

DOI: 10.5846/stxb202110102827

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.

Feng S, Tang Z Y, Yu L, Guo C, Tang M X, Yang Z P. Collaborative construction of ecological network in urban agglomerations: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20): 8223-8237.

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

冯 舒^{1,2}, 唐正宇^{1,2}, 俞 露^{1,2,*}, 郭 晨³, 汤沫熙^{1,2}, 杨志鹏^{1,2}

1 深圳市城市规划设计研究院有限公司, 深圳 518052

2 广东省数字城市规划和空间配置工程技术研究中心, 深圳 518052

3 深圳市智慧城市科技发展集团有限公司, 深圳 518046

摘要:城市群生态网络构建是城市与区域协同发展面临的重要场景之一,合理的生态网络能加强生态源地间的连通性,提高生态系统的生态功能,有效缓解生态环境问题,对保障城市与区域生态安全,提升人类福祉具有重要意义。以粤港澳大湾区城市群为例,以场景为依托开展生态网络协同构建场景要素与协同路径分析,结合景观连通性和形态学空间格局分析方法(MSPA)获得生态源地,并基于最小累积阻力模型识别生态廊道与生态节点,构建大湾区生态网络总体格局,最后从跨区域协作角度探讨城市群生态网络协同构建的潜在路径。研究表明:(1)研究区生态网络由 40 个生态源地、780 条潜在生态廊道与 892 个生态节点构成,生态源地面积 1.88 万 km²,占湾区总面积比例为 33%,所识别的生态源地及生态廊道与自然保护区、广东省万里碧道、珠江三角洲绿道网重合程度较高;(2)识别跨区域生态廊道 552 条,其中,跨越佛山与广州市的生态廊道较多,一半以上的廊道跨越三个及以上城市,跨陆海区域的生态廊道连接了湾区南部主要沿海城市,构成陆海生态网络的关键组成部分;(3)提出城市群生态网络协同构建的潜在模式,应结合生态源地、生态廊道、生态节点等构建主体,分析城市内、城市间生态网络构建过程涉及的协同需求、协同对象,探索差异化的协同路径;(4)以场景为依托识别城市群生态网络构建场景的主题、时空特征、对象、路径和价值,可为进一步开展生态网络协同构建与应用示范过程提供指导。本研究是对城市群生态网络协同建设的有益探索,基于跨区域生态廊道协同构建场景模式的探讨能够为今后进一步探索区域统筹协同机制、实现景观格局协同构建和优化、促进区域生态共建共享提供理论依据。

关键词:生态廊道;最小累积阻力模型;场景;城市群;粤港澳大湾区

Collaborative construction of ecological network in urban agglomerations: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

FENG Shu^{1,2}, TANG Zhengyu^{1,2}, YU Lu^{1,2,*}, GUO Chen³, TANG Moxi^{1,2}, YANG Zhipeng^{1,2}

1 Urban Planning and Design Institute of Shenzhen, Shenzhen 518052, China

2 Guangdong Engineering Research Center for Digital Urban Planning and Spatial Allocation, Shenzhen 518052, China

3 Shenzhen Smartcity Technology Development Group Co.Ltd., Shenzhen 518046, China

Abstract: The construction of ecological network is an important measure to connect habitat patches and protect biological habitats, which not only can improve ecological function, but also increase the comprehensive ability of the ecosystem and alleviate the deterioration of ecological environmental. It is of great significance to guarantee urban and regional ecological security and improve human well-being. Taking the urban agglomeration of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFB2103105)

收稿日期:2021-10-10; 网络出版日期:2022-06-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yul@upr.cn

as an example and relying on the scene planning method, this study carried out the scene elements and collaborative path analysis of ecological network construction. Based on the Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA) and the Minimum Cumulative Resistance model (MCR), we identified the ecological sources, ecological corridors and ecological nodes to form the ecological network of the Greater Bay Area. In addition, the potential collaborative forms of urban agglomeration ecological network construction were discussed from a cross-regional perspective. The research results show that: (1) ecological network of the Greater Bay Area is composed of 40 ecological sources, 780 ecological corridors and 892 ecological nodes, which has a high overlap with nature reserves, ecological belt in Guangdong and greenway network in the Pearl River Delta. The ecological source is 18800 km², accounting for 33% of the Greater Bay Area. (2) 552 cross-regional ecological corridors are identified and more than half of them across three or more cities. The corridors crossing Guangzhou and Foshan are as high as 46%. The land-sea ecological corridor connects the major coastal cities in the southern part of the Greater Bay Area, forming a key component of the land-sea ecological network. (3) A potential collaborative mode for ecological network construction of urban agglomerations was proposed. From the perspective of ecological source, ecological corridor and ecological node, collaborative needs, collaborative objects, and collaborative paths were further analyzed from the intra-city and inter-city scales. (4) Scene planning helps to identify the scene theme, spatiotemporal characteristics, scene objects, scene construction paths and scene value of urban agglomeration ecological network construction. It can be a theoretical tool to provide guidance for the further development of the ecological network collaborative construction and practice. This research is a useful exploration of the collaborative construction of ecological network in urban agglomerations. The discussion based on the collaborative construction of cross-regional ecological corridors will help to provide a theoretical basis for further exploring regional coordination mechanisms, realizing the collaborative construction and optimization of landscape patterns, and promoting regional ecological joint construction in the future.

Key Words: ecological network; the Minimum Cumulative Resistance model; scene; urban agglomeration; the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

21 世纪以来,场景一词被广泛应用于社会学、传播学、教育学、互联网等各个领域^[1-2],经历了由面对面的物理空间维度发展为多维度的信息空间,并且随着科技的不断进步,逐渐演变成时空一体化的场景特点^[3-4]。本质上,场景是对时间、地点、对象等场景要素所形成的特定事件的描述。近年来,场景被认为是连接问题需求与技术应用的关键桥梁,许多城市开始着眼于通过探索城市应用场景推动城市健康可持续发展^[5]。随着城市化进程不断推进,城市群逐渐成为我国未来经济社会发展的重要载体和空间形态,城市群协同发展被视为提升城市化质量、提高区域核心竞争力、实现城市间互利共赢的重要手段^[6]。研究表明我国城市间各类资源的配置及社会治理水平存在差异,城市间的区域协同与行政分治矛盾仍普遍存在,制约了区域协调发展^[7]。探索城市群协同发展路径,已成为城市群治理与区域协同发展的核心内容之一。在这一背景下,识别城市群协同发展中的重要场景,并以场景为驱动展开城市群协同发展的需求与过程分析显得尤为重要。

城市群协同发展涉及的场景众多,涵盖产业、交通、环境、生态、服务等领域,大气污染协同治理^[8]、自然岸线协同保护^[9-10]、跨界水环境污染综合整治^[11]、生态安全格局构建^[12]等均是城市与区域生态协同发展面临的重要场景,众多学者围绕这些场景在不同区域及时空尺度上开展了大量的理论与实践探索,为加快生态一体化建设、推动城市与区域协同发展提供了重要支撑。生态网络构建场景是围绕生态空间开展一系列生态源地、廊道、节点识别与网络构建过程,是生态安全格局构建的重要组成部分。合理的生态网络能够加强生态源地间的连通性,提高生态系统的生态功能,有效缓解生态环境问题,对保障城市与区域生态安全,提升居民福祉具有重要意义^[13-14]。相关学者围绕生态网络构建场景开展了大量研究,研究内容、理论和方法日益丰富,研究范围广泛涉及城市尺度^[15-16]、区域尺度^[17-18]乃至城市群尺^[19]。“源地识别-阻力面设置-廊道提取-

节点判定”^[20-21]是较为常用的研究范式,借助地理空间分析技术(Geographical Information System, GIS)构建生态网络,并通过增加踏脚石、提升连通性等方法探讨生态网络的优化^[22]。目前多数研究停留于对生态网络及生态安全格局的现状识别层面,鲜有学者从跨区域角度开展生态网络构建过程中协同问题的探讨。生态网络构建场景中究竟存在哪些协同需求,协同对象的任务和角色分工如何,以及不同城市、区域间应该采取怎样的协同策略等,这些仍是城市群协同发展过程中普遍面临和亟需思考与解决的问题。

粤港澳大湾区作为重要的城市群之一,是国家区域协调发展的重要组成部分。然而,随着城镇空间不断扩张,湾区面临着社会经济发展与生态环境保护之间的突出矛盾^[23],在生态安全协同发展方面仍存在区域间发展不平衡、市际间发展不充分的问题。因此,明晰城市间生态安全协同需求与协同路径,有效调控具体生态空间布局,保障生态功能的充分发挥,是推进城市群生态绿色一体化发展、建设绿色可持续大湾区的重要途径。为探索粤港澳大湾区城市群在打造生态防护屏障方面的协同发展路径,本研究引入场景概念,开展生态网络协同构建场景要素与协同路径分析。结合景观连通性和形态学空间格局分析方法(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)获得生态源地,并基于最小累积阻力模型识别生态廊道与生态节点,构建大湾区生态网络总体格局,最后通过识别跨区域生态廊道,从跨区域协作角度探讨城市群生态网络构建在城市间的协同需求与潜在协同路径,旨在为进一步建设与完善粤港澳大湾区城市群生态网络提供参考。

1 研究区域

粤港澳大湾区陆地总面积 5.6 万 km²,包括广东省的广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆 9 市和香港、澳门两个特别行政区(图 1),具有“一个国家、两种制度、三个关税区、四个核心城市”的区域特点,是中国开放程度最高、经济活力最强的区域之一,在国家发展大局中具有重要战略地位。粤港澳大湾区位于珠江入海口,外围三面环山,具有“山、水、城、田、海”并存的自然禀赋,具有极其重要的生态和经济价值。

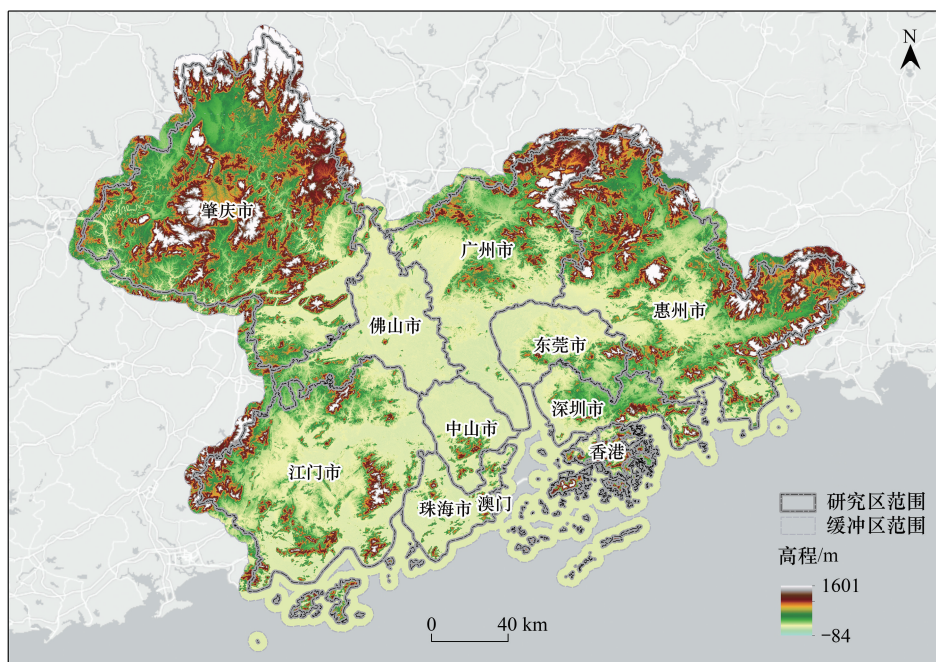


图 1 粤港澳大湾区地理位置

Fig.1 Location of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

作为中国改革开放的前沿阵地,粤港澳大湾区在过去 40 多年里取得了飞速发展,随着城市群建设规模急剧增长,生态类土地资源大幅缩减、退化,引发了一系列生态环境问题^[24-25]。为了恢复珠三角地区的生态系

统,协调城市发展与环境保护之间的关系,广东省政府相继出台了《珠江三角洲绿道网总体规划纲要》、《广东万里碧道总体规划(2020—2035年)》等多部规划指引,旨在构建较完备的生态网络,实现生态环境保护和恢复,提升城市与区域的生态安全格局。2019年2月,《粤港澳大湾区发展规划纲要》正式发布,提出打造生态防护屏障的一系列措施,包括实施重要生态系统保护和修复重大工程、构建生态廊道和生物多样性保护网络、建设沿海生态带、开展滨海湿地跨境联合保护等,为粤港澳大湾区的绿色可持续发展规划出新的蓝图。

2 研究方法

引入场景与场景规划概念^[26]用以指导城市群生态网络构建的场景要素特征分析,并运用评估模型与GIS空间分析技术按照生态源地识别-阻力面构建-生态廊道提取-生态节点判别的场景研究路径,构建湾区生态网络格局,并探讨跨区域生态廊道协同构建与优化模式。

2.1 场景规划与城市群协同发展

结合各领域提出的场景概念及已开展的研究工作,课题组对场景内涵进行了重新界定,用于指导在不同领域开展场景实践工作^[26]。认为场景是在特定的时空条件下,围绕事件的关键问题和目标,以技术、资源等作为媒介,通过一系列行动形成的特定交互关系,场景的构建能够满足利益相关者的需求,创造和实现价值。场景包含时间、空间、对象、问题(场景主题)、路径和价值等六个场景要素(图2)。其中,主题是对场景进行简要的整体性描述,体现场景需要解决的问题或完成的目标、采用的方法技术以及场景实现的价值;时空范围能够在一定程度上体现时代背景,蕴含技术发展变化、宏观经济趋势、社会关系等时代特征;场景对象有助于阐明相关责任权利及利害关系;路径是解决场景问题、实现场景目标的方法和途径;价值是场景实施后对社会、经济以及生态带来的效益。

以具体场景为依托,通过整合现有资源与技术开展场景构建与设计,实现特定社会、经济或生态功能和价值的系统性过程即为场景规划。场景规划有助于将各类技术、资源连接到实际应用,拓展到城市群协同发展的方方面面,围绕不同的规划单元、区域以及实际发展水平展开城市群协同场景构建及分析,识别协同需求、明确协同对象并制定差异化的协同路径,促进城市内、城市间和城市群间跨部门、跨层级、跨区域或跨制度的统筹协作,实现区域协同创新和多层次治理,为城市 and 城市群在不同领域的协同发展过程与机制提供理论基础,并通过在合适的区域进行应用示范,为协同建设宜居宜业宜游的城市群提供实践指导。

2.2 生态网络构建场景分析方法

2.2.1 数据来源及处理

研究涉及到的数据包括地表覆盖数据、DEM数据、道路网、人口密度、自然保护区等数据。(1)地表覆盖数据:2020年全球30m精细地表覆盖产品(GLC_FCS30-2020),来源于地球大数据科学工程数据共享服务系统(<http://data.casearth.cn/>);(2)DEM数据:采用GDEM V2数字高程数据,空间分辨率为30m,来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>);(3)道路网数据:来源于Open Street Map(OSM)共享数据(<http://www.openstreetmap.org/>),主要包括国道、省道、高速与铁路;(4)人口数据:采用WorldPop人口密度数据集(<https://www.worldpop.org/>),空间分辨率为100m,为保障数据精度,以第七次全国人口普查的区县统计人口数据(香港特别行政区、澳门特别行政区为全市人口数据)进行修正;(5)自然保护区数据:来源于广东省政务数据统一开放平台(<https://gddata.gd.gov.cn/>),通过地理编码获取研究区内国家级、省级自然保护区的地理位置。考虑粤港澳大湾区边界区域景观要素的完整性,并结合各阻力因子的最大影响范围,将研究区范围向外缓冲5km开展数据分析。选择30m×30m作为栅格数据文件的像元大小,投影方式为WGS_1984_UTM_Zone_50N。

2.2.2 生态源地识别

生态源地作为物种生存和扩散的起点,与周围环境进行复杂的物质、能量和信息交换,对维持生态系统功能起到重要作用^[27]。识别生态源地是构建生态廊道的基础,也是生态网络重要的组成部分。基于形态学空

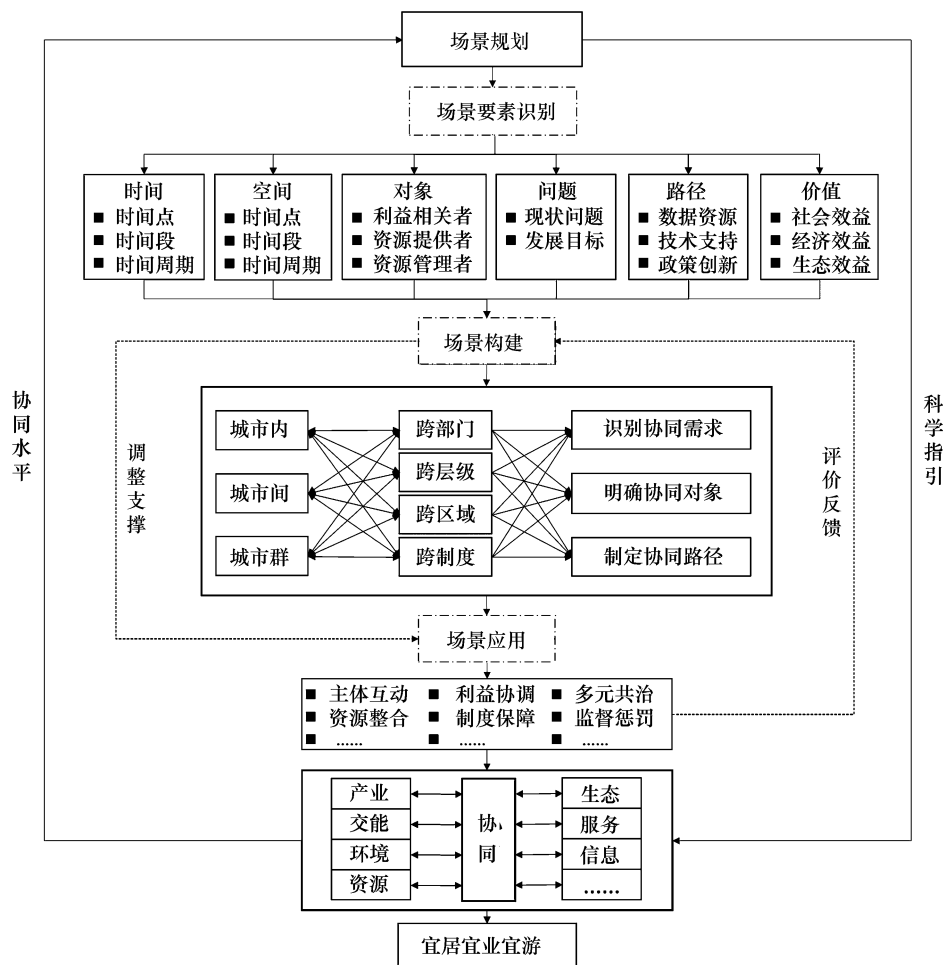


图2 场景规划与城市群协同发展

Fig.2 Scene planning and coordinated development of urban agglomeration

间格局分析(MSPA)方法^[28-29],将土地覆被类型中的林地和水体设置为前景,其余类型作为背景,对两种类型栅格数据进行二值化处理。为满足区域所有物种的需求,将边缘宽度设置为1^[30],运用Guidos Toolbox软件的八邻域图像细化分析方法将前景数据分割为7种景观类型^[31-33],分别为核心区(Core)、桥接区(Bridge)、岛状斑块(Islet)、支线(Branch)、边缘区(Edge)、环道区(Loop)和孔隙(Perforation)。考虑到面积大小影响生物扩散与迁移能力^[15,22],筛选面积大于10km²的核心区为生态源地备选斑块。

景观连通性能够有效表征物种在生态源地之间扩散和迁移的难易程度,具有重要的生态学意义^[34]。选取可能连通性指数(Probability of connectivity, PC)衡量景观连通性^[35-36],基于Conefor 2.6软件,参考学者在佛山市开展的网络构建研究^[16],将斑块连通距离阈值设置为2400m,连通概率设为0.5,对核心区进行连接度评价。

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij}^* \times a_i \times a_j}{A_L^2}$$

$$dPC = 100\% \times \frac{PC - PC_{remo}}{PC}$$

式中,PC为可能连通性指数,n表示斑块总数, a_i 、 a_j 分别表示斑块i、j的面积, A_L 表示整个景观的面积, P_{ij}^* 表示斑块i和斑块j之间连接的最大概率;dPC为可能连通性指数的变化量,值越大表明要素重要性越高, PC_{remo}

是去除某斑块后剩余斑块的整体指数。

2.2.3 景观阻力面构建

物种迁移扩散过程中需要穿越一定的阻力,通过设定由生态源地向其他景观单元扩散的阻力值,可判断生态源地的可达性和连通性^[37—38]。结合研究区实际并参照相关研究^[39—40],选取土地利用类型、海拔、坡度、距道路的距离、距生态源地的距离和人口密度作为阻力因子,基于层次分析法赋予各类阻力因子权重^[41],通过叠加生成景观阻力面(表 1)。

表 1 阻力因子分级标准及权重
Table 1 Assignment of resistance factors

阻力值 Resistance value	阻力因子分级指标 Classification index of resistance factor					
	土地利用类型 Landuse type ^[24]	距生态源地的距离 Distance from ecological source/m ^[39]	人口密度 Population density/ (人/km ²) ^[42]	距道路的距离 Distance from road/m ^[43]	坡度 Slope/(°) ^[18]	海拔 Altitude/m ^[40]
10	林地	$x < 500$	$x < 100$	$x \geq 2000$	$x < 3$	$x < 300$
30	水体	$500 \leq x < 1000$	$100 \leq x < 200$	$1500 \leq x < 2000$	$3 \leq x < 8$	$300 \leq x < 600$
50	草地	$1000 \leq x < 2000$	$200 \leq x < 500$	$1000 \leq x < 1500$	$8 \leq x < 15$	$600 \leq x < 900$
70	耕地	$2000 \leq x < 4000$	$500 \leq x < 800$	$500 \leq x < 1000$	$15 \leq x < 25$	$900 \leq x < 1200$
90	建设用地及其他	$x \geq 4000$	$x \geq 800$	$x < 500$	$x \geq 25$	$x \geq 1200$
权重 Weight	0.3414	0.2301	0.1582	0.1359	0.0829	0.0514

2.2.4 生态廊道提取

最小累积阻力模型(Minimum Cumulative Resistance, MCR)能够确定起始生态源地和目标生态源地之间的最短路径,表征生态要素从一个生态源地迁移到另一个生态源地需要克服的生态阻力^[44],被广泛用于生态连接度、功能分区、景观格局和生态安全格局等方面的研究^[27,45]。利用 ArcGIS 10.2 成本路径分析工具,计算生态源地间要素迁移所需克服的最小累积阻力并识别最小成本路径作为潜在生态廊道^[20,41]。具体公式如下:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i$$

式中,MCR 是最小累积阻力值; m 和 n 表示任意两个生态源地; D_{ij} 是生态源地 j 到生态源地 i 的空间距离; R_i 是生态源地 i 的生态阻力系数; f 为最小累积阻力与生态过程之间的正相关关系。

基于重力模型计算生态源地之间的相互作用矩阵,定量评价生态源地之间相互作用强度^[17],判定潜在生态廊道的相对重要程度,识别重要生态廊道。重力模型公式如下:

$$G_{ij} = \frac{N_i N_j}{D_{ij}^2} = \frac{(\frac{1}{P_i} \times \ln S_i)(\frac{1}{P_j} \times \ln S_j)}{(\frac{L_{ij}}{L_{\max}})^2} = \frac{L_{\max}^2 \ln S_i \ln S_j}{L_{ij}^2 P_i P_j}$$

式中, G_{ij} 为生态源地 i 和 j 之间的相互影响作用强度; N_i 和 N_j 分别表示源地 i 和 j 的对应权重值; D_{ij} 为源地 i 和 j 之间廊道阻力的标准值; P_i 和 P_j 分别为源地 i 和 j 的平均阻力值; S_i 和 S_j 为源地 i 和 j 的面积; L_{ij} 为源地 i 到源地 j 的最小累积阻力; $L_{\max}$ 为区域内最小累积阻力的最大值。 G 值越大,斑块间的相对重要性程度越明显、空间关联性越强,廊道的作用就越大。

2.2.5 生态节点判别

生态节点指物种迁移的最大耗费路径和最小成本路径的交汇处,是景观格局中生态功能相对薄弱的区域,需要加以识别和保护^[46—47]。利用水文分析的相关工具提取景观格局阻力面的“山脊线”,将其与生态廊道相交得到最低与最高阻力路径的交汇点,即为生态节点^[48]。

3 结果分析

3.1 生态网络构建场景要素

根据场景要素分析可知(表 2),粤港澳大湾区城市群生态网络构建场景旨在湾区范围内开展生态网络构

建的中长期规划,基于湾区的生态本底条件,运用评估模型与空间分析技术,实现关键生态源地、生态廊道及生态节点的识别与优化,并从跨区域协同角度为下一阶段生态廊道的布局规划、建设管理提供更为科学、全面、客观的决策依据,使生态网络发挥其应有的社会、环境、经济和文化效益,为区域性生态廊道的规划调整、生态空间资源的优化利用提供辅助决策。

结合各自的相关责任权利及利害关系,场景对象将作用于场景中的不同环节。城市群生态网络构建场景的直接利益相关者为住房和城乡建设厅、自然资源部门、生态环境部门、规划部门等,间接利益相关者为交通、林业、园林、文旅、消防等管理部门,这些场景对象将以资源整合、利益协调、多元共治、调控管理、制度保障、监督惩罚等方式直接或间接参与生态网络的规划、治理、保护和建设过程;潜在利益相关者为使用绿道的公众、自行车运动协会、登山协会等民间组织,也是生态网络潜在的使用者与受益方;主要资源提供者住房和城乡建设厅、自然资源部门、生态环境部门、规划部门等,间接资源提供者交通、林业、园林、文旅、消防、运营商等部门(表2),为场景的建设提供必要的资源、数据资源、技术支撑和政策创新。

基于土地利用格局现状及未来区域发展规划进行场景主题、时空特征、场景对象与路径等要素的识别,有助于明晰粤港澳大湾区城市群生态网络构建在不同发展阶段的建设目标,厘清生态源地、生态廊道、生态节点保护、治理与提升等各个环节的具体任务与作用对象,尤其是不同利益相关者的协同需求与参与方式,通过制定差异化的管理措施与实施途径,进一步指导粤港澳大湾区范围内生态空间的中长期规划。

表 2 粤港澳大湾区城市群生态网络构建场景要素分析

Table 2 Scene elements analysis of ecological corridor construction in the Guangdong-HongKong-Macao Greater Bay Area

场景要素 Scene elements	内涵 Content
场景主题 Theme	场景以构建粤港澳大湾区城市群的生态网络为目标,基于湾区的生态本底条件,运用评估模型与空间分析技术,实现关键生态源地、生态节点、跨区域生态廊道的识别与优化,为生态空间资源优化利用、推进区域协调发展提供辅助决策
时间 Time	开展生态网络构建的中长期规划时期内
空间 Space	粤港澳大湾区范围内需要构建生态网络的区域
场景对象 Object	直接利益相关者:住房和城乡建设厅、自然资源部门、生态环境部门、规划部门 间接利益相关者:交通、林业、园林、文旅、消防等部门等 潜在利益相关者:公众、各类协会和民间组织 主要资源提供者:住房和城乡建设厅、自然资源部门、生态环境部门、规划部门等 间接资源提供者:交通、林业、园林、文旅等部门
场景路径 Path	以当前大湾区基础地理信息数据、统计数据、遥感数据、调查数据、规划数据等为数据基础,运用评估模型与GIS空间分析技术识别生态源地,构建生态阻力面,判别潜在生态廊道与关键生态节点,并实现跨区域生态网络的识别与协同构建分析
预期结果 Value	提升生态斑块连通性,优化区域生态空间格局,维护生物多样性;提升生态环境品质,有助于发展生态旅游活动;为研究城市群生态廊道协同规划和管理提供科学的决策辅助支持,推进生态文明建设

3.2 生态网络构建场景路径

3.2.1 生态源地

粤港澳大湾区前景(林地、水域)面积较大,约占研究区总面积(含缓冲区)的65.7%。核心区在前景景观类型中的占比最大,高达83.9%(表3),主要分布于粤港澳大湾区西北部、南部和东北部。边缘区和孔隙区是核心区和非绿色景观区之间的过渡区域,是核心区的保护屏障^[49],面积相对较小,占前景数据不足10%,表明核心区斑块在整体上稳定性不高。桥接区和环道区均具有连接作用,是斑块内部与外部能量流动的途径,分别占前景总面积的1.4%和1.3%,说明研究区原有的生态廊道较少,核心斑块的独立性较强。岛状斑块属于核心区的一部分,面积较小且独立,反映区域核心斑块的破碎程度,其面积占前景的2.0%,斑块的破碎程度较低、整体性强。

基于景观要素识别结果,排除距离陆地较远海岛的生态“孤岛”斑块,结合核心区面积与连通性指数,最终确定40个生态源地。湾区范围内生态源地总面积1.88万km²,约占湾区总面积的33%(表4),主要分布于

表 3 基于 MSPA 的各景观类型及面积比例
Table 3 Area of each landscape types based on MSPA

景观类型 Landscape type	面积 Area/km ²	占前景面积比例 Percentage of the foreground/%	景观类型 Landscape type	面积 Area/km ²	占前景面积比例 Percentage of the foreground/%
核心区 Core	37909.72	83.9	岛状斑块 Islet	915.32	2.0
边缘区 Edge	2858.94	6.3	桥接区 Bridge	650.16	1.4
孔隙区 Perforation	1332.60	3.0	环道区 Loop	570.02	1.3
支线 Branch	970.23	2.2	总计 Total	45207.00	100

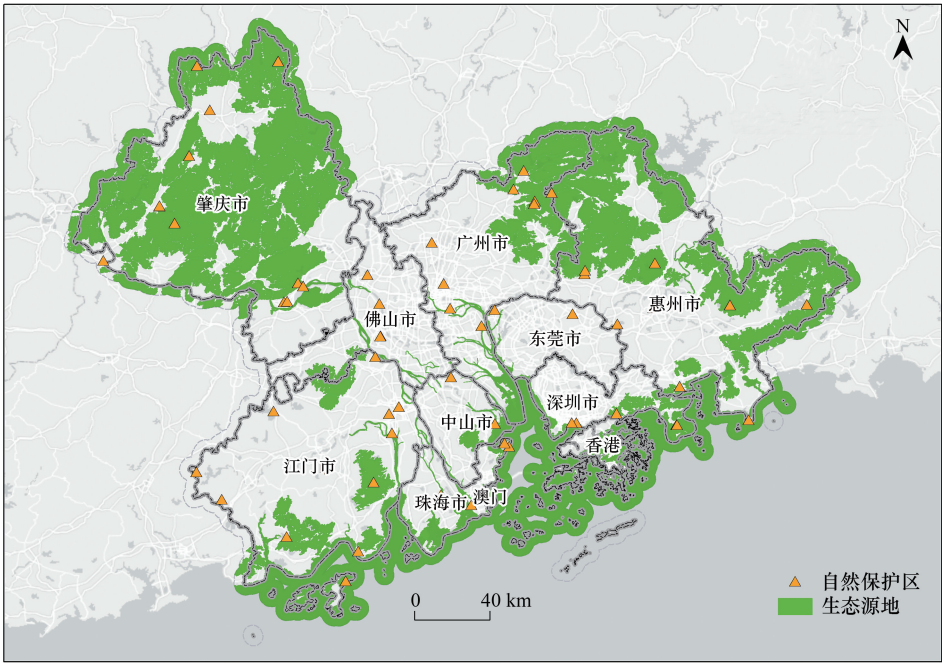


图 3 粤港澳大湾区生态源地分布
Fig.3 Ecological sources of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

表 4 各城市面积及生态网络要素特征
Table 4 Ecological network elements of each city

城市 City	占总面积比例 Percent in total area/%	占源地面积比例 Percent in source area/%	生态廊道长度 Ecological corridor length/km	生态节点数 Number of ecological nodes	跨该城市的廊道比例 Percent of corridor across the city/%
广州	13.0	10.4	837.23	117	47.8
佛山	6.7	1.1	307.43	36	46.0
肇庆	26.3	44.9	2695.73	290	48.5
深圳	3.8	2.6	124.35	11	24.7
东莞	4.3	0.4	60.42	0	8.2
惠州	20.2	25.3	1384.26	252	58.7
珠海	3.4	2.8	180.55	24	12.9
中山	3.2	1.2	144.12	18	22.3
江门	17.1	8.7	810.73	120	40.3
香港	1.9	2.6	165.33	24	22.2
澳门	0.1	0.1	0.00	0	0.0
总计 Total	100.0	100.0	6710.16	892	-

肇庆(44.9%)、惠州市(25.3%)及南部沿海地区,研究区中部尤其是东莞市与澳门特别行政区分布相对较少(图3)。肇庆、惠州和广州北部等区域以山地、丘陵及森林生态系统为主,构成北部连绵山体生态屏障,涵盖了封开国家地质公园、燕都国家湿地公园四会绥江国家湿地公园、花都湖国家湿地公园、东江国家湿地公园、云开山国家级自然风景区、象头山国家级自然保护区以及若干省级自然保护区等重要生态保护区,具有良好的水源涵养、水土保持和生物多样性保护作用。沿海生态带主要包括近岸海域和以环珠江口、环大亚湾、大广海湾区以及海岸山地屏障构成的近海生态防护林组成。

3.2.2 生态廊道

景观阻力影响物种迁徙,阻力较小有利于物种的迁移和扩散,反之则阻碍物种之间的联系。通过构建粤港澳大湾区生态阻力面分析阻力值的空间分布情况(图4),东莞的平均阻力值最高,其次是佛山、深圳和中山市,形成了阻力屏障,生态流迁移阻力较大;阻力值最小的是肇庆市,其次是澳门特别行政区。从都市圈尺度来看,深莞惠都市圈的平均阻力值最大,珠中江和广佛肇都市圈的平均阻力值相近。

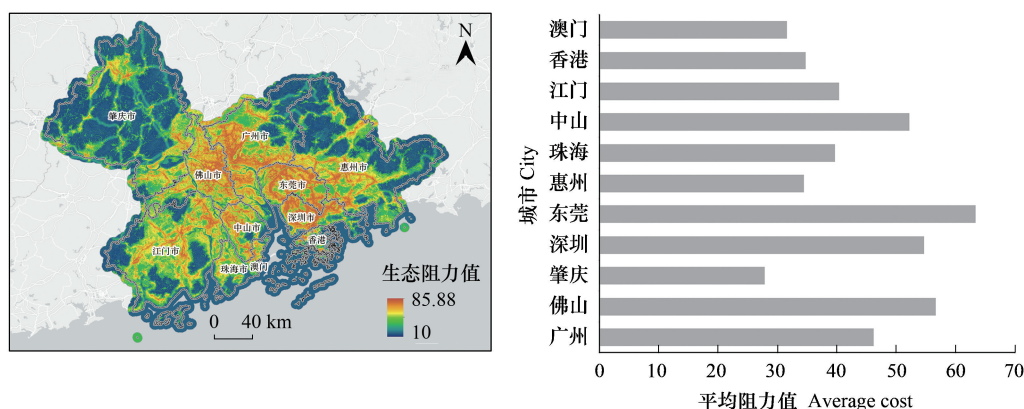


图4 各地区生态阻力值

Fig.4 Resistance value of each city

源地之间的相互作用强度表明潜在生态廊道的重要程度。基于生态阻力面共识别出780条潜在生态廊道,为生态网络体系构建奠定了基础,其中,肇庆市的生态廊道最长(2695.73km)(表4),珠三角九市中拥有生态廊道最短的是东莞市,澳门特别行政区的生态廊道最短。通过重力模型计算,选取G值(相互作用强度)大于1的潜在生态廊道作为一级生态廊道^[41],共287条,其余分别划分为二、三、四级生态廊道(表5,图5)。一级生态廊道主要密集分布于肇庆市、惠州市、江门市和广州市东部,这些源地之间的连通性较强,空间关联最强,物种在两个斑块之间进行迁移和扩散时遇到的阻力小,有助于物质流和能量流的迁移,在生态保护规划中应列为重点对象。二、三级生态廊道散布于研究区,包含南部沿海区域的陆海生态廊道,四级生态廊道主要是距离较远生态源地间形成的廊道,景观阻力相对较大,物质流和能量流迁移困难,在未来的规划中应适当增加生态源地,改善廊道的生境质量,提高源地间生态要素的迁移能力。

总体看来,一、二级生态廊道构成了粤港澳大湾区生态网络的主体架构,涵盖了研究区陆域以及陆海相接的大部分区域,是生态源地与其他源地相互连接的重要保障。其他级别廊道是湾区范围内斑块较小源地的连接通道,一定程度上完善了湾区的生态安全格局。东莞、深圳和澳门特别行政区生态廊道较少,需要在今后的生态相关专项规划中增补生态源地,完善生态网络,促进生态资源的合理利用。

3.2.3 生态节点

生态网络中的生态节点数量、质量以及分布状况均影响物种迁徙的时间和成功概率^[40]。湾区范围生态节点共892处,位于肇庆与惠州市的节点数最多,其次是广州与江门市(表4)。结合构建的区域生态廊道,将研究区生态节点划分为四个等级(表5),每一级生态节点为相应级别生态廊道与“山脊线”的交点。其中,

一级生态节点 357 个,二级生态节点 89 个,三四级生态节点占据总节点数的近一半,这些节点的生态功能相对薄弱,是生态网络构建过程亟需保护与提升的重要区域。

表 5 生态廊道与生态节点级别
Table 5 Ecological corridor and ecological node classification

级别 Level	生态廊道 Ecological corridor			生态节点 Ecological node		
	划分标准 Standard of division	数量 Quantity	占廊道比例 Percent in corridor/%	划分标准 Standard of division	数量 Quantity	比例/% Percent in node
一级 First level	$G>1$	287	36.8	山脊线与一级廊道的交点	357	40.0
二级 Second level	$0.5<G\leq 1$	75	9.6	山脊线与二级廊道的交点	89	10.0
三级 Third level	$0.1<G\leq 0.5$	347	44.5	山脊线与三级廊道的交点	404	45.3
四级 Fourth level	$G\leq 0.1$	71	9.1	山脊线与四级廊道的交点	42	4.7
总计 Total	—	780	100.0	—	892	100.0

G:Gravity,代表生态源地间相互影响作用强度

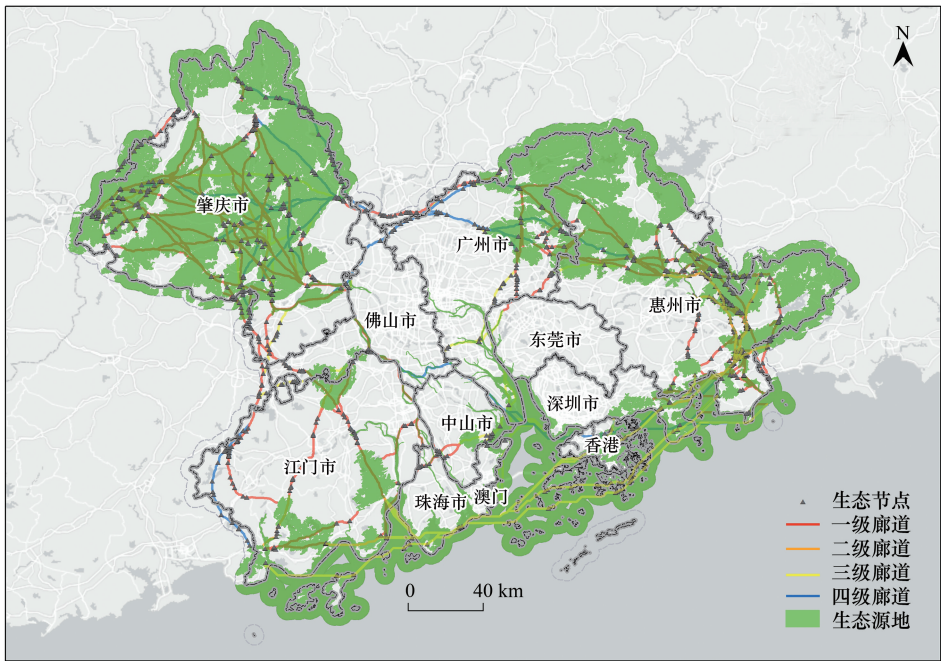


图 5 粤港澳大湾区生态网络
Fig.5 Ecological network of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

3.2.4 生态网络跨区域特征

生态廊道建设是区域生态网络构建的重要组成部分之一,有助于促进区域总体环境向良性发展^[50]。研究区跨区域生态廊道共 552 条,约占生态廊道总数的 71%,一半以上 (56.3%) 的廊道跨越三个及以上城市 (图 6);46% 的生态廊道跨越广州与佛山境内,跨越东莞的廊道数相对较少,占 8.2% (表 4);跨陆海区域的生态廊道连接了湾区南部的主要沿海城市。值得注意的是,约 8.3% 的生态廊道跨越了 8 个城市,基本构成了横跨粤港澳大湾区的廊道结构,连通湾区西北部、东部及沿海的大部分生态源地,对整个区域的生态网络形成及生态安全格局构建具有极期重要的意义。

总体上,粤港澳大湾区生态网络呈“两横三纵”分布的整体态势 (图 7),北部为连绵山体生态屏障,南部为近岸海域海陆生态流交换的重要廊道和抵御海洋灾害的重要生态防护带,东部和西部主要由江门市和惠州市东部的山地丘陵带构成,包括恩平地热国家地质公园、台山上川岛省级自然保护区和惠东古田省级自然保

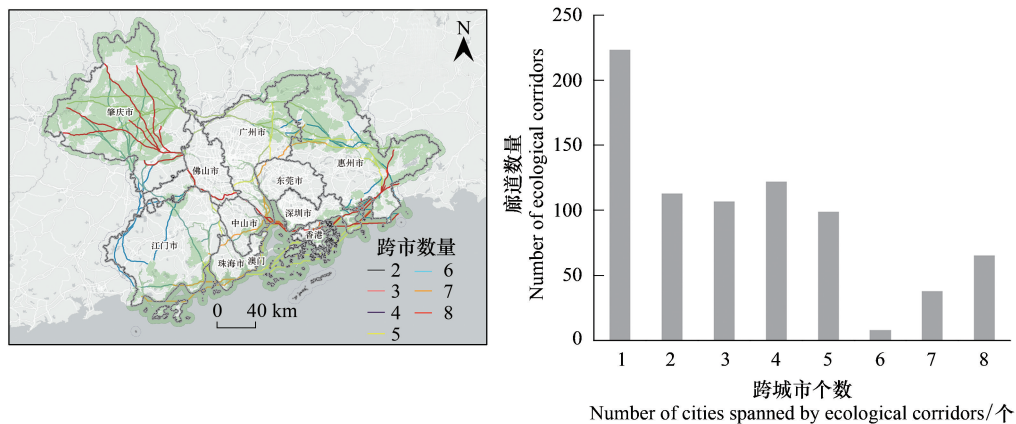


图 6 生态廊道跨区域情况
Fig.6 Distribution of cross-regional ecological corridors

护区等重要生态保护区,并分别连接北部生态屏障和南部的近岸海域重要廊道。中部以珠江流域的水系和珠三角城市群重要的自然保护区、湿地和森林公园等重要区域为主体,形成多点支撑、结构相对稳定的生态网络格局。



图 7 粤港澳大湾区生态网络总体格局
Fig.7 Ecological network pattern of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

3.3 生态网络协同规划与治理模式

基于粤港澳大湾区的生态网络特征,从生态源地、生态廊道、生态节点等构建主体探讨城市内、城市间生态网络协同规划与治理模式(图 8)。

(1) 针对不同的构建主体与跨区域类型,分别从保护、治理、优化、新增等角度开展协同目标与需求分析。如生态源地与廊道集中分布的肇庆、惠州及广州与惠州市的交界地带,应结合资源环境承载力、土地适应性评价等,对生境质量良好、生态服务价值较高的重点区域进行分级保护与进一步优化;在生态要素分布较少的东

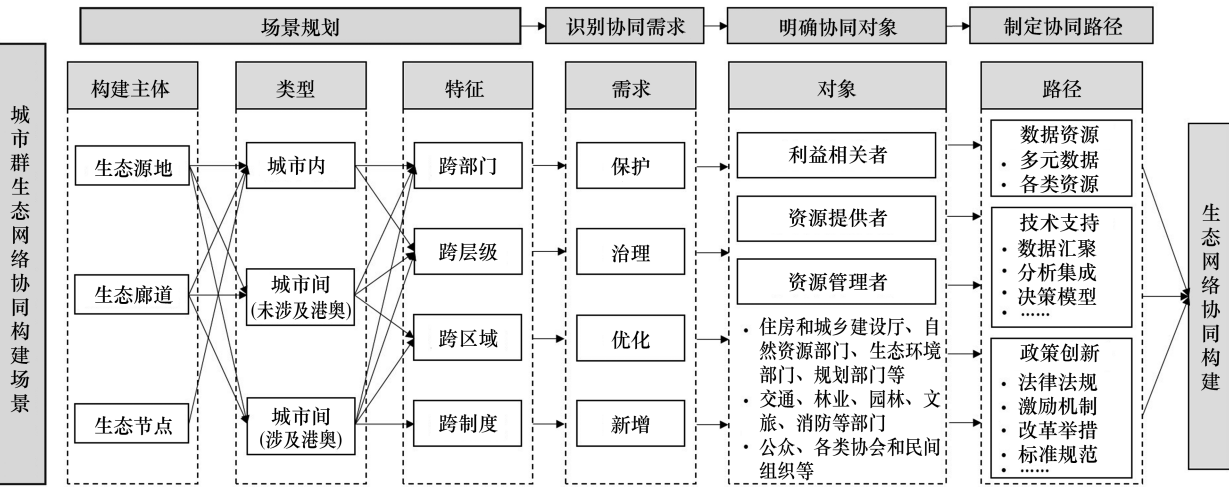


图 8 城市群生态网络协同构建

Fig.8 Collaborative construction of ecological networks in urban agglomerations

莞、深圳及佛山与广州的交界区域,建议通过国土空间规划及相关生态功能区规划,严格用途管制,通过增大生态斑块面积,加强生态源地的保护与建设;生态节点受干扰的程度远大于生态空间内部,在节点密集分布的肇庆市、广州与惠州北部、以及江门市的中西部,可采取划定生态缓冲区、增设防护措施等方式提升不同等级节点的生态环境建设,减弱对生态廊道的负面影响。

(2)明确每种需求所涉及的协同类型、特征与具体协同对象。单个城市内的生态网络主体构建相对简单,主要涉及本地区跨部门、跨层级的协作,如分布于湾区 11 个城市内的生态源地、重要生态节点、未跨区域的生态廊道等,需要当地住房和城乡建设、生态环境、规划、交通、林业等多方部门配合开展(表 4);由于不同地区经济制度、法律和行政体系存在差异,城市间的协同构建更为复杂,针对跨越湾区多个行政区划边界的生态源地与廊道(图 6),需要破除行政和制度壁垒,开展跨区域、跨陆海甚至跨制度(涉及港澳地区)的统筹协作,通过不同部门的权属和职能划分相应的政策与责任区,推进跨境联合保护与治理工作。

(3)依据当地的区域特点与协同发展水平制定差异化的协同路径。各协同对象结合自身职责、管理和使用权限,通过提供场景构建过程所需的多元数据和各类资源,探索数据汇聚、分析集成、决策模型部署等关键技术支持,法律法规、激励机制、改革举措、标准规范等政策创新途径,以及公众或社会组织广泛参与等,明晰其在场景构建各阶段的参与方式及任务流程,开展精细化统筹协作,促进城市群生态网络协同构建。

3.4 陆海统筹生态网络协同构建

粤港澳大湾区生态网络构建场景中,依据连接的生态斑块类型,生态廊道可分为陆地生态廊道(连接陆域生态斑块)、海洋生态廊道(连接近岸海域生态斑块)及陆-海生态廊道(连接陆海生态斑块)。陆地廊道结构较为简单,主要分布在自然资源相对丰富的区域,可结合区域特征采取相应的协同规划与治理模式。本研究将边界向海一侧区域全部识别为近岸海域生态斑块,未进行海洋功能区划分,因此海洋生态廊道数量较少。湾区南部尤其是江门、珠海、深圳、惠州以及香港特别行政区的海岸带区域,分布有较密集的陆-海生态廊道(图 5),为近岸海域生物的扩散、迁移和栖息活动提供良好的生态环境,是构成陆海生态网络的关键组成部分,也是海岸带地区进行陆海交互的主要途径^[51—52]。由于跨越陆地、海洋两种生态系统,陆-海生态廊道结构更为复杂,跨协同构建需求与协同对象更加多样,涉及更多部门间的沟通与协调。

海岸带城市群的生态可持续发展需要着重考虑陆地和海洋的生态连接,将其作为整体进行陆海统筹的生态规划,是粤港澳大湾区生态网络构建场景的重要环节。进一步识别与细分近岸海域生态斑块,尤其位于海洋保护区、保留区及特殊利用区等人类开发利用较低的海洋功能区,将有助于在陆海联结的关键区域实现陆海统筹的生态系统管理。如深圳的福田-内伶仃岛自然保护区、珠江口中华白海豚自然保护区和大亚湾水产

资源自然保护区,位于东莞的虎门海洋自然保护区,惠州的大亚湾海洋自然保护区、港口海洋自然保护区、针头岩海洋特别保护区,珠海与江门的淇澳岛海洋自然保护区、珠江口海洋自然保护区、大襟岛海洋自然保护区等,各沿海城市的海洋保留区(表6)以及香港特别行政区的海岸公园与海岸保护区等。在粤港澳大湾区城市群发展中,建议以近岸海域生态斑块为依托,以入海河流为骨架,统筹和权衡多种发展目标,构建陆域和近岸海域的一体化生态网络,针对重要生态斑块与关键生态节点,明确各类利益相关者权责,严格规范海域使用行为,保障陆海生态廊道的流通性以及生态网络的完整性,推动跨区域陆海生态系统协调发展。

表6 粤港澳大湾区沿海城市海洋功能区划

Table 6 Marine functional zoning of coastal cities in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

城市 City	海洋保护区 Marine protected area	保留区 Marine reserve	规划文件来源 Planning document
深圳	福田-内伶仃岛自然保护区、珠江口中华白海豚自然保护区和大亚湾水产资源自然保护区	深圳湾保留区、茅洲河口保留区、伶仃洋保留区等	《深圳市海洋环境保护规划(2018—2035年)》
东莞	虎门海洋自然保护区	伶仃洋保留区、太平水道保留区、东江南支流保留区、倒运海保留区、狮子洋保留区、东江北干流保留区	《东莞市海洋功能区划(2013—2020年)》
惠州	大亚湾海洋自然保护区、港口海洋自然保护区、针头岩海洋特别保护区	小桂保留区	《惠州市海洋功能区划(2013—2020年)》
珠海	淇澳岛海洋自然保护区、珠江口海洋自然保护区、佳蓬列岛海洋自然保护区和担杆列岛海洋自然保护区	黄茅海保留区、鸡啼门保留区、磨刀门保留区、拱北保留区、横琴岛东保留区、香洲保留区、伶仃洋保留区	《珠海市海洋功能区划(2015—2020年)》
中山	—	伶仃洋(中山)保留区	《中山市海洋功能区划(2013—2020年)》
江门	大襟岛海洋自然保护区、大矾石、乌猪洲海洋特别保护区	广海湾保留区、黄茅海保留区	《江门市海洋功能区划(2013—2020年)》

4 讨论

本研究引入场景概念,结合生态源地识别-阻力面构建-生态廊道提取-生态节点判别的研究范式,开展粤港澳大湾区生态网络协同构建场景分析,初步识别了“两横三纵”的生态网络总体格局,并从生态源地、生态廊道、生态节点等构建主体探讨城市内、城市间生态网络协同规划与治理模式,以期为粤港澳大湾区城市群生态保护相关专项规划、政策制定和生态安全保障提供参考。近年来,跨行政区域协同治理与发展受到越来越多的重视,以协同理念为指导建设生态廊道,对加强跨省区生态建设和环境保护,推进城市群生态网络建设具有重大意义。已有研究多是对生态网络的现状识别与格局优化^[20,46],尚未从跨区域协同构建的角度开展深入探讨与分析^[49,53],与同类型研究相比,本研究具有以下改进与创新:(1)从跨区域角度分析湾区生态网络空间特征。识别跨区域生态廊道552条,明确跨越多个城市的廊道数量与格局特征,有助于指导地方开展针对性的生态网络保护与治理工作。(2)从陆海统筹视角探索生态网络协同构建。考虑粤港澳大湾区陆海连接的地域特点,初步探讨了陆地生态廊道、海洋生态廊道和陆-海生态廊道连接之间的区别。(3)以场景为依托开展城市群生态廊道协同构建与治理模式分析。本研究在场景规划的基础上,根据城市群生态网络协同构建应用场景的业务特征,进一步探讨了生态网络构建过程中的协同需求、协同对象、协同路径等,有助于厘清不同生态要素在不同区域应采取差异化的管理措施,更精准地指导城市群生态廊道协同建设,为湾区国土空间规划中生态空间的全局调控和局部优化策略提供参考。

研究仍存在需要完善的地方,首先,形态学空间格局分析(MSPA)虽然能够基于空间形态指导生态源地识别,但无法定量体现斑块生境质量等功能属性,对生态源地的识别具有局限性^[40—41],应探索更合适的理论模型,结合实地调查完善生态源地的判别标准;其次,生态廊道与生态节点的识别仅停留在空间位置确定上,缺少对其面积及内部景观建设的分析,有研究表明廊道的宽度对物种移动具有非常重要的意义^[54—55],未来可

通过设置生态廊道宽度或增加缓冲区空间分析,探讨廊道的属性特征对生态过程的影响;由于受到用海区域数据获取的限制,本研究未剔除确权用海和规划开发用海区域,将边界向海一侧区域全部识别为生态源地,未来可结合近岸海域环境功能区划和海洋功能区划进一步划分用海类型;最后,场景规划是课题组基于场景理念提出的理论体系,本研究是场景规划理论的初步实践探索,通过识别生态网络构建的场景要素,探讨了不同生态网络构建主体的协同规划与治理模式,但场景要素如何为开展以生态源地-阻力面-生态廊道-生态节点为范式的生态网络协同构建过程提供具体指导,仍有待进一步研究与阐明。该理论是否能够在城市群协同领域得到良好应用,还需深入开展理论验证与广泛讨论。

粤港澳大湾区城市群具有地理位置、经济与政策制度的多重特殊性,其生态网络格局构建不仅是跨区域、跨层级、跨部门、跨制度的综合性问题,也具有跨陆地与海洋的湾区典型特色,与一般的城市群具有显著差异。湾区生态空间布局优化是一个动态过程,也是一个不断探索的过程。在今后的研究中,需要进一步完善生态网络格局构建的协同范式,围绕生态廊道的类型如陆地生态廊道、水生生态廊道、海洋生态廊道、陆海生态廊道等,更深入地开展城市内、城市间及城市群生态网络协同构建场景的实践探索,使得各市更好地发挥自身优势,为湾区生态网络布局优化与区域生态安全格局提升提供指导。

5 结论

本研究以粤港澳大湾区城市群为例,开展生态网络协同构建场景要素与协同路径分析,结合景观连通性和形态学空间格局分析方法(MSPA)获得生态源地,并基于最小累积阻力模型识别生态廊道与生态节点,构建大湾区生态网络总体格局,最后通过识别跨区域生态廊道,从跨区域协作角度探讨城市群生态网络协同构建的潜在路径。主要结论如下:

(1)粤港澳大湾区城市群生态网络构建场景的主题是以协同构建湾区城市群的生态网络为目标,基于湾区的生态本底条件,运用评估模型与空间分析技术,实现关键生态节点、跨区域生态廊道的识别,构建完善的生态网络格局,为生态空间资源优化利用提供辅助决策;场景涉及众多跨部门、跨层级、跨区域、跨制度的利益相关者。

(2)粤港澳大湾区生态网络由40个生态源地、780条潜在生态廊道与892个生态节点构成,呈现“两横三纵”的整体分布态势,形成多点支撑、结构相对稳定的生态网络空间格局,识别的生态网络与广东省万里碧道、珠江三角洲绿道网重合程度较高。

(3)粤港澳大湾区近一半的生态廊道跨越佛山与广州市,一半以上的廊道跨越三个及以上城市,有部分生态廊道横跨整个湾区范围;南部海岸带区域分布有较密集的陆-海生态廊道,连接了湾区的主要沿海城市,是构成陆海生态网络的关键组成部分,为后续跨区域生态安全格局优化打下基础。

(4)以场景为依托,从生态源地、生态廊道、生态节点等构建主体分析跨区域生态廊道协同构建过程涉及的协同需求、协同对象,探索差异化协同路径,探讨了城市内、城市间、城市群生态网络协同构建场景的潜在模式,可为进一步开展生态网络协同构建与应用示范过程提供指导。

参考文献(References):

- [1] 吴军,叶裕民.消费场景:一种城市发展的新动能.城市发展研究,2020,27(11):24-30.
- [2] 夏蜀.数字化时代的场景主义.文化纵横,2019(5):88-97,143.
- [3] Wasburn P C, Joshua M. No sense of place: the impact of electronic media on social behavior. Contemporary Sociology, 1988, 17(6): 820.
- [4] Scoble R and Israel S. Age of Context: Mobile, Sensors, Data and the Future of Privacy. Scotts Valley, CA: Create Space.2013.
- [5] 陈波.基于场景理论的城市街区公共文化空间维度分析.江汉论坛,2019(12):128-134.
- [6] 方创琳.中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向.地理学报,2014,69(8):1130-1144.
- [7] 周春山,邓鸿鹄,史晨怡.粤港澳大湾区协同发展特征及机制.规划师,2018,34(4):5-12.
- [8] 王红梅,谢永乐,张驰,孙静.动态空间视域下京津冀及周边地区大气污染的集聚演化特征与协同因素.中国人口·资源与环境,2021,31(3):52-65.
- [9] 杨晨晨,甘华阳,万荣胜,张耀明.粤港澳大湾区1975—2018年海岸线时空演变与影响因素分析.中国地质,2021,48(3):697-707.
- [10] Jayakumar K, Malavannan S. Assessment of shoreline changes over the Northern Tamil Nadu Coast, South India using WebGIS techniques. Journal

- of Coastal Conservation, 2016, 20(6): 477-487.
- [11] 符志友, 张衍桑, 冯承莲, 郭昌胜, 游静, 孙宇巍, 刘新妹, 吴丰昌. 我国水环境风险管理进展、挑战与战略对策研究. 环境科学研究, 2021, 34(7): 1532-1541.
- [12] 陈利顶, 孙然好, 孙涛, 杨磊. 城市群生态安全格局构建:概念辨析与理论思考. 生态学报, 2021, 41(11): 4251-4258.
- [13] 傅强, 顾朝林. 基于生态网络的生态安全格局评价. 应用生态学报, 2017, 28(3): 1021-1029.
- [14] Luo Y H, Wu J S, Wang X Y, Wang Z Y, Zhao Y H. Can policy maintain habitat connectivity under landscape fragmentation? A case study of Shenzhen, China. Science of the Total Environment, 2020, 715: 136829.
- [15] 孔繁花, 尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建. 生态学报, 2008, 28(4): 1711-1719.
- [16] 沈钦伟, 林美玲, 莫惠萍, 黄宇斌, 胡欣雨, 魏凌伟, 郑郁善, 陆东芳. 佛山市生态网络构建及优化. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3288-3298.
- [17] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 王红扬, 周艳妮, 秦正茂. 湖南省城市群生态网络构建与优化. 生态学报, 2011, 31(10): 2863-2874.
- [18] 张雪茂, 董廷旭, 杜华明, 廖传露, 王飞. 基于景观生态风险评价的涪江流域景观格局优化. 生态学报, 2021, 41(10): 3940-3951.
- [19] 胡炳旭, 汪东川, 王志恒, 汪翡翠, 刘金雅, 孙志超, 陈俊合. 京津冀城市群生态网络构建与优化. 生态学报, 2018, 38(12): 4383-4392.
- [20] 杨凯, 曹银贵, 冯喆, 耿冰瑾, 冯漪, 王舒菲. 基于最小累积阻力模型的生态安全格局构建研究进展. 生态与农村环境学报, 2021, 37(5): 555-565.
- [21] Peng J, Yang Y, Liu Y X, Hu Y N, Du Y Y, Meersmans J, Qiu S J. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns. Science of the Total Environment, 2018, 644: 781-790.
- [22] 刘一丁, 何政伟, 陈俊华, 谢川, 谢天资, 慕长龙. 基于 MSPA 与 MCR 模型的生态网络构建方法研究——以南充市为例. 西南农业学报, 2021, 34(2): 354-363.
- [23] 王文静, 韩宝龙, 郑华, 欧阳志云. 粤港澳大湾区生态系统格局变化与模拟. 生态学报, 2020, 40(10): 3364-3374.
- [24] 甘琳, 陈颖彪, 吴志峰, 千庆兰, 郑子豪. 近 20 年粤港澳大湾区生态敏感性变化. 生态学杂志, 2018, 37(8): 2453-2462.
- [25] 刘汉仪, 林媚珍, 周汝波, 钟亮. 基于 InVEST 模型的粤港澳大湾区生境质量时空演变分析. 生态科学, 2021, 40(3): 82-91.
- [26] 郭晨, 冯舒, 汤沐熙, 唐正宇, 杨志鹏. 场景规划:助力城市群协同发展——以粤港澳大湾区为例. 热带地理, 2022, 42(2): 305-317.
- [27] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. 生态学报, 1999(1): 8-15.
- [28] Wickham J D, Riitters K H, Wade T G, Vogt P. A national assessment of green infrastructure and change for the conterminous United States using morphological image processing. Landscape and Urban Planning, 2010, 94(3/4): 186-195.
- [29] Saura S, Vogt P, Velázquez J, Hernando A, Tejera R. Key structural forest connectors can be identified by combining landscape spatial pattern and network analyses. Forest Ecology and Management, 2011, 262(2): 150-160.
- [30] 王越, 林箐. 基于 MSPA 的城市绿地生态网络规划思路的转变与规划方法探究. 中国园林, 2017, 33(5): 68-73.
- [31] Soille P, Vogt P. Morphological segmentation of binary patterns. Pattern Recognition Letters, 2009, 30(4): 456-459.
- [32] Forman R T T, Wilson E O. Land Mosaics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [33] 丁成呈, 张敏, 束学超, 彭鹏. 多尺度的城市生态网络构建方法——以合肥市主城区生态网络规划为例. 规划师, 2021, 37(3): 35-43.
- [34] 吴昌广, 周志翔, 王鹏程, 肖文发, 滕明君. 景观连接度的概念、度量及其应用. 生态学报, 2010, 30(7): 1903-1910.
- [35] Visconti P, Elkin C. Using connectivity metrics in conservation planning-when does habitat quality matter? Diversity and Distributions, 2009, 15(4): 602-612.
- [36] Engelhard S L, Huijbers C M, Stewart-Koster B, Olds A D, Schlacher T A, Connolly R M. Prioritising seascape connectivity in conservation using network analysis. Journal of Applied Ecology, 2017, 54(4): 1130-1141.
- [37] 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.
- [38] 王秀明, 赵鹏, 龙颖贤, 宋巍巍, 刘谓承. 基于生态安全格局的粤港澳地区陆域空间生态保护修复重点区域识别. 生态学报, 2022, 42(2): 450-461.
- [39] 汪金梅, 雷军成, 王莎, 吴婕, 梁屹, 陈永林, 熊星, 王军围. 东江源区陆域生态网络构建与评价. 生态学杂志, 2020, 39(9): 3092-3098.
- [40] 王浩, 马星, 杜勇. 基于生态系统服务重要性和生态敏感性的广东省生态安全格局构建. 生态学报, 2021, 41(5): 1705-1715.
- [41] 陈南南, 康帅直, 赵永华, 周煜杰, 闫瑾, 卢雅茹. 基于 MSPA 和 MCR 模型的秦岭(陕西段)山地生态网络构建. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1545-1553.
- [42] 党安荣. 人口密度分级的一般原则与定量标准的探讨. 地理科学, 1990(03): 264-270, 292.
- [43] 程植, 林孝松. 三峡库区大宁河流域景观格局变化及生态安全格局构建研究. 重庆师范大学学报:自然科学版, 2021, 38(3): 40-49.
- [44] 黄雪飞, 吴次芳, 游和远, 肖武, 钟水清. 基于 MCR 模型的水网平原区乡村景观生态廊道构建. 农业工程学报, 2019, 35(10): 243-251.
- [45] 陈德权, 兰泽英, 李玮麒. 基于最小累积阻力模型的广东省陆域生态安全格局构建. 生态与农村环境学报, 2019, 35(7): 826-835.
- [46] 陈小平, 陈文波. 鄱阳湖生态经济区生态网络构建与评价. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1611-1618.
- [47] 诸葛海锦, 林丹琪, 李晓文. 青藏高原高寒荒漠区藏羚羊生态廊道识别及其保护状况评估. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2504-2510.
- [48] 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.
- [49] 梁艳艳, 赵银娣. 基于景观分析的西安市生态网络构建与优化. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3767-3776.
- [50] 李博, 韩增林, 佟连军. “吉三角”区域生态规划与生态网架建设. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1160-1165.
- [51] 殷炳超, 何书言, 李艺, 李杨帆. 基于陆海统筹的海岸带城市群生态网络构建方法及应用研究. 生态学报, 2018, 38(12): 4373-4382.
- [52] Álvarez-Romero J G, Pressey R L, Ban N C, Vance-Borland K, Willer C, Klein C J, Gaines S D. Integrated land-sea conservation planning: the missing links. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2011, 42: 381-409.
- [53] 孙枫, 章锦河, 王培家, 魏国恩, 储光, 曹禹. 城市生态安全格局构建与评价研究:以苏州市区为例. 地理研究, 2021, 40(9): 2476-2493.
- [54] 蒋思敏, 张青年, 陶华超. 广州市绿地生态网络的构建与评价. 中山大学学报:自然科学版, 2016, 55(4): 162-170.
- [55] 韦宝婧, 苏杰, 胡希军, 徐凯恒, 朱满乐, 刘路云. 基于“HY-LM”的生态廊道与生态节点综合识别研究. 生态学报, 2022, 42(7). DOI: 10.5846/stxb202101240248