

DOI: 10.5846/stxb202101240248

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): 2995-3009.

Wei B J, Su J, Hu X J, Xu K H, Zhu M L, Liu L Y. Comprehensive identification of eco-corridors and eco-nodes based on principle of hydrological analysis and Linkage Mapper. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 2995-3009.

基于“HY-LM”的生态廊道与生态节点综合识别研究

韦宝婧¹, 苏杰², 胡希军^{1,*}, 徐凯恒³, 朱满乐¹, 刘路云¹

1 中南林业科技大学风景园林学院, 湖南省自然保护地风景资源大数据工程技术研究中心, 城乡景观生态研究所, 长沙 410004

2 南京大学建筑与城市规划学院, 南京 210093

3 中国城市建设研究院有限公司, 北京 100120

摘要:传统的生态网络或生态安全格局构建研究中,多基于最小累积阻力模型(MCR)提取最小费用路径作为生态廊道,并人工判别生态节点,这种方式缺少对生态过程中能量流、信息流等交换过程的考虑,导致生态网络在结构、功能上存在一定的缺失。以福建省上杭县为例,以上杭县森林公园、湿地保护区、自然保护区等为主要生态源地,从陆生动物迁移特征出发选取土地覆被类型、距道路距离、地形起伏度、坡度、距水域距离、NDVI 植被指数等因素为阻力因子,利用熵权法获得权重加权叠加生成综合阻力面,运用水文分析原理 Hydrology(HY)和 Linkage Mapper 工具箱(LM)中电路理论等方法综合识别生态廊道和生态节点,运用重力模型对生态廊道重要性进行评价并对生态廊道和生态节点划分等级。研究结果如下:(1)基于 LM 方法共提取 187 条生态廊道,生态夹点 52 个,生态障碍点 55 个,基于 HY 方法共提取生态廊道 240 条,生态节点 133 个;(2)LM 和 HY 提取的生态廊道和生态节点进行叠加,共提取生态廊道 197 条,辐射道 30 条,生态节点 283 个;(3)运用重力模型提取关键生态廊道 103 条(含辐射道 30 条),一般生态廊道 124 条,同时判别关键生态节点 97 个,一般生态节点 186 个,关键生态廊道和关键生态节点主要集中在高阻力和较高阻力值集中的区域,关键生态节点多分布在生态源地周围;(4)对关键生态廊道、关键生态节点缓冲区所在区域土地覆被类型构成进行分析,森林、耕地和草地等土地覆被类型占比具有绝对优势,并从生态连通性和生境质量角度针对各土地覆被类型提出了优化及生态建设策略。研究结果可为区域生态网络安全格局构建、国土空间规划与生态系统修复等研究提供参考,同时也为生物多样性保护与生态文明建设提供科学依据。

关键词:生态廊道;生态节点;水文分析原理(HY);Linkage Mapper(LM);电路理论;上杭县

Comprehensive identification of eco-corridors and eco-nodes based on principle of hydrological analysis and Linkage Mapper

WEI Baojing¹, SU Jie², HU Xijun^{1,*}, XU Kaiheng³, ZHU Manle¹, LIU Luyun¹

1 College of Landscape Architecture, Hunan Big Data Engineering Technology Research Center of Natural Protected Areas Landscape Resources, Institute of Urban and Rural Landscape Ecology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 College of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China

3 China Urban Construction Design & Research Institute, Beijing 100120, China

Abstract: In the traditional studies on the construction of ecological network or ecological security pattern, based on the minimum cumulative resistance (MCR) model to extract the minimum cost path as ecological corridor, and artificial ecological node. But it lacks consideration of the exchange process such as energy flow and information flow in the ecological process, which leads to some deficiencies in the structure and function of the ecological network. We selected Shanghang County in Fujian Province as study area. We selected the national forestry parks, wetland reserves, nature reserves etc. as

基金项目:国家自然科学基金(31901363);湖南省研究生科研创新项目资助(CX20200701);中南林业科技大学研究生科技创新基金资助(CX20201016);湖南省“双一流”建设项目资助(湘教通[2018]469号)

收稿日期:2021-01-24; **网络出版日期:**2021-11-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 120795043@qq.com

the main ecological sources and took land cover types, distance to roads, relief, slope, distance to water, normalized difference vegetation index (NDVI) and other factors as resistance factors. Based on migration characteristics of terrestrial animals, we used entropy weight method to obtain the weight for the weighted superposition to generate a comprehensive resistance surface. Then we used hydrological analysis principles (HY) and circuit theory in Linkage Mapper toolbox (LM) to comprehensively identify eco-corridors and eco-nodes. The gravity model is used to evaluate the importance of eco-corridors and eco-nodes and classify them into different levels. The research results showed that: (1) a total of 187 eco-corridors, 52 ecological pinch points and 55 ecological barrier points were extracted based on the LM method, and 240 eco-corridors and 133 eco-nodes were extracted based on the HY method; (2) The eco-corridors and eco-nodes extracted by LM and HY were superimposed, and a total of 197 eco-corridors, 30 radiation corridors, and 283 eco-nodes were extracted; (3) Using the gravity model, we extracted key 103 eco-corridors (including 30 radiation corridors), 124 general eco-corridors, at the same time identified 97 key eco-nodes and 186 generally eco-nodes. The key eco-corridors and key eco-nodes were mainly concentrated in areas with high resistance values and relatively high resistance values, and the key eco-nodes distribution around the ecological source; (4) Based on the analysis of the composition of land cover types in areas where key eco-corridors and key eco-nodes buffer areas located, it is found that the proportion of forest, farmland and grassland had the absolute advantage, and optimization and ecological construction strategies were proposed for each type of land cover due to ecological connectivity and habitat quality. The results can provide reference for network construction of ecological security pattern in local, national spatial planning and ecosystem restoration, and also can provide scientific basis for biodiversity protection and ecological civilization construction.

Key Words: eco-corridors; eco-nodes; principle of hydrological analysis; Linkage Mapper; circuit theory; Shanghang County

2020年9月《市级国土空间总体规划编制指南(试行)》(自然资办发[2020]46号)中提到需“明确自然保护地等生态重要和生态敏感区域,构建重要生态屏障、廊道和网络,形成连续、完整、系统的生态保护格局和开敞空间网络体系,维护生态安全和生物多样性”。生态网络是一个区域同类型生态系统的集合,是形成区域生态斑块有效连接的方式之一,构建生态网络和生态廊道是恢复和维护生态连通性的重要策略^[1]。生态廊道作为沟通生态斑块的桥梁,是不同于两侧基质的线状或带状景观要素,也是生态斑块间物质、能量及信息交换的通道^[2],因此借助生态廊道可促进物种栖息、繁衍、迁徙和扩散等生态过程^[3]。目前学者们多运用基于最小累积阻力模型(MCR)提取最小费用路径^[4-6],即为生态廊道;近年来部分学者利用水文分析原理通过提取累积耗费距离的山谷线作为生态廊道^[7];少量学者运用 Linkage Mapper 工具提取带有宽度信息的生态廊道^[8-9],其本质是计算与最近源地的加权成本距离。生态节点是指生态廊道上对斑块间生态过程起关键作用的生态地段^[10],一般位于廊道的最薄弱处,起“踏脚石”作用的生态节点可实现斑块间从结构联动到功能连通的转变^[11-12],对维持生态安全格局、生态网络构建中各组分间物质能量交流过程具有战略节点价值。依据已有研究对生态节点的识别方式,生态节点是环绕相邻源的等阻力线的相切点^[10,13],也有是与最小费用路径的交点^[14-15],还有是不同等级廊道的交点^[16],甚至有的是基于电路理论识别出生态“夹点”和“障碍点”^[17]。

大量的研究为生态网络构建提供了较为成熟的研究范式^[18],也为生态安全格局构建、生态规划建设及物种保护等战略部署提供重要方法依据。在这些生态廊道提取方法中,MCR 模型运用 ArcGIS 的成本路径工具识别源地间最小耗费路径确定物种迁徙与扩散的所有可能路径,其过程需大量反复操作且生成的廊道冗杂;Linkage Mapper 工具进行生态廊道识别的原理与 MCR 基本相同,其优势在不需要人为剔除重复冗余廊道,即可通过设定廊道长度阈值等操作得到含一定宽度信息的生态廊道;利用水文分析原理除了得到源地间生态廊道外,还可生成许多以源地为中心的、按照累积阻力面向周围景观展开的低阻力通道,一般呈辐射状展开,称为辐射道^[19],是区别于 MCR 模型和 Linkage Mapper 方法识别的生态廊道,辐射道对于加强源地与周围基

质的连接以及连接潜在源地具有重要作用^[20]。在生态节点判别方面,MCR 模型主要将生态廊道交汇处判别为生态节点,而 Linkage Mapper 工具进行生态节点判别其优势主要通过分析生态“夹点”和生态“障碍点”而确定,带有明确的空间及区域信息,不仅是简单的廊道相交;水文分析原理则可形成集水“盆地”确定生态节点,目前已被多数学者认可^[21]。目前的研究方法和思路多基于某一种识别方法进行生态廊道提取和生态节点判别,多方法、多目标的综合识别研究较少。

本文以福建省上杭县为实例,运用水文分析原理和 Linkage Mapper 工具等分别提取生态廊道,叠加合并后构成上杭县综合生态廊道体系,利用 Circuitscape 工具识别其生态“夹点”和“障碍点”,与水文分析“源-汇”原理识别所得的生态薄弱点进行叠加获得上杭县综合生态节点空间分布。对生态廊道和生态节点进行等级划分,关键生态廊道和关键生态节点构成了上杭县生态网络关键地段,对关键地段不同宽度缓冲区设定下所覆盖的土地覆被类型构成进行分析,从而为区域生态安全格局、国土空间规划与生态系统修复等研究提供较为科学、全面的研究思路和研究方法,同时也可为生物多样性保护与生态建设提供科学依据。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

上杭县隶属于福建省龙岩市,又称杭城、杭川、金杭,位于福建省西南部,龙岩市域中西部,汀江中游(图 1)。上杭县境内丘陵起伏,西侧属武夷山脉南段的延伸分支,境内水系密布,有汀江、九龙江、梅江水系,其中汀江是福建省四大河流之一。上杭县属亚热带季风气候,温暖湿润,降水充沛,原生植被类型中亚热带常绿阔叶林,森林覆盖率达 75.1%,是我国南方 48 个重点林区县之一。由于受人为活动的影响和生态环境的改变,仅有步云、古田的梅花山区有保存较好的成片原生植被。

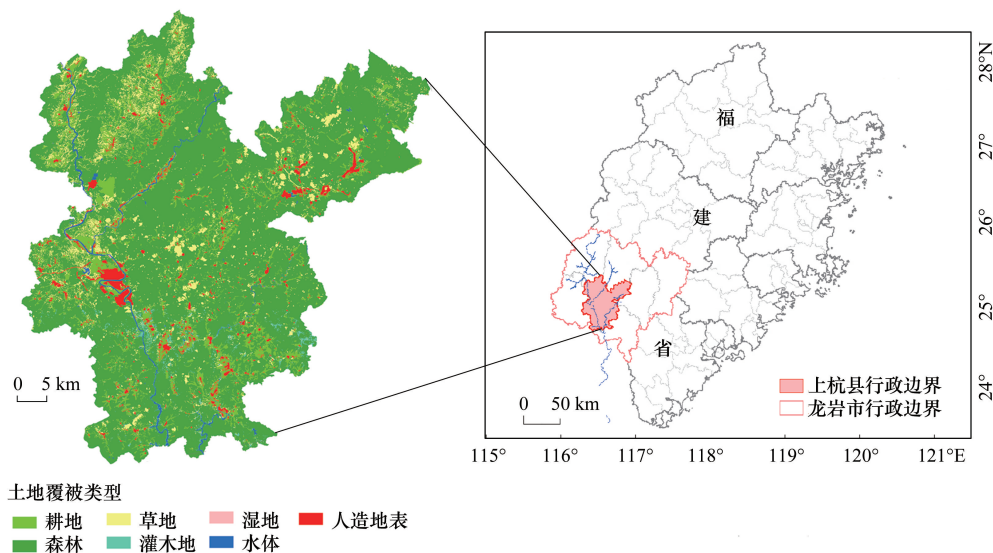


图 1 上杭县区位图

Fig.1 Location of Shanghang County

1.2 数据来源及预处理

土地覆被数据来源于国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/ngcc/>) 2020 年全球 30 m 地表覆盖数据(GlobalLand30),根据上杭县行政边界矢量裁剪,获取上杭县 2020 年土地覆被数据,分为森林、水体、耕地、灌木地、草地、湿地、人造地表七类;DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>) ASTER GDEM 30M 分辨率数字高程数据,条带号 120,行编号 43;上杭县道路、河流数据均由上杭县自然资源局提供,年份为 2019 年;2020 年上杭县 NDVI 数据来源于 Landsat 系列遥感影像,并根据上杭县主要作物物候期(即 2020 年 7 月 1 日—2020 年 10 月 31 日)进行中值处理。

基于生态重要性角度综合上杭县森林公园、湿地保护区(水库、水源保护地等)、梅花山国家自然保护区、自然保护小区等区域,删除重复、细碎斑块,获得上杭县生态源地分布图(图2),共73个生态源地,源地内主要保护物种以陆生动物为主,有眼镜蛇 *Naja atra*、穿山甲 *Manis pentadactyla*、蟒蛇 *Python bivittatus*、虎纹蛙 *Hoplobatrachus chinensis*、云豹 *Neofelis nebulosa*、大灵猫 *Viverra zibetha*、苏门羚(中华鬣羚) *Capricornis milneedwardsii*、野猪 *Sus scrofa* 等。

2 研究方法

研究方法由三部分组成,即生态源地的筛选和综合阻力面构建、生态廊道综合识别、生态节点综合识别。技术路线如图3所示。

2.1 阻力面构建

(1) 阻力因子选取

生态阻力值主要受土地覆被类型和地形坡度影响^[22]。对于大多数生物,特别是陆生物种来说,建设用地、道路和水域是物种迁移扩散的重要障碍,由于遭受强烈的人为干扰,城市建设用地(人造地表)景观阻力赋值最大;高速公路与铁路对生态斑块的阻隔作用较大,因此道路的景观阻力赋值也较大;大的水域可能更多的是对陆生物种的阻隔作用,而小的水域是动物迁徙过程中的重要水源,因此将主要水域按照距水域不同的距离分别赋予不同的景观阻力值。参考前人研究成果^[23]及综合上杭县实际情况,选取土地覆被类型、距道路距离、地形起伏度、坡度、距水域距离、NDVI 植被指数等为主要阻力因子并进行分级赋值(表1、图4)。

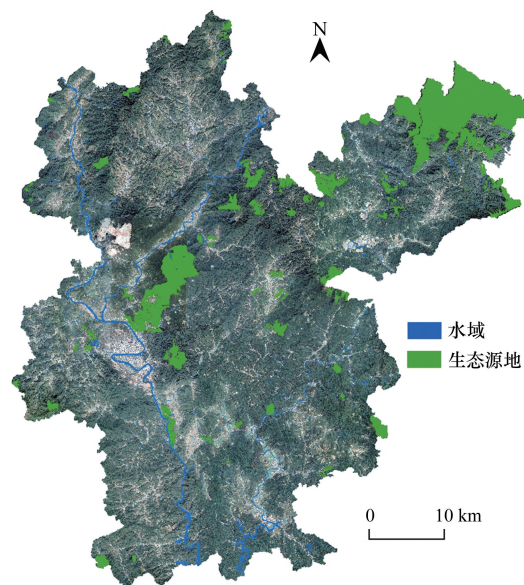


图2 上杭县主要生态源地分布

Fig.2 Distribution of main Eco-sources in Shanghang County

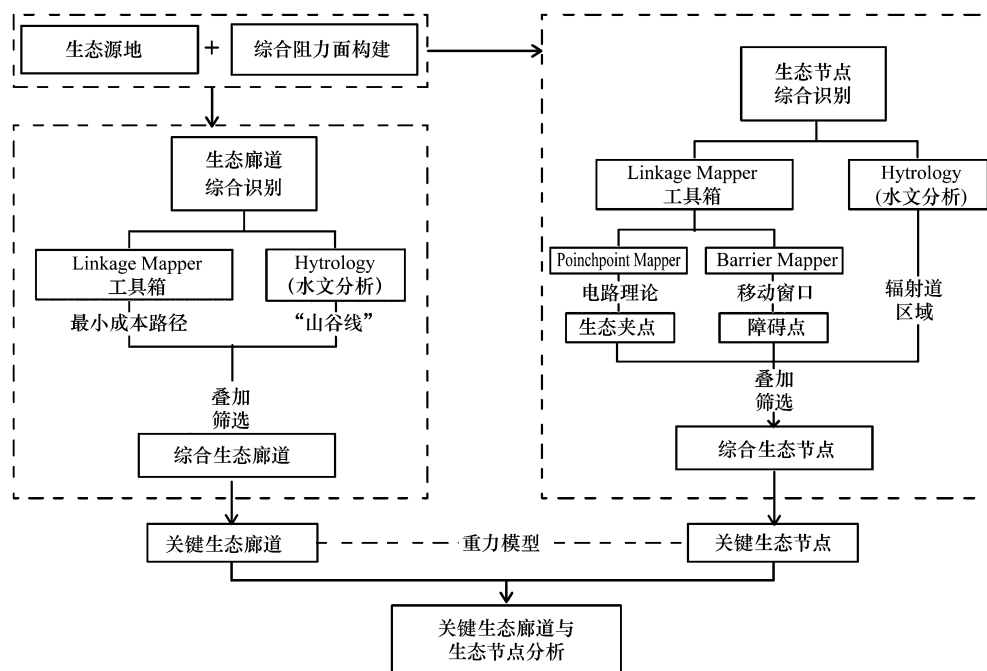


图3 技术路线

Fig.3 Technical workflow

表 1 阻力因子与阻力值
Table 1 Resistance factors and resistance values

阻力因子 Resistance factors	分级标准 Classification criteria	阻力值 Resistance value	阻力因子 Resistance factors	分级标准 Classification criteria	阻力值 Resistance value
土地覆被类型 Land cover types	森林	1	距道路距离 Distances from roads	<300 m	5
	水体、湿地	2		300—600 m	4
	灌木林	3		600—900 m	3
	草地、耕地	4		900—1500 m	2
	人造地表	5		>1500 m	1
地形起伏度 Relief	<76 m	1	坡度 Slope	3°	1
	77—126 m	2		3°—8°	2
	127—178 m	3		8°—15°	3
	179—243 m	4		15°—25°	4
	>243 m	5		>25°	5
距水域距离 Distances from water	<300 m	5	归一化植被指数 Normalized difference vegetation index (NDVI)	−0.497—0.150	5
	300—600 m	4		0.150—0.300	4
	600—900 m	3		0.300—0.450	3
	900—1500 m	2		0.450—0.600	2
	>1500 m	1		0.600—1.000	1

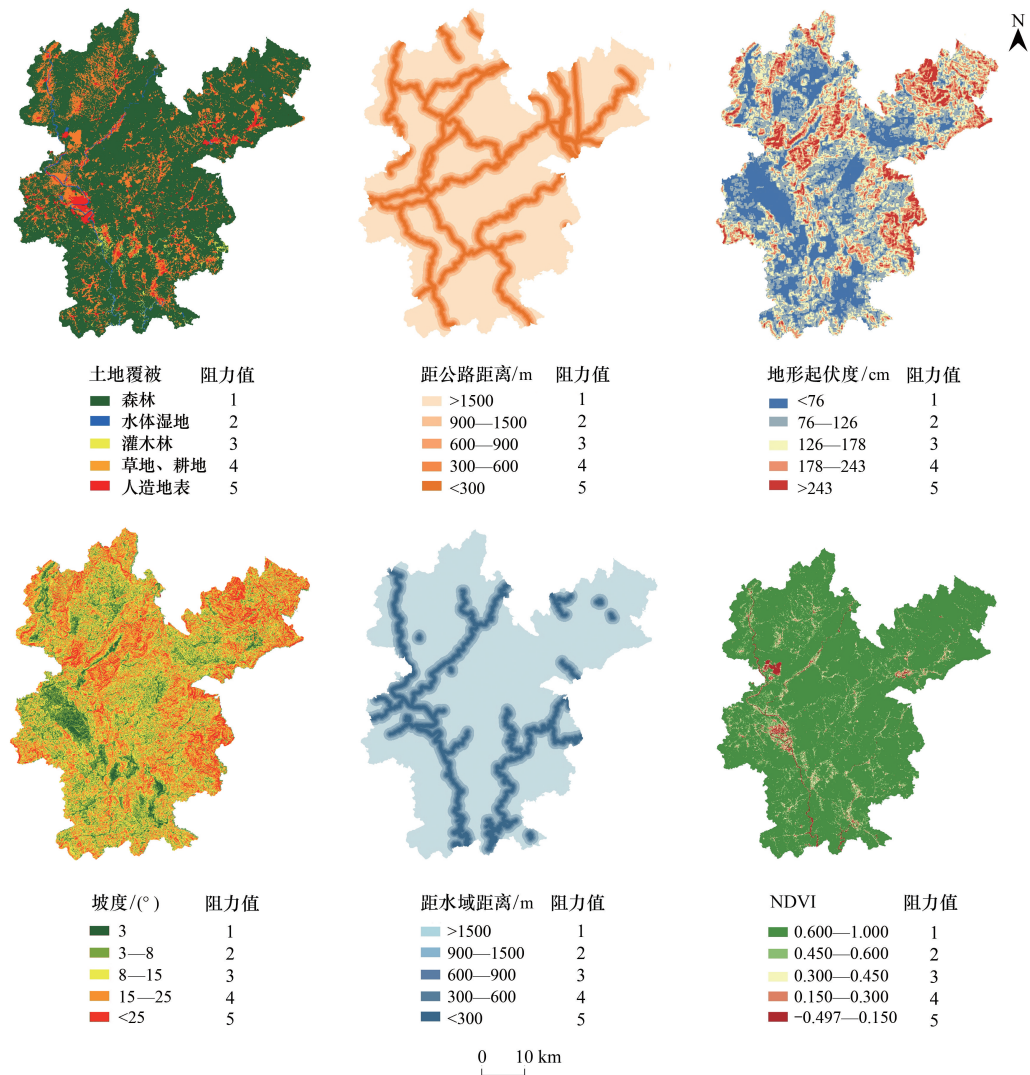


图 4 上杭县域生态阻力基面
Fig.4 Ecological resistance base surface in Shanghang County

(2)阻力值确定及综合阻力面构建

利用 ArcGIS 对阻力因子分级、标准化处理,参考文献资料及结合上杭县实际情况将其标准化为 5 级^[24—25]。目前在阻力值权重方面主要分为客观赋权法和主观赋权法两种,前者根据阻力因子反映的统计信息对阻力因子赋权,如熵权法、主成分分析法等,后者结合专业知识和专家经验综合确定指标权重,如层次分析法、灰度关联度分析法等^[26],目前多数研究采用层次分析法^[27]。然层次分析法权重的主观性较大,未对各阻力因子深入分析可能会导致结果与实际误差较大,考虑模型可行性、综合阻力面结果的客观性和准确性,本研究采用熵权法求取阻力因子权重。熵权法既可以克服主观赋权法无法避免的随机性、臆断性,还可以有效解决多指标变量间信息的重叠问题,熵权法主要运用于面板数据的指标权重求取。本文引入熵权法,将其与 GIS 空间地图代数功能相结合构建基于空间化的数据指标,确定各阻力因子权重(表 2),将 6 个阻力因子加权叠加得到综合阻力面(图 5)。

表 2 阻力因子熵权
Table 2 Weight of resistance factors

阻力因子 Resistance factors	土地覆被类型 Land cover types	距道路距离 Distance from roads	地形起伏度 Relief	坡度 Slope	距水域距离 Distance from water	NDVI
权重 Weight	0.3553	0.2246	0.0856	0.0223	0.3064	0.0058

2.2 Linkage Mapper

(1)生态廊道提取

最小成本路径(Least-cost path method, LCP)能够计算物种在源地间迁徙经过不同阻力的景观面所克服的累积阻力值。利用 Linkage Mapper(LM)工具在 ArcGIS 平台把综合阻力基面和生态源地一同导入,识别物种迁移扩散的最小成本路径,获得最小成本距离通道,即生态流通道,本研究中用于截断生态走廊的成本加权距离阈值设置为 20 km^[28]。

(2)生态节点判别

Circuitscape 程序基于电路理论对不同景观进行连接建模^[29],该模型利用电荷的随机游特性,将电路理论与运动生态学联系在一起。运用 Linkage Mapper 工具箱中的 Pinchpoint Mapper 模块调用 Circuitscape 程序将所有核心生境斑块对(包括非相邻核心生境斑块对)之间的电流进行组合,生成累积电流图,估算每个生态源地斑块与廊道的中心性值,识别最小成本廊道内的夹点(Pinch Point)位置^[30],以“夹点”电流值评估廊道和连接点对于维持整个景观连接性的重要性^[31—33]。本文利用 Pinchpoint Mapper 模块,分别选择“all-to-one”和“Pairwise”模式迭代运算。鉴于廊道宽度不会影像夹点位置与区域连通性,本研究设置 10000 m 加权成本距离作为廊道宽度,电流密度按自然断点法分为四类,提取最高值为生态“夹点”。

Barrier Mapper 是 Linkage Mapper 工具箱的组成之一,可检测到影响通道质量的重要屏障(障碍物),运行 Barrier Mapper 中运用移动窗口搜索法,把搜索窗口中心像元数值替换为源地之间最小耗费距离值,用单位最小费用距离改善值表征障碍点移除后连通性的改善情况^[34—36],数值大的区域即廊道中的障碍点(Barrier Point),修复后可增强源地间连通性。选择“Maximum”模式,经过反复阈值迭代计算,以 250 m 为半径迭代运

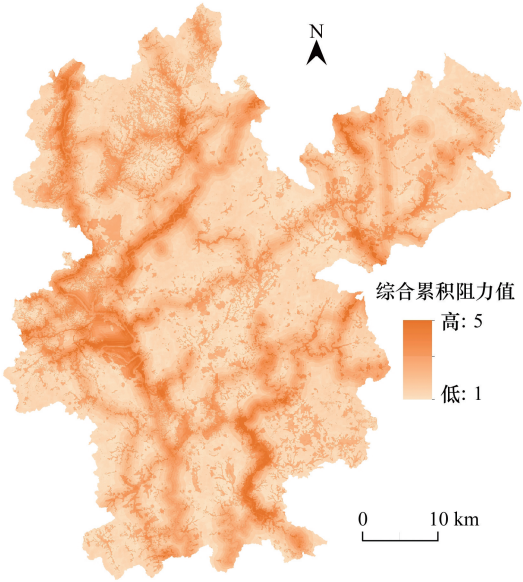


图 5 综合阻力基面
Fig.5 Comprehensive resistance base surface

算结果最佳。

2.3 水文分析原理

水文分析原理(HY)常用于基于高程 DEM 数据提取河流网络、划分流域等水文分析中。借鉴 ArcGIS 中水文分析方法,以累积耗费距离表面为基础进行一系列水文分析操作,最终形成低阻力值“河流网络”,根据“河流分级”工具最终提取低阻力“山谷线”为潜在生态廊道。水文分析中确定生态节点组成的方法主要遵循以下原则:生态节点应具备一定规模的“集水盆地”,即辐射区域;生态节点应在“河网等级”较高的“河道”、“集水盆地”出水口和“河流”交叉点,这些生态节点皆为生态廊道中的重要位置且为生态薄弱点。

以所有生态源地为对象利用 ArcGIS 中的 Cost Distance 工具分析得到研究区累积耗费距离表面,以此为基础,结合研究区实际情况,借鉴水文分析原理利用 Hydrology 工具对洼地填充、计算无洼地水流方向,汇流累积量,通过反复设定阈值,确定汇流累积的值,进一步确定源地之间最小通道即潜在生态廊道^[37]。通过阈值测试,确定 1500 处源间最小累积耗费路径的完整性(延伸性)和连通性较好,因此提取大于 1500 的值,矢量化、平滑处理后即得到物种扩散或生态流运行的低阻力“山谷线”,确定潜在生态廊道的空间位置。

2.4 重力模型

目前重力模型(Gravity model)已被广泛用于空间相互作用的相关分析中,在城市规划、人文科学、经济地理等与相互关系有关的研究中应用最多^[38-39]。生态廊道的有效性及重要性主要通过源地之间的相互作用强度来表达。运用重力模型可构建生态源地间的相互作用矩阵,从而可定量判别生态源地间的相互作用强度,并结合研究区实际情况判断生态廊道的重要性,本研究依据重要性将廊道分为关键生态廊道和一般生态廊道两类^[40]。重力模型公式如下:

$$G_{ij} = \frac{N_i N_j}{D_{ij}^m} = \frac{\left[\frac{1}{p} \times \ln(S_i) \right] \left[\frac{1}{p} \times \ln(S_j) \right]}{\left(\frac{L_{ij}}{L_{\max}} \right)^2} = \frac{L_{\max}^2 \ln(S_i S_j)}{L_{ij}^2 p_i p_j} \quad (1)$$

式中, G_{ij} 代表的是斑块 i 与 j 的相互作用强度的大小; N_i 与 N_j 代表斑块 i 与 j 的权重系数大小; D_{ij} 代表斑块 i 与 j 的潜在廊道标准化阻力值大小; p_i 表示斑块 i 的整体阻力值大小; S_i 为斑块 i 的面积; L_{ij} 表示斑块 i 与 j 的潜在廊道的累积阻力值数值; $L_{\max}$ 代表区域内所有廊道的阻力值最大数值。

3 结果与分析

3.1 基于 Linkage Mapper 提取生态廊道和节点

3.1.1 生态廊道提取

基于 Linkage Mapper 工具箱的 Linkage Pathways Tool 工具识别生态流通道,生态流通道带有一定宽度信息,可为后期生态廊道规划宽度提供一定的参考。生态流通道映射出生态廊道 187 条(图 6),实现了每个源地均有廊道被连接且形成网络回路。

3.1.2 生态节点判别

在 Pinchpoint Mapper 工具中使用多对一(all-to-one)模式调用 Circuitscape,鉴于廊道宽度不会影像夹点位置与区域连通性,本研究设置加权成本距离 10 km 为廊道宽度,获得“all-to-one”电流密度图,进而提电流高密度区域为夹点区域和生态节点,43 个。在 Pinch point Mapper 工具中使用成对模式(Pairwise)模式调用 Circuitscape,设置加权成本距离 10 km 为廊道宽度,获得“Pairwise”模式电流密度图,进而提取电流高密度区域为“夹点”区域和生态节点(图 7),共 52 个。

利用 Barrier Mapper 对源间生态廊道进行障碍点分析。可通过两种设定分别检测改进到得分高的节点与原始连接相对较高的节点,即未选定改进得分相对于 LCD(least-cost distance)百分比和选定改进得分相对于 LCD 百分比,分别提取生态“障碍点”40 个、15 个,共 55 个生态障碍点即生态节点(图 8)。

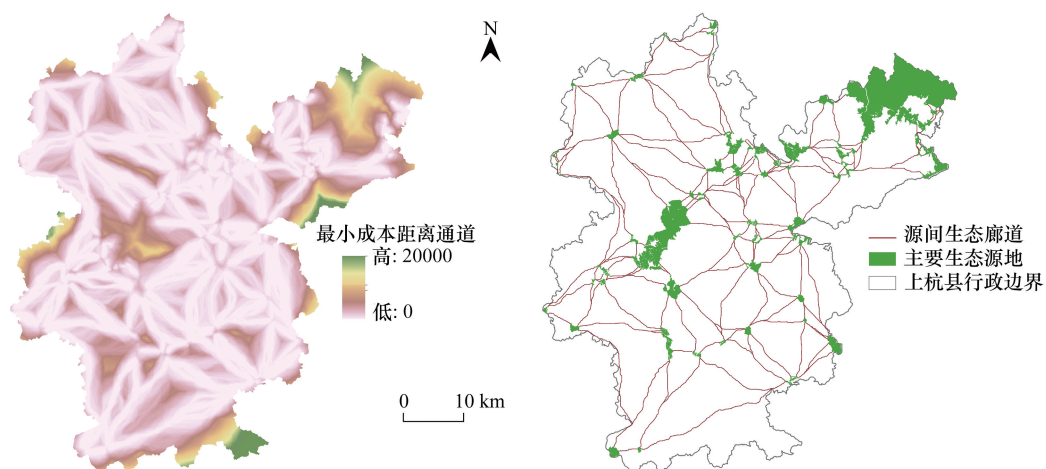


图6 Linkage Mapper 识别生态廊道分析

Fig.6 Identify eco-corridors analysis of Linkage Mapper

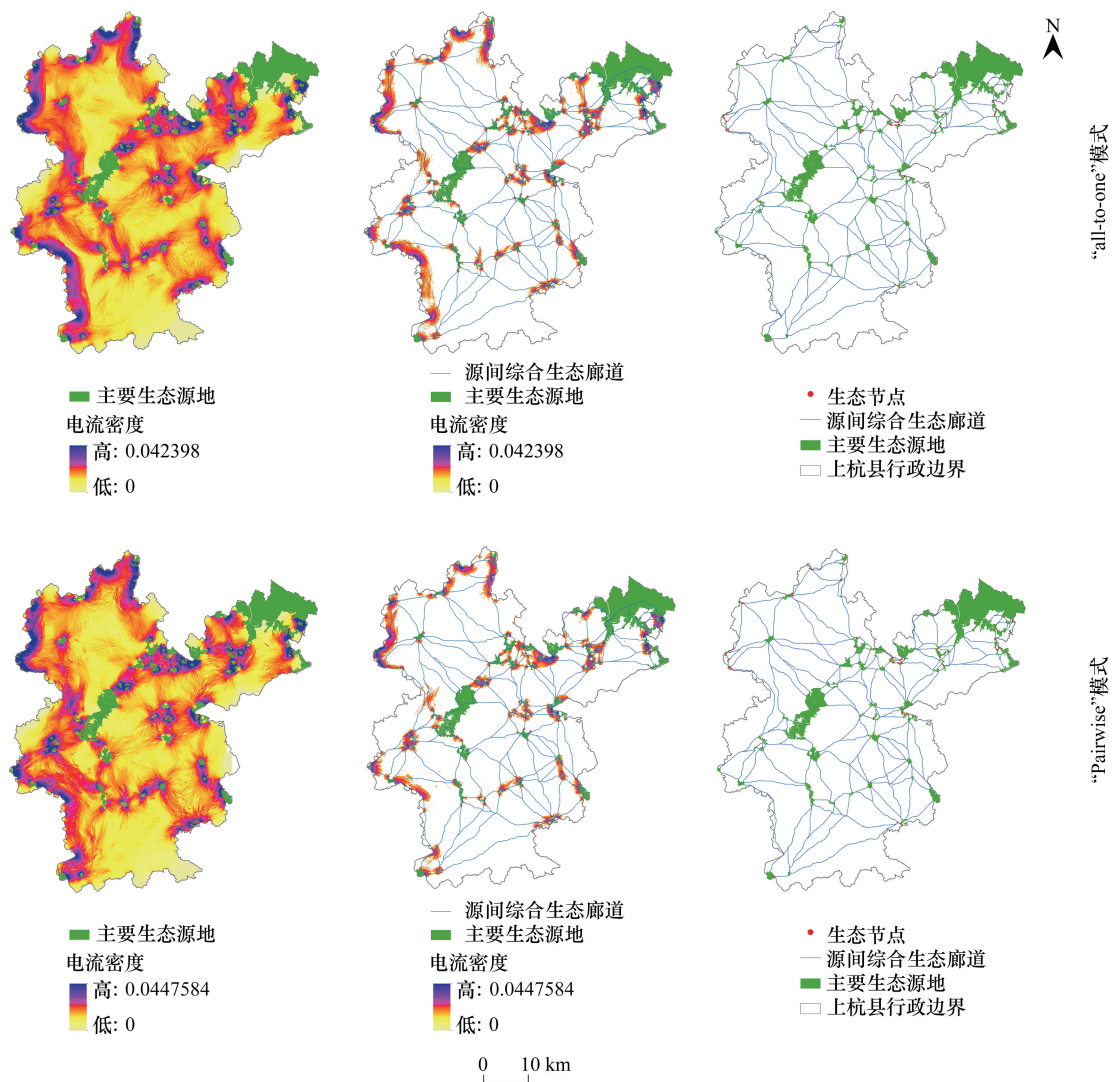


图7 基于 Pinpoint Mapper 生态节点分析

Fig.7 Eco-nodes analysis based on Pinpoint Mapper

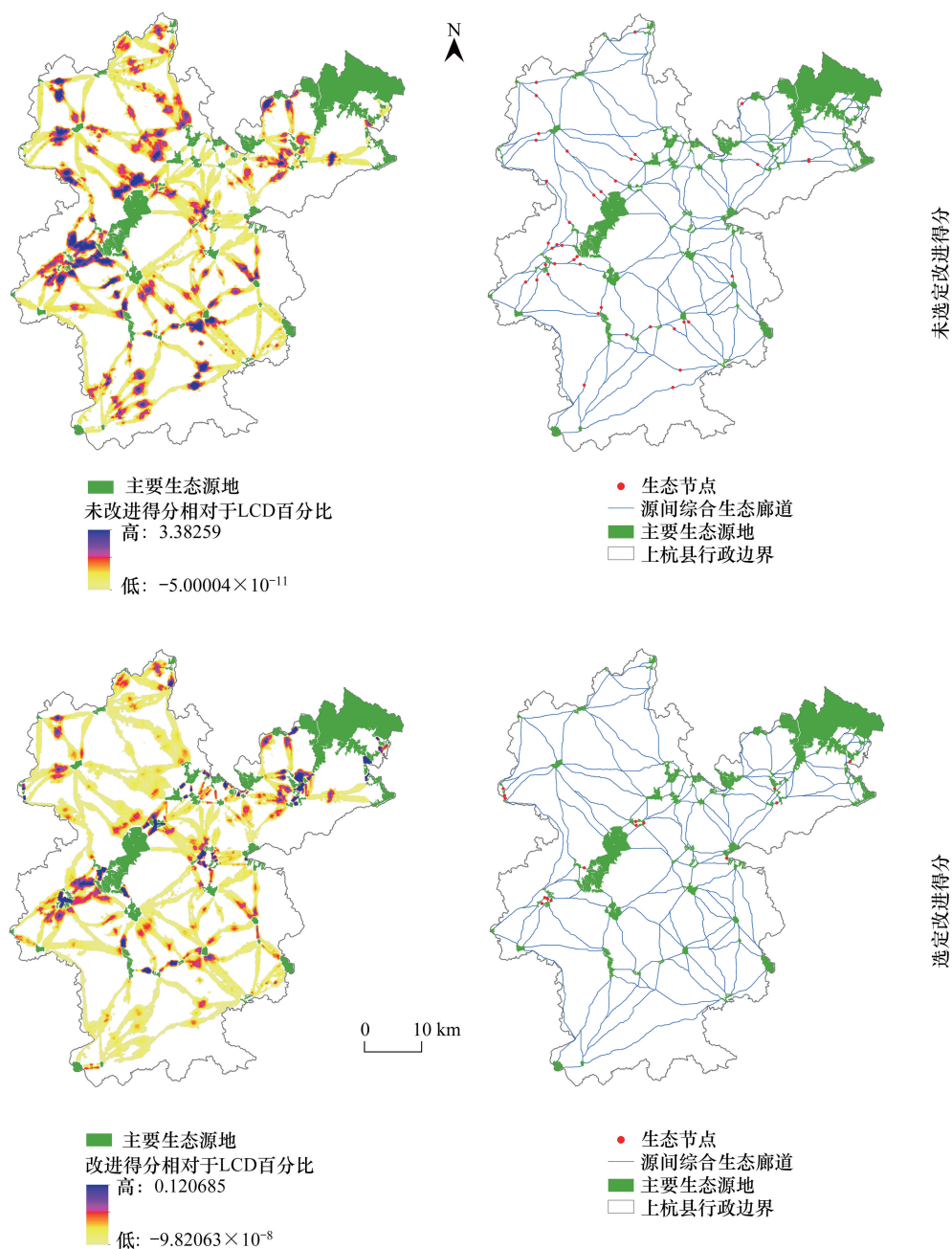


图8 基于 Barrier Mapper 生态节点分析

Fig.8 Eco-nodes analysis based on Barrier Mapper

LCD: 最小耗费距离 Least-cost distance

3.2 基于水文分析原理提取生态廊道和节点

3.2.1 生态廊道提取

基于生态源地之间的累积耗费距离表面,运用水文分析原理提取连接性较好、较完整的“山谷线”,共提取240条生态廊道(图9),生态廊道分布多呈“西北-东南”向,这与累计耗费距离的阻力值空间分布基本一致。

3.2.2 生态节点判别

基于水文分析原理从低阻力值路径中提取辐射道,即除了两“生态源地”之间的生态廊道,以某个“源地”为中心向外辐射的所有低阻力谷线。生态节点即低阻力路径的交汇点或低阻力和高阻力的相交处,而某个“源地”

即生态节点,它将零散的斑块连接起来,并对生态流的运行起关键作用^[41],共提取生态节点 133 个(图 10)。

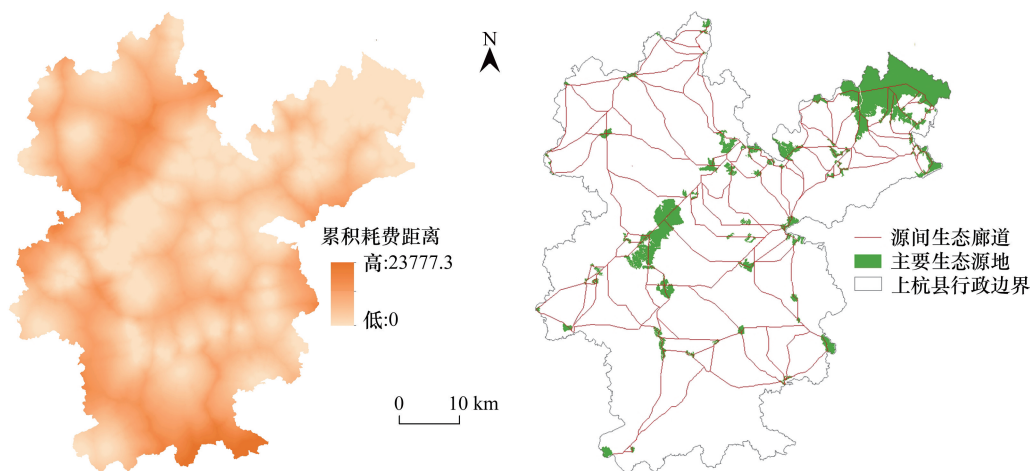


图 9 基于水文分析原理生态廊道识别分析

Fig.9 Eco-corridors identification analysis based on hydrologic analysis principle

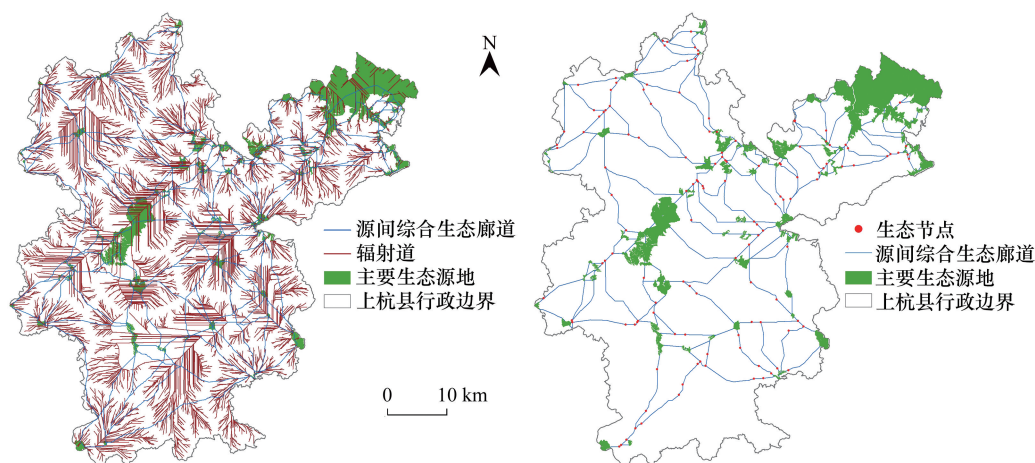


图 10 基于水文分析原理生态节点识别分析

Fig.10 Eco-nodes identification and analysis based on the principle of hydrological analysis

3.3 生态廊道与生态节点综合识别

3.3.1 关键生态廊道提取

在 Linkage Mapper 获取的生态廊道的基础上,叠加水文分析原理所提取的生态廊道互为补充、验证,增强生态廊道的连通性,进而根据上杭县实际情况删除冗杂、多余廊道后提取最终综合生态廊道分布图(图 11),共提取生态廊道 197 条。利用重力模型,分析源地间相互作用强度,形成重力模型重要值矩阵,根据上杭县主要生态源地间的相互重要值矩阵将源间生态廊道分为两级,重要值大于 500000 的生态廊道为关键生态廊道,其余为一般生态廊道。综合水文分析原理获得的辐射道,根据源地间的相互重要程度及生态廊道的分布,综合考虑关键生态廊道连通性、去除冗余的辐射道选取剩余辐射道作为关键生态廊道,共同构成上杭县生态廊道等级(图 12),关键生态廊道共 103 条(含辐射道 30 条),一般生态廊道 124 条。

3.3.2 关键生态节点提取

从保护现有生态节点和改善现有源地间连通性两个角度出发,将水文分析判别的生态薄弱点和 Linkage Mapper 工具箱中 Pinchpoint Mapper 和 Barrier Mapper 识别的有效改善区域、连通性较好的生态夹点和生态障

碍点叠加综合共得到 283 个生态节点(图 13)。结合上杭县关键生态廊道与潜在生态廊道分布,基于前人的研究^[42]将位于关键生态廊道与关键、潜在生态廊道的交点及关键生态廊道这点的生态节点作为关键生态节点;当多个关键生态节点重合时选取其中之一作为关键生态节点,剩余作为一般生态节点,最终提取关键生态节点 97 个,一般生态节点 186 个(图 14)。

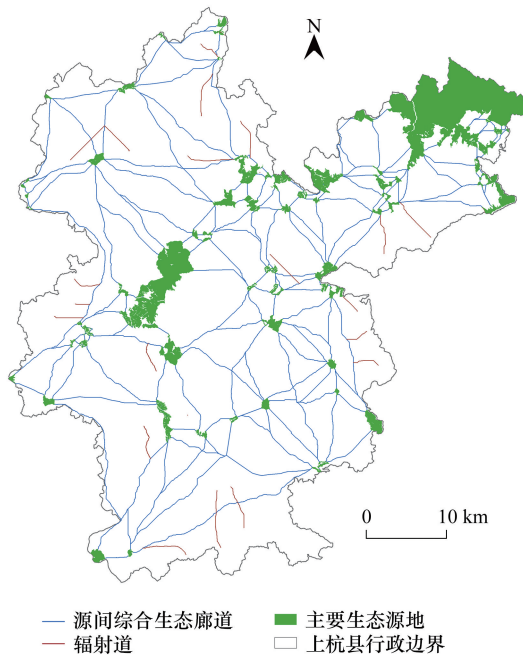


图 11 综合潜在生态廊道

Fig.11 Comprehensive potential eco-corridors

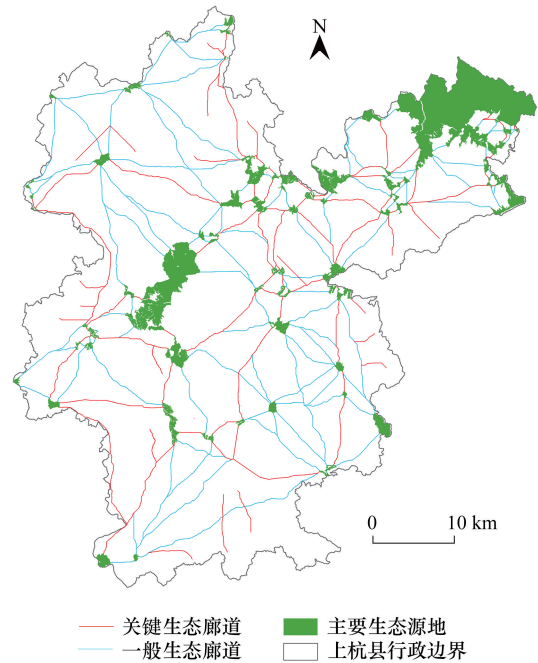


图 12 生态廊道等级划分

Fig.12 Classification of eco-corridors

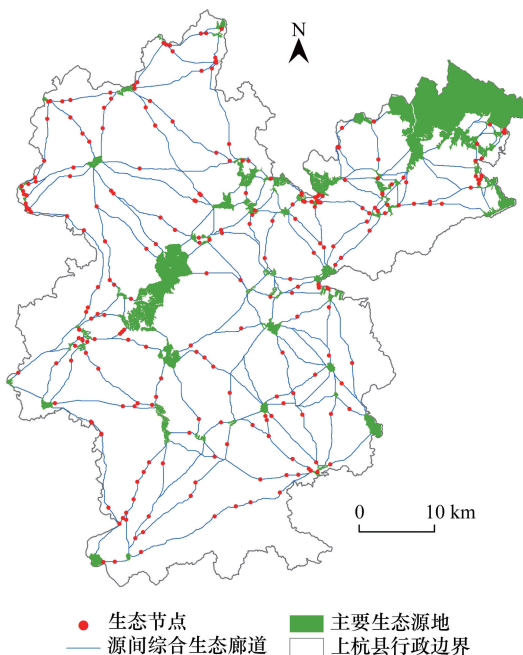


图 13 综合生态节点

Fig.13 Integrated eco-nodes

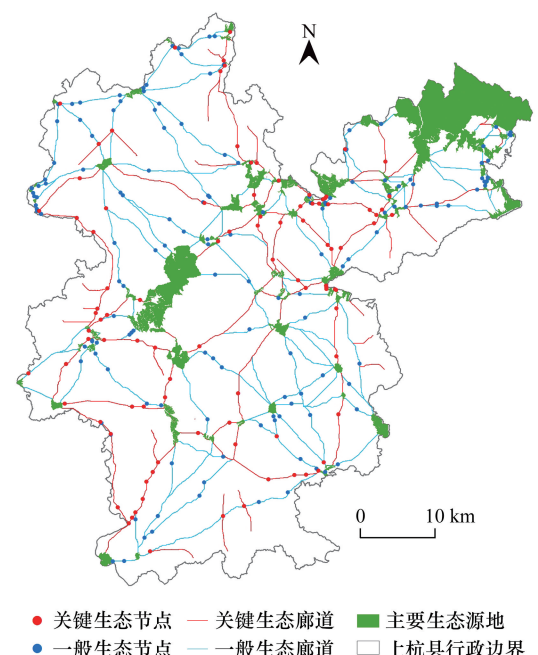


图 14 生态节点等级划分

Fig.14 Classification of eco-nodes

3.3.3 关键生态廊道与关键生态节点分析

(1) 关键地段分析将阻力面栅格利用自然断点法分为低阻力、较低阻力、中度阻力、较高阻力和高阻力 5 个级别,同时将关键生态廊道与关键生态节点进行叠加,结合生态源地分布,得到研究区关键地段分布图(图 15)。由图可看出,关键生态廊道分布受生态源地空间分布的影响主要集中在上杭县的北部、东北部和西部,同时有辐射道存在,而这些区域也是高阻力和较高阻力较为集中的区域;关键生态廊道加强了生态源地与周围基质的物质能量交流,同时也减缓了生态源地空间上分布不均的问题,这在一定程度上可增强上杭县西北、东南部的绿色生态建设,为潜在生态源地的连接提供可能性。关键生态节点在空间上分布相对均匀,与生态源地分布较一致在东北、西南及西北分布较稀疏,这也说明在源地分布密集的区域需加强生态节点建设,降低阻力值,增加生态节点促进连通性的作用。此外,关键生态节点多集中在生态源地周边,也说明了上杭县自然保护区、国家森林公园、湿地保护区等范围应综合考虑关键生态廊道和关键生态节点的分布重新界定保护范围,以更好的实现源地间的物质、能量交换。

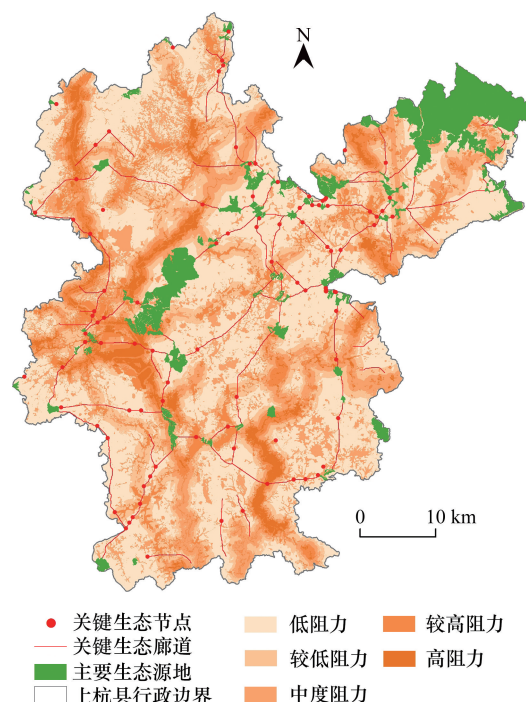


图 15 关键地段分布图

Fig.15 Distribution of key eco-section

(2) 土地覆被构成分析

关键生态廊道是生态源地之间进行物质、能量等信息交换时所耗费累积阻力最小的通道,是关键生态源地间最有效的连接。生态廊道一般都有一定的宽度,适当的廊道宽度可增加其连通性。选用 30 m、60 m、90 m、150 m、300 m、500 m 进行缓冲区分析,获取到不同廊道宽度下的关键生态廊道的土地覆被类型组成(图 16)。由图 16 所示,在 30—500 m 宽度时,森林的占比均大于 80%,但随着廊道宽度的增加森林面积占比逐渐下降,从 88.05% 下降到 81.1%;耕地、草地、人造地表和灌木地的面积占比随着廊道的加宽而增大,其中耕地和草地的增加趋势较大,分别从 5.52%、3.85% 增加到 9.44%、5.76%,而人造地表、灌木地的增幅不大;水体随着廊道宽度的加大其面积占比变化微小,廊道宽度加大到 500m 时才有 0.002% 的湿地。由此说明,森林、耕地和草地等土地覆被类型在关键生态廊道中占主要地位。

关键生态节点是提升生态廊道连接性的重要战略点,同理生态廊道具有一定的宽度才能更好的发挥其促进连接作用。与生态廊道保持一致选用 30 m、60 m、90 m、150 m、300 m、500 m 进行缓冲区分析,获取到不同廊道宽度下的关键生态节点的土地覆被类型组成(图 17)。由图所示,结果与生态廊道一致,随着廊道的加宽森林的面积占比虽从 80.87% 下降到 77.08%,但仍在所有土地覆被类型中占绝对优势;耕地、草地、人造地表和灌木地的面积占比随着廊道的加宽而逐渐增大,其中耕地和草地的增加趋势较大,分别从 9.89%、4.29% 增加到 11.48%、6.25%,而人造地表和灌木地增幅不大;水体的面积占比却随着廊道宽度的加宽从 2.31% 下降到 1.78%。由此说明,关键生态节点的土地覆被构成占比及趋势与生态廊道保持一致,即森林、耕地、草地为主要土地覆被类型构成。

综合关键生态廊道和关键生态节点土地覆被类型组成比例可知,森林、耕地、草地为其主要土地覆被类型构成,在 30—500 m 宽度设定下三类要素的占比和均大于 90%,当廊道预设宽度增加时其占比和会降低,但幅度不大。为了使区域生态廊道连通性更好,免受外界影响,优化关键生态廊道和关键生态节点所在的森林、灌木地、草地等自然要素生境质量,降低景观阻力,促进生态源地间物质和能量流交换,维护区域生物多样性;增

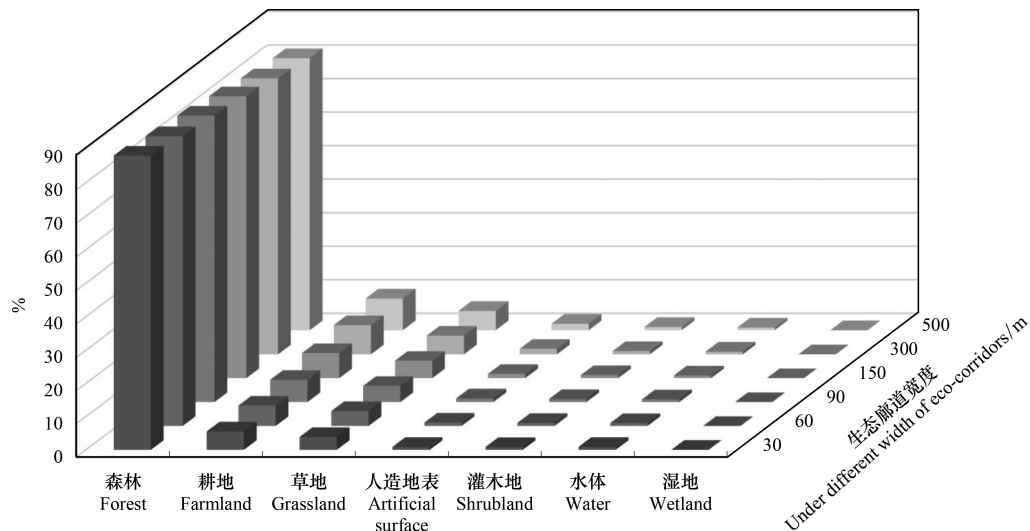


图 16 不同生态廊道宽度下土地覆被类型构成

Fig.16 Land cover types composition under different width of eco-corridors

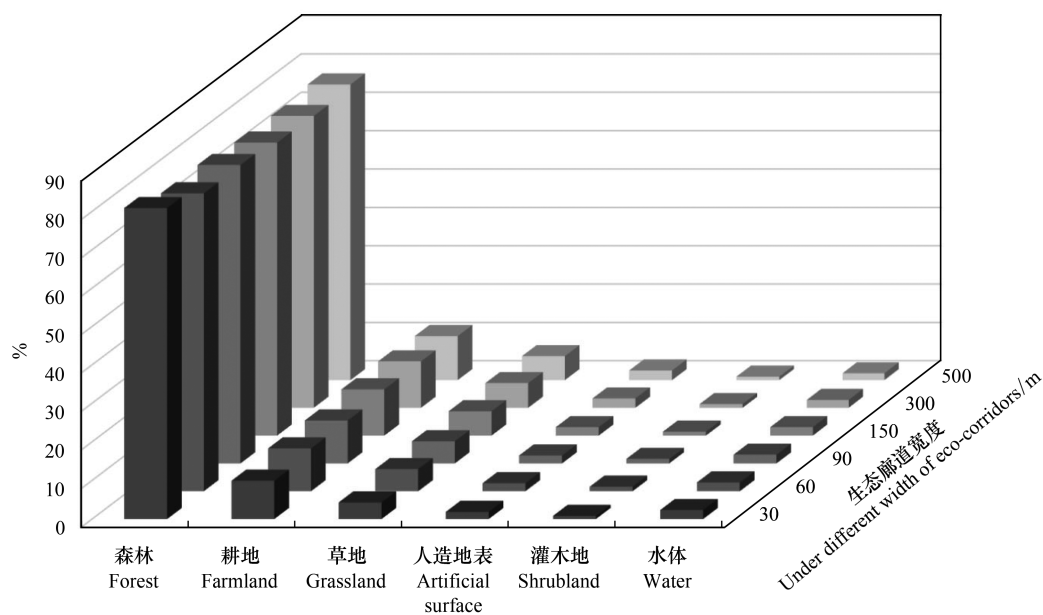


图 17 不同生态节点宽度下土地类型构成

Fig.17 Land cover types composition under different width of eco-nodes

强水体和道路等阻隔性要素连通能力,如架桥或修路时需考虑生物迁徙通道,强化其生态建设,最大程度降低其景观阻力;随着缓冲区宽度的增加,面积占比增加的区域将成为生态廊道和生态节点建设与改善的关键点;此外在保护基本农田的前提下加强耕地防护带建设,而在人造地表区域保证一定规模的绿化隔离带并且在生态空间建设中保证生态廊道的连通性和生态节点的“踏脚石”作用。

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1)在生态网络及生态安全格局构建及优化研究中,生态源地的识别、生态廊道的提取和生态节点的判

别都是关键性问题,目前本研究仅着眼于生态廊道的提取和生态节点的判别研究思路和方法,未进行生态源地的综合识别,而综合、多功能生态源地的空间分布在一定程度上会影响生态廊道和生态节点的空间分布。福建省上杭县林地面积占国土空间面积的 76.78%,大面积的林地为生物栖息、迁徙等生态过程提供了良好的生境基础,虽然目前的生态源地基本覆盖了上杭县境内保护生物的分布区域及活动范围,但还是会对物种迁徙运动及物种保护区范围划定有一定的影响。

(2)关键生态廊道和关键生态节点土地覆被类型构成分析主要目的在于分析其空间分布及指明生态规划建设方向。根据上杭县土地覆被类型构成分析结果,虽然耕地面积占比相对林地较少,但基于目前国土空间规划及基本农田保护条例,耕地是否可纳入生态廊道和生态节点建设还需进一步探讨。

(3)综合 Linkage Mapper 工具箱分析模块提取的生态廊道、生态“夹点”、生态“障碍点”不仅可为构建生态网络提供新的思路和研究方法,而且其分析结果可为多物种迁徙运动及物种保护区的范围划定及建设提供科学参考。根据水文分析的“源-汇”原理,物种从趋于向低阻力值方向迁徙,生成的“主河道”和辐射出的支流形成能量流“盆域”,这也为物种迁移及保护提供了一种有效的补充。

4.2 结论

在结合上杭县实际与前人研究结果的基础上,构建综合阻力面,进而借助 GIS 技术,运用水文分析原理和电路理论的研究思路和方法,以福建省上杭县为实证进行生态廊道和生态节点识别研究,为区域生态网络、生态安全格局构建及优化研究提供新的研究思路和研究方法,研究结论如下:

(1)基于陆生动物迁移特征,土地覆被类型、距道路距离、地形起伏度、坡度、距水域的距离、NDVI 植被指数为主要阻力因子,其中土地覆被类型、距水域距离和距道路距离对综合阻力面影响较大;

(2)运用水文分析原理和电路理论的连接度模型,叠加筛选后共提取 240 条生态廊道,运用重力模型对生态廊道的有效性及重要性进行判别并结合水文分析提取的辐射道提取关键生态廊道 103 条(含辐射道 30 条),一般生态廊道 124 条;

(3)运用水文分析原理和 Linkage Mapper 的 Pinchpoint Mapper 和 Barrier Mapper 模块共提取 283 个生态节点,结合关键生态廊道的分布及廊道交叉点分布提取关键生态节点 97 个,一般生态节点 186 个;

(4)关键生态廊道和关键生态节点主要集中在高阻力和较高阻力值集中的区域,需在这些区域加强生态建设,降低阻力值以促进生态网络连通性;同时关键生态节点多分布在生态源地周边,为实现源地间物质、能量交换建议根据关键生态节点分布重新界定保护区范围;

(5)对关键生态廊道、关键生态节点缓冲区土地覆被类型构成进行分析,森林、耕地和草地等土地覆被类型占比具有绝对优势,尤其是林地景观,在生态建设中需优化其生境质量降低景观阻力,同时增强水体和道路的连通性如架桥或修路时需考虑生物迁徙通道,强化其生态建设最大程度降低景观阻力;随着廊道宽度的增加,面积占比增加的区域将成为生态廊道和生态节点建设与改善的关键点。

参考文献(References):

- [1] Bennett A F. Habitat corridors and the conservation of small mammals in a fragmented forest environment. *Landscape Ecology*, 1990, 4(2): 109-122.
- [2] 邓金杰, 陈柳新, 杨成韞, 徐志博. 高度城市化地区生态廊道重要性评价探索——以深圳为例. *地理研究*, 2017, 36(3): 573-582.
- [3] Brose U. Improving nature conservancy strategies by ecological network theory. *Basic and Applied Ecology*, 2010, 11(1): 1-5.
- [4] 于成龙, 刘丹, 冯锐, 唐权, 郭春玲. 基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建. *生态学报*, 2021, 41(1): 290-301.
- [5] 郭家新, 胡振琪, 李海霞, 刘金兰, 张雪, 赖小君. 基于 MCR 模型的市域生态空间网络构建——以唐山市为例. *农业机械学报*; 1-17. (2021-01-19) [2021-01-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20210118.1907.008.html>.
- [6] 戴璐, 刘耀彬, 黄开忠. 基于 MCR 模型和 DO 指数的九江滨水城市生态安全网络构建. *地理学报*, 2020, 75(11): 2459-2474.
- [7] 李瑾, 金晓斌, 孙瑞, 顾铮鸣, 韩博, 周寅康. 江南水网区域复合型生态网络构建初探——以常州市金坛区为例. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(11): 2427-2435.
- [8] Cao Y, Yang R, Carver S. Linking wilderness mapping and connectivity modelling: a methodological framework for wildland network planning.

- Biological Conservation, 2020, 251: 108679.
- [9] Wang C X, Yu C Y, Chen T Q, Feng Z, Hu Y C, Wu K N. Can the establishment of ecological security patterns improve ecological protection? An example of Nanchang, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 740: 140051.
- [10] 张远景, 俞滨洋. 城市生态网络空间评价及其格局优化. *生态学报*, 2016, 36(21): 6969-6984.
- [11] 于强, 岳德鹏, Yang D, 马欢, 张启斌, 尹波. 基于 BCBS 模型的生态节点布局优化. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 330-336, 329.
- [12] 乌尼图, 岳德鹏, 张亦超, 曹睿, 尚书. 基于 3S 技术的城乡区域生态节点的识别与分析. *环境科学与技术*, 2014, 37(2): 184-189.
- [13] 李静, 张莹莹, 朱永明. 基于景观安全格局的北戴河新区生物多样性保护研究. *水土保持研究*, 2017, 24(1): 305-310, 316-316.
- [14] 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.
- [15] 潘竞虎, 刘晓. 基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化——以张掖市甘州区为例. *应用生态学报*, 2015, 26(10): 3126-3136.
- [16] 陈小平. 鄱阳湖生态经济区生态网络构建研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2016.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 王原, 何成, 刘荣国, 吴洪斌, 陈骁强. 宁夏沙坡头自然保护区鸟类景观生态安全格局构建. *生态学报*, 2017, 37(16): 5531-5541.
- [20] 潘竞虎, 刘晓. 疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建. *生态学杂志*, 2016, 35(3): 791-799.
- [21] 张美丽, 齐跃普, 张利, 陈影, 周亚鹏, 陈亚恒, 王树涛. 基于 Linkage Mapper 与粒度反推法的太行山中北段生态节点识别与分析——以河北省阜平县为例. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(12): 1569-1578.
- [22] 杨天荣, 匡文慧, 刘卫东, 刘爱琳, 潘涛. 基于生态安全格局的关中城市群生态空间结构优化布局. *地理研究*, 2017, 36(3): 441-452.
- [23] 魏伟. 基于 CLUE-S 和 MCR 模型的石羊河流域土地利用空间优化配置研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [24] 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.
- [25] 陈竹安, 况达, 危小建, 张立亭. 基于 MSPA 与 MCR 模型的余江县生态网络构建. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(8): 1199-1207.
- [26] 庞雅颂, 王琳. 区域生态安全评价方法综述. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(S1): 340-344.
- [27] 张玥, 许端阳, 李霞, 张晓宇, 王小博, 王绍强. 中-老交通走廊核心区生态廊道构建与关键节点识别. *生态学报*, 2020, 40(6): 1933-1943.
- [28] 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.
- [29] 刘世梁, 侯笑云, 尹艺洁, 成方妍, 张月秋, 董世魁. 景观生态网络研究进展. *生态学报*, 2017, 37(12): 3947-3956.
- [30] Koen E L, Bowman J, Sadowski C, Walpole A A. Landscape connectivity for wildlife: development and validation of multispecies linkage maps. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5(7): 626-633.
- [31] Carroll C, McRae B H, Brookes A. Use of linkage mapping and centrality analysis across habitat gradients to conserve connectivity of gray wolf populations in western north America. *Conservation Biology*, 2012, 26(1): 78-87.
- [32] 王慧. 县域生态安全格局关键地段识别研究——以沛县为例[D]. 北京: 中国矿业大学, 2018.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 王回茜, 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.
- [36] 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.
- [37] 朱军, 李益敏, 余艳红. 基于 GIS 的高原湖泊流域生态安全格局构建及优化研究——以星云湖流域为例. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(8): 1237-1250.
- [38] 黄浦江. 城市绿道网络识别、评价与优化[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [39] 刘世峰, 赵洪武. 重力模型的机理分析. *数量经济技术经济研究*, 2000, 17(1): 56-58.
- [40] 许峰, 尹海伟, 孔繁花, 徐建刚. 基于 MSPA 与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建. *生态学报*, 2015, 35(19): 6425-6434.
- [41] 李潇然, 李阳兵, 王永艳, 邵景安. 三峡库区县域景观生态安全格局识别与功能分区——以奉节县为例. *生态学杂志*, 2015, 34(7): 1959-1967.
- [42] 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.