

DOI: 10.5846/stxb202102260535

吴钰茹, 吴晶晶, 毕晓丽, 栗云召, 肖鲁湘. 综合模型法评估黄河三角洲湿地景观连通性. 生态学报, 2022, 42(4): 1315-1326.

Wu Y R, Wu J J, Bi X L, Li Y Z, Xiao L X. Application of the least cost distance model and the circuit theory model in the evaluation of wetland landscape connectivity in the Yellow River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1315-1326.

综合模型法评估黄河三角洲湿地景观连通性

吴钰茹^{1,2}, 吴晶晶³, 毕晓丽¹, 栗云召⁴, 肖鲁湘^{4,*}

1 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003

2 中国科学院大学, 北京 101400

3 广州城市信息研究所有限公司, 广州 510665

4 鲁东大学, 烟台 264003

摘要:景观连通性是区域生态系统功能完整的重要表征。连通性的评估对生态系统管理和保护规划有重要意义。综合常用的景观连通性评估模型,即最小耗费距离模型与电路理论模型,根据生态网络构建的一般范式,采取两种不同阻力面赋值方案,对黄河三角洲的湿地景观连通性进行评估,并对比分析了两种模型的基本原理、工作性能、分析尺度等。结果表明:最小耗费距离模型能够识别最优生态廊道,为景观连通性评估提供基本模式。电路理论则能扩展到潜在生态廊道和关键生态节点的量化识别,能确定具有生态功能的“夹点”和障碍区的空间位置。综合两种模型,可以量化评估黄河三角洲湿地景观连通性,空间化三角洲湿地保护恢复的管理目标,即潜在廊道和关键生态节点,为区域生态系统功能评估和管理提供精准的数据支持。

关键词:最小耗费距离模型;电路理论;景观连通性;黄河三角洲湿地

Application of the least cost distance model and the circuit theory model in the evaluation of wetland landscape connectivity in the Yellow River Delta

WU Yuru^{1,2}, WU Jingjing³, BI Xiaoli¹, LI Yunzhao⁴, XIAO Luxiang^{4,*}

1 Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China

3 China Digital Cities Institute Co., Ltd, Guangzhou 510665, China

4 Ludong University, Yantai 264003, China

Abstract: Landscape connectivity is important for maintaining the integrity of ecosystem structure and function, but usually ignored in practical ecosystem management and conservation planning. Graph theory and circuit theory were commonly considered as useful methods to quantify landscape connectivity through identifying potential corridors and key ecological nodes and thus contributed greatly to policy-making at both regional and global scales. The Yellow River Delta (YRD) has typical coastal wetland ecosystems and provided unique ecosystem services, such as high bird diversity. However, natural wetlands in this delta have been greatly fragmented due to global climate changes and human activities, especially after 1980's. How to efficiently evaluate wetland landscape and to identify those hotspots for maintaining wetland connectivity is a primary task for regional wetland conservation and management. Using wetland classification and land cover data in the YRD, 56 wetland patches without human disturbances and with larger areas were selected as source patches. We designed two resistance surface schemes, considering the characteristics of coastal wetlands and rivers in this delta. The principles, processing procedures and analysis scales of models from graph theory (the Least Cost Distance model, LCD) and circuit theory (Circuitscape), respectively, based on source patches and resistance surface designation, were compared. Finally,

基金项目:国家自然科学基金(31870468);蓝色粮仓科技创新项目(2019YFD0900705);山东省自然科学基金(ZR2020MD013)

收稿日期:2021-02-26; **网络出版日期:**2021-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaoluxiang@163.com

we assessed the wetland connectivity of the YRD using the two models and provide specific suggestions for wetland protection in this delta. The results showed that, (1) the Least Cost Path (LCP) generated by the LCD model is consistent with the high current density area obtained by Circuitscape, (2) different resistance values schemes for rivers and water bodies have clear impacts on outputs of LCP, (3) the key ecological nodes, such as pinch points generated on the two resistance surface are mainly concentrated in the central area of the YRD, (4) according to the improvement score of the obstacle area, three major improvement areas of this delta are extracted: industrial and mining areas, aquaculture ponds in the east, aquaculture ponds in the west and the current estuary of the Yellow River. The results indicated that the LCD model could identify the optimal ecological corridors and Circuitscape model could identify potential corridors, obstacle areas and pinch points. Combination of the two models can not only quantify the spatial patterns of potential corridors and key ecological notes, but also identify the objects of wetland protection and restoration for the YRD and thus provide a scientific and feasible research scheme for landscape protection and wetland management in the other coastal zone.

Key Words: least cost distance model; circuit theory; landscape connectivity; the Yellow River Delta

景观连通性是测定各类景观廊道或基质在空间上连续的指标^[1],用来度量物种迁移、扩散或某种生态过程在景观中的畅通程度,是景观格局和生态过程之间联系的纽带^[2]。景观连通性评估包括功能性度量和结构性度量。景观连通性评估有助于快速了解景观内的生态过程,对提高生态功能,优化区域生态网络和区域景观管理及可持续发展具有重要意义。近年来由于数据结构简化和运算方法的快速发展,基于最小耗费距离理论和电路理论的景观连通性评估模型应用最为广泛^[3]。

最小耗费距离模型基于图论,通过计算源斑块与目标斑块之间最小累积成本来模拟最小成本路径,是物种迁徙或者某种生态过程运行的最优路径^[4]。最小耗费距离模型所计算的障碍影响大小是物种迁移或扩散过程中景观对物质、能量阻力产生的损耗系数^[5]。通过对土地利用类型、海拔、道路密度等障碍因素进行阻力面赋值,运用最小耗费距离模型来构建研究区的累积耗费距离表面,进而计算出最小耗费路径。

但是,由于物种迁徙或者某种生态过程事先不知道目的地,符合随机游走理论^[6]。McRea 据此提出将物理学的电路理论应用到景观生态学中,将电流作为物种迁移或者某种生态过程的生物流^[7]。电路理论可以识别景观内物种或生态过程所有可以利用的潜在生态廊道,并拓展了夹点、障碍区等的识别功能^[8]。

最小耗费距离模型和电路理论模型都是基于“识别生态源地—构建阻力面—提取生态廊道”的一般研究范式进行模拟运算^[9]。其中阻力面用来反映物种迁移扩散或某种生态过程运行的困难度^[10],是连通性研究的基础^[11]。阻力面的设定通常是根据专家意见或者相关数据而参数化设定。例如,刘孝富在厦门土地生态适宜性的评价中,采用专家打分与地形、水文地质等各影响要素权重比相结合的方法来设定景观过程阻力值^[12];孔繁花等将道路、水体、建设用地等不同用地类型赋予不同的景观阻力值,生成济南市耗费阻力面^[13]。Finch 通过研究区所有土地利用类型排序公式进行阻力赋值^[14]。也有文献根据生态系统服务价值来设定阻力面参数,生态系统服务价值越高,该生态过程所经受的阻力越小^[15]。而 Koen 等人直接设计一个电阻表面,使景观的阻力值估计对成本权重变化产生线性响应,这提高了衡量景观功能连通性的准确性^[16]。因为很难获取实际观测的阻力值数据,所以阻力面的准确构建成为景观连通性模型应用中的一大难点^[17]。

黄河三角洲具有典型的河口湿地生态系统。随着区域经济的快速发展,频繁的人类活动导致黄河三角洲湿地景观破碎化,引起了一系列生态问题。许多学者在黄河三角洲景观格局及其生态保护方面做了大量的研究工作,王永丽等人利用 Fragstats 研究了黄河三角洲 2000 年和 2009 年湿地不同时空尺度的景观格局变化,结果表明 10 年间滨海湿地景观破碎化程度有所降低^[18]。吴晶晶等人利用基于图论的指数方法测度景观连接度对黄河三角洲湿地的时空变化格局进行分析,结果表明 1991—2013 年期间黄河三角洲的景观连通性整体较低^[19]。大部分研究利用景观指数等方式对黄河三角洲景观连通性进行了评估,为黄河三角洲开展湿地保护提供了参考。然而,较单一的使用基于图论的指数模型和最小耗费距离模型,使连通性评估结果存在一

定的偏差。因此本文以黄河三角洲湿地生态系统为研究对象,运用最小耗费距离模型与电路理论模型对黄河三角洲湿地进行景观连通性评估,同时通过对比分析两种模型的基本原理、计算过程及其主要存在的问题,以期综合利用两种模型所得结论为黄河三角洲湿地景观保护及规划管理提供精准服务。

1 研究区概况与数据准备

1.1 研究区

本文以东营市垦利县宁海为起点的近代黄河三角洲为研究区(图1),总面积约为 3084.72 km²。该研究区的范围在 37°36'N—37°45'N、118°32'E—119°19'E 之间,属于温带季风气候区,四季分明,雨热同期,年平均降水量约为 500 mm 左右。黄河三角洲是我国三大河口三角洲之一,它的滩涂、盐沼、森林等湿地生态系统是众多保护物种如丹顶鹤(*Grus japonensis*)、白尾海雕(*Haliaeetus albicilla*)等的栖息地和繁殖地;也是候鸟迁徙的重要路径^[20];芦苇(*Phragmites australis*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)为湿地植物群落的主要优势种。黄河三角洲石油资源丰富,石油工业相关的活动及渔业资源发展使三角洲新生湿地生态系统面临严重的人为干扰。近 30 年来,湿地景观破碎化明显,如何维持和提高湿地生态系统结构和功能的完整性是当前黄河三角洲湿地保护管理工作中面临的主要问题。

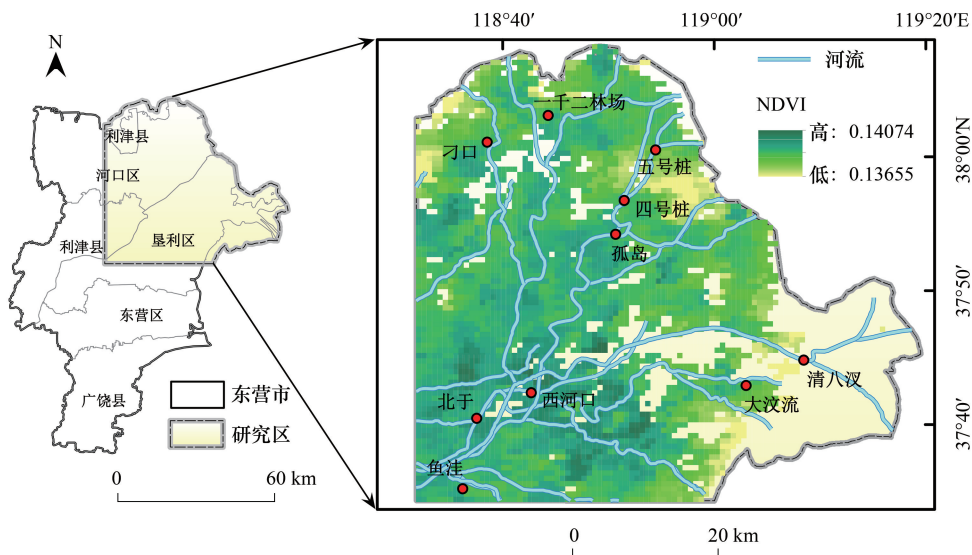


图1 研究区概况

Fig.1 Study Area

1.2 数据来源

本研究所使用的数据包括湿地分类数据、归一化植被指数(NDVI)数据,其中湿地分类数据来源于栗云召 2014 年构建的湿地数据库,其将黄河三角洲划分为 3 个地类级别:一级地类(自然湿地、人工湿地、非湿地和海洋)、二级地类(草本沼泽、灌丛湿地、森林湿地、盐沼、滩涂、河流、积水洼地、养殖塘、池塘、水田、盐田、水库、沟渠等 19 个)、三级地类(芦苇湿地、淡水沼泽、草甸湿地等 36 个)^[21];NDVI 数据为 500 m 分辨率的月合成产品,来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/search>)。

2 研究方法

2.1 基本原理

2.1.1 最小耗费距离理论

最小耗费距离是目前使用最广泛、简便快速的一种景观连通性评估模型。它是通过计算源点到消耗费用

最低、距离最近的源的方向和路径来确定廊道和战略点^[19]。不同于欧氏距离,最小耗费距离是基于某物种或某一生态过程克服不同生态源地时的耗费阻力系数来计算的。源斑块之间存在多条路径,但总有一条路径上的阻力累计值最小,称之为最小耗费路径。其计算公式为^[9]:

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

式中,MCR 为某物种或某生态过程通过源 i 出发到达景观中另一源 j 所耗费的最小费用距离; D_{ij} 为源斑块 i 到源斑块 j 所经历的费用距离; R_i 为经过源斑块 i 时的阻力系数。

基于 ArcGIS 的空间分析工具(Spatial Analyst Tools),根据重力模型进行生态网络中重要边的提取,网络边的有效性和重要性则通过源斑块相互作用强度来定量表征,计算出源地斑块之间的最小累积阻力值。最小累积耗费距离强调的是资源阻力在一定空间距离上的累积效应,所生成的为两个生态源地之间的最小耗费距离^[22],即物种在对景观格局有着最优了解的情况下,根据唯一最优路径进行迁徙,没有其他潜在路径可以通过,此方法存在一定的分析误差。

2.1.2 电路理论

电路理论通过随机漫步理论将物理学中的电路与生态学相结合,在物种迁移或扩散过程中,景观被视为导电表面,高渗透性景观的电阻低,低渗透性景观电阻高^[23]。电路理论模型假定物种迁移或扩散过程中经过不同的阻力值会产生有差异的电流密度,通过连接源斑块,创建累积电流值作为耗费路径^[24]。累积电流值越高,说明在该区域两生态源地之间的连通性越好,有更多的物种或者某物种更加频繁地通过该区域,即该生态廊道的使用频率越高。电路理论可获取多路径扩散的研究结果,更具有现实性和客观性。因此,在电路理论模型中,相关的物理学术语具有了明确的生态学意义(表 1)。

表 1 电路理论中物理学术语、单位及生态学意义对照表

Table 1 Physical terms, units, and ecological significance in circuit theory

物理学术语 Physical term	单位 Unit	生态学意义 Ecological significance
电导 Conductance(G)	西门 S	景观的渗透性,电导越高,景观连通性越强
电阻 Resistance(R)	欧姆 Ω	景观阻力值,电导的倒数,电阻越大,景观渗透性越差
电流 Current(I)	安培 A	随机游走者通过给定的网格单元净移动概率的估计值
电压 Voltage(V)	伏特 V	预测随机游走者离开任意像元到达下一特定像元成功的可能概率

利用 Circuitscape^[24] 软件,通过模拟物种迁移路径或者基因流来确定生态廊道。ArcGIS 的 Linkage Mapper 插件可进行源地中心度、廊道“夹点”以及景观连接中的障碍区确定与分析。其中源地中心度是用来衡量生态源地或者生态廊道对保持整个生态网络的重要性^[25],通过使用 Circuitscape 成对运算模式计算获得的整个生态网络中的电流的中心性进而产生中心度得分。其计算方式是将两生态源地间最小成本路径的成本加权距离作为该路径的阻力值,一生态源地为起点,输入 1 A 的电流,另一生态源地接地,以此遍历所有成对生态源地,最终获得生态源地和生态廊道的中心性得分。在研究区域的生态保护过程中如果中心度得分较高的生态源地或者生态廊道被某种方式占用或出现一定的损失,该区域的大部分的生态源地和生态廊道会受到惨重损失;通过电流密度图识别的“夹点”是整个景观连接最重要的部分,某个“夹点”的损失会造成该研究区内整个景观连接的紊乱,相当于生态网络中的“踏脚石”^[26],所以“夹点”区域的保护要优于对景观连通性贡献不大的区域。

在关键生态廊道中存在建设用地等阻力面值较高的土地利用类型时,就会产生障碍,在一定成本加权距离范围内,借助移动窗口搜索法识别障碍区^[27]。障碍区分析最终给出的结果为当改变电阻值为 1 时,每个栅格恢复时,预期减少的最小耗费距离并对减少的最小耗费距离给予改善得分,改善得分高的区域通过修复,可以改善研究区域内多重廊道^[28]。但是该方法存在的问题:电路理论根据随机游走理论运行,但物种迁移

过程有一定的事先经验或者根据沿途中的指示植物进行迁移扩散。

2.2 生态源地的识别

某一生态斑块作为某物种或生态过程向外扩散和维持的源区,对区域生态过程和功能起着决定作用,将该生态斑块识别为生态源地^[29-30]。生态源地的功能是相对的,比如某一廊道的生境斑块质量较差,但是可能提供最佳或者唯一的觅食路径或者休息区^[14]。Mallarach 等认为面积较小的生态孤岛对生态保护的功能性不强^[31],选择有较丰富物种的大面积生境斑块作为生态源地。所以本文在进行生态源地的选择时根据黄河三角洲区域主要湿地类型斑块面积的大小进行生态源地的选择,选择面积大于 0.8 km² 的主要湿地(图 2):灌丛湿地(14 个)、森林湿地(11 个)、滩涂(13 个)、盐沼(18 个)作为源斑块,进行湿地景观连通性评估分析。

2.3 阻力面设定

根据研究区的生态本底特征、生态系统服务价值以及专家经验提出两种阻力面构建的方案(表 2)。本文中,积水洼地是指油田相关活动导致的坑洼地面,将其划为人工湿地。第一种阻力面设定考虑所有水系在黄河三角洲湿地具有较高的生态系统服务功能,阻力面设定为 1,对物种迁移或者物质、能量运输等阻力最小。第二种阻力面将河流根据不同流域面积对阻力值进行分级设定,并结合最为广泛使用的陆域方案对各土地利用类型进行阻力赋值(图 3)。

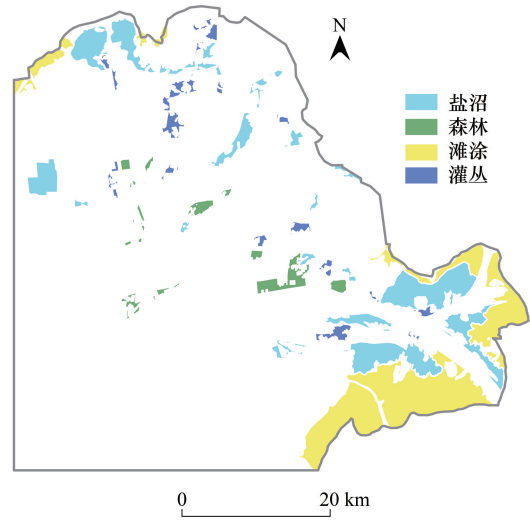


图 2 生态源地
Fig.2 Wetland sources in the Yellow River Delta

表 2 阻力赋值体系

Table 2 Resistance values of different land types in two resistance surfaces			
景观类型 Landscape type	亚类 Sub-type	阻力方案 1 Resistance 1	阻力方案 2 Resistance 2
自然湿地 Natural wetland	灌丛、森林、盐沼、滩涂	1	1
人工湿地 Constructed wetland	沟渠	2	20
	积水地、池塘、水库	4	40
	水田	6	60
	养殖池	8	80
	盐田	10	100
河流 River	$S < 1 \text{ km}^2$	1	10
	$1 \text{ km}^2 < S < 10 \text{ km}^2$	1	50
	$S > 10 \text{ km}^2$	1	100
旱田 Upland filed		60	60
建设用地 Constructed land	公路、堤坝	60	60
	矿区 80	80	
	居民区	100	100

S: 流域面积 Square

2.4 运行过程对比

最小耗费距离模型与电路理论模型都是以计算欧氏距离为基础的。最小耗费距离只生成了最小耗费路径,没有办法识别整个生态区域的潜在生态廊道。最小耗费距离模型的计算在运行过程中会轻易忽略阻力较小的生态源地,对最后景观连通性产生较大的影响。电路理论首先是识别邻近核心区域,基于欧氏距离来构建核心网络,计算电阻路径之后通过阈值的设定来确定核心生态源地的连接,从而计算电流值。

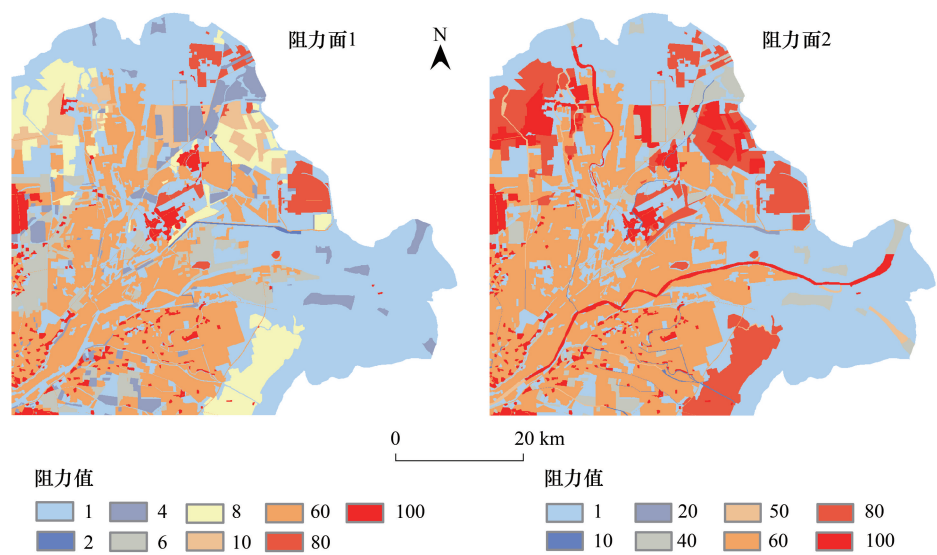


图 3 两种阻力面赋值情况

Fig.3 Resistance values of two surfaces

2.5 分析尺度对比

最小耗费距离模型生成的只有最小耗费生态廊道,不进行潜在廊道的分析,输入数据与结果数据均占较小空间,运行速度快,能够在几分钟内进行大尺度的景观生态网络的研究。电路理论需要生成两生态源地之间的电流值,并对其电流值进行累加运算。生态源地之间的廊道连接存在一定的冗余性,需要在运行过程中删除穿过生态源地的生态连接。其拓展功能需要通过计算耗费电流值来获取“夹点”和障碍区。以黄河三角洲为例,应用于最小耗费距离的生态源地与阻力面在电路理论中运行需耗费 30 h 左右,运行速度慢,适合短时间内中小尺度区域的研究。

3 结果与分析

3.1 基于最小耗费距离的评估

最小耗费距离模型对两种方案分别共生成了 129 条和 113 条最小成本路径(图 4)。对比于第一种阻力面,将河流根据不同流域面积设定不同阻力值对景观连通性有更大的影响,通过成对栖息地之间的成本加权距离(CWD, Cost Weight Distance)与最小耗费路径(LCP, Least Cost Path)可以看出阻力面设定值越大,成本加权距离越大(表 3)。

表 3 成对栖息地之间的欧氏距离、最小耗费路径长度、成本加权距离等数量特征

Table 3 Euclidean distance, least cost path length, cost weight distance and other quantitative characteristics between pairs of habitats				
数量特征 Quantitative characteristics	阻力面 Resistance	欧氏距离/m Euclidean distance	最小耗费路径/m Least cost path length	成本加权距离 Cost weight distance
均值 Mean	阻力面 1	3858.32	5397.4	7183.88
	阻力面 2	3185.5	5330.8	19953.57
最大值 Maximum	阻力面 1	28043	41517	47043.9
	阻力面 2	15423	35031	220711.28
最小值 Minimum	阻力面 1	30	30	30
	阻力面 2	30	30	30
标准差 Standard deviation	阻力面 1	4660.42	7027.21	8613.94
	阻力面 2	3391.46	6942.64	37249.10

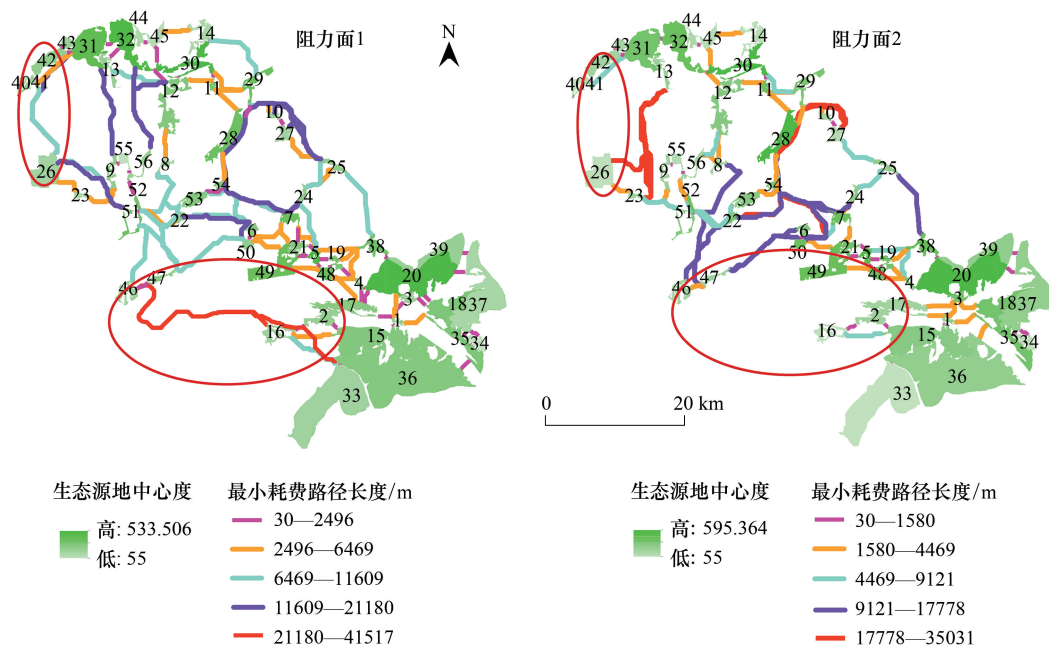


图4 最小成本路径

Fig.4 Least cost path of two resistance surfaces

成本加权距离与最小耗费路径长度(LCPL, Least Cost Path Length)的比值可以研究最小成本路径的性质^[3],当CWD/LCPL值越大时,物种通过此最小成本路径进行迁移或者扩散时遭受到较大的阻力,景观连通性较差。结合2013年的土地利用类型图进行分析,发现耗费高的路径大部分经过旱地、工矿区等阻力面较大的土地利用类型。第二种阻力面相对于第一种阻力面景观连通性有所降低,廊道总长减少4010 m,最小耗费路径降低16%,体现在研究区的西部。

阻力面方案一中,从编号为5的生态源地出发的最小耗费路径最多,有7条;到达编号为29的生态源地的连接路径有6条。129条路径中最长的一条路径是从生态源地33到生态源地2,其欧式距离为28043 m。方案二从编号6和22的生态源地出发的最小耗费路径最多,有6条,到达编号为54的生态源地的最小耗费路径有6条(图4)。

在两种阻力面方案设定下,有10对生态源地之间一直存在廊道,不同阻力面下仍存在连接的生态源地之间最小耗费路径长度存在明显的差异(图5)。

3.2 基于电路理论的景观连通性评估

Circuitscape运行结果表明第一种方案阻力面的电流值在(0,40) A之间(图6),生态源地56与51之间、7与54之间的电流密度大,电流值均大于4。较高的电流密度主要集中在黄河三角洲中部区域,说明黄河三角洲中部区域的景观连通性较好。生态源地30、20与5的中心度得分较高,分别为533.50594、503.819695、497.402128,分布在黄河三角洲的北部和东部,属于原黄河入海口和现黄河三角洲保护区,这些生态源地对维持黄河三角洲景观连通性具有重要贡献。而在边缘编号为40的生态源地,中心度得分最低为55,且周围的电流值较低,景观呈现破碎化趋势。

第二种方案的阻力面的电流值在(0,73) A之间(图6),相对于第一种阻力面,整体电流密度明显下降,潜在生态廊道明显减少,生态源地7与54之间有大于10 A的电流值通过。结合土地利用类型,由于25号(研究区东部)生态源地附近多人工养殖池,26号与23号(研究区西部)生态源地附近多盐田,旱地较多的遍布在了45号生态源地(研究区东北部)周围,在方案2中面积小的水域阻力值设定较高,导致黄河三角洲西北部、中南部和东北部的电流密度明显降低,造成关键生态廊道消失或者潜在生态廊道减少。景观连通性在第二种

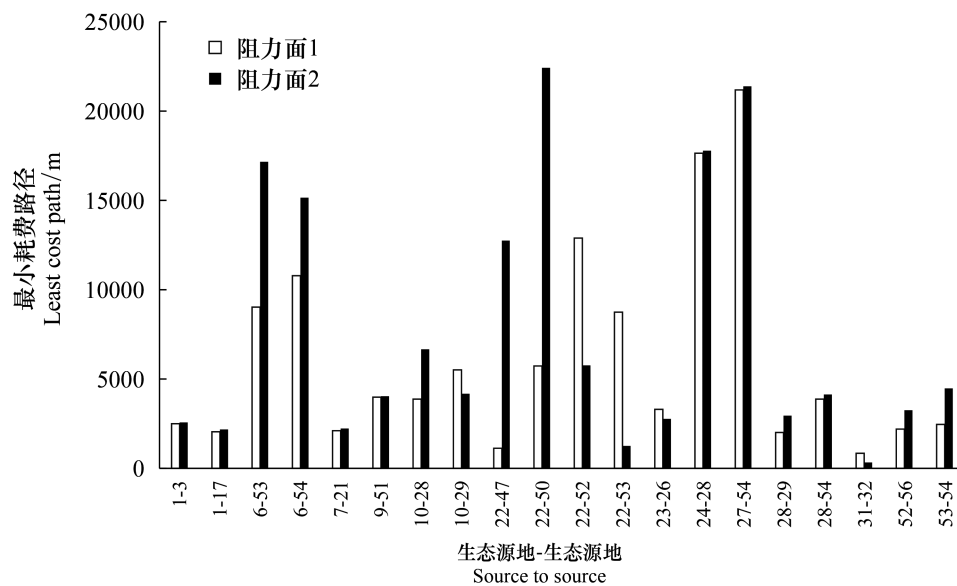


图5 不同阻力面下 10 对生态源地之间最小耗费路径

Fig.5 Least cost path between 10 pairs of ecological sources of different resistance surfaces

阻力面的设定情况下明显较差,不利于识别有关潜在廊道及对黄河三角洲景观连通性的整体性了解。在阻力面变更的情况下,生态源地的中心性没有明显变化,主要生态源地仍然分布在北部和东部。

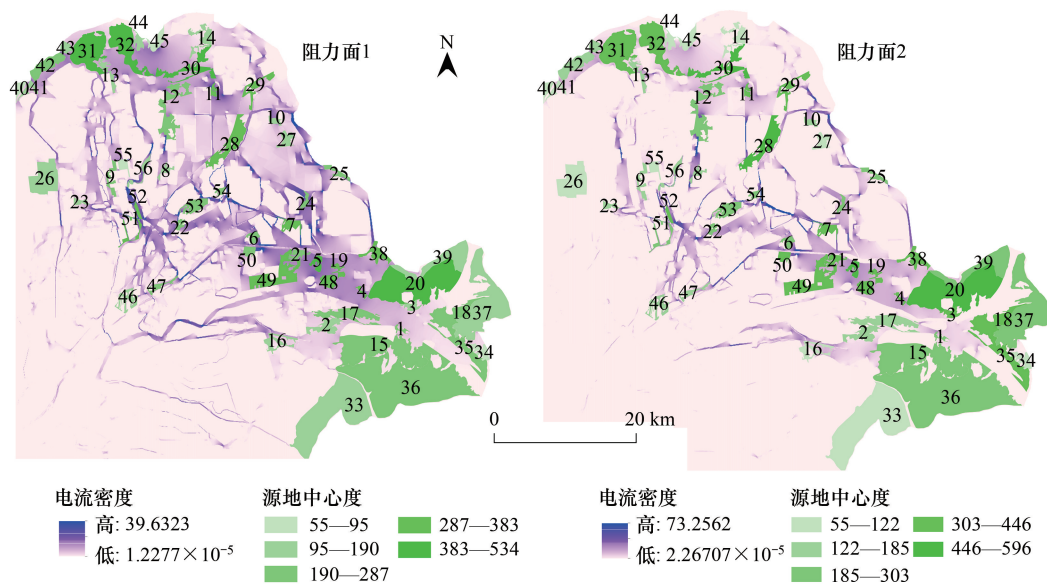


图6 不同阻力面方案电流密度

Fig.6 Patterns of current density of different resistance surfaces

图7左为第一种阻力面方案生成的成本加权距离表面。电流高的地区其成本加权距离越小,在电流几乎为零的地区,该廊道的成本加权距离呈现红色较高值,在东部工矿区和西南部的旱地、居民区最为明显。图7右为第二种阻力面方案生成的成本加权距离表面,各生态源地之间的成本加权距离都较小。人工湿地阻力值的设定大于第一种,所以在西南部地区高值更加明显,东部工矿区的成本加权距离显然低于第一种阻力面设定。西南部人工湿地建设区与东部工矿区的景观破碎化程度较高,对景观连通性的贡献较低。

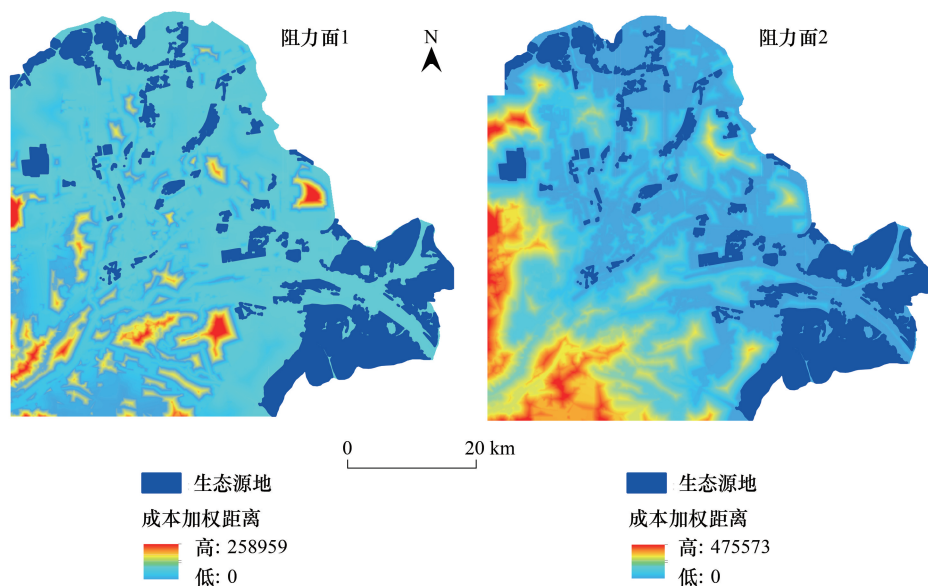


图7 不同阻力面方案成本加权距离

Fig.7 Patterns of cost weight distance of different resistance surfaces

根据生态源地面积大小将成本加权距离的阈值设定为 2000 m 作为生态廊道的“宽度”,此宽度是指成本加权距离的大小。在不同廊道“宽度”下,两个生态源地之间的电流大小不同。本研究在 2000 m 阈值下研究黄河三角洲区域生态廊道的“夹点”,该“夹点”是指一条状的狭窄区域,并不是单纯的点。通过参数设定生成的夹点区域如图 8 所示,相同阈值设定下,第一种阻力面生成的夹点区域较为明显。在第一种阻力面设定下,黄河三角洲区域生态源地之间大部分存在夹点,作为两个生态源地之间的小型生态区域;在第二种阻力面设定情况下,黄河三角洲北部和南部区域生态源地之间的部分夹点消失,零散的人工湿地和旱地造成北部区域和南部区域的景观破碎化,导致较差的景观连通性。两种阻力面设定情况下的“夹点”主要集中在中部区域,说明中部地区对黄河三角洲景观连通性起着关键作用。

以往景观连通性的研究仅限于构建生态网络,很少关注生态网络中的障碍区。为了更好地维护和改善景观连通性,需要进一步做出规划,对于障碍区的精准识别尤为重要。生态廊道的宽度在 600—1200 m 范围内能够创造自然化的物种丰富的景观结构^[32],本文据此设定生态源地 800 m 的搜索半径进行障碍区的识别。图 9 是通过设定 800 m 搜索半径获取黄河三角洲区域的障碍区范围,使用最大改善得分方法获取的障碍区的改善得分,为该区域中心像元改善得分的最大值。在两种阻力面设定下,改善得分较高的障碍区相似,主要为东部工矿区、养殖池(A 区域),西部养殖池(B 区域)。不同的是,在水系阻力值较高的设定下,黄河三角洲现入海口(C 区域)的改善得分明显有所提高,水系对 C 区域连通性有一定程度的影响,应对该区域引起足够的重视。在一定的保护和改善措施下 A、B、C 区域的景观连通性将会得到较大的提高。由于南部地区的景观阻力值较大,导致该区域改善得分为零,可能会造成该区域修复的忽略,不利于该区的景观生态发展。

4 结论与展望

综合最小耗费距离模型与电路理论模型评估了黄河三角洲湿地景观连通性。结果发现:(1)通过最小耗费距离模型得出的最小成本路径与由电路理论模型得出的电流密度高值区基本贴切。(2)根据不同流域面积对河流设定不同的阻力值对景观连通性有一定影响,不同阻力面方案的设定下景观连通性不同。成本加权距离在第一种阻力值设定下工矿区和旱地、居民区呈现高值;当在阻力面方案二设定中人工湿地阻力值较大时,工矿区的成本加权距离较第一种阻力面方案设定低。(3)在成本加权距离 2000 m 阈值范围内生成“夹

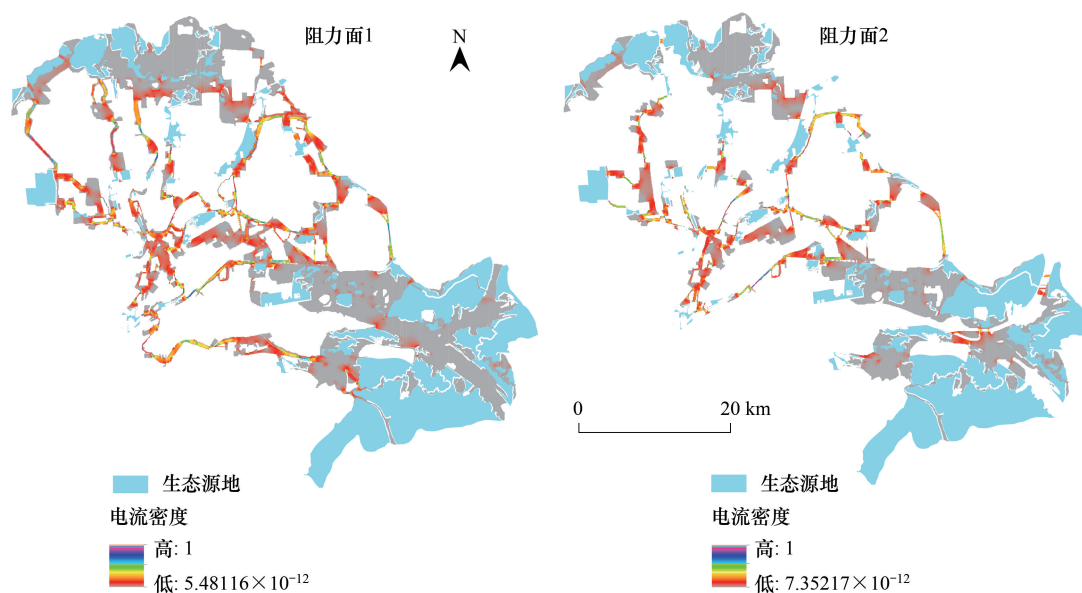


图8 不同阻力面方案“夹点”

Fig.8 Pinch points in different resistance surfaces

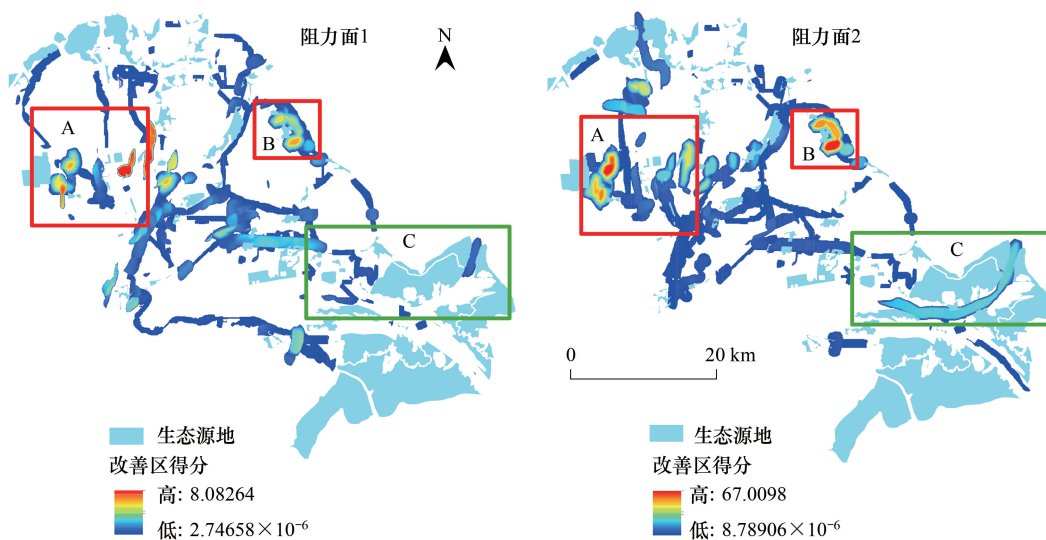


图9 不同阻力面设定方案下的障碍区

Fig.9 Barrier areas of different resistance surfaces

点”,两种阻力面方案设定下,“夹点”主要集中在黄河三角洲中部区域,说明中部地区对黄河三角洲的景观连通性起着关键作用。(4)根据障碍区的改善得分提取黄河三角洲三大改善区域(图9):东部工矿区、养殖池,西部养殖池以及黄河现入海口区域。

最小耗费距离模型得出的最小成本路径是评估景观连通性的重要方法,能够为黄河三角洲湿地的主要保护区的修护与管理提出建议;电路理论以随机游走理论为基础,能够识别黄河三角洲各生态源地之间的潜在生态廊道,可作为关键生态廊道的补充,为黄河三角洲湿地保护、恢复、管理提供更加充分的空间。

两种模型存在一定的局限性。最小耗费模型无法识别潜在廊道,只关注于最优路径,一定程度上导致生态网络构建的缺失。电路理论认为物种的迁移或扩散是事先不知道周围环境状况,不一定能够识别最优路

径,但是物种在黄河三角洲地区可能具有一定的迁徙或活动经验,其行为具有一定的不确定性。最小耗费距离模型由于只是识别最小成本路径,运行速度快,能够在几分钟内进行大尺度景观的研究,而电路理论的运行处理速度慢,需生成累积电流,适用于在短时间内对中小尺度景观的研究。其次电路理论在运行过程中根据累积电流值生成障碍区或者“夹点”等都需要设置一定的阈值范围,此阈值范围的设定需要进行进一步讨论研究,本文仅根据生态源地的面积来进行设定,具有一定的局限性。

阻力值的设定也是目前需要关注的问题之一,同一物种对于不同土地利用类型具有不同的适应性,或者不同物种对于同一种土地利用类型具有不同的适应性,以及不同的迁移扩散需求等都对土地利用类型有着不同的要求,仅仅考虑专家意见或者在专家意见上根据有限的数据来设定的阻力值具有一定的局限性。本文通过采用两种阻力值设定方案进行研究,能够根据研究目的相互结合得出更加全面的数据分析。

黄河三角洲作为典型的河口湿地生态系统,“夹点”具有维持和促进物种多样性、便于特有物种迁徙等功能。通过量化“夹点”的重要性,有利于提出合理的景观规划方案,降低破碎化程度,促进湿地生态系统健康可持续发展。通过障碍区的改善得分可以为黄河三角洲的湿地生态修复提供数据支持。

总之,最小耗费距离模型与电路理论模型对黄河三角洲区域的景观连通性评估结果趋于一致,电路理论同时具有识别“夹点”和障碍区的拓展功能。综合两种方法能够快速全面地分析海岸带地区的景观连通性,可以为我国海岸带景观保护与生态安全格局建设提供科学可行的研究方案。

参考文献 (References):

- [1] Minor E S, Urban D L. A graph-theory framework for evaluating landscape connectivity and conservation planning. *Conservation Biology*, 2008, 22 (2): 297-307.
- [2] 焦胜,李振民,高青,周恺,魏春雨,何韶瑶. 景观连通性理论在城市土地适宜性评价与优化方法中的应用. *地理研究*, 2013, 32(4): 720-730.
- [3] 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.
- [4] Goodwin B J, Fahrig L. Effect of landscape structure on the movement behaviour of a specialized goldenrod beetle, *Trirhabda borealis*. *Canadian Journal of Zoology*, 2002, 80(1): 24-35.
- [5] 陈国平,袁磊,王森,赵俊三. 基于最小耗费距离模型的西山区生态连接度评价. *国土资源科技管理*, 2017, 34(5): 62-72.
- [6] Doyle P G, Snell J L. *Random Walks and Electric Networks*. Washington, D.C.: Mathematical Association of America, 1984.
- [7] McRae B H. Isolation by resistance. *Evolution*, 2006, 60(8): 1551-1561.
- [8] 倪庆琳,丁忠义,侯湖平,贾宁凤,王慧. 基于电路理论的生态格局识别与保护研究——以宁武县为例. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(5): 67-73.
- [9] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. *生态学报*, 1999, 19(1): 10-17.
- [10] 康洁铭,刘雨,朱晓伟,金昌东,孙硕,张宝雷. 胶东半岛生态安全格局识别与优化布局. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(8): 1015-1025.
- [11] 徐占勇. 基于最小耗费距离森林景观斑块耦合网络的构建[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2019.
- [12] 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.
- [13] 孔繁花,尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建. *生态学报*, 2008, 28(4): 1711-1719.
- [14] Finch D, Corbacho D P, Schofield H, Davison S, Wright P G R, Broughton R K, Mathews F. Modelling the functional connectivity of landscapes for greater horseshoe bats *Rhinolophus ferrumequinum* at a local scale. *Landscape Ecology*, 2020, 35(3): 577-589.
- [15] 孙贤斌,刘红玉. 基于生态功能评价的湿地景观格局优化及其效应——以江苏盐城海滨湿地为例. *生态学报*, 2010, 30(5): 1157-1166.
- [16] Koen E L, Bowman J, Walpole A A. The effect of cost surface parameterization on landscape resistance estimates. *Molecular Ecology Resources*, 2012, 12(4): 686-696.
- [17] Koen E L, Bowman J, Garraway C J, Mills S C, Wilson P J. Landscape resistance and American marten gene flow. *Landscape Ecology*, 2012, 27(1): 29-43.
- [18] 王永丽,于君宝,董洪芳,栗云召,周迪,付玉芹,韩广轩,毛培利. 黄河三角洲滨海湿地的景观格局空间演变分析. *地理科学*, 2012, 32(6): 717-724.
- [19] 吴晶晶,栗云召,于良巨,高猛,吴晓青,毕晓丽. 黄河三角洲自然湿地景观连接度动态变化及其驱动因素分析. *生态环境学报*, 2018, 27(1): 71-78.

- [20] 张晓龙. 现代黄河三角洲滨海湿地环境演变及退化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [21] 栗云召. 黄河三角洲滨海湿地的演变过程与驱动机制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [22] 魏伟, 雷莉, 范雯, 周俊菊, 师玮, 颀斌斌. 基于累积耗费距离理论的石羊河流域水土资源优化配置. 生态学报, 2015, 34(2): 532-540.
- [23] 李慧, 李丽, 吴巩固, 周跃, 李雯雯, 梅泽文. 基于电路理论的滇金丝猴生境景观连通性分析. 生态学报, 2018, 38(6): 2221-2228.
- [24] 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.
- [25] McRae B H. Centrality Mapper Connectivity Analysis Software. Fort Collins: The Nature Conservancy, 2012. <http://www.circuitscape.org/linkagemapper>.
- [26] Guo X Y, Zhang X Q, Du S X, Li C, Siu Y L, Rong Y J, Yang H. The impact of onshore wind power projects on ecological corridors and landscape connectivity in Shanxi, China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 254: 120075.
- [27] 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.
- [28] McRae B H. Barrier Mapper Connectivity Analysis Software. Seattle WA: The Nature Conservancy, 2012. <http://www.circuitscape.org/linkagemapper>.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Mallarach J M, Marull J. Impact assessment of ecological connectivity at the regional level: recent developments in the Barcelona Metropolitan Area. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 2006, 24(2): 127-137.
- [32] Bueno J A, Tsihrintzis V A, Alvarez L. South Florida greenways: a conceptual framework for the ecological reconnectivity of the region. *Landscape and Urban Planning*, 1995, 33(1/3): 247-266.