

DOI: 10.5846/stxb202005241316

付凤杰, 刘珍环, 刘海. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以贺州市为例. 生态学报, 2021, 41(9): 3406-3414.

Fu F J, Liu Z H, Liu H. Identifying key areas of ecosystem restoration for territorial space based on ecological security pattern: A case study in Hezhou City. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3406-3414.

基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别 ——以贺州市为例

付凤杰¹, 刘珍环^{2,*}, 刘 海¹

¹ 广东国地规划科技股份有限公司, 广州 510650

² 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275

摘要: 国土空间生态修复是落实生态文明建设战略的重要举措。科学识别国土空间生态修复关键区域, 合理布局全域生态修复空间是当前国土空间规划面临的难点之一。以广西壮族自治区贺州市为例, 从生态保护重要性、景观连通性、生态功能重要区域和自然保护区四个方面识别生态源地, 运用电路理论提取生态廊道, 构建生态安全格局。通过电流密度诊断生态廊道中的生态“夹点”和生态障碍点, 判定生态廊道宽度, 识别国土空间生态保护修复关键区域, 制定生态修复的空间布局策略。研究结果表明: (1) 市域生态源地面积 3656.89 km², 呈“东西重, 中部轻”的空间分布特征; 生态廊道总长度 639.50 km, 以中部分布为主, 关键生态廊道 133.96 km。 (2) 市域生态“夹点”共 16 处, 面积 124.24 km², 主要分布在钟山县, 亟待保护修复的生态“夹点”8 处, 面积 45.02 km², 零散分布于市域; 生态障碍点共 32 处, 面积 426.56 km², 主要分布在市域东部和南部, 需优先保护修复的生态障碍点 6 处, 面积 166.05 km², 集中在平桂区。通过综合分析国土生态修复关键区域土地利用现状和空间分布特征, 制定了分级分类的生态修复措施, 以期进一步优化生态安全格局, 为国土空间生态修复区域识别和国土空间生态修复规划编制提供参考。

关键词: 国土空间生态修复; 生态安全格局; 生态“夹点”; 生态障碍点; 贺州市

Identifying key areas of ecosystem restoration for territorial space based on ecological security pattern: A case study in Hezhou City

FU Fengjie¹, LIU Zhenhuan^{2,*}, LIU Hai¹

¹ Guangdong Guodi Planning Science Technology Co., Ltd., Guangzhou 510650, China

² School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Ecosystem restoration for territorial space is an important measure to implement the strategy of ecological civilization construction. It is vital to scientifically identify key areas of territorial space for ecological restoration, which can help to make policy to maintain the ecosystem integrity. However, how to identify the restoration area is a controversial question in the current territorially spatial planning. In this study, ecological security patterns were employed to identify the key areas of ecological restoration. We followed the paradigm of ecological sources identification-resistance surface construction-corridor extraction to construct the ecological security pattern in Hezhou City, Guangxi Zhuang Autonomous Region. Four kinds of ecological condition including the ecological protection degree, landscape connectivity, ecological important degree and nature reservation areas were used to identify the ecological sources. Then, A Circuitscape model based on circuit theory was used to extract ecological corridors and build the ecological security pattern. After that, the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41571172)

收稿日期: 2020-05-24; 网络出版日期: 2021-03-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenhuanliu@gmail.com

current density of landscape was used to diagnose ecological pinch points and ecological barriers in ecological corridors, and determined the width of ecological corridors. We also established grading rules to identify key areas of territorial space and formulate spatial strategies for ecological restoration. The results showed that Hezhou City has quite good ecological condition, which can identify 18 ecological sources with a total area of 3656.89 km². It also needs 37 of ecological corridors to connect the ecological sources with the total length of 639.50 km. We also found that 16 ecological pinch-points covering area of 124.24 km² need to repair, while 8 ecological pinch points in urgently dangerous condition with area of 45.02 km². There are 32 ecological barriers with area of 426.56 km² and 6 ecological barriers in urgently dangerous condition. After comprehensive understanding the land use policy, we carefully design the spatial planning of ecological restoration through the classification and formulation rules. The study can provide a scientific mode for the identification of ecological restoration in territorial space planning.

Key Words: ecological restoration for territorial space; ecological security pattern; ecological pinch-point; ecological barrier; Hezhou City

国土空间是生态文明建设的物质基础,由生态系统和人类社会相互作用形成^[1-2]。随着生态系统退化、国土空间格局失序和优质生态产品缺乏等问题的出现,国土空间生态修复受到广泛关注^[3-4]。优化生态安全屏障体系,分区分类开展受损自然生态系统修复,建设生态廊道、开展重要栖息地恢复和废弃地修复等是国土空间生态修复的重点^[5-6]。而如何识别国土空间生态修复关键区域,统筹推进山水林田湖草系统治理,构建国土空间生态保护修复格局,实现国土空间优化和生态功能提升,是当前国土空间生态修复面临的难题^[7-9]。

生态安全格局以景观生态学理论为基础,对保护和恢复区域生物多样性、维持生态系统结构和过程的完整性以及改善区域生态环境具有显著意义^[10-12]。构建生态安全格局逐渐成为国土空间生态修复的重要抓手^[13]。当前,“源地识别-阻力面构建-廊道提取”已成为生态安全格局研究的一般范式^[14-15]。生态源地指对区域生态安全具有重要意义的生态用地,是构建生态安全格局的基础^[16-17],通常从景观连通性、生态敏感性、生态系统服务价值、生境质量评估、生态风险评估等方面综合选取^[18-20]。阻力面指生态流在穿越土地利用类型时需要克服的阻力,可依据土地利用类型赋值得到^[21]。廊道提取多采用最小累积阻力(Minimum Cumulative Resistance, MCR)模型^[22-24]和电路理论^[25-27]。最小累积阻力模型通过寻找源地间最小耗费路径构建生态廊道,是基于现状的生态安全格局^[22];电路理论利用电子在电路中随机游走的特性(即随机漫步理论)来模拟物种在某一景观面中的迁移扩散过程^[25],通过计算廊道中电流的大小判别廊道的重要性,能识别潜在的生态廊道,并根据电流密度识别生态“夹点”,通过某一区域移除前后电流的变化情况识别生态障碍点。

生态安全格局是景观格局优化的空间表现,国土空间生态修复是对国土空间受损、退化生态系统进行恢复与重建,两者对维持景观格局整体性和生态系统功能完整性均有重要意义。因此,基于生态安全格局识别国土空间生态修复关键区域更具生态学价值。现有研究重视生态安全格局构建技术方法的改进^[28-30],而针对生态修复区域的整体识别研究较少,且集中在生态修复区域的识别和廊道长度的判定^[31-33]。在国土空间生态修复规划编制中,生态廊道宽度及“补丁”的大小则缺少较合理的科学研究,导致国土空间生态修复项目难落实,不利于生态系统稳定性的维持和景观连通性的提升。此外,现有生态修复以工程修复措施为主,缺乏生态要素统筹修复意识,不利于生态系统整体功能发挥。未来需推动以景观为基础,聚焦多尺度景观格局研究,识别国土空间生态保护修复关键区域和最佳生态廊道宽度,分级分类提出生态修复措施,通过整体保护、系统修复实现国土空间格局优化。

以贺州市为研究区,通过生态保护重要性、景观连通性、生态功能重要区域和自然保护区四个方面识别生态源地;根据土地利用类型的植被覆盖程度设定阻力值;依据电路理论提取生态廊道,识别研究区域的生态“夹点”和生态障碍点,利用核密度分析,综合判定生态廊道宽度;并提出生态修复策略,优化生态安全格局,

研究可为国土空间生态修复提供参考。

1 研究区概况

贺州市位于广西壮族自治区东部(23°39′—25°10′N, 110°34′—112°03′E), 处于湘、粤、桂三省(区)的结合部, 下辖两区三县, 即八步区、平桂区、钟山县、昭平县和富川瑶族自治县, 面积 11752.46 km², 常住人口约 207 万人。地势四周高, 中间低, 总体上由西北向东南倾斜, 是南岭山地丘陵地貌。属亚热带季风性湿润气候区, 四季分明, 光热充足, 雨量丰沛, 夏季炎热, 冬有霜雪, 年平均气温 19.2—19.9℃。

贺州市生态本底较好, 国土绿化成效显著。土地覆被以林地为主, 是广西重要林区之一, 森林覆盖率达 72.62%, 是“国家森林城市”。得益于“山清水秀生态美, 城古茶香人长寿”的资源, 贺州市被评为“世界长寿市”。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

研究采用的基础数据包括矢量和栅格数据。生态保护重要性数据来源于《广西壮族自治区资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价》阶段性成果; 土地利用现状数据来源于贺州市第三次全国国土调查阶段性成果; 自然保护区数据来源于贺州市自然资源局等; 数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据, 空间分辨率为 30 m, 来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)。

2.2 研究方法

2.2.1 生态源地识别

研究从生态保护重要性、景观连通性、生态功能重要区域和自然保护区等方面识别具有重要生态价值的斑块作为生态源地。生态保护重要性是通过开展生态服务功能重要性和生态敏感性评价集成得到^[34], 按斑块重要程度划分为 5 级; 斑块重要性指斑块保持景观连通性的重要程度, 通过斑块移除前后景观连通性的变化量识别斑块重要性^[35-36], 研究利用 Conefor Sensinode 计算得到, 并将斑块重要性值划分为 5 级; 生态功能重要区域是利用反地形 DEM 提取山顶的方法提取研究区域所有山体的顶点^[22], 设定阈值筛选得到; 同时, 再叠加自然保护区数据, 根据各斑块四个方面综合重要性高低及空间分布情况, 选取贺州市生态源地。

2.2.2 阻力面构建与生态廊道提取

阻力面指物种在不同景观单元之间迁移时受到的阻碍, 是计算物种在克服阻力情况下扩散路径的基础^[37]。研究以土地利用现状数据为基础, 根据植被覆盖情况, 划分为耕地、林地、草地、种植园用地、湿地、水域及水利设施用地、建设用地和未利用土地 8 类土地利用类型, 参考他人研究^[14, 23-24], 设定不同土地利用类型的阻力值, 构建生态阻力面。

通过 MCR 模型模拟物种穿越不同景观基面的过程^[38]。模型原理如下:

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

式中, MCR 为最小累积阻力值; f 为最小累积阻力与生态过程的正相关关系; D_{ij} 为物种从源地 j 到景观单元 i 的空间距离; R_i 为景观单元 i 对物种运动的阻力系数。研究利用 Linkage Mapper 模块构建生态廊道。

2.2.3 生态“夹点”和生态障碍点识别

生态“夹点”指对生态保护具有重要作用的区域。生态“夹点”的识别是将一个节点(生态源地)接地, 其他节点(生态源地)分别输入相同的电流, 通过迭代运算得到每个像元的累积电流值, 电流值较大的区域即为生态“夹点”^[39]。生态“夹点”具有高电流密度和不可替代性, 该区域的退化或损失极有可能切断生态源地之间的连通^[40], 应优先考虑栖息地保护。研究通过 Pinchpoint Mapper 模块识别生态廊道中的“夹点”。

生态障碍点指物种在生境斑块间运动受到阻碍的区域, 通过计算清除障碍点后电流恢复值的大小来识

别,移除这些区域可增加生态源地间的连通性^[41],应进行生态修复。研究利用 Barrier Mapper 模块识别生态廊道中的障碍点。

2.2.4 生态廊道宽度选取

参考 Peng 等^[42]的研究方法,在生态“夹点”和生态障碍点识别的基础上,利用核密度分析得到电流密度分布。鉴于核密度分析结果默认为 9 级,研究提取生态“夹点”和生态障碍点核密度结果中的 6—9 级,通过联合得到生态廊道宽度。

3 结果分析

3.1 生态源地识别

研究共选取 18 处生态源地,面积 3656.89 km²,占贺州市域面积的 31.12%,呈现“东西重,中部轻”的空间分布特征。从区县分布看,生态源地主要集中在八步区,占生态源地总面积的 42.27%,其次为昭平县,占生态源地总面积比 35.64%,钟山县生态源地最少,仅占生态源地总面积的 2.39%。

3.2 阻力面和生态廊道提取

通过对不同土地利用类型的植被覆盖程度进行赋值,得到生态阻力面(图 1)。值越高,表示穿越该斑块所耗费的代价越高,如穿越建设用地比穿越耕地所耗费的代价高。参考他人研究并结合贺州市实际情况,阻力值设置如表 1 所示。

表 1 不同土地利用类型阻力系数

Table 1 Resistance coefficient of land use types

土地利用类型 Land use types	阻力系数 Resistance coefficient	土地利用类型 Land use types	阻力系数 Resistance coefficient
林地 Forest	1	湿地 Wetland	40
草地 Grassland	10	水域及水利设施用地 Water	50
种植园用地 Orchard	20	未利用地 Unutilized land	300
耕地 Cropland	30	建设用地 Built-up land	500

生态廊道将重要生态斑块连接起来,为物种的扩散、迁徙提供通道。研究综合考虑生态廊道长度、连接斑块的重要程度和廊道可替代性等因素,将贺州市域生态廊道分为三个等级,即关键生态廊道、重要生态廊道和一般生态廊道(表 2)。关键生态廊道分散于贺州市域,数量最多,长度占比 20.95%,是所有生态源地间最佳连通通道,对维持市域生态系统结构连通性和功能连通性具有重要意义;重要生态廊道指大块生态源地间联系桥梁,其数量和长度占比均不高;一般生态廊道指生态源地间连接廊道,有助于增加市域内部的连通性,但廊道可替代性较高,主要分布于市域中部,廊道数量占比第二,长度占比超过 50%。

表 2 贺州市生态廊道分类表

Table 2 Types of ecological corridors in Hezhou City

生态廊道类型 Ecological corridor types	数量 Numbers	数量占比 Percentage/%	长度 Length/km	长度占比 Percentage/%
关键生态廊道 Key ecological corridor	18	45.95	133.96	20.95
重要生态廊道 Important ecological corridor	7	21.62	112.14	17.53
一般生态廊道 General ecological corridor	12	32.43	393.40	61.52
合计 Total	37	100	639.50	100

3.3 生态“夹点”和生态障碍点识别

基于生态安全格局识别生态“夹点”,贺州市域生态廊道电流分布如图 2 所示,电流强度由蓝至红逐渐增大,红色区域为生态“夹点”。市域需修复的生态“夹点”共 16 处,面积 124.24 km²,主要分布在市域中部。生

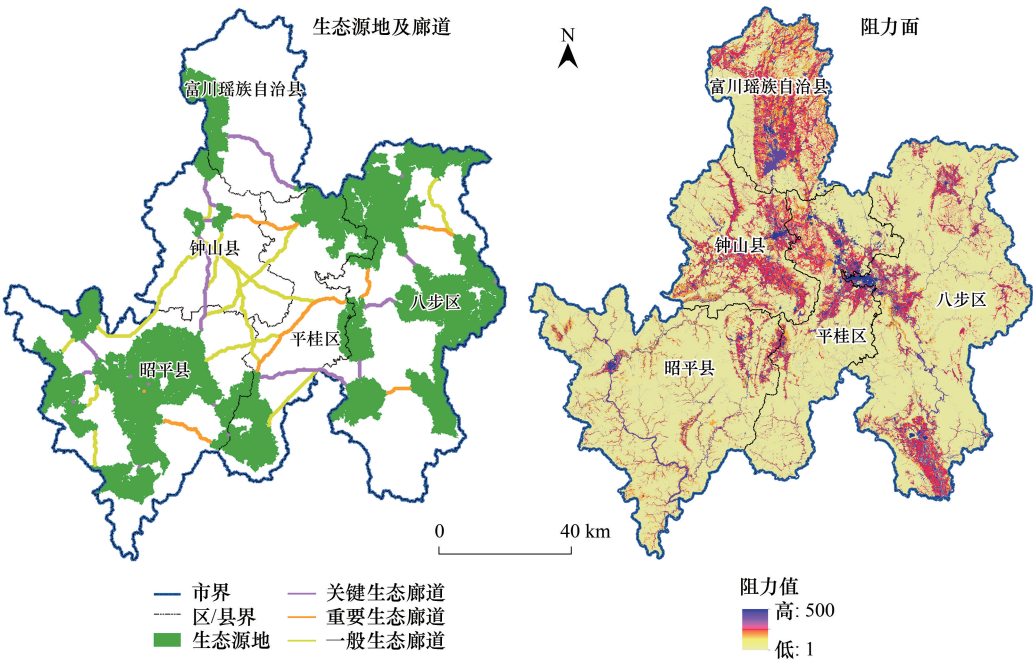


图 1 贺州市生态安全格局图
Fig.1 Ecological security pattern in Hezhou City

态“夹点”数量以钟山县最多,有 6 处,主要分布在钟山县城域中南部,占比 37.50%。生态“夹点”面积以平桂区最大,为 57.59 km²,占比 46.35%,横向分布于平桂区北、中、南部(表 3)。

表 3 贺州市各区县生态“夹点”分布情况统计表

Table 3 Statistics on ecological pinch-points in Hezhou City				
区县名 Districts	数量 Numbers	数量占比 Percentage/%	面积 Area/km ²	面积占比 Percentage/%
八步区	2	12.50	7.40	5.96
平桂区	5	31.25	57.59	46.35
钟山县	6	37.50	41.62	33.50
昭平县	2	12.50	8.87	7.14
富川瑶族自治县	1	6.25	8.76	7.05
合计 Total	16	100	124.24	100

贺州市域生态障碍点识别结果如图 3 所示,红色区域为电流高值区,即生态障碍点。研究识别贺州市域生态障碍点共 32 处,面积 426.56 km²,集中分布在贺州市域东部和南部。昭平县生态障碍点数量最多,有 10 处,呈环状空间分布特征,占比 31.25%;生态障碍点面积以平桂区最大,面积 189.36 km²,占比高达 44.39%,集中分布在南部(表 4)。

4 关键区域生态修复策略

为保障生态修复达到预期效果,建议将空间上连续,但被行政界线割裂的待修复区域作为联合修复区域统一修复。位于关键生态廊道上的生态“夹点”有 8 处,面积 45.02 km²(表 5),分布范围较广且景观类型多样。生态“夹点”上的水域及水利设施用地主要分布在贺江和桂江,建设用地包含农村宅基地和采矿用地。河流廊道作为天然廊道,其修复涉及水域治理、护坡护岸整治和河岸绿化等工作。水域的修复多以河道清淤、

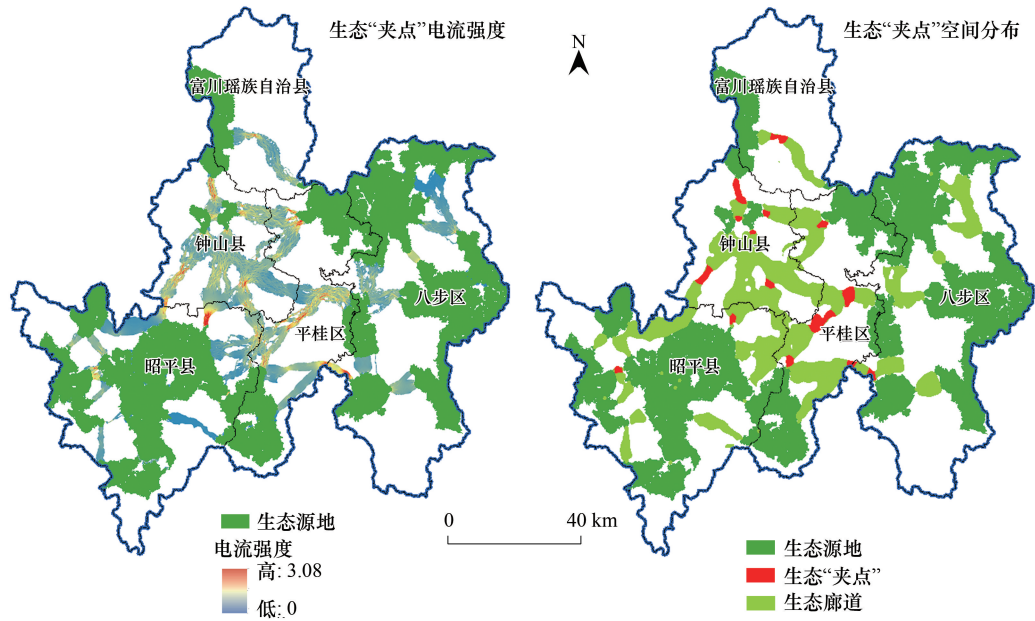


图 2 贺州市生态“夹点”及其生态电流强度分布图

Fig.2 The current intensity of ecological pinch-points and their location in Hezhou City

表 4 贺州市各区县生态障碍点分布情况表

Table 4 Statistics on ecological barriers in Hezhou City

区县名 Districts	数量 Numbers	数量占比 Percentage/%	面积 Area/km ²	面积占比 Percentage/%
八步区	6	18.75	115.71	27.13
平桂区	7	21.88	189.36	44.39
钟山县	8	25.00	54.27	12.72
昭平县	10	31.25	63.57	14.90
富川瑶族自治县	1	3.12	3.65	0.86
合计 Total	32	100	426.56	100

表 5 关键生态廊道待修复生态“夹点”分布情况表

Table 5 Statistics of ecological pinch-points to be restored in key ecological corridors

区县名 Districts	位置 Location	待修复面积 Needed restored area/km ²	主要土地利用类型 Major land use type	修复建议 Restoration policy
富川瑶族自治县	龟石水库北部、G538 和 S203(富川段)交点以南	8.76	水域及水利设施用地、耕地、建设用地	(1) 建立河流保护区, 并进行河流违法监督; (2) 提高植被丰度
昭平县	昭平县城以南、G241 以北桂江段	3.70	水域及水利设施用地、耕地	
钟山县	红花镇中部、挂榜山以北	2.45	水域及水利设施用地、耕地	(1) 推进乡村绿化景观提升; (2) 发展特色农业、林业经济
钟山县	两安瑶族自治乡中南部和红花镇北部	14.40	耕地、建设用地	
昭平县	黄姚镇西北部的凤立村	5.17	耕地、建设用地	
八步区	仁义镇西北部、大桂山林场南部	5.53	林地	(1) 注重林地整体保护; (2) 加强本土树种运用。
八步区、平桂区	仁义镇、鹅塘镇和沙田镇南部交界区域	5.01	林地	

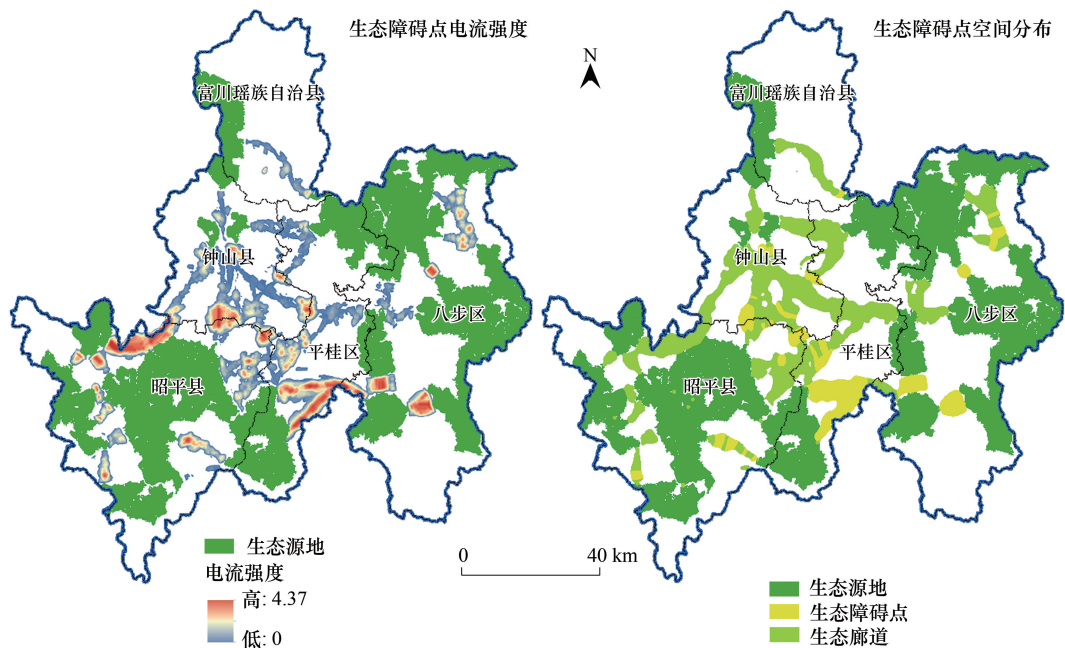


图3 贺州市生态障碍点及其生态电流强度空间分布图

Fig.3 The current intensity of ecological barriers and their spatial distribution in Hezhou City

水污染治理为主;常见的本土优势草本植物多用于河岸绿化,在种植过程中应注重景观配置;护坡护岸则由传统的硬质铺装逐渐转变为自然恢复。建设用地的修复应依托乡村振兴战略,加快村庄绿化建设,发展特色农业和林业经济,改善农村生态环境,提升景观连通性。位于采矿用地的生态“夹点”区域,可采用耐性较好的本土植物进行复绿,加快矿山生态环境修复。

位于关键生态廊道上的生态障碍点有6处,面积166.05 km²(表6),主要分布在贺州市域东部,平桂区面积最大,景观类型以林地(商品林)为主。生态修复应重视森林生长和采伐利用的动态平衡,注重林地垂直立面的建设,积极发展林下经济(中草药种植、林菌种植等)。树木种植优先考虑本土树种,加强林带建设,提高林地景观连通性,减少破碎生态空间。

表6 关键生态廊道待修复生态障碍点分布情况统计表

Table 6 Statistics of ecological barrier points to be restored in key ecological corridors

区县名 Districts	位置 Location	待修复面积 Needed restored area/km ²	主要土地利用类型 Major land use type	修复建议 Restoration policy
富川瑶族自治县	白沙镇东北部、北界岭和乌羊山附近	3.65	林地	(1) 加强林地资源监管和林带建设; (2) 树木种植以本土树种为主,注重垂直立面树木配置; (3) 减少人为干扰,促进群落自身演替
钟山县、昭平县	黄姚镇北部、同古镇西南部、清塘镇东南部三镇交界区域	28.51	林地	
平桂区	公会镇东部和大桂山林场	84.25	林地	
八步区	大桂山林场北部和步头镇西部	38.23	林地	
八步区	黄洞林场和黄洞瑶族自治乡中部	11.41	林地	

5 结论

研究基于生态安全格局识别生态修复关键区域,分级分类提出生态修复措施,优化生态安全格局,获得如下结论:

(1)贺州市生态本底良好,生态源地面积 3656.89 km²,占市域面积的 31.12%。可通过构建 37 条生态廊道,约 639.50 km 连接生态源地。识别生态“夹点”共 16 处,面积 124.24 km²,主要分布在贺州市域中部。生态障碍点共 32 处,面积 426.56 km²,集中分布在贺州市域东部和南部。贺州市生态修复应以自然恢复为主,人工修复为辅,人工修复措施以林带改造提升和植被复绿为主。针对关键生态廊道的优先保护修复分区分级策略表明,需重点修复的生态“夹点”有 8 处,土地利用类型包含水域及水利设施用地、耕地、林地和建设用地等,生态修复策略主要有建立河流保护区、推进乡村景观绿化以及发展特色农业、林业经济等。待修复的生态障碍点有 6 处,土地利用类型以林地(商品林)为主,生态修复优先考虑发展林下经济,种植本土树种,加强林带建设等。

(2)研究基于生态安全格局构建范式,从维护生态系统完整性视角出发,识别国土空间退化、受损斑块,按照保护重要生态空间,整治低效空间,修复退化受损空间为目标,分级分类制定生态修复措施。研究可为科学确定国土空间生态修复关键区域、统筹谋划生态修复重大工程、实现自然资源优化配置提供参考。

然而,修复后生态系统结构连通性和功能连通性的提升程度仍有待进一步的研究。此外,研究通过对生态“夹点”和生态障碍点电流密度的核密度分析,综合判定生态廊道宽度,实现生态廊道由线转面,此方法在具体的生态保护修复实践中,需结合实际情况进行调整,以确定最佳廊道宽度。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 王威,贾文涛.生态文明理念下的国土综合整治与生态保护修复.中国土地,2019,(5):29-31.
- [4] 王军,应凌霄,钟莉娜.新时代国土整治与生态修复转型思考.自然资源学报,2020,35(1):26-36.
- [5] 中共中央,国务院.生态文明体制改革总体方案.(2015-09-21).http://www.gov.cn/guowuyuan/2015-09/21/content_2936327.htm.
- [6] 中共中央办公厅,国务院办公厅.关于建立以国家公园为主体的自然保护地体系的指导意见.(2019-06-26).http://www.gov.cn/xinwen/2019-06/26/content_5403497.htm.
- [7] 韩博,金晓斌,项晓敏,赵庆利,林金煌,洪长桥,金志丰,胡静,周寅康.基于“要素-景观-系统”框架的江苏省长江沿线生态修复格局分析与对策.自然资源学报,2020,35(1):141-161.
- [8] 王聪,伍星,傅伯杰,韩兴国,陈亚宁,王克林,周华坤,冯晓明,李宗善.重点脆弱生态区生态恢复模式现状与发展方向.生态学报,2019,39(20):7333-7343.
- [9] 易行,白彩全,梁龙武,赵子聪,宋伟轩,张妍.国土生态修复研究的演进脉络与前沿进展.自然资源学报,2020,35(1):37-52.
- [10] 陈利顶,景永才,孙然好.城市生态安全格局构建:目标、原则和基本框架.生态学报,2018,38(12):4101-4108.
- [11] 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.
- [12] 俞孔坚,乔青,李迪华,袁弘,王思思.基于景观安全格局分析的生态用地研究——以北京市东三乡为例.应用生态学报,2009,20(8):1932-1939.
- [13] 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.
- [14] 彭建,李慧蕾,刘焱序,胡熠娜,杨旸.雄安新区生态安全格局识别与优化策略.地理学报,2018,73(4):701-710.
- [15] 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.
- [16] 吴健生,张理卿,彭建,冯喆,刘洪萌,赫胜彬.深圳市景观生态安全格局源地综合识别.生态学报,2013,33(13):4125-4133.
- [17] 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.
- [18] Peng J, Pan Y J, Liu Y X, Zhao H J, Wang Y L. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. Habitat International, 2018, 71: 110-124.
- [19] 王玉莹,金晓斌,沈春竹,鲍桂叶,刘晶,周寅康.东部发达区生态安全格局构建——以苏南地区为例.生态学报,2019,39(7):2298-2310.
- [20] 徐文彬,尹海伟,孔繁花.基于生态安全格局的南京都市区生态控制边界划定.生态学报,2017,37(12):4019-4028.

- [21] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 杨旸, 李贵才. 基于“重要性-敏感性-连通性”框架的云浮市生态安全格局构建. 地理研究, 2017, 36(3): 471-484.
- [22] 吴健生, 马洪坤, 彭建. 基于“功能节点-关键廊道”的城市生态安全格局构建——以深圳市为例. 地理科学进展, 2018, 37(12): 1663-1671.
- [23] 蒙古军, 王晓东, 周朕. 干旱区景观格局综合优化: 黑河中游案例. 北京大学学报(自然科学版), 2017, 53(3): 451-461.
- [24] 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.
- [25] 刘佳, 尹海伟, 孔繁花, 李沐寒. 基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化. 生态学报, 2018, 38(12): 4363-4372.
- [26] 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.
- [27] 王回苗, 李汉廷, 谢苗苗, 许萌, 李少玲, 白中科. 资源型城市工矿用地系统修复的生态安全格局构建. 自然资源学报, 2020, 35(1): 162-173.
- [28] 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.
- [29] 李航鹤, 马腾辉, 王坤, 谭敏, 渠俊峰. 基于最小累积阻力模型(MCR)和空间主成分分析法(SPCA)的沛县北部生态安全格局构建研究. 生态与农村环境学报, 2020, 36(8): 1036-1045.
- [30] 李青圃, 张正栋, 万露文, 杨传训, 张杰, 叶晨, 陈裕婵. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化. 地理学报, 2019, 74(7): 1420-1437.
- [31] 杜腾飞, 齐伟, 朱西存, 王鑫, 张瑜, 张蕾. 基于生态安全格局的山地丘陵区自然资源空间精准识别与管制方法. 自然资源学报, 2020, 35(5): 1190-1200.
- [32] 朱捷, 苏杰, 尹海伟, 孔繁花. 基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建. 自然资源学报, 2020, 35(8): 1986-2001.
- [33] 杨彦琨, 王勇, 程先, 李维杰, 高敏, 王家录, 傅俐, 张瑞. 基于连通度指数的生态安全格局构建——以三峡库区重庆段为例. 生态学报, 2020, 40(15): 5124-5136.
- [34] 自然资源部. 资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南(试行). (2020-01-19). http://gi.mnr.gov.cn/202001/t20200121_2498502.html.
- [35] 吴健生, 刘洪萌, 黄秀兰, 冯喆. 深圳市生态用地景观连通性动态评价. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2543-2549.
- [36] 付凤杰, 刘珍环, 黄千杜. 深圳市福田区三维城市景观格局变化特征. 生态学报, 2019, 39(12): 4299-4308.
- [37] 王洁, 李锋, 钱谊, 殷春雪. 基于生态服务的城乡景观生态安全格局的构建. 环境科学与技术, 2012, 35(11): 199-205.
- [38] 刘孝富, 舒俭民, 张林波. 最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性评价中的应用——以厦门为例. 生态学报, 2010, 30(2): 421-428.
- [39] 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.
- [40] 黄隆杨, 刘胜华, 方莹, 邹磊. 基于“质量-风险-需求”框架的武汉市生态安全格局构建. 应用生态学报, 2019, 30(2): 615-626.
- [41] 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.
- [42] Peng J, Zhao S Q, Dong J Q, Liu Y X, Meersmans J, Li H L, Wu J S. Applying ant colony algorithm to identify ecological security patterns in megacities. Environmental Modelling & Software, 2019, 117: 214-222.