态学报*, 2022, 42(6): 2281-2293.
- [ 9 ] 许雯, 刘韩昕, 刘宁, 赵屹男. 空间叙事理论下城市物质文化遗产价值评估与保护策略——以大运河国家文化公园(苏州段)为例. *规划师*, 2024, 40(5): 83-90.
- [ 10 ] Tao Q, Gao G H, Xi H H, Wang F, Cheng X B, Ou W X, Tao Y. An integrated evaluation framework for multiscale ecological protection and restoration based on multi-scenario trade-offs of ecosystem services: Case study of Nanjing City, China. *Ecological Indicators*, 2022, 140: 108962.
- [ 11 ] Yang H H, Yan S Y, Wang X H, Li C, Meng H X, Yao Q. Constructing ecological networks based on ecosystem services and network analysis in Chongqing, China. *Land*, 2024, 13(5): 662.
- [ 12 ] Qiu S, Xu C L, Wang F, Yu Q. Potential grading refrigeration system Based on urban agglomeration thermal environment analysis perspective. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 97: 104736.
- [ 13 ] 周媛, 黎贝, 李朋瑶, 姚娟, 陈明坤, 唐密, 张莉, 陈娟. 基于“生态-气候适应性-游憩”多功能耦合的复合绿地生态网络格局优化. *生态学报*, 2024, 44(13): 5854-5866.
- [ 14 ] Cao L, Wang K P, Zhao X Y, Zhang Y L. Optimizing composite ecological networks through Synergistic risk Management, ecological Conservation, and recreational Integration; a case study of Beijing's shallow mountain regions. *Ecological Indicators*, 2025, 170: 113026.
- [ 15 ] Zhang Y, Lu M, Ma W D, Meng Q H, Li Z, Wu Y X. Urban multi-scale ecological network sequence and spatial structure optimization: a case study in Nanjing city, China. *Ecological Indicators*, 2024, 167: 112622.
- [ 16 ] Li Q, Zhou Y, Yi S Q. An integrated approach to constructing ecological security patterns and identifying ecological restoration and protection areas: a case study of Jingmen, China. *Ecological Indicators*, 2022, 137: 108723.
- [ 17 ] 柯钦华, 周俏薇, 庄宝怡, 孙传淳. 基于生态系统服务供需平衡的粤港澳大湾区生态安全格局构建. *生态学报*, 2024, 44(5): 1765-1779.
- [ 18 ] 张一, 张春彦. 京津冀线性文化遗产景观体系构建——以太行东麓遗产带为例. *中国园林*, 2018, 34(10): 71-76.
- [ 19 ] 王思思, 李婷, 董音. 北京市文化遗产空间结构分析及遗产廊道网络构建. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(6): 51-56.
- [ 20 ] 杨培峰, 陆雅婷, 杨迪, 张秋仪. 遗产廊道视角下文化遗产的保护与活化——以大樟溪沿线(福州段)为例. *规划师*, 2024, 40(5): 123-130.
- [ 21 ] Li Y Y, Wang X H, Dong X F. Delineating an integrated ecological and cultural corridor network: a case study in Beijing, China. *Sustainability*, 2021, 13(1): 412.
- [ 22 ] Wang G Y, Li J, Liu X F, Li B Y, Zhang Y. Social-ecological network of peri-urban forest in urban expansion: a case study of urban agglomeration in Guanzhong Plain, China. *Land Use Policy*, 2024, 139: 107074.
- [ 23 ] 张萌萌, 王帅, 傅伯杰, 刘焱序, 武旭同. 社会-生态网络方法研究进展. *生态学报*, 2021, 41(21): 8309-8319.
- [ 24 ] Gurney G G, Darling E S, Jupiter S D, Mangubhai S, McClanahan T R, Lestari P, Pardede S, Campbell S J, Fox M, Naisilisili W, Muthiga N A, D'agata S, Holmes K E, Rossi N A. Implementing a social-ecological systems framework for conservation monitoring: lessons from a multi-country coral reef program. *Biological Conservation*, 2019, 240: 108298.
- [ 25 ] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 2009, 325(5939): 419-422.
- [ 26 ] 王晓玉, 冯喆, 吴克宁, 林倩. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护与修复. *生态学报*, 2019, 39(23): 8725-8732.
- [ 27 ] 陈瑾, 赵超超, 赵青, 徐崇敏, 林森, 邱荣祖, 胡喜生. 基于 MSPA 分析的福建省生态网络构建. *生态学报*, 2023, 43(2): 603-614.
- [ 28 ] Nie H R, Zhao Y, Zhu J, Ning A, Zheng W H. Ecological security pattern construction in typical oasis area based on ant colony optimization: a case study in Yili River valley, China. *Ecological Indicators*, 2024, 169: 112770.
- [ 29 ] 杨亮洁, 张玲玲, 张芳宁, 杨永春, 罗亚玲. 生态安全格局视角下黄土高原生态网络韧性研究. *生态学报*, 2024, 44(22): 10471-10485.
- [ 30 ] 祝诗榕, 祝明建, 林丰泽, 马滢, 曹瀚文. 基于生态网络构建的国土空间生态修复关键区域识别: 以粤港澳大湾区为例. *中国园林*, 2024, 40(10): 34-40.
- [ 31 ] 刘瑞雪, 林小龙, 李云. 基于 MSPA-生境质量评估和电路理论的城市绿色基础设施网络优化研究——以深圳市为例. *中国园林*, 2024, 40(10): 68-74.
- [ 32 ] 张乐相, 柴波, 张岩, 何文清, 谭秀全. 基于重力模型与电路理论的生态网络对比研究——以济宁市为例. *生态学报*, 2025, 45(4): 1684-1696.
- [ 33 ] 吴健生, 罗可雨, 马洪坤, 王振宇. 基于生态系统服务与引力模型的珠三角生态安全与修复格局研究. *生态学报*, 2020, 40(23): 8417-8429.
- [ 34 ] 孙芳城, 张娜, 胡钰苓, 唐菁. “流空间”视角下成渝地区双城经济圈城市网络结构研究. *世界地理研究*, 2024, 33(9): 147-162.
- [ 35 ] 戴俊骋, 刘方宇. 线性文化遗产价值评估模型的构建研究——以中国大运河为例. *中国名城*, 2023, 37(1): 90-96.
- [ 36 ] 张广汉, 付彬, 赵霞, 陶诗琦. 大运河线性文化遗产保护传承路径探索. *城市规划*, 2022, 46(S2): 27-35.