研究论文

基于蓝绿基础设施的大运河四女寺枢纽区域生态安全格局构建*

宋 凤[1] 戴永菲[1,2] 吴兆敏[1] 赵 亮[1]

1 山东建筑大学建筑城规学院 济南 250101
2 北京建筑大学建筑与城市规划学院 北京 100044

摘要：大运河长期参与并影响沿线人居环境建设活动，由此衍生的水利枢纽工程影响着区域生态安全的维持。文中以大运河关键水利枢纽工程区域——四女寺枢纽区域为研究对象，基于 2023 年土地利用数据，通过形态学空间格局分析、景观连通性评价和最小累积阻力模型，对区域蓝绿基础设施数据进行收集、分析，结果共识别出 16 个生态源地、15 条重点潜在生态廊道与 105 条一般潜在生态廊道；构建“一核两心，三带四轴，多节点，多廊道”的区域生态安全格局；最后，基于区域上位规划与景观空间特点提出生态安全格局优化建议，即蓝绿整合的韧性优化、多样保护的体系优化和突破边界的协同优化。研究结果可为大运河枢纽区域文化遗产保护和生态环境保护修复提供循证依据，并为国土空间规划与生态文明建设提供参考。

关键词：大运河；四女寺枢纽区域；蓝绿基础设施；生态安全格局

DOI：10.12169/zgcsly.2024.05.14.0001

Constructing Ecological Security Pattern for Sinvsi Hub Region of the Grand Canal Based on Blue-Green Infrastructure

Song Feng[1] Dai Yongfei[1,2] Wu Zhaomin[1] Zhao Liang[1]

(1. School of Architecture & Urban Planning, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China; 2. School of Architecture & Urban Planning, Beijing University of Civil Engineering & Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: The Grand Canal has long been affected by the construction of human settlements, and the resulting water conservancy projects have affected the maintenance of regional ecological security. The paper takes Sinvsi hub region, the vital water conservancy hub project area of the Grand Canal, as the research object, to collect and analyze the regional blue-green infrastructure data based on the land data in 2023 through morphological spatial pattern analysis, landscape connectivity evaluation and minimum cumulative resistance model. In the region, 16 ecological sources, 15 key potential ecological corridors and 105 general potential ecological corridors are identified. The regional ecological security pattern of ‘one core, two centers, three belts, four axes, and multiple nodes and corridors’ is constructed. The paper puts forward suggestions for optimizing the ecological security pattern based on the regional master planning and landscape spatial characteristics, i. e., enhancing ecological resilience through blue-green integration, establishing a diverse protection system, and breaking down administrative boundaries for optimal management. The relevant results can provide an evidence base for the protection of cultural heritage and

收稿日期：2024-05-14

* 基金项目：山东省社科规划项目一般项目（P202204151444412234）

第一作者：宋凤（1974-），女，副教授，博士，研究方向为地域景观、乡村景观与生态智慧。E-mail：12976@sdjzu.edu.cn

通信作者：赵亮（1981-），男，教授，博士，研究方向为城市设计和遗产保护。E-mail：zhaoliang8117@126.com

eco-environment protection and restoration in the Grand Canal hub area, and provide references for land spatial planning and ecological civilization.

Keywords: the Grand Canal; Sinvsi hub region; blue-green infrastructure; ecological security pattern

大运河，由隋唐运河、京杭运河和浙东运河组成，历史上承担着漕运、商贸、政治等重要职能，与人居环境建设息息相关，2014 年被列入世界遗产名录，是典型的线性廊道遗产[1]。2019 年，《大运河文化保护传承利用规划纲要》《长城、大运河、长征国家文化公园建设方案》等文件陆续出台，如何保护、传承、利用好大运河成为相关行业关注热点[2-3]。2021 年，《大运河文化保护传承利用“十四五”实施方案》在加强大运河生态环境保护修复方面明确了绿色生态廊道建设与生态空间优化任务，为进一步推动大运河活化利用与高质量发展提供了新思路[4]。运河枢纽是在大运河适宜地段修建的水工设施综合体，一般由闸、坝、堰、涵、堤等组成，发挥着调节水流、控制水位等重要功能。其中，四女寺枢纽是大运河体系的关键水利枢纽工程，地处华北平原鲁冀两省隋唐运河与京杭运河交汇的核心区，对沿线生产、生活、生态空间的协调发展有着重要影响[5]，同时肩负着生态与文化价值提升的使命。在快速城镇化影响下，四女寺枢纽区域生境破碎化程度加剧、生态敏感性提高、抵御灾害性天气的能力降低，生态保护与绿色发展之路受阻[6]。

2019 年，中共中央、国务院将国土空间规划视为绿色发展的基础，从生命共同体的视角提出对山水林田湖草系统进行统筹规划治理[7]。蓝绿基础设施（blue-green infrastructure，BGI）是由河流、湖泊、湿地、森林、公园等各类开敞空间和自然区域相互联系而成的生态空间网络，表现为“源地（hubs）-廊道（links）-节点（sites）”的空间结构，其目的在于组成自然生命的支持系统，成为维护生态环境和提升人民生活质量的连接网络[8]，与国土空间规划体系下的生命共同体在内涵上高度一致。近年来，BGI 研究主要聚焦在概念内涵解析、技术方法研究以及空间格局构建等方面，注重解决生态环境与自然资源保护管理等问题[9]。其中，生态安全格局构建打破了传统生态保护的局限性，强调实现生态、社会与经济的协调可持续发展，突出生态空间在区域生态安全、健康福祉、文脉传承等方面的价值，是保障国土空间规划良好运行的关键[10]。

四女寺枢纽区域面积覆盖广，生态空间类型丰富，涉及水利、文化、生态等多种资源，与 BGI 构成要素及其综合价值具有高度重合性。在国土空间规划背景下，如何破解四女寺枢纽区域生态稳定和绿色发展面临的困境？区域生态安全格局构建是行之有效的途径。本研究在对四女寺枢纽区域进行数据汇总和综合认知的基础上，首先通过形态学空间格局分析（morphological spatial pattern analysis，MSPA）、景观连通性评价和最小累积阻力模型（minimum cumulative resistance，MCR），完成区域 BGI 数据分析，并提取生态源地与生态廊道；然后结合区域生态空间和文化遗产分布现状进行生态安全格局构建；最后基于区域上位规划与景观空间特点提出生态安全格局优化建议。

1 研究区概况

四女寺枢纽（37°21′N，116°13′E）位于山东省德州市德城区、武城县与河北省衡水市故城县交界区域，是漳卫南运河中下游重点大型控制性水利枢纽工程和安全屏障[5]。该区域属于暖温带大陆性季风气候区，2023 年最高气温 43.3 ℃，最低气温-20.8 ℃，年均气温 14.6 ℃，年均降水量 535.87 mm。区域地处华北平原中部，地势整体平坦开阔，由西南向东北缓倾，地表岗、坡、洼相间分布[11]，中西部多潮土，北部多盐土，风沙土零星分布在区域各处。区域现以运河、岔河、减河、黄河故道、马颊河为骨架，六五河、利民河、沙杨河等灌溉干渠穿插其间，形成了以行洪和灌溉功能为主的水网体系（图 1），在四女寺枢纽调控作用下协同运作，滋养着沿线城镇和广袤农田，孕育着运河文化、黄河文化与马颊河文化，同时还拥有苏禄王墓、北厂漕仓、陈公堤遗址等历史文化资源，具备优越的保护开发价值。

在历史演进过程中，四女寺枢纽功能不断丰

富，影响范围不断扩大。基于对各类舆图、史志、规划以及现状区域环境的综合考量，研究范围的界定以保障四女寺枢纽运作安全和统筹保护其附属水工设施遗产为基础。依据《大运河遗产保护与管理总体规划（2011—2030）》中四女寺枢纽附属水工设施遗产的分布和漳卫南运河流域边界，确定研究区域范围。研究区域涉及鲁冀 2 省 4 市，占地约 3 625.7 km^2。

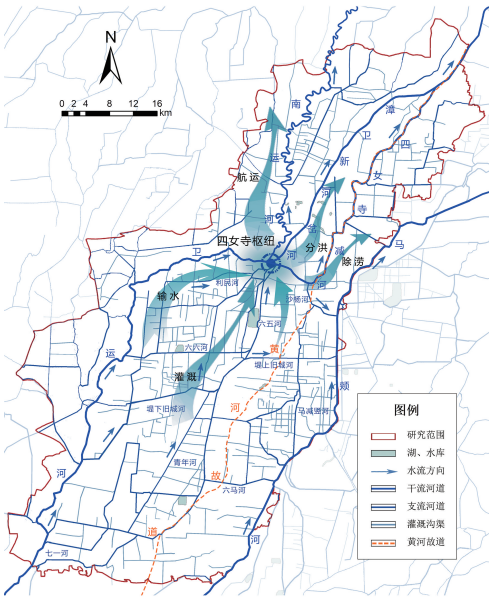


图 1　研究区域范围

结合区域 2023 年土地利用类型（图 2）和实地勘察信息，对区域生态空间现状进行综合评价：1）区域以 5 条主河流和黄河故道为脉络；用地类型以耕地为主，占总面积的 54.21%，其次为林地（23.24%）；呈现“河-林-田”的景观空间格局。2）区域林地面积共为 842.70 km^2，但缺少大面积成片林地，仅黄河故道森林公园占地 85.30 km^2，内部拥有古桑树（*Morus alba*）片林 4.00 km^2，其中百年以上桑树 20 000 余株，健康状况良好，并在 2018 年被联合国粮农组织认定为全球重要农业文化遗产；区域农田林网、防护林带等线状生态空间断带长、面积小、植被区系贫乏，常见毛白杨（*Populus tomentosa*）、刺槐（*Robinia pseudoacacia*）、垂柳（*Salix babylonica*）、榆树（*Ulmus pumila*）、白花泡桐（*Paulownia fortunei*）等乡土植物。3）区域内的减河湿地公园和黄河故道森林公园等大型面状生态空间孤立于聚落边缘，水库、遗存、公园等小型点状生态空间分布散乱无序，均缺少与居民联系互动的生态廊道；区域生态斑块数量少、生境破碎化程度高，人居环境质量亟需提升。

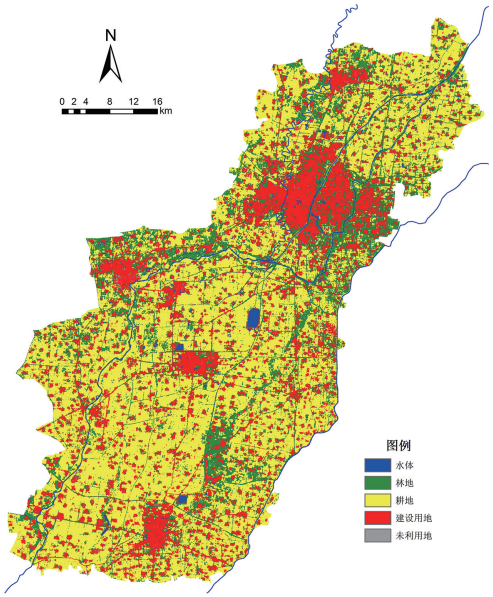


图 2　区域 2023 年土地利用类型

2　研究方法

2.1　数据来源

本研究数据源包括遥感影像、数字高程、文献资料，以及实地勘察信息（表 1）。

表 1　区域生态安全格局构建数据来源

数据类型	基本信息	主要目的
遥感影像	Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 遥感影像，获取时间为 2023 年 6 月 9 日，云量为 0.11%，30 m 分辨率	解译得到区域土地利用类型、植被覆盖度与景观空间格局等数据
数字高程	ASTER GDEM 数字高程模型，30 m 分辨率	计算得到区域高程、坡度数据
文献资料	1)《大运河遗产保护与管理总体规划（2011—2030）》《大运河生态环境保护修复专项计划》《山东省国土空间规划（2021—2035 年）》《河北省国土空间规划（2021—2035 年）》等上位规划；2)《山东运河全图》《四省运河水利泉源河道全图》《京杭道里图》等历史舆图	认知区域概况
实地勘察信息	调研时间：2023 年 4 月； 调研内容：1) 与相关管理部门会议纪要，2) 与在地居民访谈记录，3) 田野调查拍摄照片	准确把握四女寺枢纽区域遗产、河道、公园、湿地、林地等生态要素分布情况

2.2 形态学空间格局分析

运用 Arc Gis 对研究区域土地利用类型进行二值化处理，提取生态功能较好的水体、林地、湿地、河道与公园作为前景要素，赋值为 2；提取耕地、建设用地、未利用地作为背景要素，赋值为 1。基于 Guidos Tool Box3.0 软件，运用八邻域分析法，将边缘宽度设置为 1，对二值数据进行 MSPA 分析，得到核心、孤岛、边缘、孔隙、环、分支、桥连接 7 种 BGI 要素类型[12]，其中核心为大型生态斑块，桥连接为连接核心的带状生态用地，两者是构建区域生态安全格局的重点要素。

2.3 景观连通性评价

使用 Conefor2.6 软件对核心进行景观连通性评价[13]，设置连接阈值参数为 1 000 m，斑块连通概率为 0.5，计算四女寺枢纽区域核心的可能连通指数（probability of connectivity，PC）与斑块重要指数（delta values for probability of connectivity，dPC）。dPC 值越大，越有利于生态流动，依据数值与国土空间规划“三条红线”筛选出生态源地。

2.4 最小累积阻力模型

考虑到土地利用类型、高程、坡度、MSPA 要素类型、距主要水系距离对物种迁徙和生态流动的影响，选取其作为生态阻力因子，以空间异质性强弱为依据，利用层次分析法和德菲尔法确定生态阻力因子权重和阻力值，完成综合阻力面的计算（表 2）。阻力值越低，对生态流动的阻碍越小，越有利于生态廊道构建。在此基础上构建 MCR 模型，提取四女寺枢纽区域的潜在生态廊道，并根据最小累积阻力值的大小对潜在生态廊道进行分级[14]。

表 2 生态阻力因子和权重

生态阻力因子	权重	分级指标	阻力值	生态阻力因子	权重	分级指标	阻力值
土地利用类型	0.48	水体	10	MSPA 要素类型	0.29	核心	5
		林地	25			桥连接	10
		耕地	50			环	30
		未利用地	75			分支	40
		建设用地	100			孤岛	50
高程/m	0.06	<15	10			边缘	60
		15~25	25			孔隙	80
		25~35	50			背景	100
		35~45	75	距主要水系距离/m	0.10	<1 000	10
		>45	100			1 000~2 000	25
坡度/°	0.07	<7	10			2 000~3 000	50
		7~15	25			3 000~4 000	75
		15~25	50			>4 000	100
		25~35	75				
		>35	100				

3 结果与分析

3.1 区域蓝绿基础设施

3.1.1 要素类型

核心作为大型的面状生态用地，面积为 317.94 km^2，占区域总面积的 8.77%，占生态用地面积的 41.43%，主要集中分布在卫运河、漳卫新河岔河、四女寺减河和黄河故道一线（图 3、表 3）。生态安全格局构建应筛除破碎化程度大的核心，保留能够维护区域生态系统结构稳定性、功能平衡性和能量流动性的核心，因此本研究筛选面积 0.10 km^2以上的核心进行分级以及生态源地选取。所筛选核心共计 424 处，最大 15.11 km^2，最小 0.10 km^2，共计 215.61 km^2，占核心总面积

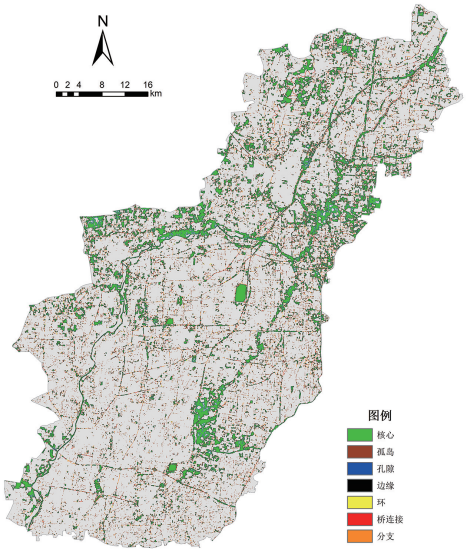


图 3 区域 BGI 要素

67.82%。此外，桥连接作为进行能量、物质交换的重要通道，被视为区域结构性生态廊道。

表 3　区域 BGI 要素类型统计

要素类型	面积/km²	占生态用地面积比例%	占研究范围总面积比例%
核心	317.94	41.43	8.77
孤岛	66.65	8.69	1.84
边缘	245.34	31.97	6.77
孔隙	9.18	1.19	0.25
环	5.79	0.75	0.16
分支	85.85	11.19	2.37
桥连接	36.68	4.78	1.01
总计	767.43	100.00	21.17

3.1.2　生态源地筛选

dPC 值作为衡量核心的景观连通度量化指标，分级标准如表 4 所示。结合鲁冀两省国土空间规划，将处于永久基本农田保护红线、城镇开发边界范围内的重点核心区筛除，保留剩余用地作为生态源地，共计 16 个（图 4）。生态源地主要分布在研究区域中部和南部，整体分布不均。统计数据表明，生态源地的 dPC 值与面积均有较大差异（表 5）：生态源地 10 的 dPC 值最大，值为 47.95，占地 15.11 km²，占据四女寺枢纽周边的大片运河滩湿地与聚落林地；生态源地 8 的 dPC 值仅次于源地 10，值为 46.42，占地 9.86 km²，占据减河湿地公园及周边区域；生态源地 15 与 16 相邻分布，共计 18.10 km²，占据黄河故道森林公园大片林地。

表 4　区域核心评价分级标准

斑块重要指数/dPC	核心分级	备注
dPC≥4	重点核心区	包含所有的生态源地
4>dPC≥1	一级核心区	无生态源地分布
1>dPC≥0.1	二级核心区	
0.1>dPC	三级核心区	

表 5　区域生态源地 dPC 值统计

生态源地编号	面积/km²	斑块重要指数（dPC）	生态源地编号	面积/km²	斑块重要指数（dPC）
1	1.44	6.99	9	0.47	32.54
2	1.59	8.99	10	15.11	47.95
3	1.47	10.70	11	0.27	5.00
4	0.72	4.52	12	2.22	35.31
5	3.04	4.86	13	1.35	34.79
6	3.28	9.09	14	0.98	4.83
7	1.36	4.77	15	9.28	9.00
8	9.86	46.42	16	8.82	10.33

3.1.3　生态廊道识别

使用 MCR 模型计算 16 个生态源地间的最低成本路径，得到 120 条潜在生态廊道。大部分潜在生态廊道沿河道、农田灌溉沟渠分布，小部分沿区域交通要道分布。生态源地间的引力值越高，潜在生态廊道越重要[15]。综合考量源地生态、历史价值和区域网络连通性[16]，筛选引力强度≥40 的潜在生态廊道，去除重合路径，共得到 15 条重点潜在生态廊道、105 条一般潜在生态廊道，共同形成层级分明的生态廊道网络（图 5）。重点潜在生态廊道主要沿黄河故道和四女寺减河呈连续分布，建设完成度高，连通性好，呈现较好景观效果。一般潜在生态廊道受建设用地阻隔和农田林网断带等影响，连通性较差，无法满足生态源地间物质、能量与信息的流通。

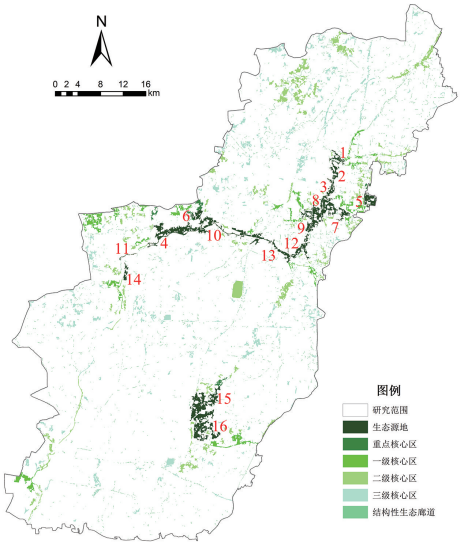


图 4　区域生态源地

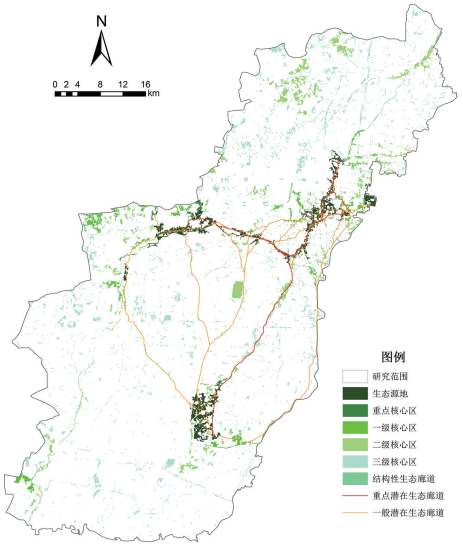


图 5　区域生态廊道分级

3.2 区域生态安全格局构建

基于以上数据分析，构建四女寺枢纽区域“一核两心，三带四轴，多节点，多廊道”的生态安全格局（图 6）。

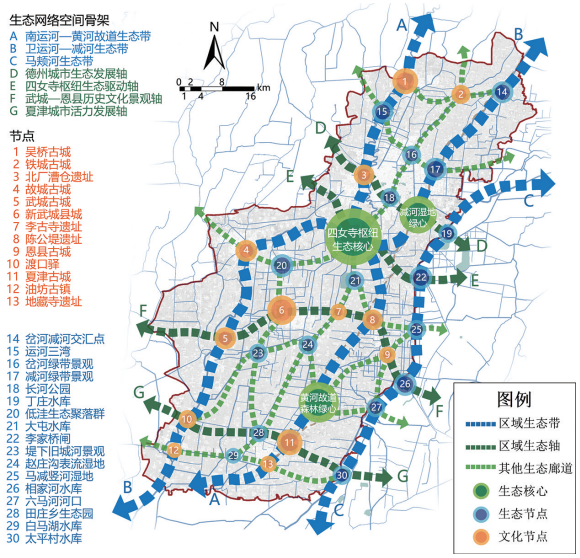


图 6 区域生态安全格局

“一核两心”明确了四女寺枢纽区域的生态空间中枢。“一核”指四女寺枢纽生态核心，兼备水利、生态与文化价值，后续需要对其进行严格管控、重点保护和精细建设。“两心”指黄河故道森林绿心与减河湿地绿心，两地分别拥有大面积的林地与湿地，是保障区域生态功能与维持生态系统稳定的关键生态绿心。

“三带四轴”构成了区域的生态网络骨架。“三带”分别是南运河—黄河故道生态带、卫运河—减河生态带与马颊河生态带，从北向南蜿蜒纵贯，连接“一核两心”，是区域内最重要的三条生态廊道。“四轴”分别是德城城市生态发展轴、四女寺枢纽生态驱动轴、武城—恩县历史文化景观轴与夏津城市活力发展轴，从西向东延伸横穿，有序整合文化遗产与生态用地，是城镇重要的生长轴线。

“多节点，多廊道”丰富了区域生态安全格局的内涵。“多节点”包含运河三湾、低洼坑塘聚落群、马颊河湿地等生态节点，以及漕运仓储码头、陈公堤遗址、恩县古城等文化节点。“多廊道”是沿河道与交通要道建设的生态廊道，串联区域核心、生态与文化节点，形成兼备稳定性与多元价值的 BGI 空间网络体系。

3.3 区域生态安全格局优化建议

3.3.1 蓝绿整合的韧性优化

四女寺枢纽区域生态空间分布不均，多集中在东部和中部偏北区域，南北、东西生态廊道的景观连通性较差，亟需对区域水网、林网进行整合。建议充分发挥区域“一核两心，三带四轴”的驱动作用，严格管控三大核心，维持其生态功能稳定，带动其他生态用地的高质量提升。同时，沿水网、路网整合破碎生态空间，将孤立的文化遗产、乡村聚落和城市绿地串联起来。在此基础上，修复断裂绿带，整治环境恶化的河道，禁止垦荒行为，优化河畔景观，提高廊道生境价值。最终形成可以兼具水土保持、气候调节、水源涵养、空气净化、生态防护、生物迁徙、防洪除涝和灌溉供水等功能的区域生态安全格局。

3.3.2 多样保护的体系优化

相关管理部门应抓住大运河国家文化公园建设与国土空间规划实施的有利时机，建立多样化保护机制。建议以“一核两心”为基点，以“三带四轴”为脉络，系统维护漕仓遗址、运河三湾和陈公堤遗址等治水工程与附属建筑，并建设四女寺枢纽博物馆，扩大四女寺枢纽作为区域绿色核心的影响，将场地打造成人们体验自然、放松精神与科普教育的场所；优化生态系统的调节服务与文化服务功能，提高区域人类健康福祉水平。

3.3.3 突破边界的协同优化

区域位于鲁冀两省交界，功能影响范围涉及漳卫南运河中下游多个城市，面临边界管辖困境。建议两省相关城市突破行政边界壁垒，以四女寺枢纽为中心，统筹建立区域协同管理部门和反馈机制，确保多地市共同保护生态源地、建设生态廊道。在此基础上，以区域生态安全格局为框架参考，抓住大运河国家文化公园建设与国土空间规划政策出台的有利时机，勇于应对四女寺枢纽区域在生态安全建设与文化遗产保护方面的挑战，确保生态环境有人治理、文化遗产无人忽略，破解当前困境，实现区域协同发展。

4 讨论

区域生态安全格局构建已成为国内抵御环境风险、推动新型城镇化建设的重要手段之一[9]。

目前，基于 BGI 的区域生态安全格局构建研究大多依据行政区划单位确定研究范围，存在一定的局限性：在数据分析上，通过 MCR 模型识别出的生态廊道，通常会被限制在单一行政区内；在优化策略上，行政区边缘地带监管力度薄弱问题未被提及，因此忽视了区域生态安全格局构建的整体性与全面性。此外，相关研究在筛选生态源地和识别生态廊道时，由于受政策时滞影响，大多未考虑国土空间规划等宏观政策限制，从而影响到后期的建设规划。

本研究突破行政管辖限制，以水利枢纽工程功能为主导确定研究区域；依托水利枢纽区域“河-林-田”的景观空间基底，运用 MSPA 法和 MCR 模型识别 BGI，结合文化遗产分布进行生态安全格局构建；严格落实国土空间规划“三区三线”政策，兼顾考虑高标准农田建设和农田防护林带保护的措施。因此，本研究不仅确保了研究的系统性与科学性，还综合考虑了区域生态价值和文化价值的提升。此外，研究紧密结合国土空间规划政策进行空间统筹规划，具备显著的现实指导意义。

本研究还存在以下问题有待探讨：1）在 BGI 数据分析过程中，景观连通指数、MCR 模型对空间尺度比较敏感，连接阈值、斑块连通概率、阻力因子等分析参数目前没有科学统一的确定方法，需要依据研究区域的特殊性设置。2）在 BGI 数据分析方法上，本研究后续还可结合生态系统服务理论、Markov 模型等方法，耦合模拟研究区域未来的生态安全格局，对相关政策与规划的推动实施方向进行预测，以适应未来的区域空间发展。

5　结论

通过 MSPA 法和 MCR 模型对研究区域的 BGI 进行数据分析，筛选识别出的 16 个生态源地主要分布在区域中部与南部，15 条重点潜在生态廊道沿区域内的河道呈连续分布，构成了区域生态安全格局的基本框架。区域形成的“一核两心，三带四轴，多节点，多廊道”的生态安全格局，兼备稳定性与多元价值。通过蓝绿整合提升生态韧性，建立多样化保护体系以及突破行政边界协同优化管理，对于维持区域生态功能稳定，提高人类健康福祉水平，促进区域协同发展具有重要意义。

参考文献

[1]王越,宋凤,任震.大运河山东段水利系统与沿运聚落景观体系特征研究:以德州、聊城段为例[J].中国园林,2022,38(6):63-68.

[2]中华人民共和国中央人民政府.中共中央办公厅 国务院办公厅印发《大运河文化保护传承利用规划纲要》[EB/OL].(2019-05-09)[2024-05-14].http://www.gov.cn/xinwen/2019-05/09/content_5390046.htm.

[3]长城、大运河、长征国家文化公园建设方案[N].人民日报,2019-12-06(1).

[4]中华人民共和国国家发展和改革委员会.国家发展改革委印发《大运河文化保护传承利用“十四五”实施方案》[EB/OL].(2021-07-26)[2024-05-14].https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/zys/sjdt/202107/t20210726_1291580.html.

[5]水利部海河水利委员会,海河下游管理局.中国现代著名水闸(三)[EB/OL].(2020-06-11)[2024-05-14].http://www.hwcc.gov.cn/hhxyglj/szwh/202006/t20200611_82660.html.

[6]宋志军,李小建,郑星.城乡过渡带社会经济空间演化特征与机理[J].地理学报,2021,76(12):2909-2928.

[7]中华人民共和国中央人民政府.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[EB/OL].(2019-05-23)[2024-05-14].https://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content_5394187.htm.

[8]马修·班博瑞,王昕欣.绿色基础设施城市主义和气候变化[J].风景园林,2021,28(11):74-88.

[9]黄勇,冯盼盼,马志杰,等.中国绿色基础设施体系建构的兴起、发展与思考[J].中国园林,2023,39(7):40-46.

[10]肖华斌,王梦颖,许宇彤,等.京杭大运河南旺分水枢纽绿色基础设施构建:基于生态智慧转译视角[J].城市规划,2022,46(6):68-76.

[11]王旭,王永刚,武大勇,等.山东省德州市河流水生生物完整性评估及时空异质性分析[J].生态与农村环境学报,2020,36(12):1579-1587.

[12]陈泓宇,李雄.基于 MSPA-InVEST 模型的北京中心城区绿色空间生境网络优化[J].风景园林,2021,28(2):16-21.

[13]杨健,戚智勇,彭舒妍.长沙市多层级绿色基础设施网络构建[J].中国城市林业,2022,20(2):36-42.

[14]王婷,任云英.城市新区绿色基础设施网络优化:基于景观格局和形态空间格局分析[J].中国城市林业,2023,21(2):105-114.

[15]徐伟振,黄思颖,耿建伟,等.基于 MCR 和重力模型下的厦门市生态空间网络构建[J].西北林学院学报,2022,37(2):264-272.

[16]ZHANG ZZ,MEEROW S,NEWELL J P,et al.Enhancing landscape connectivity through multifunctional green infrastructure corridor modeling and design[J].Urban Forestry & Urban Greening,2019,38:305-317.