引文格式：王锦,孙幼政,杨梅焕,等. 招远市国土空间生态保护修复优先区识别[J]. 地理空间信息, 2024, 22(7): 22-26. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.07.005

招远市国土空间生态保护修复优先区识别

王　锦[1]，孙幼政[2*]，杨梅焕[3]，陈宝强[4]
（1. 西安翻译学院，陕西 西安 710105；2. 自然资源部第一航测遥感院，陕西 西安 710054；
3. 西安科技大学 测绘科学与技术学院，陕西 西安 710054；4. 中煤西安设计工程有限责任公司，陕西 西安 710054）

摘 要：以招远市为研究对象，基于生境质量和生态系统服务价值，结合景观连通性综合识别生态源地。通过最小累积阻力模型构建综合阻力面，利用电路理论提取生态廊道和生态关键点，进而构建沿海资源富集区市域生态安全格局，并提出针对性的修复建议。结果表明：①招远市生态源地面积为23.11 km^2，占研究区总面积的1.6%；②共识别出生态廊道28条，生态夹点25个，生态障碍点37个，生态断裂点31个；③基于构建的生态安全格局，提出生态保护优化策略。研究结果可为中小型市域生态安全格局构建提供理论支撑和现实参考。

关键词：生态安全格局；生态源地；最小累计阻力模型；电路理论；生态廊道
中图分类号：TU983　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）07-0022-05

Identification of Priority Area of Ecological Protection and Restoration in Zhaoyuan City

WANG Jin[1], SUN Youzheng[2], YANG Meihuan[3], CHEN Baoqiang[4]
(1. Xi'an Fanyi University, Xi'an 710105, China;
2. The First Institute of Photogramemetry and Remote Sensing, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China;
3. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
4. China Coal Xi'an Design Engineering Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Taking Zhaoyuan City as the research object, based on ecological environment quality and ecosystem service value, we combined with landscape connectivity to comprehensively identify ecological source area. We used MCR model to construct the comprehensive resistance surface, and used the circuit theory to extract the ecological corridor and ecological key points at first. Then, we constructed the ecological security pattern of coastal resource-rich area, and put forward the targeted restoration suggestions. The results show that ①the ecological source area of Zhaoyuan City is 23.11 km^2, accounting for 1.6% of the total area. ②28 ecological corridors, 25 ecological pinch points, 37 ecological barrier points, and 31 ecological fracture points are identified. ③Based on the constructed ecological security pattern, ecological protection optimization strategy is proposed. The research results can provide theoretical support and practical reference for the construction of ecological security pattern in small and medium-sized cities.

Key words: ecological security pattern, ecological source area, MCR model, circuit theory, ecological corridor

1　生态安全格局研究现状

随着城镇化进程的快速推进，出现了生态用地减少、生境质量退化、景观破碎化加剧、生态系统服务功能降低、生物多样性功能丧失等生态环境问题，严重威胁区域的可持续发展[1]。党的十九大报告提出将“实施重要生态系统保护和修复重大工程，优化生态安全屏障体系，构建生态廊道和生物多样性保护网络”[2]作为建设美丽中国的重要任务之一。构建生态安全格局已成为我国政府保障区域经济可持续发展、协调生态与经济关系的一项重要政策以及国土空间开发保护的三大战略格局之一[3]。其作为国内生态与人居环境领域的研究热点，具有重要的研究价值[4]。生态廊道是国土空间生态保护修复优先区识别的核心，近年来修复关键区域的研究又引入了生态夹点、生态障碍点和生态断裂点。识别生态廊道的前提是提取生态源地和构建阻力面。生态源地的提取方法主要包括直接识别和综合识别两种[5]，直接识别法的筛选标准较单一，综合识别法则结合多种方法来确定生态源地，具有客观性。本文综合选取生境质量、生态系统

收稿日期：2023-03-28。
项目来源：2023年度陕西省哲学社会科学研究专项青年项目（2023QN0307）；国家自然科学基金资助项目（41501571）。
第一作者简介：王锦（1992—），硕士，讲师，从事地理空间信息技术工作，E-mail：794342644@qq.com。
通信作者：孙幼政（1990—），硕士，工程师，从事地理空间信息技术工作，E-mail：972581573@qq.com。

服务价值和景观连通性3个指标来识别生态源地。基于景观连通性的形态学空间格局分析[6]可弥补以往研究忽略斑块连通性的缺陷。阻力面的构建需要考虑影响生态过程的多个影响因子，注重人类活动对生态阻力系数的影响[7]，本文选取6个阻力因子构建招远市综合阻力面。现阶段生态廊道通常采用最小累积阻力模型[8]识别，但该模型不能识别廊道中的“夹点”“障碍点”等生态关键点。McRae将物种在景观中的扩散过程类比于电子随机游走的过程，用电路理论[9]来解决景观生态学问题，已成为识别生态廊道和关键区域的有效途径之一[10]。因此，电路理论构建生态安全格局逐渐被更多学者采用。

2　研究区概况和数据来源

2.1　研究区概况

招远市（37°05′~37°33′ N、120°08′~120°38′ E）位于山东省烟台市西部地区；土地总面积为1 432.31 km^2，其中山区面积为471.23 km^2，丘陵区面积为550.01 km^2，平原区面积为328 km^2，洼地面积为83.07 km^2。

2.2　数据来源

本文采用的数据包括：2018年土地利用矢量数据，来源于招远市国土资源局；空间分辨率为30 m×30 m的DEM数据，来源于地理空间数据云平台（http://www.gscloud.cn）；招远市道路交通等基础矢量数据，来源于OpenStreetMap数据平台（http://www.openstreetmap.org）；社会经济数据来源于2019年《招远统计年鉴》。

3　研究方法

3.1　生态源地识别

本文采用生境质量、生态系统服务价值和景观连通性[11]3个指标识别生态源地，并对3种结果等权重叠加，选取级别较高且面积大于0.4 km^2的区域作为生态源地。

1）生境质量评估。生境质量是分析人类活动产生的威胁因子对土地利用/覆被斑块的影响。本文运用InVEST模型中的Habitat Quality模块评估生境质量，威胁因子属性和敏感性中的参数设置主要参考InVEST模型使用手册及其同类相关文献[11-12]，具体见表1、2。

表1　威胁因子属性表

威胁因子	最大胁迫距离/km	权重	空间衰减类型
耕地	0.5	0.4	Linear
城镇用地	6	1.0	Exponential
农村居民点	4	0.6	Exponential
采矿用地	5	0.8	Exponential
交通用地	3	0.6	Linear
其他用地	2	0.3	Linear

表2　各种生境类型的生境得分及其对不同威胁因子的相对敏感性

地类名称	生境适宜度	耕地	城镇用地	农村居民点	采矿用地	交通用地	其他用地
水浇地	0.45	0.3	0.5	0.4	0.35	0.35	0.3
旱地	0.3	0.2	0.5	0.3	0.3	0.3	0.25
果园	0.6	0.4	0.5	0.4	0.55	0.4	0.45
其他园地	0.7	0.5	0.6	0.5	0.65	0.5	0.5
有林地	0.95	0.7	0.65	0.55	0.8	0.7	0.5
灌木林地	1	0.8	0.7	0.6	0.85	0.8	0.45
其他林地	0.9	0.9	0.8	0.6	0.75	0.65	0.4
其他草地	0.8	0.7	0.7	0.6	0.75	0.6	0.55
河流水面	1	0.7	0.9	0.8	0.9	0.85	0.5
水库水面	0.85	0.7	0.8	0.7	0.8	0.7	0.6
坑塘水面	0.8	0.7	0.7	0.7	0.75	0.6	0.45
沿海滩涂	0.7	0.7	0.5	0.4	0.65	0.5	0.4
内陆滩涂	0.6	0.6	0.4	0.3	0.55	0.4	0.3
沟渠	0.65	0.2	0.4	0.5	0.6	0.5	0.35

2）生态系统服务价值评估。本文选用谢高地[13]等在2015年修正的单位面积生态系统服务价值当量，估算招远市的生态系统服务价值。根据上述研究，将当年单位面积平均粮食价值的1/7作为生态服务价值当量因子的经济价值量[14]。招远市2018年粮食产量为5 569.646 kg/hm^2，平均粮食价格为2.36元/kg，计算得到招远市2018年生态服务价值当量因子经济价值量为1 877.766元/hm^2·a，进而计算得到招远市生态系统服务总价值（表3）。

3）景观连通性。景观连通性是指生态景观对物种流通和阻碍的影响程度。本文利用Guidos软件，结合形态学空间格局分析方法，提取景观类型的核心区。

表3 招远市土地利用类型单位面积生态系统服务价值/(元/hm²·a)

一级类型	二级类型	耕地	园地	林地	草地	水域	其他土地
供给服务	食物生产	1 596.10	507.00	544.55	713.55	1 502.21	0.00
	原料生产	751.11	976.44	1 239.33	1 051.55	431.89	0.00
	水资源供给	37.56	525.77	638.44	582.11	15 566.68	0.00
调节服务	气体调节	1 258.10	3 286.09	4 074.75	3 699.20	1 445.88	37.56
	气候调节	676.00	9 445.16	12 205.48	9 783.16	4 300.08	0.00
	净化环境	187.78	2 816.65	3 624.09	3 229.76	10 421.60	187.78
	水文调节	507.00	5 370.41	8 900.61	7 173.07	191 982.80	56.33
支持服务	土壤保持	1 934.10	3 999.64	4 976.08	4 506.64	1 746.32	37.56
	维持养分循环	225.33	319.22	375.55	338.00	131.44	0.00
	生物多样性	244.11	3 642.87	4 525.42	4 093.53	4 788.30	37.56
文化服务	美学景观	112.67	1 596.10	1 990.43	1 802.66	3 548.98	18.78
合计		7 529.84	32 485.35	43 094.73	36 973.21	235 866.19	375.55

3.2 综合阻力面确定

最小累积阻力模型是物种从源头点到目标地所需克服的总阻力模型。根据招远市的地理特点，本文选取6个影响因子（表4）构建最小累积阻力模型。参考以往研究成果[15]，分别给各阻力因子赋予阻力系数和权重，再计算各影响因子的阻力面，最后根据影响因子的权重计算综合阻力面。

3.3 生态安全格局构建

生态廊道是指物质与能量在各生态源地间流动的通道。本文通过构建综合阻力面，根据电路理论，借助Linkage Pathway Tool工具识别招远市的生态廊道。结合前人研究成果和研究区现状[16]，本文构建宽度为700 m的生态廊道。生态夹点是生态廊道中的电流高密度区域，具有重要的连通功能，代表生物迁徙过程中通过可能性较高或无其他替代路径的区域。物种迁徙的随机性，导致主观上很难判断出最优迁徙路径，电路理论将电子随机游走的原理应用于行为生态学[17]，可以很好地应用于预测物种迁徙路径方面。生态障碍点是指阻碍物种在生态源地之间流动的区域，通过计算清除障碍点后电流恢复值的大小来识别。电流恢复值越高，说明清除该障碍点后越有利于改善整体景观连通性[18]。生态断裂点是指廊道上非连续处的间隙点[19]，将阻碍物种在生态源地间的流动。本文选取交通干线和生态廊道的交叉点作为生态断裂点。

4 研究结果与分析

4.1 生态源地识别结果

根据招远市的生境质量、生态系统服务价值和景观连通性的空间分布，本文共识别出生态源地13处（图1），总面积为23.11 km²，占招远市总面积的1.6%，以林地和水域为主；主要分布在东部低山丘陵区和西北部的水库、水域。研究区北部和中部主要是

表4 招远市阻力因子权重和系数

影响因子	权重	阻力因子	阻力系数	影响因子	权重	阻力因子	阻力系数
土地利用类型	0.400	林地	1	坡向	0.100	正南	1
		草地、水域	3			东南、西南、平地	3
		耕地	5			正东、正西	5
		其他土地	7			东北、西北	7
		建设用地	9			正北	9
起伏度/(°)	0.150	<150	1	距道路距离/m	0.125	<1 000	9
		150~300	3			1 000~2 000	7
		300~450	5			2 000~3 000	5
		450~600	7			3 000~4 000	3
		>600	9			>4 000	1
坡度/(°)	0.100	<8	1	距水体距离/m	0.125	<500	9
		8~15	3			500~1 000	7
		15~25	5			1 000~1 500	5
		25~35	7			1 500~2 000	3
		>35	9			>2 000	1

城区和矿山开采区，生态源地分布较少。

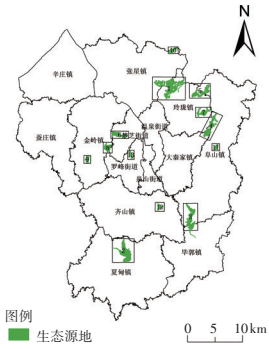


图1　招远市生态源地分布

审图号：GS(2020)4619

4.2　综合阻力面构建

本文基于各影响因子的阻力面（图2），构建招远市综合阻力面（图3），可以看出，生态阻力值高的地区多分布于城镇中心和各乡镇居民点，属于人类活动密集的区域，交通流量大，不利于生态廊道的连通性，严重阻碍了生物迁徙；综合阻力面的高值区位于招远市中心城区，分布较集中，其余地区分布零散，整体分布与土地利用类型阻力面类似；招远市中部和北部的阻力值较大；低值区主要分布在低山丘陵区，土地利用类型以林地、草地为主，人类活动较少，有利于生态源地的连通性。

4.3　生态廊道构建

招远市共识别出生态廊道28条，多经过林地和草地，研究区东北部和西部的廊道数量多、密度大；东北部的廊道由于生态源地间距离近，长度较短但整体连通性较强；西部的廊道由于生态源地间距离较远，长度较长；西北部多为旱地、农村居民点，没有生态源地。

4.4　生态待修复区识别

招远市共识别出生态夹点25个，空间分布见图4a，总面积为2.9 km²，主要位于齐山镇、罗峰街道、泉山街道和大秦家镇，其中面积最大的为0.41 km²，最小的为0.02 km²；生态夹点区域土地利用类型以耕地、林地和水域为主；多处于生态源地附近和生态廊道的中心区域，是物种在生态源地间迁徙的核心区域。招远市共识别出生态障碍点37个，空间分布见图4b，总面积为3.7 km²，其中面积最大的为0.5 km²，最小的为0.04 km²；主要分布于齐山镇、梦芝街道、罗峰街道和玲珑镇。不同于生态夹点的景观类型，生态障碍点大部分为受人类活动影响较大的景观，且破碎化现象非常明显。招远市共确定生态断裂点31个，空间分

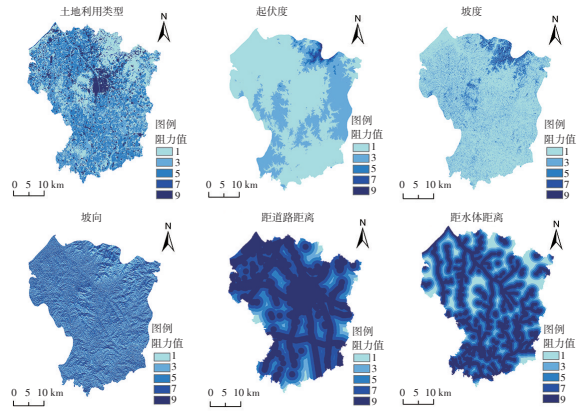


图2　单个影响因子阻力面

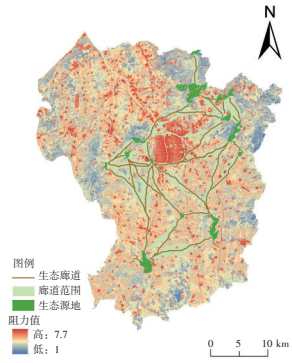
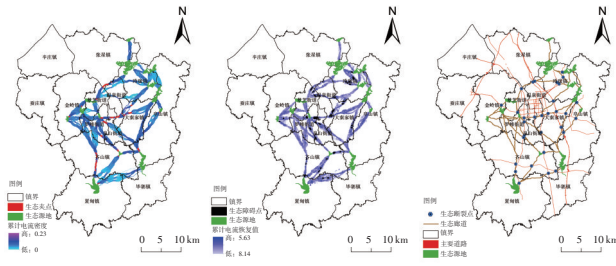


图3　综合阻力面与生态廊道

布见图4c。本文选取交通干线和生态廊道的交叉点作为生态断裂点，交通干线对于当地经济发展具有重要影响，必然不可随意拆除，可采取在生态断裂点处建设生物迁徙地下通道或天桥等措施。



a 生态夹点　　b 生态障碍点　　c 生态断裂点

图4　生态待修复区识别结果

审图号：GS(2020)4619

4.5　生态待修复区优化策略

生态廊道和生态关键点共同构成招远市生态待修复区。具体修复建议为：

1）建议保护现有生态源地，加强原有廊道建设，并采取相应措施增加生态源地数量，加快建设生态廊道空间网。针对研究区西部生态源地间隔距离远的特点，应重点保护廊道的中心位置，预防生态廊道断裂，物种难以迁徙的困境。

2）生态夹点区域土地利用类型主要为水域、耕

地、园地、草地和林地。对于河流和水域健全河流管理体制，可采取河道整治疏通、岸坡防护、水体过滤、配置水生生物等措施。对于耕地，基本农田保护区内耕地应加强农田整治工程，充分发挥耕地的生态功能；保护区外耕地可适当退耕还林、还草。对于园地，应加强园地管理工作，合理调控园地产量，维持生态系统可持续发展。对于草地，加强保护利用高覆盖度草地，恢复退化草地。对于林地，应恢复退化林地，加强林业巡护工作，严厉打击违法采伐行为和毁林种田现象。

3）生态障碍点区域由建设用地、园地和耕地组成。对于影响地方经济等无法去除的建设用地，可在周边预留动物迁徙的通道；对于已损毁且占地面积大的建设用地，可改造为其他景观类型。对于园地，开展园地污染调查，清除损毁生态环境的低质量园地。对于耕地，可适当退耕还林、还草。

4）生态断裂点区域主要是生态廊道与铁路、公路的交点。针对大型交通设施很难改道的现状，可建设隧道、涵洞或架设天桥；并对野生动物通道进行监测，杜绝破坏通道、猎杀野生动物等行为。

5 结 语

本文以沿海资源富集区的山东省招远市为研究对象，通过构建生境质量模型、估算生态系统服务价值和分析景观连通性综合识别生态源地，提取生态待修复区。

1）研究区中共识别出13处生态源地，以林地和水域为主，总面积为23.11 km^2，占招远市总面积的1.6%，分布在东部低山丘陵区和西北部的水库、水域。

2）招远市生态待修复区主要包括：生态廊道28条，设定其宽度为700 m；生态夹点25个，多分布于生态源地与生态廊道的接壤处；生态障碍点37个，大部分为受人类活动影响较大的景观，且破碎化现象非常明显；生态断裂点31个，为交通干线与生态廊道的交叉点。

3）在生态安全格局背景下，遵循“保护生态廊道，修复生态夹点，尽量移除生态障碍点，采取措施改道进而实现生态断裂点连通性”的原则，提出了针对招远市的生态保护修复策略。

参考文献

[1] 欧阳晓,朱翔. 中国城市群城市用地扩张时空动态特征[J]. 地理学报,2020,75(3):571-588

[2] 宋海云,赵天,张晓萱,等. 新型城镇化绿色低碳发展的理论基础及启示[J]. 中国经贸导刊(中),2018(35):94-97

[3] 李久林,徐建刚,储金龙. 基于Circuit理论的城市生态安全格局研究:以安庆市为例[J]. 长江流域资源与环境,2020,29(8):1812-1824

[4] 郝月,张娜,杜亚娟,等. 基于生境质量的唐县生态安全格局构建[J]. 应用生态学报,2019,30(3):1 015-1 024

[5] 李涛,巩雅博,戈健宅,等. 基于电路理论的城市景观生态安全格局构建:以湖南省衡阳市为例[J]. 应用生态学报,2021,32(7):2 555-2 564

[6] 罗言云,李春容,谢于松,等. 成都市中心城区城市公园景观连通性[J]. 生态学杂志,2020,39(11):3 795-3 807

[7] 彭建,李慧蕾,刘焱序,等. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略[J]. 地理学报,2018,73(4):701-710

[8] 王云,潘竟虎. 基于生态系统服务价值重构的干旱内陆河流域生态安全格局优化:以张掖市甘州区为例[J]. 生态学报,2019,39(10):3 455-3 467

[9] Gao J, Du F, Zuo L, et al. Integrating Ecosystem Services and Rocky Desertification into Identification of Karst Ecological Security Pattern[J]. Landscape Ecology, 2020, 36(7):2 113-2 133

[10] 黄九明. 基于电路理论的济南市生态安全格局构建研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2020

[11] Li S C, Xiao W, Zhao Y L, et al. Incorporating Ecological Risk Index in the Multi-process MCRE Mmodel to Optimize the Ecological Security Pattern in a Semi-arid Area with Intensive Coal Mining: A Case Study in Northern China[J]. Journal of Cleaner Production,2020,247(20):1-16

[12] 张华,韩武宏,宋金岳,等. 祁连山国家公园生境质量时空演变[J]. 生态学杂志,2021,40(5):1 419-1 430

[13] 谢高地,张彩霞,张雷明,等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报,2015,30(8):1 243-1 254

[14] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报,2003,18(2):189-196

[15] 龙欢. 城镇化背景下森林景观格局变化及绿色网络的构建:以关中地区为例[D]. 西安:西北大学,2020:45-50

[16] 朱强,俞孔坚,李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度[J]. 生态学报,2005,25(9):2 406-2 412

[17] Fan F, Liu Y, Chen J, et al. Scenario-based Ecological Security Patterns to Indicate Landscape Sustainability: A Case Study on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Landscape Ecology,2021,36(7):2 175-2 188

[18] Mcrae B H, Beier P. Circuit Theory Predicts Gene Flow in Plant and Animal Populations[C]//Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007:19 885-19 890

[19] 汤峰,王力,张蓬涛,等. 基于生态保护红线和生态网络的县域生态安全格局构建[J]. 农业工程学报,2020,36(9):263-272