

DOI: 10.5846/stxb202011072848

王秀明,赵鹏,龙颖贤,宋巍巍,刘谕承.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.

Wang X M, Zhao P, Long Y X, Song W W, Liu X C. Identification of key areas of land space ecological protection and restoration based on the pattern of ecological security in Guangdong, Hong Kong and Macau. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 450-461.

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

王秀明^{1,2}, 赵 鹏^{1,2}, 龙颖贤^{1,2}, 宋巍巍^{1,2}, 刘谕承^{1,2,*}

1 生态环境部华南环境科学研究所, 广州 510655

2 国家环境保护城市生态环境模拟与保护重点实验室, 广州 510655

摘要:区域和景观尺度的生态保护修复应以保障生态安全、促进生态过程实现为目标。将生态安全格局构建、生态连通性修复方法引入国土空间生态修复识别领域,以粤港澳大湾区外延范围——粤港澳地区为研究区,基于生态系统服务重要性和敏感性评价、最小阻力模型、电路理论模型,识别了生态源地、生态廊道及障碍点、生态夹点、生态敏感区,提供了一种中尺度的国土空间生态保护修复重点区域识别研究案例。结果表明:(1)研究区生态源地总面积 5.27 万 km²,潜在生态廊道 138 条,共同构成了环绕粤港澳大湾区的环形生态屏障,但局部区域仍存在一定的保护空缺。(2)研究区生态障碍点、生态夹点面积分别为 442.7、9.1 km²,对其进行针对性修复可显著改善生态连通性。(3)研究区生态敏感区共 4302.48 km²,青云山、九连山、起微山等重要生态源地内存在部分生态退化区域,对其进行修复可防范生态风险、提升生态功能。未来应通过空间规划途径对重要源地和生态廊道加强保护监管,对生态节点、生态敏感区、生态退化区进行分区分类修复。研究结果可为未来粤港澳地区生态保护修复工作提供科学参考。

关键词:生态安全格局;生态修复;生态廊道;生态障碍点;生态夹点;粤港澳大湾区

Identification of key areas of land space ecological protection and restoration based on the pattern of ecological security in Guangdong, Hong Kong and Macau

WANG Xiuming^{1,2}, ZHAO Peng^{1,2}, LONG Yingxian^{1,2}, SONG Weiwei^{1,2}, LIU Xucheng^{1,2,*}

1 South China Institute of Environmental Sciences, the Ministry of Environmental Ecology, Guangdong Guangzhou 510655, China

2 National Key Laboratory of Urban Ecological Environment Simulation and Protection, Guangzhou 510655, China

Abstract: Ecological restoration in regional and landscape scale should aim to improve ecological connectivity and promote the realization of ecological processes. This paper introduces the ecological security pattern and the restoration of ecological connectivity into the field of ecological restoration identification. Taking the extended area of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, the Guangdong-Hong Kong-Macao region as the research area, based on the evaluation of the importance of ecological functions and ecological sensitivity, the minimum cumulative resistance model (MCR) and circuit theory model, the ecological source, ecological corridors, barriers, and ecological pinch points are identified, providing a meso-scale research case on the identification of key areas of land and space ecological restoration. The results indicate (1) The total area of ecological sources in the study area is 52700 km², which are mainly distributed in the main mountain ranges of northern, western and eastern Guangdong, and the central and eastern mountains of the Hong Kong Special Administrative Region, Lantau Island and Hong Kong Island. The ecological sources and ecological corridors together form a

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(PM-zx703-202104-061)

收稿日期: 2020-11-07; 网络出版日期: 2021-09-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuxucheng@scies.org

circular ecological barrier surrounding the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, but there are still protection vacancies in some areas. (2) The areas of ecological barriers and ecological pinch points in the study area are 442.7 and 9.1 km² respectively. The targeted restoration of them can significantly improve ecological connectivity. (3) The ecological sensitive areas is 4302.48 km². There are some ecological degraded areas in important ecological sources such as Qingyun Mountain, Jiulian Mountain and Qiwei Mountain. Restoration of these areas can prevent ecological risks and improve ecological functions. In the future, ecological protection and restoration should strengthen the protection and supervision of important sources and ecological corridors through spatial planning, and carry out zoning and classification restoration of ecological nodes, ecological sensitive areas, and ecological degraded areas. The research results can provide a scientific reference for future ecological protection and restoration work in Guangdong, Hong Kong and Macao.

Key Words: ecological security pattern; ecological restoration; ecological corridors; ecological barriers; ecological pinches; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

快速城镇化过程中,城市无序扩张和土地不合理开发利用,导致了生境破碎、生态功能下降、生态系统退化等诸多生态问题。20 世纪 70 年代以来,我国在生态退化严重地区部署了一系列生态修复工程,如 1979 年的“三北”防护林工程、1997 年开始的黄河上中游水土流失区重点防治工程、2002 年开始的京津风沙源治理工程^[1],生态系统恶化趋势基本得到遏制^[2]。党的十八大以来,随着“山水林田湖草生态保护修复试点”、“编制国土空间生态保护修复规划”、“实施全国重要生态系统保护和修复重大工程”等相关重要决策部署相继出台,生态保护修复工作得到高度重视,并成为当前的研究热点。

当前生态修复研究主要聚焦于污染场地、河流湿地、矿山等单要素、小尺度层面^[3],未体现山水林田湖草统筹治理的系统整体观^[4]。部分研究基于生态系统退化诊断、生态系统服务供需、压力-状态-响应等理论,构建指标体系,提出修复分区^[5-7]或评价修复优先级方法^[8-9],其根本是将生态受损区域恢复、生态功能提升作为修复目标,而未充分考虑生态过程实现的目标。值得注意的是,生态保护修复目标在个体、群落、生态系统、景观及区域等不同尺度上存在差异^[10],大中尺度生态修复研究应充分考虑生态系统完整性和连通性,对制约生态过程实现的关键区域进行修复^[11-13]。以格局和过程耦合为核心理论的景观生态学为新时期国土空间一体化生态修复提供了实现途径^[14-15]。

生态连通性修复最早源于生物栖息地保护和生物迁移廊道研究。20 世纪 90 年代以来,随着图论、地理信息系统的发展,生态连通性通过景观指数得以量化评价,并发展出多种工具对生物廊道进行空间模拟^[16]。相比于对大范围的生态廊道进行保护,有针对性的修复影响生物运动的障碍区可以以最小的面积达到最大的生态修复效果^[17],实现“最优生态修复”。2012 年,MaRce 等提出了障碍区、生态夹点等生物栖息地连通性修复识别方法^[17-18],此后广泛应用于野生动物廊道设计、景观基因流、运动生态学、疾病传播等。2019 年,苏冲^[19]、方莹^[20]、倪庆琳^[21]等将生态安全格局构建、生态连通性修复识别方法引入国土空间生态修复领域,分别开展了四川华蓥山区、烟台市、徐州贾汪区生态修复重点区域识别,为国土空间生态保护修复规划和管理提供了一种新的方法。目前该方法应用于国土空间生态修复识别研究仍较少,且研究区范围整体较小。

粤港澳大湾区是国家建设世界级城市群和参与全球竞争的重要空间载体,由于长期、快速的城镇化建设,大湾区生态空间被不断挤占,生态格局完整性和连通性受到一定影响,生态安全面临威胁^[22]。目前有部分学者开展了大湾区生态安全格局研究^[23-25],研究范围多局限于大湾区行政边界,且仅关注生态源地和廊道等生态保护区域。按照整体保护、系统修复的原则,有必要从全区域、大尺度层面,科学识别大湾区生态保护修复重点区域。本文以大湾区外延范围——粤港澳地区作为研究区,探索一种大中尺度下基于生态安全格局开展生态保护修复区域识别的研究案例,并结合国土空间生态保护修复相关政策,提出了生态保护修复的对策建议,以期为大湾区生态保护和修复提供借鉴和参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

粤港澳地区包括广东省及香港、澳门特别行政区,陆域面积 18.08 万 km²。地势总体北高南低,具有山地、丘陵、台地、平原多种地貌类型,见图 1。气候为热带和亚热带季风气候,年平均日照时数自北向南为 1750—2200 h。年平均降水量 1789.3 mm,自西北向东南为 1580—2290 mm。年均气温 21.8℃。地带性植被包括北热带季雨林、南亚热带季风常绿阔叶林、中亚热带典型常绿阔叶林和沿海的热带红树林。

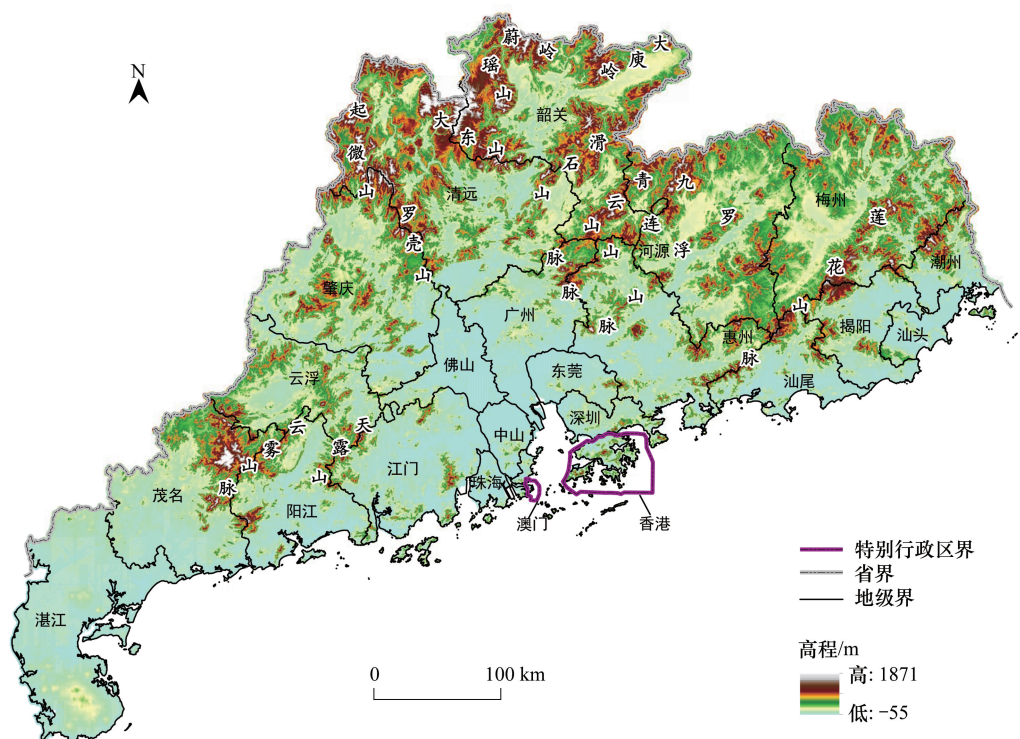


图 1 研究区地形及行政区划图

Fig.1 Topographic and administrative division map of the study area

1.2 数据来源

本文涉及数据包括:(1)土地利用分类数据:2020 年土地利用数据来源于中科院资源环境科学数据中心,将研究区划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 个一级类,及 22 个二级类,空间分辨率为 100 m;(2)多年累计年均降雨量数据:来源于中科院资源环境科学数据中心;(3)多年降雨侵蚀力栅格数据:来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>);(4)多年潜在蒸散量栅格数据:来源于美国国家航空航天局(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) MOD16A2 数据,经过 MRT 格式转换、投影转换和重采样统一为 100 m 分辨率;(5)多年植被净初级生产力栅格数据,来自美国国家航天局 mod17A3 数据。(6)土壤质地数据:来源于寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)中国土壤数据集;(7)高程数据:来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。(8)自然保护区数据:广东省自然保护区(省级及以上)来自广东省生态环境厅,香港特别行政区郊野公园、自然保育区、具有特殊科学价值区域来自《香港生物多样性策略及行动计划 2016—2021》,澳门特别行政区生态保护区数据通过地图矢量化。(9)交通道路网矢量数据:来自生态环境部卫星环境应用中心。

2 研究方法

按照生态源地-阻力面构建-生态廊道-生态节点的研究范式,通过生态系统服务重要性分析识别生态源地;基于地表覆盖、地形、人类干扰构建综合阻力面,采用最小累积阻力模型、电路理论模型,识别生态廊道及生态障碍点、生态夹点;根据生态敏感性分析,识别生态敏感区。综合识别结果,以生态源地、生态廊道为生态保护重点区域,以生态障碍点、生态夹点、生态敏感区为生态修复重点区域(图2)。

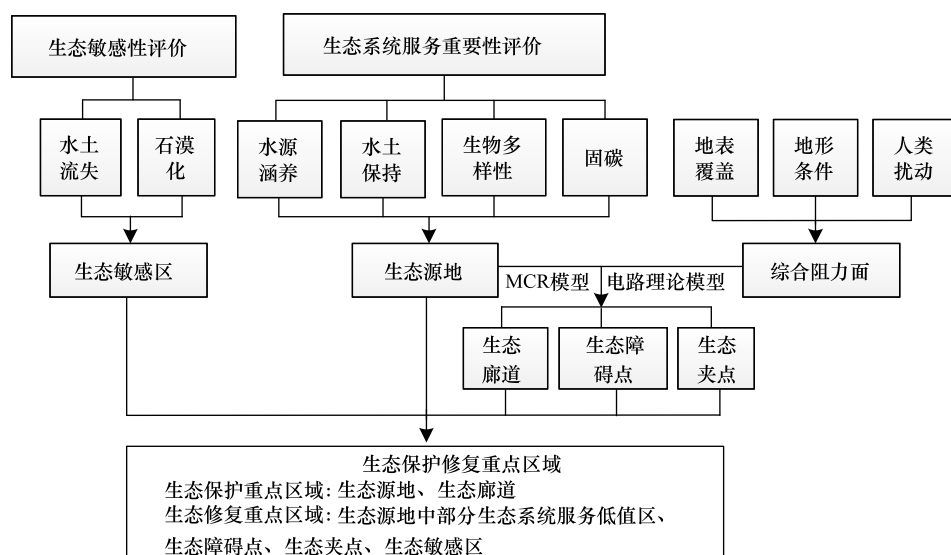


图2 技术路线图

Fig.2 Technology Roadmap

2.1 生态源地识别

生态源地是指维护区域生态安全和可持续发展必须加以保护的区域,是物种扩散、生态功能流动与传递的源点^[26]。本文通过开展生态系统服务重要性评价识别生态源地。

水源涵养服务重要性:利用水量平衡法计算研究区水源涵养服务重要性,以降水量扣除蒸散量、地表径流量的值表示水源涵养量,计算过程及参数取值详见参考文献^[27—28]。

水土保持服务重要性:利用 InVEST 模型水土保持模块计算研究区水源涵养服务重要性,详见参考文献^[28—29]。

生物多样性保持服务重要性:现有研究多利用 InVEST 模型生境质量模块计算生物多样性功能重要性,其结果仅与土地利用类型高度相关,未能完全反映生物多样性实际分布情况^[28]。本文以广东省自然保护区(省级以上)及香港、澳门特别行政区郊野公园、自然保育区、具有特殊科学价值区域等区域为基础,考虑到陆域与水域生态过程阻力因素不同、难以共用同一阻力面,因此仅筛选其中以保护陆生生物为主的区域作为生物多样性保护重要区。

碳储存服务重要性:部分研究采用 InVEST 模型中碳储存模块,仅基于用地类型评价生态系统固碳功能,而未考虑温度、降水、光照条件及人类扰动等因素,不能充分反映碳储存空间异质性。本文利用研究区多年植被净初级生产力(NPP)平均值评价碳储存服务。

2.2 生态廊道模拟

(1) 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最小阻力值,可判断各景观单元到生态源地的可达性和连通性^[26]。本文以土地利用类型为基础,并基于夜间灯光数据、距

建设用地距离修正阻力面,修正的阻力值为:

$$R'_i = R_i \times \frac{NL_i}{(NL_{\max} - NL_{\min})} \times S_i \times D_i$$

式中, R'_i 是修正后的阻力值, R_i 是 i 栅格所属土地利用类型的阻力值,按照二级类对林地阻力值赋值为 2—20,草地赋值为 10—30,水域赋值为 120—200,耕地为 80,建设用地为 150—250,未利用地 180; NL_i 是 i 栅格夜间灯光指数, NL_{\max} 、 NL_{\min} 是研究区夜间灯光指数的最大值和最小值; S_i 是 i 栅格坡度对应的阻力系数,按照坡度由小到大赋值为 1.0—1.8; D_i 是 i 栅格距离建设距离的阻力系数,按照距离由小到大将距离建设用地 1 km 范围内的区域赋值为 2—1.3。

(2) 生态廊道模拟

生态廊道是保障生态源地之间能量和物质流动的通道,是保障生态过程、生态功能实现的关键生态用地^[30]。目前生态廊道构建方法主要包括最小累积阻力模型(MCR)、电路理论模型。最小累积阻力模型认为物种迁移距离与穿越的景观阻力值的乘积即为迁移“成本”,累积成本最低的通道即为最优通道^[31]。电路理论模型用电子在电路中随机流动的特性来模拟物种在景观中的迁移扩散过程^[18],电流反映了游走者到达目标栖息地之前通过相应节点或路径的净迁移概率^[32],因而电路理论识别的生态廊道是多个生物通过可能性较大的片区,而非唯一的一条阻力最小通道。

由于本研究区较大,电路理论模型运算所需时间过长,本文利用基于最小累积阻力模型的 Linkage Mapper 模拟生态廊道,其运算步骤包括:(1)计算源地间欧氏距离或加权成本距离(Cost-weighted Distance, CWD)以识别生态源地邻近斑块;(2)根据邻近生态源地创建源地网络,以确定在哪些源地斑块间生成最小成本路径(Least Cost Path, LCP);(3)逐个源地计算加权成本距离和最小成本路径^[33]。

2.3 生态修复重点区域识别

(1) 生态障碍点

生态障碍点是指阻碍生物扩散移动的景观,移除这些区域会显著增加生态连通性^[34]。本文利用 Linkage Mapper 工具箱中的 Barrier Mapper 识别生态障碍点。该工具通过设定一定半径的移动搜索窗口,逐栅格计算生态廊道上各点清除后(将其阻力值设定为 1)到达该廊道连接的两个生态源地间的最小成本距离(Least cost distance, LCD'),并计算其相比原始最小成本距离的减少量^[17,35]。一般通过计算 LCD' 与初始值的改进得分作为识别障碍点的定量指标。障碍点清除后最小成本距离的计算公式为^[17,35]:

$$LCD' = CWD1_{\min} + CWD2_{\min} + (L \times R')$$

式中, LCD' 是障碍移除后通过焦点栅格最佳路径的最小成本距离, $CWD1_{\min}$ 和 $CWD2_{\min}$ 分别是搜索窗口到源地 1 和源地 2 的最小累积阻力值, L 是搜索窗口的最长轴长度, R' 是替代障碍物的特征阻力值,设定为 1。

(2) 生态夹点

生态夹点是廊道中电流密度较大的区域,代表了影响整个景观连接度的“瓶颈”地区,对维持整个网络的连接性非常重要^[32]。夹点的形成往往是由于周边地区的阻力值较大,廊道在夹点地区被压缩在了相对狭窄的范围内^[19]。本文利用 Linkage Mapper 工具箱中的 Pinchpoint Mapper 识别生态夹点,该工具通过调用电路理论模型 Circuitscape 计算斑块间电流密度,电流密度较大的区域生物迁移概率大但受周围干扰大,因而需对周边区域进行修复。

利用 Circuitscape 工具成对模式两两计算源地间电流密度,计算时将其中一个生态源地任意地连接到一个 1A 的电源,而其他源地将被接地(设定为物种在该源地停留,不再继续扩散),电阻将迭代地对所有成对源地进行计算,计算后生成电流密度叠加图^[36—37]。

(3) 生态敏感区

生态敏感区是指对外界干扰和环境变化具有特殊敏感性或潜在自然灾害影响的区域,因而需进行严格保护和修复。陆地生态敏感性主要包括水土流失敏感性、土地沙化敏感性、石漠化敏感性,考虑到广东省气候湿

润、冬春季无沙尘天气现象,土地沙化敏感性较低,因而本文参考《生态保护红线划定技术指南》^[27] 分析了研究区水土流失、石漠化敏感性,并将敏感性处于前 20% 的区域作为生态敏感区。

3 结果分析

3.1 生态系统服务重要性

生态系统服务重要性空间分布见图 3。研究区水源涵养量多年平均值为 $633.28 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,高值区主要位于广东省清远-广州北部-惠州-河源南部-汕尾一带,及阳江、江门地区,香港特别行政区本岛中部、西北部及南部山地、大屿山及香港岛,整体与研究区降水量空间分布基本一致。低值区位于珠三角城市群及各城市建成区、农用地集中区域。

研究区水土保持多年平均值为 $5166.15 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其空间分布与研究区地形基本一致,高值区主要分布在粤北、粤东、粤西主要山脉,及香港特别行政区中部山地及香港岛、大屿山。低值区集中分布在珠三角城市群核心区域,及湛江全域、茂名南部等地。

研究区以保护陆生生物为主的自然保护地面积共 74 个,总面积 6286.10 hm^2 ,占研究区总面积的 0.035%,在粤北韶关、清远、河源、梅州及香港特别行政区分布较多。其中香港特别行政区各类保护地面积 537.71 hm^2 ,占陆域面积的 0.48%。澳门特别行政区各类保护地面积 4.59 hm^2 。

研究区多年平均植被净初级生产力为 $851.71 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,高值区主要分布在粤北、粤东及香港特别行政区中部山地,低值区集中分布在珠三角城市群核心区,及粤东城市建成区。

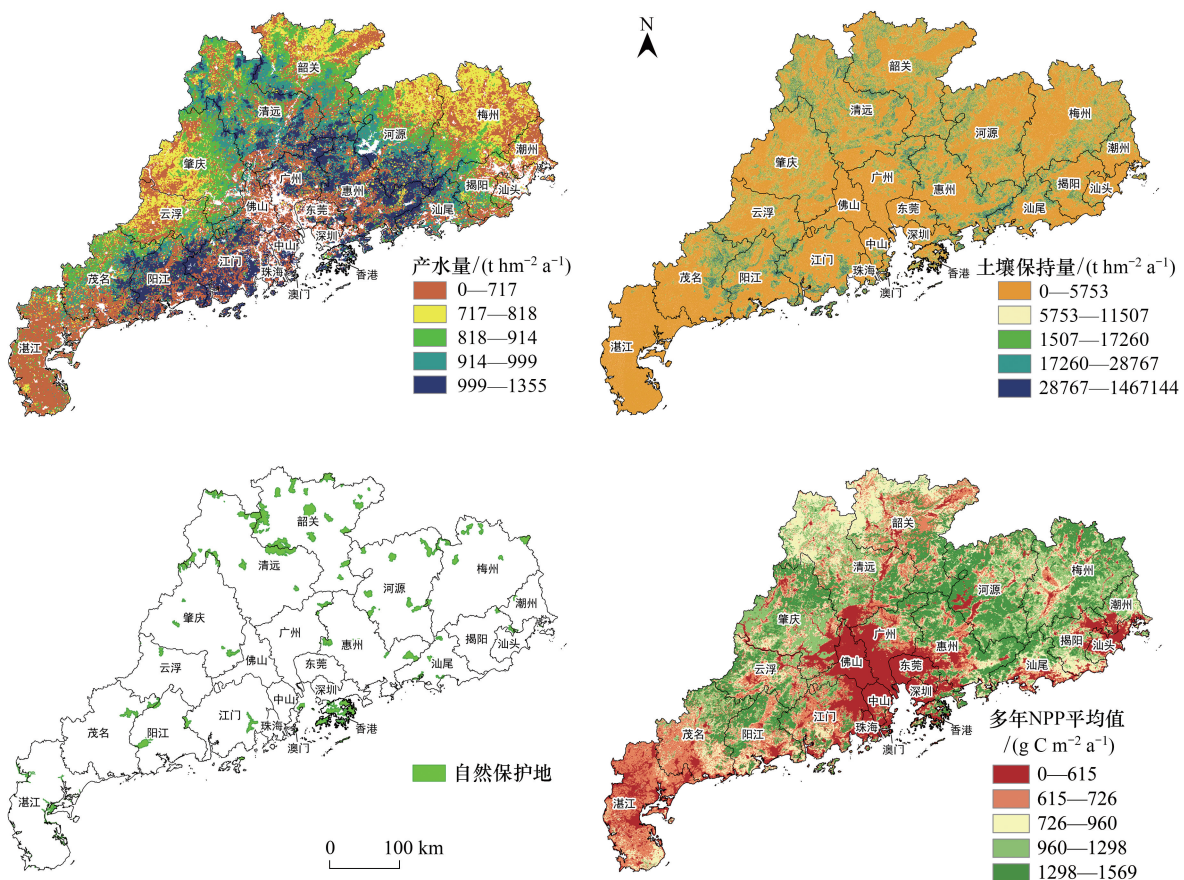


图3 研究区生态系统服务重要性空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the importance of ecosystem services in the study area

3.2 生态保护重点区域

3.2.1 生态源地

将水源涵养、水土保持、碳储存功能重要性前 20% 的区域进行空间融合,得到生态功能重要斑块 954 个,面积范围为 0.01—11522.6 km²。为便于下一步廊道模拟,需对碎小斑块进行处理,参考吴茂全等研究^[38],根据斑块面积阈值与其累计面积占比及斑块数量关系(图 4),选择 100 km² 以上的斑块时,其累计面积占比达到 80% 以上,能够代表生态源地的整体格局。在此基础上叠加生物多样性维持重要区(自然保护地),得到生态源地共 83 个斑块,总面积 52740.65 km²,占研究区总面积的 29.2%,主要分布在粤北青云山、九连山、起微山、罗浮山,粤东莲花山,粤西云雾山、天露山(图 5),及香港特别行政区中部、东部山地及大屿山、香港岛,澳门特别行政区路环岛山地区域。

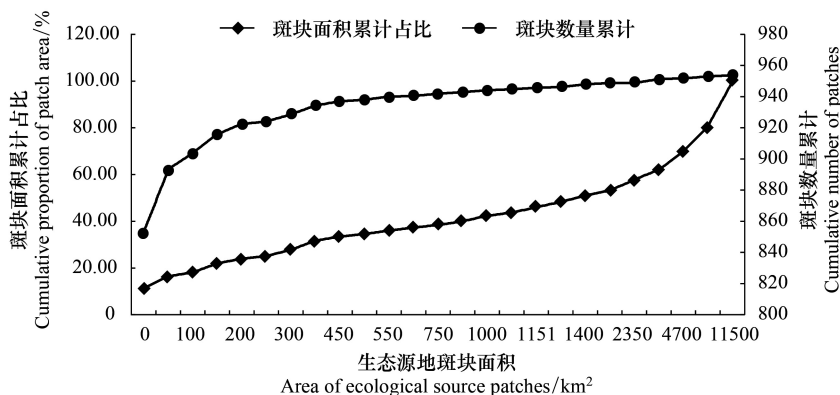


图 4 生态源地斑块面积分布区间

Fig.4 Distribution range of area of ecological source patches

3.2.2 生态廊道

利用 Linkage mapper 识别得到研究区潜在生态廊道共 138 条,总长度 2750.0 km。按照自然断点法将廊道阻力值进行分类(图 5),得到阻力较小的廊道 84 条,主要分布在韶关、河源、梅州、惠州等地,其景观类型以林地、草地为主,该类廊道阻力小,对源地连接起重要作用,未来需要重点保护。阻力较大的廊道主要分布在肇庆、云浮、佛山、江门、阳江,主要是由于建设用地、耕地阻隔导致生物迁移的物理距离过长或由于林地等低阻力区破碎化,廊道多次穿越耕地等阻力较大区。阻力极大的廊道 12 条,主要分布在珠海、中山市,主要是由于该区域景观基质为耕地,且水网交织,该类廊道连接生态源地、促进生态过程实现的作用较弱。香港特别行政区陆域三个源地斑块间生态廊道阻力均较小,且通过西北部船湾-八仙岭源地斑块与深圳市南部梧桐山源地斑块保持较好的连通。香港特别行政区 3 个位于海岛的源地斑块、澳门特别行政区源地斑块及江门市的上下川岛、汕头市的南澳岛均由于海域阻隔而成为生态“孤岛”。整体来说,生态源地与生态廊道共同构成了“两屏多核、两横四纵”的生态安全格局(图 5)。

3.3 生态修复重点区域

3.3.1 生态障碍点

通过设定不同的移动搜索窗口半径,Linkage Mapper 工具可探测不同大小的障碍点。小半径可搜索高速公路等狭窄障碍点,大半径可搜索耕地等障碍点或两个平行的狭窄障碍点^[32]。本文采用 100、500、1000、2000 m 四种搜索半径,将整个移动搜索窗口内改进得分的百分比按照自然断点法分为三个区间,最高的区间作为障碍点。

比较不同搜索半径下障碍点识别结果的差异发现,500 m 半径识别结果与 1000、2000 m 基本一致,说明研究区大部分障碍点不超过 500 m,同时 100 m 半径识别障碍点一般位于 500 m 半径识别障碍点的核心区域,由于因而综合 100、500 m 半径识别结果,并将生态廊道与交通道路图层叠加识别道路障碍点(由于本文土

<http://www.ecologica.cn>

3.3.2 生态夹点

利用 Pinchpoint Mapper 计算得到廊道上各点的电流密度见图 7。按照自然断点法将电流密度分为五个等级,电流密度最高的区域即为夹点。可见,研究区生态夹点主要分布在清远、云浮、江门、珠海、河源、梅州等地,总面积 9.13 km^2 ,夹点周边高阻力景观包括耕地、灌木林、其他林地及河流、建设用地。夹点形成的主要原因是该区域生物通过的概率大,但其周边一定范围内分布着阻力较高的耕地等景观,因而被压缩在较窄的区域内。

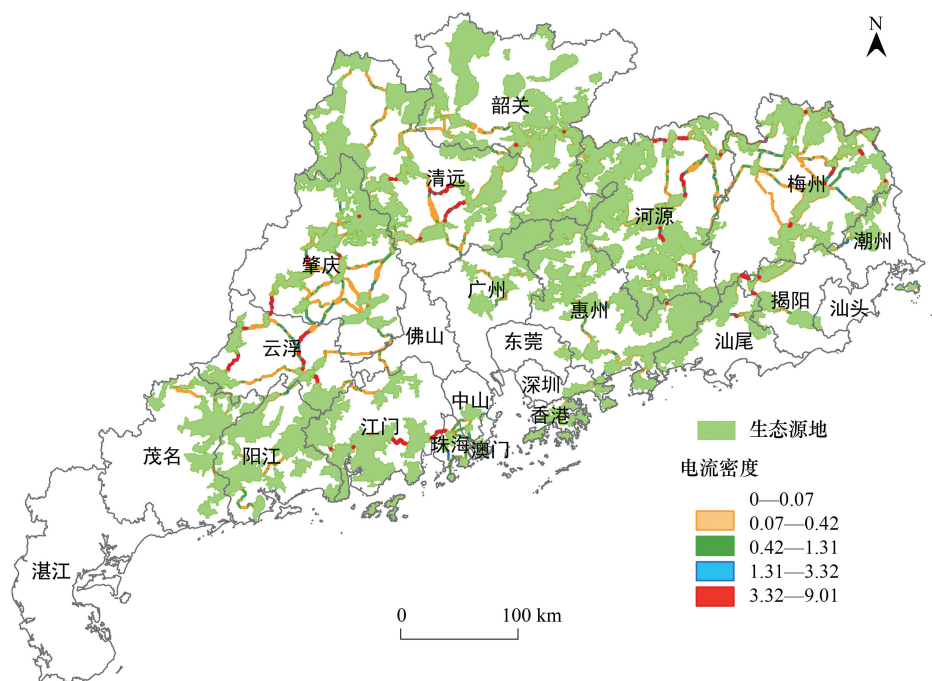


图 7 研究区生态廊道电流密度及生态夹点空间分布图

Fig.7 Spatial distribution of current density of ecological corridor and pinch points in the study area

3.3.3 生态敏感区

研究区水土流失敏感区总面积 3906.13 km^2 ,主要分布在韶关、清远、梅州、河源、云浮、茂名等地的山地区域,香港特别行政区大屿山也有一定分布;石漠化敏感区与研究区碳酸岩分布一致,主要分布在清远、韶关、云浮、阳江等地,总面积 679.48 km^2 。将水土流失和石漠化敏感区融合后得到生态敏感区总面积 4302.48 km^2 (图 8),其土地利用类型主要是耕地、植被覆盖度较低的林地、草地。

4 讨论与建议

4.1 同类研究对比

(1) 同类研究对比与不足

整体而言,本文生态系统服务重要性及生态源地、生态廊道、生态障碍点识别结果与相关研究^[23-25,39]基本一致,差异主要包括:①源地识别方面,本研究识别出的肇庆、茂名、湛江市源地范围较其它研究小,而江门市较大。主要原因一是部分研究将生态敏感性、生态连通性作为源地识别依据^[23],本文认为源地是生态过程实现的源点,将敏感区作为生态源地易掩饰其应实施生态修复的特征,将生态连通性作为生态源地识别的依据,则默认了连通性较差的区域没有改善连通性的可能,因而本文源地识别中仅考虑了生态系统服务重要性。二是重要性评价方法和分级方式不同。②生态廊道识别方面,因源地识别结果、研究范围等方面的不同,肇庆、茂名、湛江及梅州等地识别结果与其他研究存在差异。未来研究应充分考虑研究区自然地理边界及外围

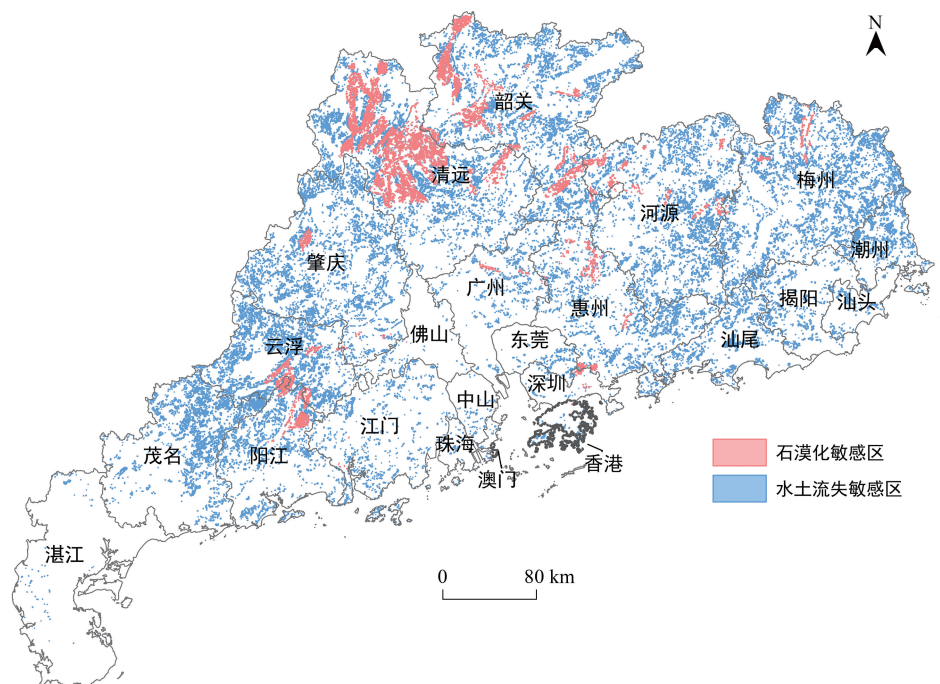


图8 研究区生态敏感区空间分布图

Fig.8 Spatial distribution of ecologically sensitive areas in the study area

地区的景观连通性;受计算能力所限,本研究仅在生态夹点识别中应用了电路理论模型,未来研究以电路理论模型识别生态廊道,并在此基础上识别障碍点、生态夹点更为合理。③生态修复重点区域识别方面,生态障碍点识别结果与吴健生等^[40]整体一致,存在差异主要由于源地识别结果及搜索半径不同,且本文补充识别了生态夹点、生态敏感区作为重点修复区域。

(2) 与相关规划和生态空间管控政策对比

《广东省主体功能区划》和《珠江三角洲地区生态安全体系一体化规划(2014—2020年)》对广东省和珠三角地区分别提出构建“两屏、一带、一网”和“一屏一带两廊多核”生态安全格局,本研究结果与上述规划基本一致。经与广东省生态保护红线划定结果(2018年报原环境保护部版)对比,本研究识别的生态源地范围在湛江、肇庆等地较红线小,原因是未考虑水域湿地地区,并删除了小面积源地斑块;在粤北起微山、罗壳山、滑石山脉及河源、惠州中部的罗浮山等区域较红线范围大,说明该区域存在一定的保护空缺。在香港特别行政区,本研究识别的生态源地90.6%位于各类保护地内,说明其重要生态空间基本得到严格保护。

4.2 生态保护修复对策建议

(1) 加强监管,保障生态安全

结合国家及地方“十四五”规划编制,通过调整红线、增设或整合自然保护地等方式,扩大起微山、罗壳山、滑石山、罗浮山等重要生态源地保护范围,加强重要源地空间管控。衔接国土空间规划、“三线一单”等工作,将重要生态廊道纳入生态控制区、一般生态空间,严格控制城镇发展区域范围,防止建设用地无序扩张。结合“绿盾”行动、中央环保督察等工作,加强生态保护红线、自然保护地监管,保障生态安全。

(2) 分区修复,确定优先次序

研究区存在诸多历史遗留问题,生态修复工作难以全面实施,因此有必要明确重点修复区域及其修复优先次序。生态修复优先区域的确定,不同研究存在差别,如综合考虑生物多样性变化、气候变化减缓和修复成本等多准则优化的最优区域^[41],生态保护与经济发展明显冲突的区域^[42],生态屏障区和生态退化区域^[2,43]。考虑到实施的可行性,建议对接现有生态空间管控、生物多样性保护等法规要求,将生态保护红线、自然保护

地、重点生态功能区等各类法定保护列为优先修复区域;位于国土空间规划划定的生态控制区、“三线一单”划定的一般生态空间中的珍稀濒危保护物种集中分布区、自然保护区、红树林、重要湿地等,宜作为次优级区域。其他区域的生态障碍点、生态夹点、生态敏感区等,应列入远期规划,逐步推进生态修复。

(3) 分类实施,明确修复重点

一是对青云山、九连山、起微山、莲花山等部分重要生态源地内的低质量林地草地及耕地,未来应以自然恢复为主,实施封育保护、退耕还林还草,减少人类扰动,保护珍稀濒危特有物种及其栖息地。二是对重要生态障碍点和生态夹点,修复应以人工干预为主,林地障碍点可通过林分改造、抚育提高自然度和多样性;水域可建设护岸林带和碧道体系,降低景观阻力;耕地宜开展退耕还林还草,营造适宜生境;城镇应强化公园等绿地系统的保护与建设,通过线性空间串联成网^[44],提高生态系统连续性;道路则应加强防护林带建设与保护,预留野生动物通道。三是对水土流失和石漠化生态敏感区,需科学推进水土流失综合治理,实施植树造林、陡坡地退耕还林、坡耕地梯田改造等植被、工程和耕作措施,防范自然灾害风险。

4.3 结论

本文基于生态系统服务重要性、敏感性评价识别了研究区生态源地和生态敏感区,并利用最小累积阻力模型、电路理论模型模拟了研究区生态廊道、生态障碍点、生态夹点等,识别了粤港澳地区生态保护修复的整体格局。结果表明:(1)研究区生态保护重点区域包括生态源地 5.27 万 km²、潜在生态廊道 138 条,其中生态源地主要分布在粤北青云山、九连山、起微山、罗浮山山脉,粤东莲花山山脉,粤西云雾山、天露山山脉等,及香港特别行政区中部、东部山地及大屿山、香港岛。(2)研究区生态修复重点区域包括生态障碍点 442.71 km²、生态夹点 9.13 km²、生态敏感区 4302.48 km²,及青云山、九连山、起微山等重要生态源地内部分生态退化区域。(3)未来生态保护修复应通过空间规划途径对重要源地和生态廊道加强保护监管,对生态节点、生态敏感区、生态退化区进行分区分类修复。

参考文献 (References):

- [1] 高世昌. 国土空间生态修复的理论与方法. 中国土地, 2018, (12): 40-43.
- [2] 中华人民共和国自然资源部.《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》印发. (2020-06-12). http://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202006/t20200612_2525856.html.
- [3] 曹宇, 王嘉怡, 李国煜. 国土空间生态修复: 概念思辨与理论认知. 中国土地科学, 2019, 33(7): 1-10.
- [4] 彭建, 吕丹娜, 张甜, 刘前媛, 林坚. 山水林田湖草生态保护修复的系统性认知. 生态学报, 2019, 39(23): 8755-8762.
- [5] 朱振肖, 王夏晖, 饶胜, 张箫, 李翠华, 李春红, 李迪华, 牟雪洁. 国土空间生态保护修复分区方法研究——以承德市为例. 环境生态学, 2020, 2(2): 1-7.
- [6] 谢余初, 张素欣, 林冰, 赵银军, 胡宝清. 基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区. 自然资源学报, 2020, 35(1): 217-229.
- [7] 田美荣, 高吉喜, 宋国宝, 邹长新, 郑好. 基于主导生态功能与生态退化程度的生态修复分区研究. 生态与农村环境学报, 2017, 33(1): 7-14.
- [8] 陈新闯, 李小倩, 吕一河, 刘红晓, 郭建英. 区域尺度生态修复空间辨识研究进展. 生态学报, 2019, 39(23): 8717-8724.
- [9] 叶艳妹, 陈莎, 边微, 高世昌, 丁庆龙, 郝朋. 基于恢复生态学的泰山地区“山水林田湖草”生态修复研究. 生态学报, 2019, 39(12): 8878-8885.
- [10] 杨兆平, 高吉喜, 杨孟, 姚森. 区域生态恢复规划及其关键问题. 生态学报, 2016, 36(17): 5298-5306.
- [11] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. 生态学报, 1999, 19(1): 8-15.
- [12] 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.
- [13] 李果. 区域生态修复的空间规划方法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [14] 彭建, 吕丹娜, 董建权, 刘焱序, 刘前媛, 李冰. 过程耦合与空间集成: 国土空间生态修复的景观生态学认知. 自然资源学报, 2020, 35(1): 3-13.
- [15] 吴健生, 王仰麟, 张小飞, 彭建, 刘焱序. 景观生态学在国土空间治理中的应用. 自然资源学报, 2020, 35(1): 14-25.
- [16] Adriaenssens F, Chardon J P, De Blust G, Swinnen E, Villalba S, Gulinc H, Matthysen E. The application of ‘least-cost’ modelling as a functional landscape model. Landscape and Urban Planning, 2003, 64(4): 233-247.
- [17] McRae B H, Hall S A, Beier P, Theobald D M. Where to restore ecological connectivity? detecting barriers and quantifying restoration benefits. PLoS One, 2012, 7(12): e52604.
- [18] McRae B H, Dickson B G, Keitt T H, Shah V B. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. Ecology, 2008, 89(10): 2712-2724.

- [19] 苏冲,董建权,马志刚,乔娜,彭建. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护修复优先区识别——以四川省华蓥山区为例. 生态学报, 2019, 39(23): 8948-8956.
- [20] 方莹,王静,黄隆杨,翟天林. 基于生态安全格局的国土空间生态保护修复关键区域诊断与识别——以烟台市为例. 自然资源学报, 2020, 35(1): 190-203.
- [21] 倪庆琳,侯湖平,丁忠义,李艺博,李金融. 基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区——以徐州市贾汪区为例. 自然资源学报, 2020, 35(1): 204-216.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 丁宇,张雷,曾祥坤. 粤港澳大湾区生态功能网络构建及对策. 生态与农村环境学报, 2019, 35(5): 573-581.
- [25] 周汝波,林媚珍,吴卓,刘汉仪,钟亮. 基于生态系统服务重要性的粤港澳大湾区生态安全格局构建. 生态经济, 2020, 36(7): 189-196.
- [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] 环境保护部. 关于印发《生态保护红线划定技术指南》的通知. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201505/t20150518_301834.htm.
- [28] 王秀明,刘谓承,龙颖贤,张音波,梁炜,洪曼,余晓东. 基于改进的 InVEST 模型的韶关市生态系统服务功能时空变化特征及影响因素. 水土保持研究, 2020, 27(5): 381-388.
- [29] Sharp R, Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, Wood S A, Chapin-Kramer R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C, Verutes G, Kim C K, Guannel G, Papenfus M, Toft J, Marsik M, Bernhardt J, Griffin R, Gowinski K, Chaumont N, Perelman A, Lacayo M, Mandle L, Hamel P, Vogl A L, Rogers L, Bierbower W. InVEST 3.2.0 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, 2015. <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>.
- [30] 苏泳娴,张虹鸥,陈修治,黄光庆,叶玉瑶,吴旗韬,黄宁生,匡耀求. 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案. 生态学报, 2013, 33(5): 1524-1534.
- [31] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. Landscape and Urban Planning, 1992, 23(1): 1-16.
- [32] 宋利利,秦明周. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3344-3352.
- [33] McRae, B.H. and D.M. Kavanagh. 2011. Linkage Mapper Connectivity Analysis Software. The Nature Conservancy, Seattle WA. Available at: <http://www.circuitscape.org/linkagemapper>.
- [34] McRae B H, Beier P. Circuit theory predicts gene flow in plant and animal populations. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(50): 19885-19890.
- [35] McRae B H. 2012. Barrier mapper connectivity analysis software. the nature conservancy, Seattle WA. Available at: <http://www.circuitscape.org/linkagemapper>.
- [36] McRae B H. 2012. Pinchpoint mapper connectivity analysis software. The nature conservancy, Seattle WA. Available at: <http://www.circuitscape.org/linkagemapper>.
- [37] McRae B H, Shah V B. Circuitscape user guide. ONLINE. The University of California, Santa Barbara. Available at: <http://www.circuitscape.org>.
- [38] 吴茂全,胡蒙蒙,汪涛,凡宸,夏北成. 基于生态安全格局与多尺度景观连通性的城市生态源地识别. 生态学报, 2019, 39(13): 4720-4731.
- [39] 王世豪,黄麟,徐新良,徐淑琬. 粤港澳大湾区生态系统服务时空演化及其权衡与协同特征. 生态学报, 2020, 40(23): 8403-8416.
- [40] 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.
- [41] Strassburg B B N, Iribarrem A, Beyer H L, Cordeiro C L, Crouzeilles R, Jakovac C C, Junqueira A B, 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.
- [42] 刘世梁,董玉红,孙永秀,史芳宁. 基于生态系统服务提升的山水林田湖草优先区分析——以贵州省为例. 生态学报, 2019, 39(23): 8957-8965.
- [43] 自然资源部办公厅,财政部办公厅,生态环境部办公厅. 关于印发《山水林田湖草生态保护修复工程指南(试行)》的通知. (2020-09-10). <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20200910/1103391.shtml>.
- [44] 宫清华,张虹鸥,叶玉瑶,袁少雄. 人地系统耦合框架下国土空间生态修复规划策略——以粤港澳大湾区为例. 地理研究, 2020, 39(9): 2176-2188.