

DOI: 10.20103/j.stxb.202501170155

王欣妍, 冯启源, 王辰星, 严岩. 基于生态适应性理论的粤港澳大湾区生态安全格局构建. 生态学报, 2025, 45(12): 5769-5782.

Wang X Y, Feng Q Y, Wang C X, Yan Y. Construction of ecological security patterns based on ecological adaptation theory in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12): 5769-5782.

基于生态适应性理论的粤港澳大湾区生态安全格局构建

王欣妍^{1,2}, 冯启源³, 王辰星^{1,*}, 严 岩¹

1 中国科学院生态环境研究中心区域与城市生态安全全国重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中信国安(北京)物业管理有限公司, 北京 100000

摘要: 全球气候变化和人类活动的加剧使城市化区域面临高度不确定且复杂的生态风险, 通过构建具有适应性的生态安全格局是重要的应对基础和保障条件。将生态适应理论融入生态网络要素的识别过程中, 基于“潜力-连通度-韧性”三维框架, 分别表征生态网络要素的多功能性、生态系统服务流动的连通性、生态系统过程的连续性以及应对生态风险的缓冲能力和恢复能力, 以粤港澳大湾区为例, 构建适应性视角下的生态安全格局。结果显示, 生态源地共 396 个, 分布在西部和东北部, 总面积 22223 km² (占区域 40.03%); 识别生态廊道 227 条, 总长度 4034.61 km, 由中心建成区向外辐射, 包括外围呈现环状分布的廊道和贯穿中部城市建成区的长距离廊道; 生态夹点 24 个, 分布在中部的河网和南部海岸带的中长距离廊道上 (33.33% 分布于水体); 生态障碍点 51 个, 分布在中部的长距离廊道上 (56.86% 分布于建设用地)。构建了“北山南海三江水廊网”的生态安全格局, 以北部山地生态屏障与南部海洋生态屏障的生态涵养和东江、西江、北江、贯穿中部人类活动密集区域的多条廊道以及港口等的生态连通为主。进一步阐述了要素分布、分类及相应的生态功能, 提出了针对当前规划及管控政策的补充建议。通过引入对生态系统适应性的综合考量, 提出了构建更具适应性的生态安全格局的识别体系, 提升了建成区廊道的识别精度, 更加明确了保障生态安全的具体途径和目标, 为后续的生态保护修复、空间格局优化和环境政策调整等工作提供理论和方法支撑。

关键词: 生态适应性; 生态安全格局; 生态网络; 生态风险; 粤港澳大湾区

Construction of ecological security patterns based on ecological adaptation theory in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

WANG Xinyan^{1,2}, FENG Qiyuan³, WANG Chenxing^{1,*}, YAN Yan¹

1 State Key Laboratory for Ecological Security of Regions and Cities, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Citic Guoan (Beijing) Property Management Company Limited, Beijing 100000, China

Abstract: The intensification of global climate change and human activities exposes urbanized areas to highly uncertain and complex ecological risks. Developing an adaptable ecological security framework is essential for effectively addressing these risks. Integrated the theory of ecological adaptation into the identification process of ecological network elements. Based on the three-dimensional framework of "potential-connectedness-resilience", respectively characterize the multifunctionality of ecological network elements, the connectivity of ecosystem service flows, the continuity of ecosystem processes, as well as

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42101250); 中国科学院战略先导 A 类专项 (XDA23030101)

收稿日期: 2025-01-17; **网络出版日期:** 2025-03-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cxwang@rcees.ac.cn

the buffering capacity and recovery ability to cope with ecological risks. Using the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area as a case study, an ecological security pattern is constructed from an adaptive perspective. The results show that there are a total of 396 ecological source areas and mainly distributed in the western and northeastern regions. Their total area is 22,223 km², accounting for 40.03% of the region. A total of 227 ecological corridors have been identified, with a total length of 4,034.61 km. These corridors radiate outward from the central built-up area, including circular-distributed corridors on the periphery and long-distance corridors that run through the central urban built-up area. The total length is 4034.61 km. There are 24 ecological pinch points, which are distributed in the river network in the central part and the medium-and long-distance corridors of the southern coastal zone (33.33% of them are distributed in water bodies). There are 51 ecological barrier points, which are distributed in the long-distance corridors in the central part (56.86% of them are distributed in construction land). Based on this, this study constructs the ecological security pattern of the “Northern mountainous-Southern marine-Three rivers water corridor network” in the Greater Bay Area, which focuses on the ecological conservation of the northern mountainous and southern marine ecological barrier, as well as the ecological connectivity of the Dongjiang River, the Xijiang River, the Beijiang River, and the corridors and harbors that run through the central human activity-intensive area. The distribution, categorization, and ecological functions of the elements are further elaborated, and additional suggestions for the current planning and ecological spatial control policies are proposed. By introducing a comprehensive consideration of ecosystem adaptation, an identification system for constructing a more adaptable ecological security pattern was proposed. This system improves the identification accuracy of corridors in built-up areas, clarifies the specific approaches and goals for ensuring ecological security, and provides theoretical and methodological support for subsequent ecological protection and restoration, spatial pattern optimization, and environmental policy adjustment.

Key Words: ecological adaptation; ecological security pattern; ecological network; ecological risk; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

全球气候变化、自然灾害和人类活动的加剧使城市化区域生态安全及人类福祉受到生态风险胁迫,生态空间保障至关重要。《中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》和《中共中央关于进一步全面深化改革、推进中国式现代化的决定》均强调完善国家生态安全屏障,推进重点生态功能区、重要生态廊道保护建设,生态保护红线、自然保护区、山水林田湖草沙一体化保护修复等相关空间规划取得了显著效果^[1-2],凸显生态安全在国家政策层面的重要性。生态安全格局考量生态用地与生态过程、功能之间的关系,识别关键空间要素,是提升区域生态质量、优化国土开发格局的重要途径,为良好的人居环境提供基本空间保障。

目前,“生态安全”研究从遥感、GIS 等技术手段转向评估模型,再到生态安全格局^[3],形成“生态源地-阻力面-廊道-战略点”的研究范式^[4]。生态源地从主观提取转向空间精细化识别^[5];阻力面从简单赋值转向社会-生态多途径修正^[6];生态廊道从线状提取转向面状范围阈值识别^[7];战略点从生态夹点和障碍点保护修复转向踏脚石设立^[8]。学者们围绕特定物种保护^[9]、全面与针对性权衡^[10]、规模阈值识别^[11]、跨尺度格局^[12]、全球变化下的生态网络构建^[13]、成效评估^[14]、网络韧性分析^[15]等方面开展研究。尽管现有研究在一定程度上考虑了生态系统韧性,但对于快速变化的环境和具有高度不确定性及复杂性的生态风险,适应性仍显不足,生态源地功能和生态廊道连通性易受损,难以有效保障生态系统的稳定性与安全性。因此,基于被动风险治理的生态安全格局识别逐渐被主动提升生态系统自身适应能力的生态安全格局所替代。

基于生态适应性理论的生态安全格局研究,从提前预防的角度建立对生态系统结构与功能调节的自适应能力评估体系,持续监测系统变化,动态调整阶段性目标,形成具有高度适应性的生态网络,提升城市化区域响应冲击、适应外界干扰的能力^[16-17]。生态适应理论中的“潜力-连通度-韧性”三维框架考虑生态系统的功能重要性、景观空间结构连通性及动态恢复过程,阐明了风险下生态系统的模式和过程如何随时间变化^[18]。本文将生态适应理论融入生态网络要素识别,综合考虑自然本底情况、人类活动干扰、生态系统服务变化等影响,旨

在构建更具适应性的生态安全格局,提升生态系统应对风险的适应能力,为城市化区域生态安全提供保障。

1 研究区域和数据来源

1.1 研究区域

研究以人口密集、经济发达、政治重要、生态价值高、生态环境问题多样的粤港澳大湾区为研究区域(图1)。其在中国0.6%的土地上聚集了6%的人口,人口城镇化率超过85%,对国内生产总值贡献高达12.4%^[19]。地势北高南低,河流众多,属亚热带季风气候。存在城市内涝、山体滑坡、热岛效应和环境污染等生态环境问题。《粤港澳大湾区发展规划纲要》指出要筑牢生态防护屏障,提升生态系统质量和稳定性,保障可持续的发展规划。作为世界四大湾区之一,其在全球经济格局与区域合作中的影响力发挥着独特且关键的引领示范作用,以大湾区为例识别出更具适应性的生态安全格局对其他同样处于快速发展的区域具有重要的指导意义。

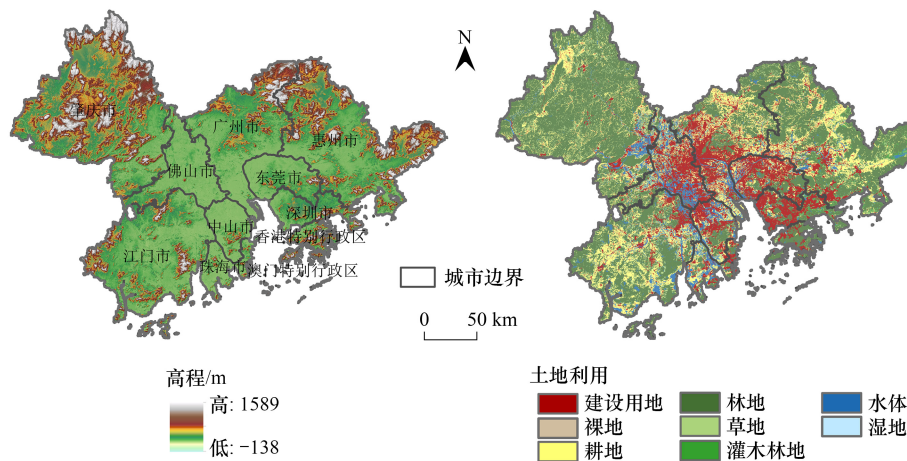


图1 粤港澳大湾区的高程和土地利用类型图

Fig.1 Map of elevation and land use types in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

1.2 数据来源及预处理

本文所用数据包括行政区划、土地利用、数字高程、水体数据、土壤数据、归一化植被指数和气象数据(表1)。阻力面采用已有研究^[32]中的大湾区生态风险适应能力数据。所有数据统一投影坐标系为 WGS_1984_UTM_Zone_49N,重采样为 1km 分辨率。

2 研究方法

2.1 分析框架

本文基于生态适应性理论中的“潜力-连通度-韧性”框架识别生态网络要素(图2)。潜力表征源地和夹点在资源、质量、功能等多方面的发展可能性,连通度表征生态流在源地、廊道和关键夹点、障碍点之间的顺畅程度以及生态过程的连续状况,韧性表征脆弱性高的源地、廊道和夹点面对干扰时的缓冲能力以及受损后的恢复能力。具有高质量与多样性资源的生态源地、具有多功能与连通性的生态廊道、表征生态流关键性与生态要素汇聚性的生态夹点的保护,以及表征阻隔性和风险性的生态障碍点的修复能够提高生态网络应对生态风险的适应能力,构建具有高度适应性的生态安全格局。

2.2 综合生态源地识别

基于形态学空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)识别结构生态源地^[33]。前景数据(林地、草地、水域、湿地)赋值2,背景数据(其他景观)赋值1,缺失数据赋值0。基于 Guidos Toolbox 3.0 八邻域法,提取面积大于 1km²的核心斑块为结构生态源地。

表 1 数据来源

Table 1 Data source

数据类型 Data type	数据集名称 Dataset name	年份 Year	来源 Source	分辨率 Resolution	参考文献 References
行政区划及道路数据 Administrative division, and roads data	全国 1:100 万公众版地形数据 (2021 版)	现势性为 2019 年	全国地理信息资源目录服务系统	1km	[20]
数字高程 Digital Elevation	ASTER GDEM	2009	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/)	30m	[21]
土地利用 Land use data	GlobeLand30	2000, 2020	GlobeLand30: 全球地理信息公共产品	30m	[22]
水体数据 Waterbody data	1990—2008 中国水体分布数据集	2008	国家科技资源共享服务平台	—	[23]
土壤数据 Soil dataset	世界土壤数据库 (HWSO)	2009	联合国粮食及农业组织 (https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/)	1km	[24]
水文土壤分组 Hydrologic soil groups	Global Hydrologic Soil Groups (HYSOGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling	—	https://daac.ornl.gov/SOILS/guides/Global_Hydrologic_Soil_Group.html	250m	[25]
归一化植被指数 NDVI Normalized Difference Vegetation Index	2000—2022 年中国 30 米年最大 NDVI 数据集	2000, 2020	国家生态科学数据中心 (https://cstr.cn/15732.11.nesdc.ecodb.rs.2021.012)	30m	[26]
蒸散发 Evapotranspiration	中国气象要素年度空间插值数据集	2000, 2020	时空三极环境大数据平台 (https://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/8b11da09-1a40-4014-bd3d-2b86e6dcead4/)	1km	[27]
降雨 Precipitation	1960—2020 年中国 1 公里分辨率月降水数据集	2000, 2020	Science Data Bank (https://www.scidb.cn/en/cstr/31253.11.sciencedb.01607)	1km	[28]
政策规划数据 Policy planning data	广东省碧道	—	《广东万里碧道建设总体规划 (2018—2035 年)》	—	[29]
	广东省南粤古驿道	—	http://www.infonht.cn/ViewMessage.aspx?ColumnId=21&MessageId=8405	—	[30]
	广东省环境管控单元数据	—	《广东省“三线一单”生态环境分区管控方案》	—	[31]

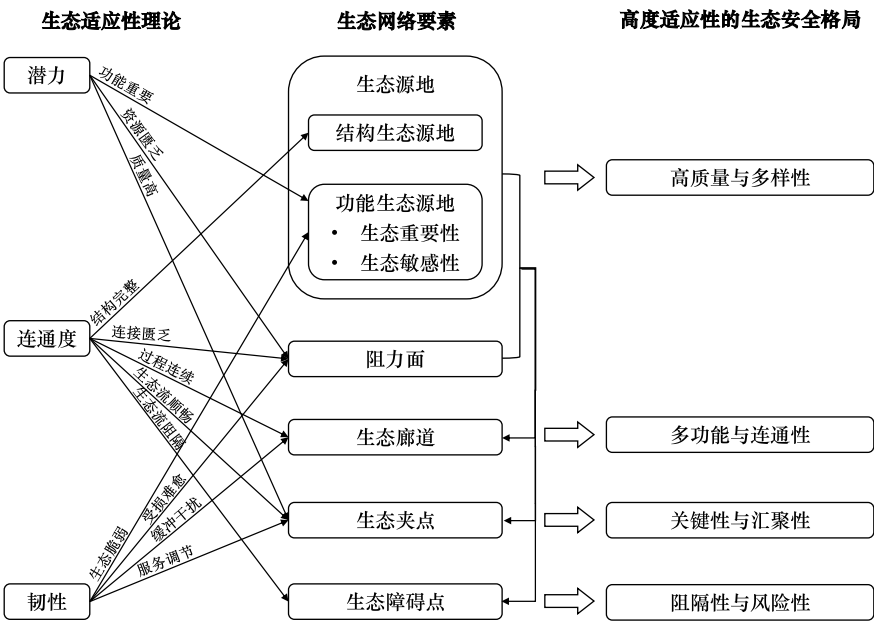


图 2 基于生态适应性理论的生态安全格局识别框架

Fig.2 The identification framework of ecological security pattern based on the theory of ecological adaptation

基于生态重要性与敏感性识别功能生态源地。生态重要性选取水源涵养、土壤保持、生境维持和固碳四种生态系统服务,采用 InVEST 3.13.0 计算并归一化后等权重叠加。生态敏感性选取人为干扰、水源保护、景观基础、地形和植被覆盖 5 类指标,依据分级标准赋值^[34](表 2)后等权重叠加。以自然断点法将两者评估结果分 5 级,提取整合面积大于 1km²的高度重要与高度敏感区域为功能生态源地。通经 ArcGIS 10.8 整合与拓扑检查,得到综合生态源地。

表 2 生态敏感性评估指标及分级标准

Table 2 Ecological sensitivity assessment indicators and grading standards

指标 Indicators	分级 Classifications		生态敏感性 Ecological sensitivity	赋值 Value
人为干扰 Human disturbance	距建设用地距离	>1500m	极高	5
		800—1500m	高	4
		400—800m	中等	3
		0—400m	低	2
		建设用地	极低	1
	距主要道路距离	>1000m	极高	5
		600—1000m	高	4
		300—600m	中等	3
		0—300m	低	2
		道路	极低	1
水源保护 Water sources conservation	距面积≥10km ² 水体距离	水体	极高	5
		0—500m	高	4
		500—1000m	中等	3
		1000—1500m	低	2
		>1500m	极低	1
	距面积在 1—10km ² 水体距离	水体	极高	5
		0—300m	高	4
		300—600m	中等	3
		600—1000m	低	2
		>1000m	极低	1
景观基础 Landscape base	土地利用类型	水体、湿地、灌木林、林地	极高	5
		草地	高	4
		耕地	中等	3
		裸地	低	2
		建设用地	极低	1
地形 Topography	高程	>200m	极高	5
		100—200m	高	4
		50—100m	中等	3
		20—50m	低	2
		≤20m	极低	1
	坡度	>50°	极高	5
		25°—50°	高	4
		10°—25°	中等	3
		3°—10°	低	2
		0—3°	极低	1
	地形起伏度	>75m	极高	5
		45—75m	高	4
		25—45m	中等	3
		15—25m	低	2
		0—15m	极低	1
植被覆盖 Vegetation	归一化植被指数	>0.8	极高	5
		0.6—0.8	高	4
		0.3—0.6	中等	3
		0.1—0.3	低	2
		≤0.1	极低	1

2.3 综合阻力面构建

基于“潜力-连通度-韧性”三维框架评估生态风险适应能力^[32]。潜力维度考虑地形地貌、植被资源、自然灾害强度和人为干扰;连通度维度考虑景观异质性、破碎程度,以及城市扩张和道路建设的干扰;韧性维度考虑生态系统服务的长期变化趋势、基础设施建设、环境政策与应急管理能力。采用自然断点法将生态风险适应能力评估结果分为 5 类,从高到低依次赋值 1—5,作为阻力面。

2.4 生态廊道识别

基于 Linkage Mapper 2.0 比较不同物种迁移路径的成本,筛选最小累积阻力路径作为生态廊道。剔除长度小于 10km 的廊道,大于等于 40km 为重要廊道^[35]。

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (1)$$

式中, MCR 是生态源地到区域内某点的最小累积阻力值; $f_{\min}$ 是最小累积阻力与生态过程的正相关函数; D_{ij} 是从生态源地 j 到景观单元 i 的空间距离; R_i 是区域景观单元 i 对运动过程的阻力系数。

2.5 生态夹点和生态障碍点识别

基于 Circuitscape 和 Pinchpoint Mapper 识别生态夹点^[36],依据自然断点法将电流密度分为 5 级,电流密度最高的区域为生态夹点。基于 Barrier Mapper 识别生态障碍点,将结果依据自然断点法分为 10 级,提取最高值为生态障碍点。

3 结果

3.1 生态源地识别结果

基于 MSPA 识别的结构生态源地中(图 3),林地、草地、水域、湿地等前景区域面积较大,为大湾区的 63.12%。其中,核心区是结构生态源地的主体,在前景区域占比最大,为 37.03%,分布于西部和东北部。边缘区与孔隙区占比 20.80%,可缓冲非绿色区域和水体核心区的负面影响,占比较低意味着核心区稳定性欠佳,易受外界干扰。桥接区与环道区占比 29.36%,是斑块间能量、物质交换的关键通道,表明核心斑块原有连通性中等。孤岛斑块占比 4.22%,反映核心区破碎程度较低,整体连贯性和完整性较好。

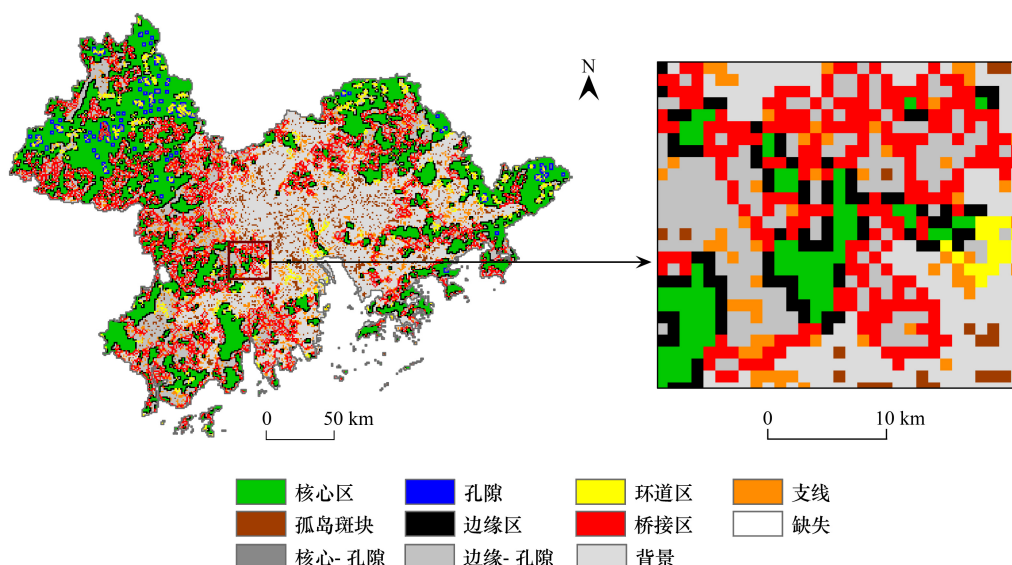


图 3 粤港澳大湾区形态学空间格局分析识别结果

Fig.3 The identification results in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA)

在识别功能生态源地时,大湾区的生态重要性和敏感性(图4)呈现显著空间分异。西部和东部山区,是两者的高值区;城市中心及东南沿海开发区域为低值区。从重要性看,东北、西南和南部沿海地区承担水源涵养功能,东北地区还承担土壤保持功能,西北部生境质量较好,外围山区整体固碳能力强。从敏感性看,外围山区植被茂密、坡度和地形起伏度大,生态系统脆弱,易导致土壤侵蚀和生物栖息地丧失,且监测和保护难度大,生态敏感性高。中部地区水体较多,承担生物栖息地和水域廊道连通功能,生态敏感性高。最终,将两者的高值区作为功能生态源地。

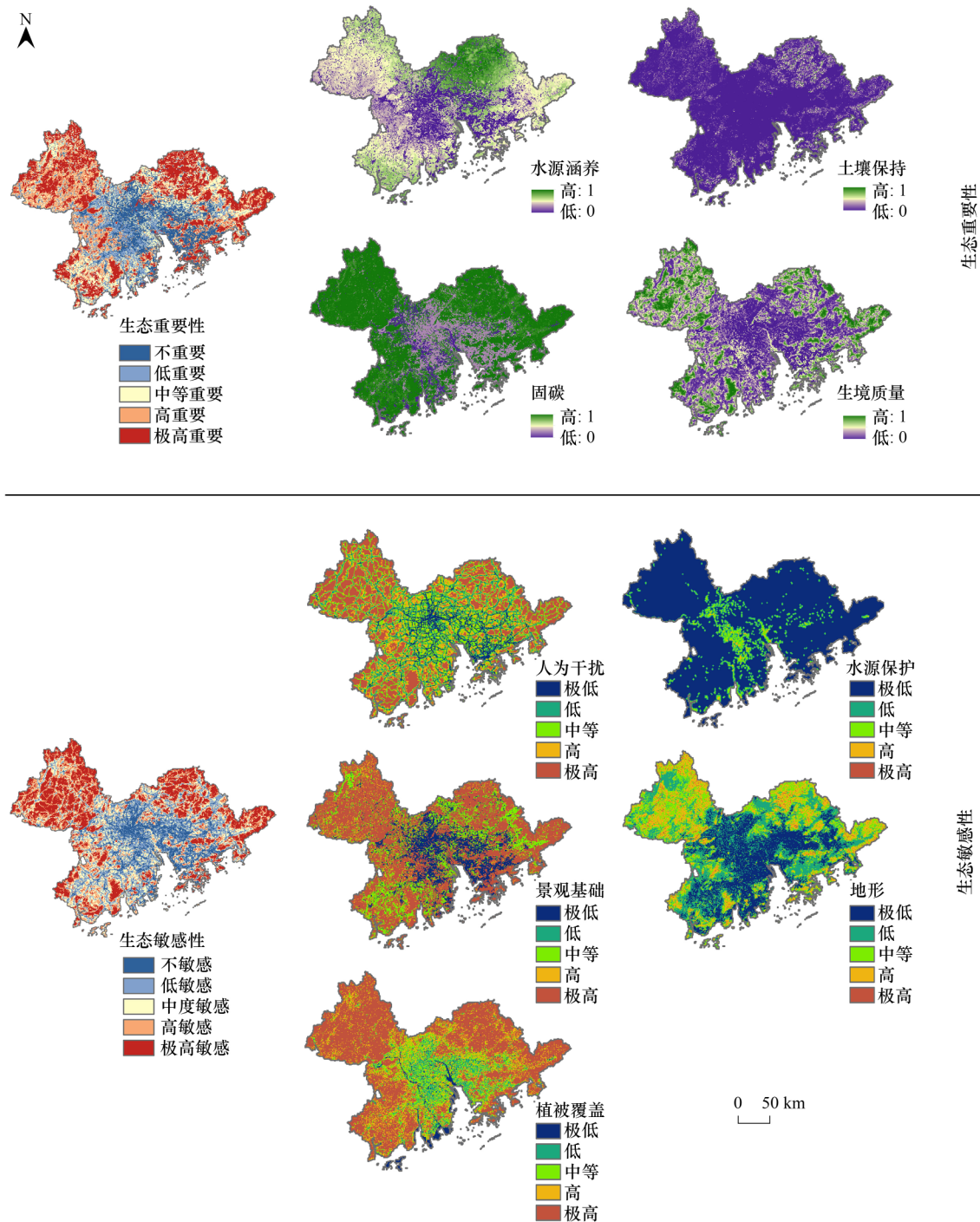


图4 粤港澳大湾区生态重要性和生态敏感性

Fig.4 The ecological importance and ecological sensitivity of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

将结构生态源地和功能生态源地结合,确定生态源地 396 个,总面积 22223km²,占大湾区总面积的 40.03%,分布在西部和东北部(图 5)。林地占比面积最大(82.58%),其次为耕地(4.80%)。最小斑块面积为 2km²,最大斑块面积为 8408km²,为分布在西北山区的林地斑块。

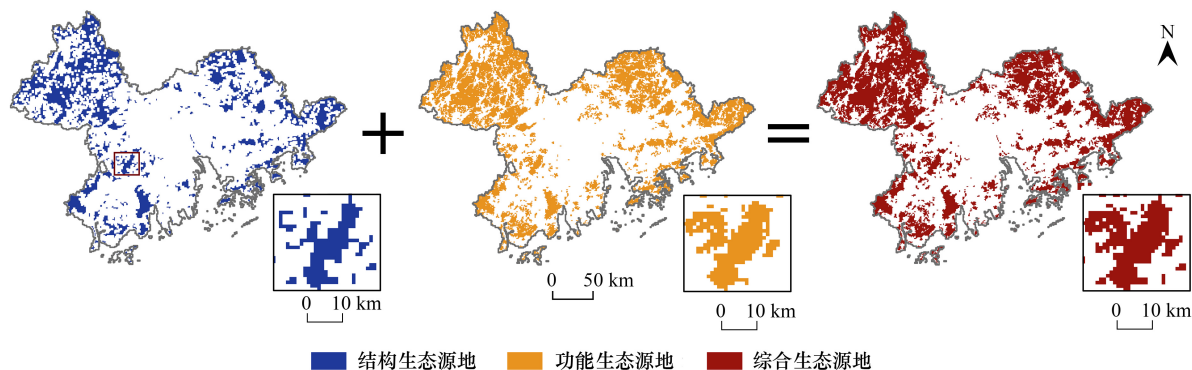


图 5 粤港澳大湾区整合结构与功能的综合生态源地结果

Fig.5 Results of integrated ecological source areas integrating structure and function in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

3.2 生态网络要素识别结果

大湾区阻力面呈现中心及东南建成区高、外围山区低的特征。基于生态源地和阻力面识别生态廊道、夹点和障碍点(图 6)。生态廊道共 227 条,由中心建成区向外辐射,将西部和东部串联起来。总长度 4034.61km,平均长度 17.77km。耕地占比面积最大(31.72%),其次为建设用地(23.79%)和林地(22.47%)。重要廊道 12 条,总长度 543.50km,分布于中部地区。

生态夹点共 24 个,分布在中部的河网和南部海岸带的中长距离廊道上。水体占比面积最大(33.33%),其次为林地(29.17%)。由于中部和南部廊道连接的源地相对孤立,两侧大多是耕地和建设用地,导致生态流

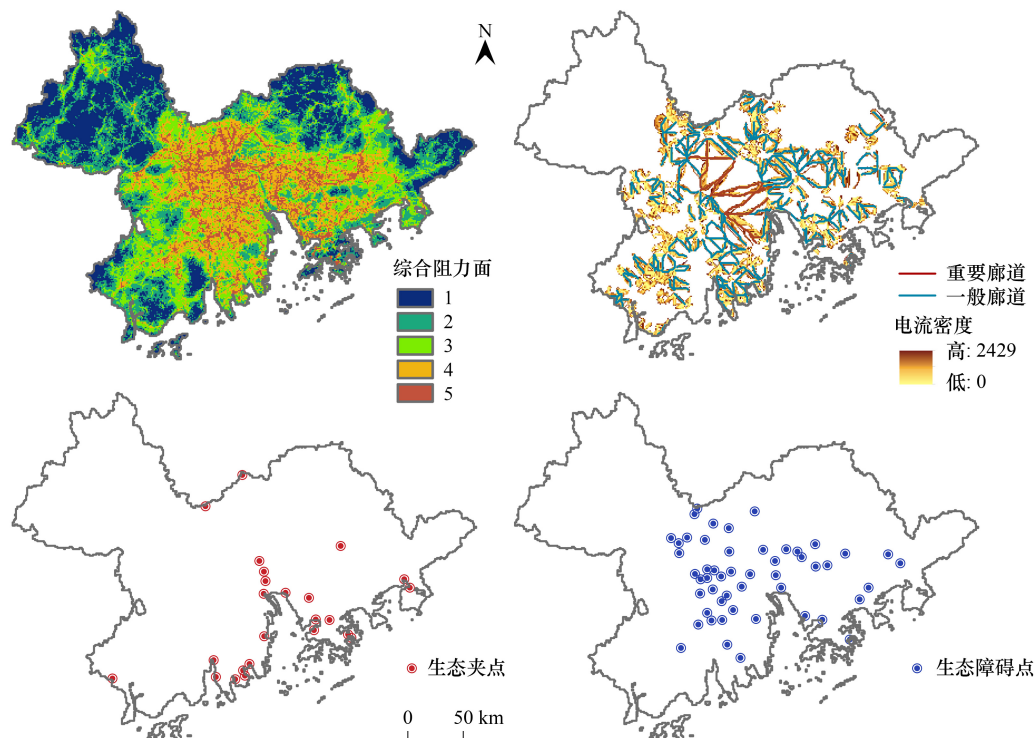


图 6 粤港澳大湾区生态网络要素的空间分布

Fig.6 The spatial distribution of ecological network elements in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

流动路径有限,廊道宽度窄,生态流密度高。

生态障碍点共 51 个,分布在中部的长距离廊道上。建设用地占比面积最大 (56.86%), 其次为水体 (19.61%)。由于中部建成区景观破碎、生态阻力较大,导致障碍点多分布在人类活动密集区域,需要在生态修复中高度关注。

3.3 基于适应性的生态安全格局构建

将上述图层叠加得到大湾区生态安全格局,呈现“北山南海三江水廊网”的格局特征(图 7)。“北山南海”包括北部山地生态屏障和南部海洋生态屏障。北部山地生态屏障以山地、水库、湖泊和湿地为主体,南部海洋生态屏障以河口、海湾、滨海湿地等为主体。“三江水廊网”由东江、西江、北江、贯穿中部人类活动密集区域的多条廊道以及港口等组成,有效连通两个屏障的生态产品流通以及生态功能耦合,形成具有高度适应性的生态网络。

4 讨论

4.1 大湾区生态安全格局的要素分布与生态功能

大湾区生态安全格局的组成要素分布广泛、分类多样且承载着不同的生态功能(表 3)。这些要素间的相互作用使生态安全格局具有高度适应性,“北山”和“南海”两个生态屏障通过中部的“三江水廊网”相互协同、支撑和关联(图 8)。

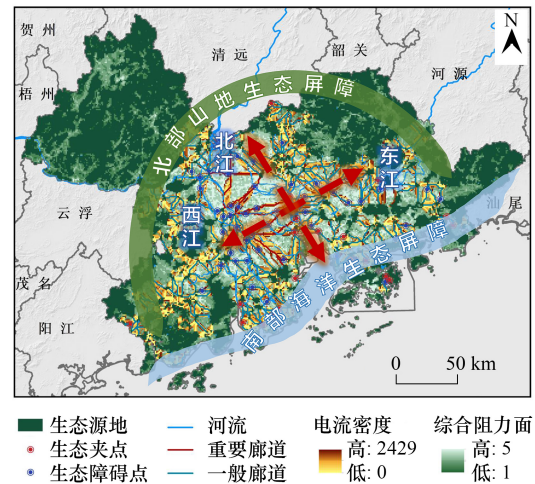


图 7 粤港澳大湾区基于生态适应性的生态安全格局

Fig.7 The ecological security pattern based on ecological adaptation in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

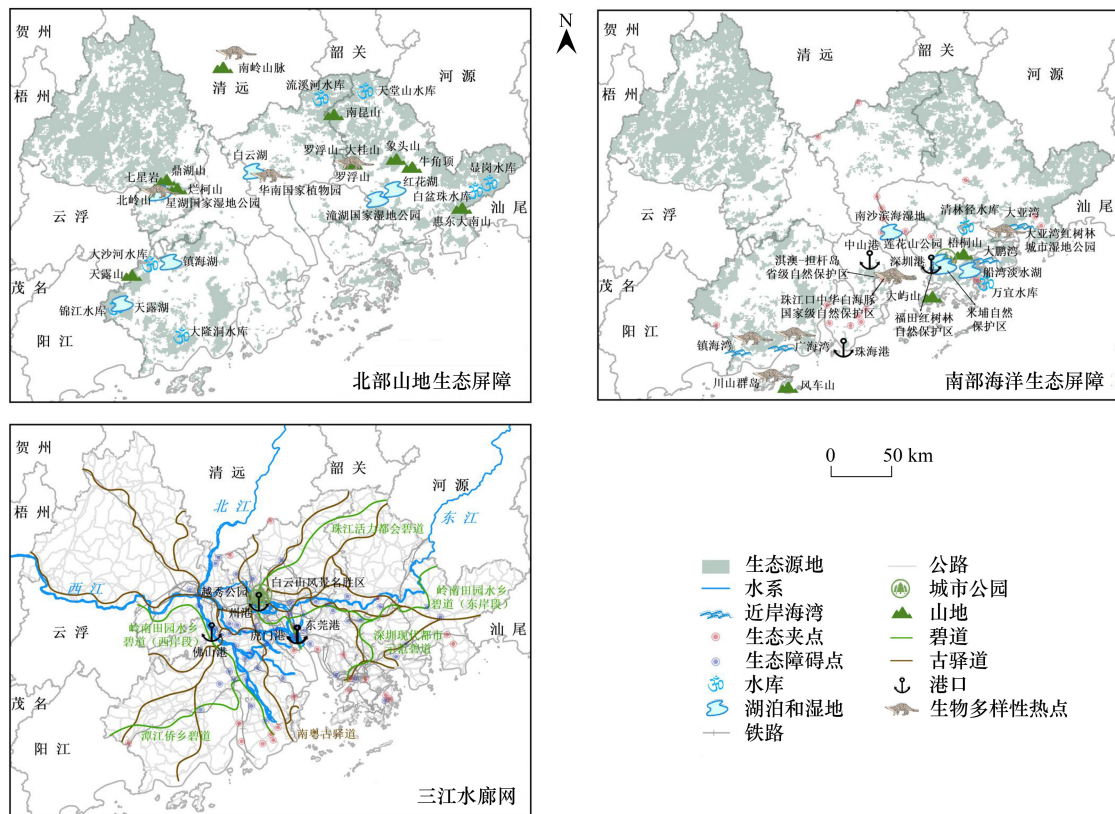


图 8 粤港澳大湾区生态安全格局的要素分布

Fig.8 Distribution of elements of the ecological security pattern in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

表 3 粤港澳大湾区生态安全格局的要素分类和生态功能

Table 3 Classification of elements and ecological functions of the ecological security pattern in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

生态安全格局	二级分类	类型	具体要素举例	生态功能
Ecological security pattern	Secondary classification	Type	Examples of specific elements	Ecological functions
北部山地生态屏障 The northern mountainous ecological barrier	西北地区的生态源地	山地	七星岩、北岭山、鼎湖山、烂柯山	水源涵养、水土保持、固碳释氧、气候调节
	东部的生态源地		南昆山、罗浮山、象头山、牛角顶、惠东大南山	
	西南地区的生态源地		天露山	
	大湾区外清远市南部的生态源地		南岭山脉	水源涵养、气候调节、农业生产保障
	东北和西南地区的生态源地	水库	流溪河水库、显岗水库、白盆珠水库、天堂山水库、大沙河水库、锦江水库、大隆洞水库	水源供给、防洪调蓄、区域水循环调节、水力发电、生态养殖与渔业发展
	东北和西南地区的生态源地	湖泊和湿地	镇海湖、天露湖、白云湖、红花湖、星湖国家湿地公园、潼湖国家湿地公园	水源涵养、防洪调蓄、气候调节、水质净化
	北部的生态源地	生物多样性热点	罗浮山-大桂山、华南国家植物园、星湖国家湿地公园	珍稀动植物栖息地，如穿山甲、小灵猫、黑脸琵鹭、广东含笑、南方红豆杉等
	大湾区外清远市南部的生态源地		南岭山脉	珍稀动植物栖息地，如华南虎、金斑喙凤蝶、广东含笑等
南部海洋生态屏障 The southern marine ecological barrier	沿海一带的生态源地	山地	梧桐山、大屿山、风车山	水源涵养、水土保持、固碳释氧、气候调节、灾害防护
	东南地区的生态源地	水库	清林径水库、万宜水库	水源供给、防洪调蓄、气候调节、海岸防护
		城市公园	莲花山公园	水源涵养、生物多样性维持、局部气候调节、干扰缓冲、休闲娱乐
	东南地区的生态源地	湖泊和湿地	船湾淡水湖、福田红树林自然保护区、米埔自然保护区	水源供给、防洪调蓄、气候调节、海岸防护、候鸟栖息地
	沿海一带的生态源地	近岸海湾	大鹏湾、大亚湾、镇海湾、广海湾	气候调节、海岸防护、生态养殖与渔业发展、候鸟栖息地
		生物多样性热点	珠江口中华白海豚国家级自然保护区、淇澳-担杆岛省级自然保护区、大亚湾红树林城市湿地公园、镇海湾、广海湾、川山群岛	珍稀动植物栖息地，如中华白海豚、穿山甲、猕猴、黑脸琵鹭、儒艮、大珠母贝等
		沿海一带的生态夹点	湖泊和湿地	南沙滨海湿地
	三江水廊网 Three rivers water corridor network	流经大湾区	港口	深圳港、珠海港、中山港
水系			东江	水源供给和跨流域调水，东深供水工程
西江			生态与经济协同，内河航道	
中部的生态廊道			北江	生态与经济协同，北江生态经济带
		绿道	珠三角绿道网，如海珠湿地周边绿道、东平河两岸绿道等	生态连通、生物多样性维持、局部气候调节、空气净化、休闲娱乐
		碧道	珠江活力都会碧道、深圳现代都市示范碧道、岭南田园水乡碧道、潭江侨乡碧道	生态连通、水生态修复与保护、海洋与河口生态保护、水源涵养、海岸防护、生物多样性维持、局部气候调节、休闲娱乐
		古驿道	南粤古驿道	生态连通、生物多样性维持、局部气候调节、休闲娱乐、传承生态文化
		城市公园	白云山风景名胜、越秀公园	水源涵养、生物多样性维持、局部气候调节、休闲娱乐
沿水系分布	交通沿线森林景观带	高速公路、铁路、国道等主要通道，如广深铁路、广佛肇城际铁路两侧的景观带	水源涵养、生物多样性维持、局部气候调节、减轻噪音与光污染影响、生态景观美感	
	港口	广州港、虎门港、东莞港、佛山港	生态连通、生态监测、生态与经济协同	
	中部和东南地区的生态夹点			
廊道上的生态障碍点	建筑物、工业、农田等	废弃工业用地、碎片化农田区域、自然沟壑等	阻碍生态流传递	

“北山”屏障植被覆盖丰富、地形优越,能有效截留降水、涵养水源。山上河流汇入“南海”屏障,构建起陆海完整的水循环网络。“南海”的湿地、红树林等生态系统净化海水,与“北山”的水源涵养功能共同保障大湾区的良好水质。山海之间通过河流、滨海湿地等生态廊道连通,为生物迁徙、扩散创造条件,维持生物多样性。

“北山”屏障可以阻挡强风、寒潮等自然灾害对城市建成区的侵袭,“南海”的红树林、珊瑚礁与沿海沙丘等能抵御海浪、风暴潮等海洋灾害对陆地的冲击。二者共同影响大湾区气候,抵御灾害,保障区域生态安全与人类聚居地的社会稳定。

4.2 与已有研究的对比及优势分析

本文基于生态适应性理论识别的生态安全格局能够从生态系统的结构、功能和动态变化维度反映城市化区域生态网络对生态风险的适应能力,与已有研究在生态源地规模、廊道连通效率、战略点数量等方面展现出一定的优势(表4)。

表4 粤港澳大湾区生态安全格局构建结果与多区域对比

Table 4 Comparison of ecological security patterns between Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and other regions

区域 Region		生态源地 总面积 Total area of ecological source areas/ km ²	生态源地 占比 Proportion of ecological source areas/%	生态廊道 数量 Number of ecological corridors	生态廊道 总长度 Total length of ecological corridors/km	生态廊道 密度 Ecological corridor density/ (km/km ²)	生态战略点 Number of ecological strategic points	参考文献 References
粤港澳大湾区 Guangdong-Hong Kong- Macao Greater Bay Area	本文	22223	40.03	227	4034.61	0.07	生态夹点 24, 生态障碍点 51	—
	已有研究	18800	33	780	6710.16	0.12	生态节点 892, 踏脚石 41	[37]
		20371	36.7	36	2300	0.04	—	[38]
京津冀城市群 Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration		29226.90	13.5	33	2391.78	0.01	—	[39]
长三角城市群 Yangtze River Delta Urban Agglomeration		64911	32.51	32	11188.85	0.03	—	[40]

廊道密度通常以单位面积内的廊道长度(km/km²)表示,计算方式为廊道总长度除以区域总面积,用于衡量区域内生态廊道的分布密集程度,反映生态网络的连通性和覆盖范围

本文识别的生态源地分布与相关研究^[37, 41]基本一致,城市化区域外围山区大面积的林地多为生态源地区域。面积占比显著高于大湾区已有研究,这可能是由于本文基于生态适应性理论,在识别生态源地时综合考虑了生态系统的潜力、连通度和韧性,将更多具有生态价值和适应功能的区域纳入生态源地范畴。例如,一些虽面积较小但生态功能关键、对生态风险缓冲和恢复能力强的区域也被识别为生态源地。与京津冀^[39]和长三角^[40]城市群相比,大湾区生态源地占比相对较高,与大湾区自身河网密集、植被生长条件优越的自然本底和生态用地破碎程度密切相关。

本文识别的生态廊道与已有研究存在一定差异^[38, 42]。已有方法仅识别外围环状廊道,易因城市扩张而断裂。本文通过更进一步考虑人为干扰对生态系统的影响,不仅识别出外围呈现环状分布的廊道,还识别到了部分贯穿中部城市建成区的长距离廊道,有效连接屏障和源地,以远程耦合的形态连通成为具有高度适应性的生态网络。由于长三角城市群地域更为广阔,其生态廊道在连接不同生态区域时需要更长的距离。因此,大湾区生态廊道数量较多,但总长度短于长三角。然而,大湾区较高的生态廊道密度使其在连接城市建成区与外围生态源地方面具有独特优势,能够有效缓解城市发展对生态系统的压力,促进城市与自然的融合。

本文识别出的生态战略点与已有研究^[37]在数量和类型上存在显著差异。本文基于生态适应性理论,从生态系统功能、生态网络连通性和对生态风险的响应角度识别生态夹点和障碍点,更注重其在生态过程中的实际作用。而生态节点和踏脚石更侧重于景观连通性和物种迁移辅助功能,定义和识别方法与本文有所不同。目前关于生态战略点对比的研究较少,未来研究可进一步深入探讨不同方法下生态战略点识别的差异及

其对生态安全格局的影响。

整体来看,传统方法多聚焦于生态要素的静态识别(如源地-廊道-阻力面),难以应对快速城市化与气候变化带来的不确定性风险。本文基于生态适应性理论提出的“潜力-连通度-韧性”框架通过动态评估生态网络的多功能性、连通性及恢复能力,在阻力面维度引入生态系统服务的长期变化数据和综合人为干扰数据,通过多维度阻力面的构建达到实时监测系统变化并调整保护策略的目标,显著提升生态系统的适应性。研究结果基本可以覆盖已有研究识别的生态安全格局范围,并在此基础上提升了建成区廊道的识别精度。因此,本文提出的框架和方法体系能够更好地表征生态系统的演替过程,提升生态系统应对风险的适应能力,为生态安全格局提供保障。

4.3 与相关规划和生态空间管控政策的对比

《广东省国土空间生态修复规划(2021—2035年)^[43]》提出构建“三屏五江多廊道”的生态安全格局,大湾区识别结果与其中“两屏”“三江”基本一致。与《广东省“三线一单”生态环境分区管控方案^[31]》对比,本文识别的生态源地有54.32%位于优先保护单元内(图9),表明现行政策对核心生态区域的有效覆盖。然而,西北山地与东北森林存在未重叠区域,表明在未来规划修编中,需将适应性视角引入管控方案修订,考虑生态系统资源禀赋与长期韧性,更多地纳入植被良好、利于人类福祉的山区和森林。对于这些生态源地集中且超出优先保护单元范围的区域,例如高韧性源地(西北地区的北岭山、鼎湖山和东北地区的南昆山、罗浮山)等,增列为新增建议保护区,制定更具针对性的管控措施,如限制开发强度、增加生态修复投入等,以更好地发挥这些区域的生态功能,为大湾区生态安全提供更有力的保障。

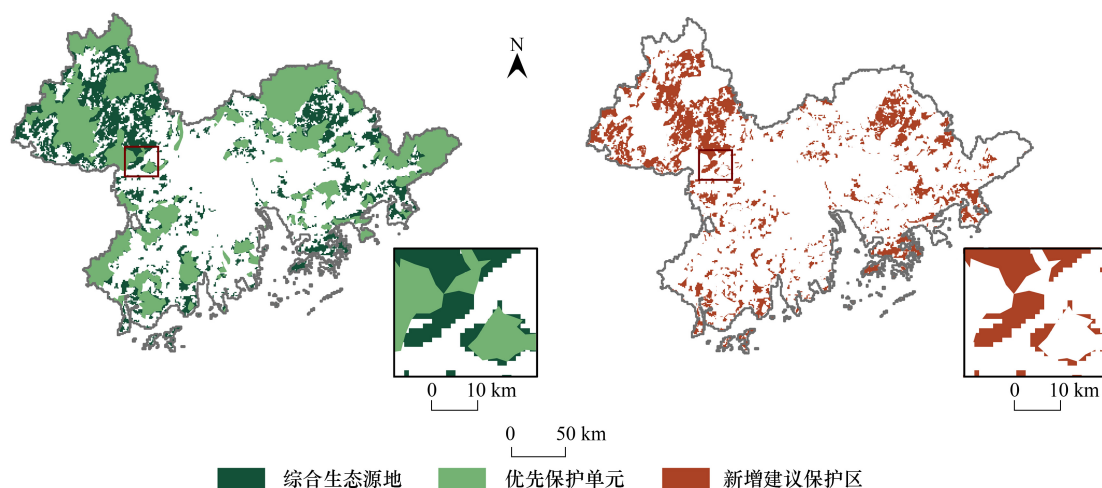


图9 粤港澳大湾区综合生态源地与优先保护单元的对比及新增建议保护区

Fig.9 Comparison between the integrated ecological source areas and priority protection units in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and newly proposed protected areas

4.4 局限性和未来展望

本文仍存在一定局限性。在战略点的识别中对踏脚石的考虑较为粗略,未考虑分散式小型生态斑块在辅助物种迁移过程中的潜在作用,可能低估生态系统之间实际存在的连接可能性。未来可以通过详细的实地调查结合遥感等技术手段对方法体系进行修正,识别区域内潜在的踏脚石区域,更精细地构建生态网络。此外,未来还应对生态安全格局的适应性进行评估,进一步从生态源地的修复、廊道的连通、战略点的功能等方面支持格局优化、生态修复和政策调整。

5 结论

气候变化和人类活动的加剧使城市化区域面临高度不确定且复杂的生态风险。本文基于生态适应理论

中的“潜力-连通度-韧性”框架构建粤港澳大湾区生态安全格局,提升生态系统应对风险的适应能力。结果显示,大湾区生态源地 396 个,总面积 22223km²,集中在西部和东北部。生态廊道 227 条,由中心建成区向外辐射。生态夹点 24 个,分布于中部河网和南部海岸带廊道。生态障碍点共 51 个,分布于中部长距离廊道。构建“北山南海三江水廊网”的生态安全格局,加强北部山地生态屏障与南部海洋生态屏障的生态涵养作用,以及东江、西江、北江和贯穿中部人类活动密集区域的多条廊道、港口等的生态连通功能。通过引入对生态系统适应性的综合考量,提出更具适应性的生态安全格局识别体系,明确了保障生态安全的具体途径和目标,为生态保护、空间规划和政策调整提供理论和方法支撑。

参考文献 (References):

- [1] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Horion S, Wang K L, De Keersmaecker W, Tian F, Schurgers G, Xiao X M, Luo Y Q, Chen C, Myneni R, Shi Z, Chen H S, Fensholt R. Increased vegetation growth and carbon stock in China Karst *via* ecological engineering. *Nature Sustainability*, 2018, 1: 44-50.
- [2] 彭建, 李冰, 董建权, 刘焱序, 吕丹娜, 杜悦悦, 罗明, 吴健生. 论国土空间生态修复基本逻辑. *中国土地科学*, 2020, 34(5): 18-26.
- [3] Liu S W, Yu H, Yu Y H, Huang J, Zhou Z Y, Zeng J X, Chen P B, Xiao F S, He Z L, Yan Q Y. Ecological stability of microbial communities in Lake Donghu regulated by keystone taxa. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108695.
- [4] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. *地理研究*, 2017, 36(3): 407-419.
- [5] Zhang L Q, Peng J, Liu Y X, Wu J S. Coupling ecosystem services supply and human ecological demand to identify landscape ecological security pattern: a case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Urban Ecosystems*, 2017, 20(3): 701-714.
- [6] Jiang H, Peng J, Dong J Q, Zhang Z M, Xu Z H, Meersmans J. Linking ecological background and demand to identify ecological security patterns across the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in China. *Landscape Ecology*, 2021, 36(7): 2135-2150.
- [7] Bishop-Taylor R, Tulbure M G, Broich M. Surface water network structure, landscape resistance to movement and flooding vital for maintaining ecological connectivity across Australia's largest river basin. *Landscape Ecology*, 2015, 30(10): 2045-2065.
- [8] Branco P, Segurado P, Santos J M, Ferreira M T. Prioritizing barrier removal to improve functional connectivity of rivers. *Journal of Applied Ecology*, 2014, 51(5): 1197-1206.
- [9] Brennan A, Naidoo R, Greenstreet L, Mehrabi Z, Ramankutty N, Kremen C. Functional connectivity of the world's protected areas. *Science*, 2022, 376(6597): 1101-1104.
- [10] Strassburg B B N, Iribarrem A, Beyer H L, Cordeiro C L, Crouzeilles R, Jakovac C C, Braga Junqueira A, Lacerda E, Latawiec A E, Balmford A, Brooks T M, Butchart S H M, Chazdon R L, Erb K H, Brancalion P, Buchanan G, Cooper D, Díaz S, Donald P F, Kapos V, Leclère D, Miles L, Obersteiner M, Plutzer C, de M Scaramuzza C A, Scarano F R, Visconti P. Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature*, 2020, 586(7831): 724-729.
- [11] Banks-Leite C, Pardini R, Tambosi L R, Pearse W D, Bueno A A, Bruscagin R T, Condez T H, Dixo M, Igari A T, Martensen A C, Metzger J P. Using ecological thresholds to evaluate the costs and benefits of set-asides in a biodiversity hotspot. *Science*, 2014, 345(6200): 1041-1045.
- [12] Liu M L, Peng J, Dong J Q, Jiang H, Xu D M, Meersmans J. Trade-offs of landscape connectivity between regional and interregional ecological security patterns in a junction area of Beijing-Tianjin-Hebei region. *Applied Geography*, 2024, 167: 103272.
- [13] Albert C H, Rayfield B, Dumitru M, Gonzalez A. Applying network theory to prioritize multispecies habitat networks that are robust to climate and land-use change. *Conservation Biology*, 2017, 31(6): 1383-1396.
- [14] Tang H, Peng J, Jiang H, Lin Y F, Xu D M. Trade-off between comprehensive and specific ecosystem characteristics conservation in ecological security pattern construction. *Global Ecology and Conservation*, 2024, 49: e02776.
- [15] Xu D M, Peng J, Dong J Q, Jiang H, Liu M L, Luo Y H, Xu Z H. Expanding China's protected areas network to enhance resilience of climate connectivity. *Science Bulletin*, 2024, 69(14): 2273-2280.
- [16] Kasperson J X, Kasperson R E, Turner B L, Hsieh W, Schiller A. Vulnerability to global environmental change//*The Social Contours of Risk*. London: Routledge, 2022: 245-285.
- [17] Paries J, Wreathall J. Resilience Engineering in Practice: A Guidebook. Boca Raton: CRC Press, 2017
- [18] 王欣妍, 王辰星, 詹云军, 丁丁, 严岩. 基于全过程和适应性视角下的城市生态风险管理研究进展. *生态学报*, 2024, 44(22): 10512-10523.
- [19] 刘芳锐, 张正栋, 王欣怡, 毛源远, 董剑彬, 黄楚珩, 刘钰坤. 粤港澳大湾区生态系统健康时空变化及其对城镇化的响应. *生态学报*, 2023, 43(7): 2594-2604.

- [20] 全国地理信息资源目录服务系统. 全国 1:100 万公众版地形数据. 2021.
- [21] 地理空间数据云. ASTER GDEM. 2009.
- [22] GlobeLand30. GlobeLand30. 2020.
- [23] 国家生态科学数据中心. 1990—2008 中国水体分布数据集. 2021.
- [24] Fischer G, Nachtergaele F, Prieler S, van Velthuisen H T, Verelst L, Wiberg D. Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008). 2008.
- [25] Ross C W, Prihodko L, Anchang J, Kumar S, Ji W J, Hanan N P. HYSOGs250m, global gridded hydrologic soil groups for curve-number-based runoff modeling. *Scientific Data*, 2018, 5(1): 180091.
- [26] 董金玮, 周岩, 尤南山. 2000—2022 年中国 30 米年最大 NDVI 数据集. 国家生态科学数据中心. 2021.
- [27] 时空三极环境大数据平台. 中国 1km 逐月潜在蒸散发数据集(1990—2021). 2017.
- [28] Qu L S, Zhu Q A, Zhu C F, Zhang J. Monthly precipitation data set with 1 km resolution in China from 1960 to 2020. 2022.
- [29] 广东省河长办. 广东万里碧道总体规划(2020—2035 年). 广东:2020.
- [30] 广东省城乡规划设计研究院南粤古驿道(文化线路)研究中心课题组. 古驿道研究中心成果展示(31)基于跨地区线性文化空间视角的粤港澳大湾区文化遗产游径研究(下). 南粤驿道网. 2019.
- [31] 广东省人民政府. 广东省“三线一单”生态环境分区分管方案. 2020.
- [32] 王欣妍, 王辰星, 张英男, 严岩. 基于“潜力-连通度-韧性”的粤港澳大湾区城市群生态风险适应能力评估与提升策略. *生态学报*, 2025, 45(7): 10.5846/stxb202408011813.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Bai H N, Weng L F. Ecological security pattern construction and zoning along the China-Laos Railway based on the potential-connectedness-resilience framework. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109773.
- [36] Li H H, Ma T H, Wang K, Tan M, Liang J F. Construction of Ecological Security Pattern in Northern Peixian Based on MCR and SPCA. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(8): 1036-1045.
- [37] 唐正宇, 冯舒, 俞露, 汤沫熙, 夏丽, 崔丽娜. 城市群国土空间生态修复区域诊断——以粤港澳大湾区为例. *热带地理*, 2023, 43(3): 429-442.
- [38] 韦家怡, 李钺, 吴志峰, 张莉, 吉冬青, 程炯. 粤港澳大湾区生态安全格局及重要生态廊道识别. *生态环境学报*, 2022, 31(4): 652-662.
- [39] 刘双嘉, 张贵军, 张蓬涛, 杜贺秋. 基于生态系统服务的京津冀地区生态安全格局构建研究. *林业与生态科学*, 2021, 36(2): 144-153.
- [40] 张豆, 渠丽萍, 张桀漓. 基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化——以长三角地区为例. *生态学报*, 2019, 39(20): 7525-7537.
- [41] 姜虹, 张子墨, 徐子涵, 丹宇卓, 叶玉瑶, 李家志, 彭建. 整合多重生态保护目标的广东省生态安全格局构建. *生态学报*, 2022, 42(5): 1981-1992.
- [42] 赵玲玲, 夏军, 杨芳, 杨龙, 徐飞. 粤港澳大湾区水生态修复及展望. *生态学报*, 2021, 41(12): 5054-5065.
- [43] 广东省自然资源厅. 广东省国土空间生态修复规划(2021—2035 年). 广东:2023.