



移动扫码阅读

赵良飞,王旭,王永刚,等.基于MCR模型的神东矿区景观生态安全格局构建研究[J].能源环境保护,2020,34(6):81-88.

ZHAO Liangfei, WANG Xu, WANG Yonggang, et al. Construction of landscape ecological security pattern of Shendong Mineral Area based on the mini-mum cumulative resistance model[J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(6): 81-88.

基于MCR模型的神东矿区景观生态安全格局构建研究

赵良飞¹, 王旭^{2,3,*}, 王永刚², 李亚翠², 王恒嘉²

(1.首都师范大学资源环境与旅游学院,北京100048;2.北京市环境保护科学研究院,国家城市环境污染控制工程技术研究中心,北京100037;3.河北省湿地生态与保护重点实验室,河北衡水053000)

摘要:针对神东矿区2018年高分一号影像,基于源汇理论的最小累积阻力(MCR)模型,构建了神东矿区景观生态安全格局。结果表明:神东矿区生态安全格为142.95 km²的11片生态源地,约占区域总面积的16%,源地的土地类型主要为草地、林地和水域,分布在人口密集的城镇和工业用地附近;53条生态廊道总长为392.84 km,穿越住宅区与工业区的生态廊道相对密集但长度有限,分散在各生态源之间的生态廊道长度相对较长。生成的40个生态节点主要分布在生态功能薄弱的工业用地、住宅用地和道路等地区,整体分布较为分散。

关键词:矿区生态安全格局;生态廊道;最小累积阻力(MCR)模型;神东矿区

中图分类号:X321

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2020)06-0081-08

Construction of landscape ecological security pattern of Shendong Mineral Area based on the mini-mum cumulative resistance model

ZHAO Liangfei¹, WANG Xu^{2,3,*}, WANG Yonggang², LI Yacui², WANG Hengjia²

(1. College of Resource, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Beijing Municipal Research Academy of Environmental Protection, National Engineering Research Center for Urban Environmental Pollution Control, Beijing 100037, China; 3. Hebei Key Laboratory of Wetland Ecology and Conservation, Hengshui 053000, China)

Abstract: According to the image of the Shendong mining area collected by GF1 in 2018, the landscape ecological security pattern of the Shendong mining area is constructed with the minimum cumulative resistance (MCR) model based on the source-sink theory. The results show that Shendong mining area has 11 ecological sources with a total area of 142.95 km², accounting for about 16% of the total area of the region. The land types are mainly grassland, woodland and water, which are near densely-populated towns and industrial area. The total length of 53 ecological corridors is 392.84 km. The ecological corridors crossing residential and industrial areas are relatively dense but short. The ecological corridor between the scattered ecological sources has a relatively long length. The generated 40 ecological nodes are mainly distributed in industrial land, residential land and roads with weak ecological functions, and the overall distribution is scattered.

Key Words: Ecological security pattern of mining area; Ecological corridor; Minimum Cumulative Resistance (MCR) model; Shendong Mineral Area

收稿日期:2020-09-05;责任编辑:金丽丽

基金项目:河北省湿地生态与保护重点实验室(筹)2019年度开放基金(hk1k201913);神东矿区生态文明建设规划项目资助;北京市环境保护科学研究院青年基金项目(Y2020-007)

第一作者简介:赵良飞(1994-),男,硕士研究生,主要从事河流生态健康和生态环境规划的研究。E-mail:zhaolf163mail@163.com

通讯作者简介:王旭(1987-),男,助理研究员,主要从事河流生态健康和生态修复技术研究。E-mail:wangxu8568658@163.com

0 引言

随着我国社会经济的飞速发展和工业化进程的不断推进,一系列的生态环境破坏问题也随之产生,这些问题的出现不仅造成严重生态安全隐患,也很大程度上影响了人们的生活质量和社会经济可持续性发展。如何构建生态安全格局,协调好经济发展与生态环境保护两者之间的关系是现代人们越来越关注的热点^[1]。

神东矿区现为我国最大的井工煤矿开采地,其又位于黄土高原丘陵沟壑区与毛乌素沙地过渡地带,生态环境十分脆弱,构建矿区生态安全格局,对保障矿区安全运行与生态环境质量提升具有重要的意义。基于神东矿区“生态矿区”目标的提出,针对生态本底脆弱性特征,识别出对于区域景观生态安全格局具有重要影响的生态源地和廊道,通过绿色基础设施建设、生态空间的优化,从而为保障和提升区域生态持续发展。在神东矿区发展的关键时期,探索矿区景观生态安全格局识别与优化可为神东矿区生态矿区建设以及打造为能源企业绿色发展的样板提供重要决策参考。

景观生态安全格局相关理论是由俞孔坚^[2]在前人景观安全优化方案研究的基础上提出的。随着研究的发展,国外学者最先利用该理论与方法对特殊物种栖息地保护或物种觅食迁徙等方面进行研究^[3-4],国内学者在土地生态适宜性评价^[5]、

生物多样性保护^[6]、流域及湿地^[7]、城市及山地区域^[8-9]等景观生态安全格局构建和应用方面做了大量的探索。目前,景观安全格局的构建方法逐渐成熟,形成了“识别源地-构建阻力面-提取廊道”的框架模式。但神东矿区与传统城市区域生态特征不同,如何在实现矿区高强度开发过程中确保区域生态安全是当前亟需解决的关键问题。生态安全格局则提供了一种重要的空间解决途径。因此,考虑神东矿区功能定位、本底生态环境状况和建设目标,构建了神东矿区景观斑块质量评价指标体系基于最小累积阻力模型识别生态廊道,构建景观生态安全格局,在此基础上探讨景观生态安全格局的优化对策,以期为神东矿区及其他工业矿区土地可持续利用、生态系统管理、生态安全维护提供技术支撑。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

神东矿区(神府东胜矿区的简称)位于毛乌素沙漠和黄河高原的过渡地带,地处陕蒙晋交界处,地理坐标是东经 109°51′-110°46′,北纬 38°52′-39°41′,研究区选取了布尔台煤矿等 11 个煤矿组成的神东核心矿区(图 1)。研究区域地表水资源短缺,生态环境十分脆弱,多年来随着煤炭资源的开发生态环境受到一定程度损坏,景观斑块连通性相对差,呈现破碎化。

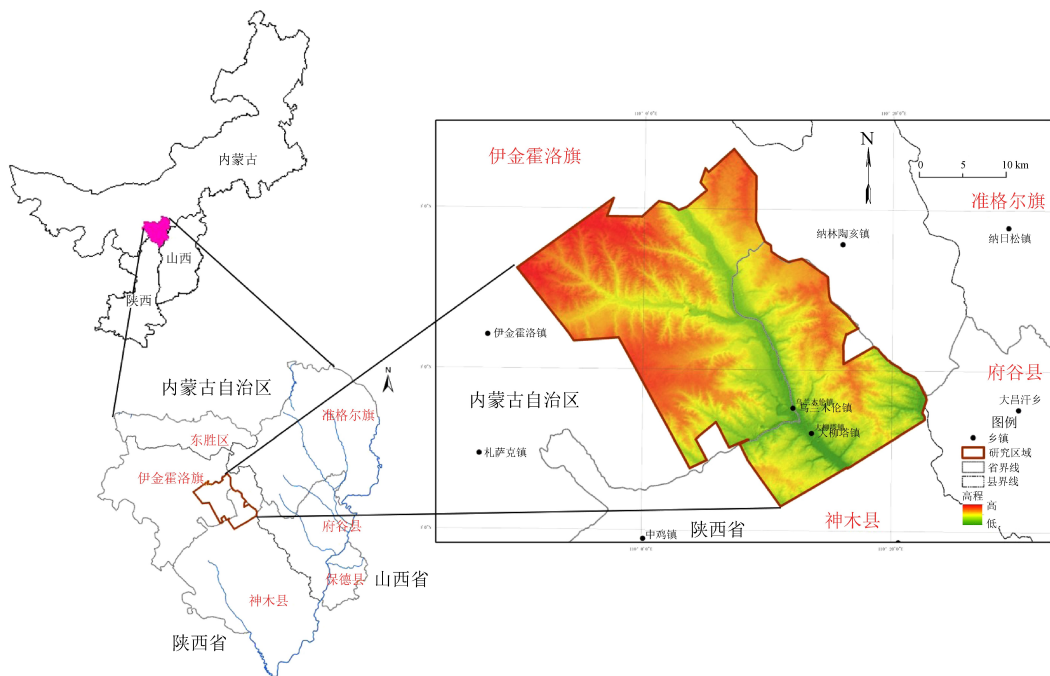


图1 研究区地理位置图

1.2 数据来源与预处理

本文的基础研究数据主要有:①高分一号(GF-1)PMS多光谱和全色数据。成像时间为2018年8月15日,多光谱数据空间分辨率为8米,有4个光谱波段,有蓝、绿、红和近红四个波段;全色数据空间分辨率为2米。GF-1 PMS的数据来源于资源卫星应用中心(<http://www.cresda.com/CN/>)。应用ENVI5.3软件对遥感数据进行处理,同时用处理后的遥感数据提取土地利用类型和归一化植被指数(NDVI)。②DEM数据(30米分辨率)来自于中国科学院计算机网络信息中心(地理空间数据云,<http://www.gscloud.cn/>)GDEM数据集。应用ArcGIS10.2软件空间分析模块提取出坡度数据。

1.3 研究方法

1.3.1 最小累积阻力模型

1992年Knaapen等人率先提出最小累积阻力(Minimum Cumulative Resistance, MCR)模型,其还可以用最小费用距离模型^[1,10]概念来表示。系用于计算从源到目的地运动过程中所需要耗费代价,也可指从“源”穿过多种阻力的景观要素所花费的费用或者克服障碍需要的最小阻力功,它是可达性的一种度量^[11]。依据Knaapen提出的模型和地理信息系统(ArcGIS)中常用的费用距离,再经国内俞孔坚等人^[12]修改后,基本公式为:

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

式中, R_{MC} 为最小累积阻力值; f 为一个未知的正函数,反映空间中任一点的最小阻力与其到所有源的距离和景观基面特征的正相关关系; D_{ij} 为物种从源 j 到空间某一点所穿越的某景观基面 i 的空间距离; R_i 为景观 i 对某物种运动的阻力。阻力值的大小,直接表现出物种迁移的难以程度。阻力值越小,物种从“源”穿过不同景观到达目的地越

容易;相反,物种迁移就越难。

1.3.2 生态源地识别

“源”作为物种扩散和维持的元点系在景观格局与生态过程研究中能促进生态过程发展的景观类型^[1],在维持景观格局的健康与完整、满足人类生态需求方面具有重要地位^[13]。在源地的选择方面,要综合考虑斑块自身特征属性和其与外界环境的相互作用。在指标选取方面,众多学者针对不同地区、不同目标选择的指标各异^[14-16]。本文也将选取评价指标对景观斑块质量进行评价从而识别研究区域的源地。

(1) 指标体系构建

鉴于神东矿区的功能定位及生态环境特征,本文基于维持景观过程完整性、生物多样性和生态系统稳定性的目的,从斑块自身特征属性、植被覆盖、重要斑块识别和人为干扰因素4个方面选取6项指标,应用层次分析法(AHP)构建一套适用本地区的指标体系。本次采用专家背靠背打分方式,选择了生态学、水文水资源学、景观学、环境学以及城市规划学等相关行业的15位专家进行打分,最终对评价指标的相对重要性构建判断矩阵确定指标权重,以此来构建本研究中的景观斑块质量评价体系(表1、表2)。

表1 神东矿区景观斑块质量评价指标相对重要性判断矩阵

指标	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
C ₁	-	2	2	1/3	1	1/2
C ₂	1/2	-	1	1/4	1/2	1/3
C ₃	1/2	1	-	1/4	1/2	1/3
C ₄	3	4	4	-	3	3
C ₅	1	2	2	1/3	-	1/2
C ₆	2	3	3	1/3	2	-

注:C₁为斑块面积,C₂为斑块形状指数,C₃为分维数,C₄为归一化植被指数,C₅为斑块重要值,C₆为人工控制程度。

表2 神东矿区景观斑块质量评价指标与指标权重

目标层	准则层	指标层	指标层对目标层的综合权重	生态学意义
景观斑块质量评价	斑块自身特征属性	斑块面积(C ₁)	0.120 7	影响生物活动的扩散和生物多样性的保护,属正向指标
		斑块形状指数(C ₂)	0.075 3	反映斑块的破碎化程度,属负向指标
		分维数(C ₃)	0.075 3	反映斑块形状的复杂度和人类活动对斑块的干扰,属正向指标
	植被覆盖	归一化植被指数(C ₄)	0.251 3	反映斑块的植被覆盖情况,属正向指标
		斑块重要性	斑块重要值(C ₅)	0.190 5
	外界环境干扰	人工控制程度(C ₆)	0.286 9	人为活动对生态系统的干扰与控制,属负向指标

(2) 评价指标计算

使用 Fragstats4.2 景观分析软件进行斑块面积、斑块形状指数和分维数的计算,并基于 ArcGIS10.2 软件把结果连接给各个斑块。归一化植被指数采用 ENVI5.3 软件计算得到^[17]。使用 ArcGIS10.2 软件、插件模块 Conefor Inputs for ArcGIS10 和 Conefor Sensinode2.6 软件完成斑块重要值的计算。人工控制程度指标为定性指标,经过分析不同景观类型受到不同的人为活动的影响,再经过专家打分评审,定性判定生态系统受人工控制程度(轻、中、强、极强)^[17]。

(3) 斑块综合评价模型构建与源地的识别

分别采用极差标准化法和采用分级赋分法对定量和定性指标进行标准化。在标准化和权重确定的基础上,运用加权法对景观斑块质量进行评估,计算结果的得分越高,景观斑块质量相对越好,公式如下:

$$G_i = \sum_{j=1}^n s_{ij} \times w_{ij} \quad (2)$$

式(2)中 G_i 为第 i 个评价斑块的质量总分值; w_{ij} 为第 i 个评价斑块第 j 个指标的权重; s_{ij} 为第 i 个评价斑块第 j 个指标的标准化值; n 为指标数。

采用 [0, 100] 区间连续数来制定分级量化值。根据评价指标的综合评价标准和分值,同时结合区域的实际生态特征状况,将斑块质量分为 5 个等级并赋分值(表 3),级别数值越小,景观斑块质量越好。选取 I 级斑块作为源地,择取质量总分值 $G_i \geq 75$ 的斑块作为生态源地,分级如表 3。

表 3 评价指标分级标准

斑块质量等级	综合评价指数 G_i	表征
I	[75, 100]	很好
II	[60, 75)	较好
III	[40, 60)	一般
IV	[20, 40)	较差
V	[0, 20)	很差

1.3.3 生态阻力面构建

生态阻力面的构建是景观安全网络构建的核心,生态阻力因子的选取和阻力值的确定是生态阻力面构建的关键。而阻力因子的相对值设定可以反映不同阻力因子的差异性。本文基于神东矿区的实际生态环境特征,并依据大量的文献成果与专家判断为基础^[15, 17-20],选择归一化植被指数、坡度、土地利用类型、距道路距离、距在用排矸场距离和距工业用地距离 6 个阻力因子来构建阻力

面,同时对各阻力因子划分等级并赋予相对阻力值,阻力值的范围设定为 1~200,1 为最小阻力值,200 为最大阻力值。其中归一化植被指数、坡度、土地利用类型相对阻力值与文献^[17]一致。其余阻力因子相对阻力值如表 4 所示。

表 4 神东矿区景观阻力因子及其权重和相对阻力值

阻力因子	权重	阻力等级	相对阻力值
距道路距离	0.1	[0, 200)	200
		[200, 400)	150
		[400, 600)	100
		[600, 800)	50
距在用排矸场距离	0.1	[800, ∞)	0
		[0, 100)	200
		[100, 150)	150
		[150, 200)	100
距工业用地距离	0.1	[200, 250)	50
		[250, ∞)	0
		[0, 100)	200
		[100, 150)	150
距工业用地距离	0.1	[150, 200)	100
		[200, 250)	50
		[250, ∞)	0

1.3.4 生态廊道的识别

在模拟构建廊道方面,目前使用较多的是最小累积阻力模型的运算法则原理,其与数学模型相比可以更好地揭示景观格局与生态过程和功能之间的联系并识别景观连通路^[21]。本文基于最小累积阻力模型运算原理,根据构建的综合阻力面和识别出的生态源地,借助 ArcGIS10.2 中空间分析模块中的成本距离功能得到神东矿区最小累积耗费距离表面。最后结合生态源地和最小累积耗费距离表面,运用成本路径功能提取生态廊道。

1.3.5 生态节点的识别

生态节点是连接相邻源之间的潜在跳板,其一般位于生态廊道上,分布在生态功能最薄弱处^[22],其通过将分散的各斑块串联起来,以此对生态流的运转起到决定作用。本文中利用 ArcGIS10.2 空间分析模块中的水文分析工具对生态节点进行提取。

2 结果与分析

2.1 源地识别结果

根据前文方法计算得到各斑块综合评价结果

和源地识别结果。结果显示,神东矿区综合评价指数 $G_i \geq 75$ 的斑块共计 11 个,此 11 个斑块作为生态源地(图 2),生态源地面积为共计 142.95 km^2 ,占区域总面积 16.03%。

从景观类型方面来说,选取的 11 个源地包括林地、水域和草地 3 种类型,其中以林地为主,水域主要为乌兰木伦河及其支流,水域生态源对生态功能稳定调控有重要作用,同时也是生物的重要栖息地和迁徙廊道。从空间分布来看,10 号水域源地从北向南贯穿研究区,其他源地主要分布在东南、西南和东北部分地区,但总体上均分布在人口密集的城镇和工业用地附近。从各煤矿分布来说,生态源地主要分布在上湾煤矿、哈拉沟煤矿、活鸡兔煤矿和大柳塔煤矿,各煤矿中的源地占比分别为 63.30%、40.02%、36.99%、24.79%。这些生态源地是区域生态红线区,生态功能较强,实现生物多样性保护所耗费的成本最小,建议纳入核心保护区范围,加强区域生态环境保护,增强生态稳定功能,通过采取自然+人工生态干预改善植被状态,不断扩大源地面积和提供源地生态稳定性。

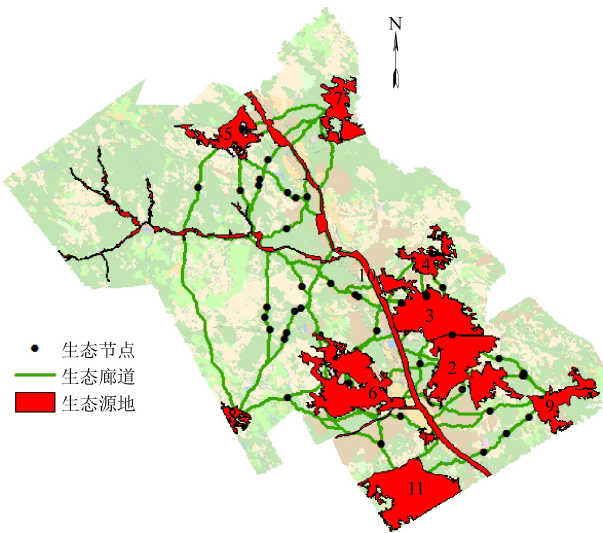


图 2 神东矿区景观生态安全格局

为了验证构建的景观生态安全格局有效性可行性,将神东矿区 7 个示范基地区与生态安全格局叠加可发现(图 3),在空间分布上可以看出,示范基地区基本都落入神东矿区生态源地范围内,包括红石圈治理区、大柳塔示范园、活鸡兔西山公园等。7 个示范基地区与全矿区生态源地具有较高的总体重合率(71.43%),其中 4 个示范基地区与源地完全重合,生态安全格局构建结果可信度相对较高。

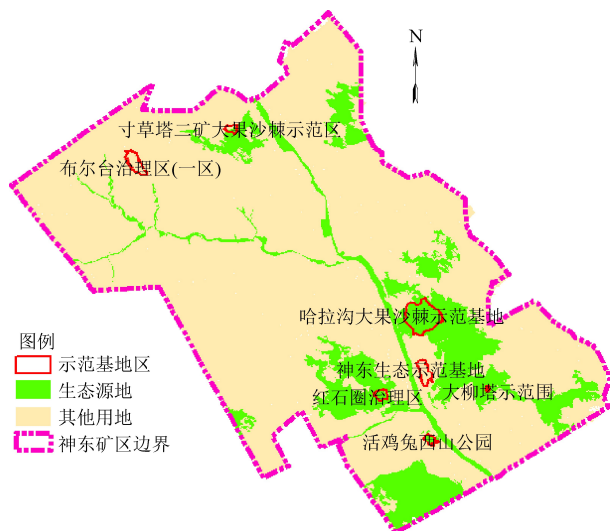


图 3 神东矿区生态安全格局构建可信度验证结果

2.2 阻力面建立结果

依据 1.3.3 所述阻力面的构建方法,首先对选取的 6 个阻力因子赋相对阻力值并生 30×30 的栅格单因子阻力面(图 4),从图中可以看出,人工景观由于受人类活动影响较大,其阻力值相对较大,其次为道路、工业用地以及排矸场影响作用区域自然和半自然的景观具有较小的阻力值,这个与黄鑫^[17]等人研究相一致。将各个单因子加权处理,生成综合阻力面(图 5);最后结合研究区的生态源地和综合阻力面计算结果,得到最小累积耗费距离表面(图 6)。

2.3 生态廊道和生态节点识别结果

根据 1.3.4 及 1.3.5 所述生态廊道和生态节点的识别方法,得到了 53 条生态廊道和 40 个生态节点(图 2)。

生态廊道能够提高区域的景观连通性,神东矿区内选取的 53 条生态廊道,总长为 392.84 km,此外贯穿矿区的乌兰木伦河也是一条物种迁徙的生态廊道。在空间尺度上,穿越住宅区与工业矿区的生态廊道相对比较密集,但长度有限,这主要是由于住宅区和工业矿区间分布有较多的生态源地,且各源地间距离比较近。位于零散分布的各生态源地间的生态廊道相对较长,可以将研究区内破碎的生境斑块连接起来,形成整体性和连通性的生态源地,有助于区域物种的迁徙和繁衍,对生物多样性维持具有十分重要作用。从景观类型上看,研究区内各生态廊道贯穿的景观类型混合有自然和人工景观。当廊道穿越自然景观时(林地、草地和水域),应采取补种、维护等方式,加强植被生长状况,并进一步防止工业生产或建设对

植被的破坏。当廊道穿越住宅区、道路和施工场地等人工景观时,应强化人工绿地的建设和管

护,做好人工绿地的补植、更新、维护等管护工作。

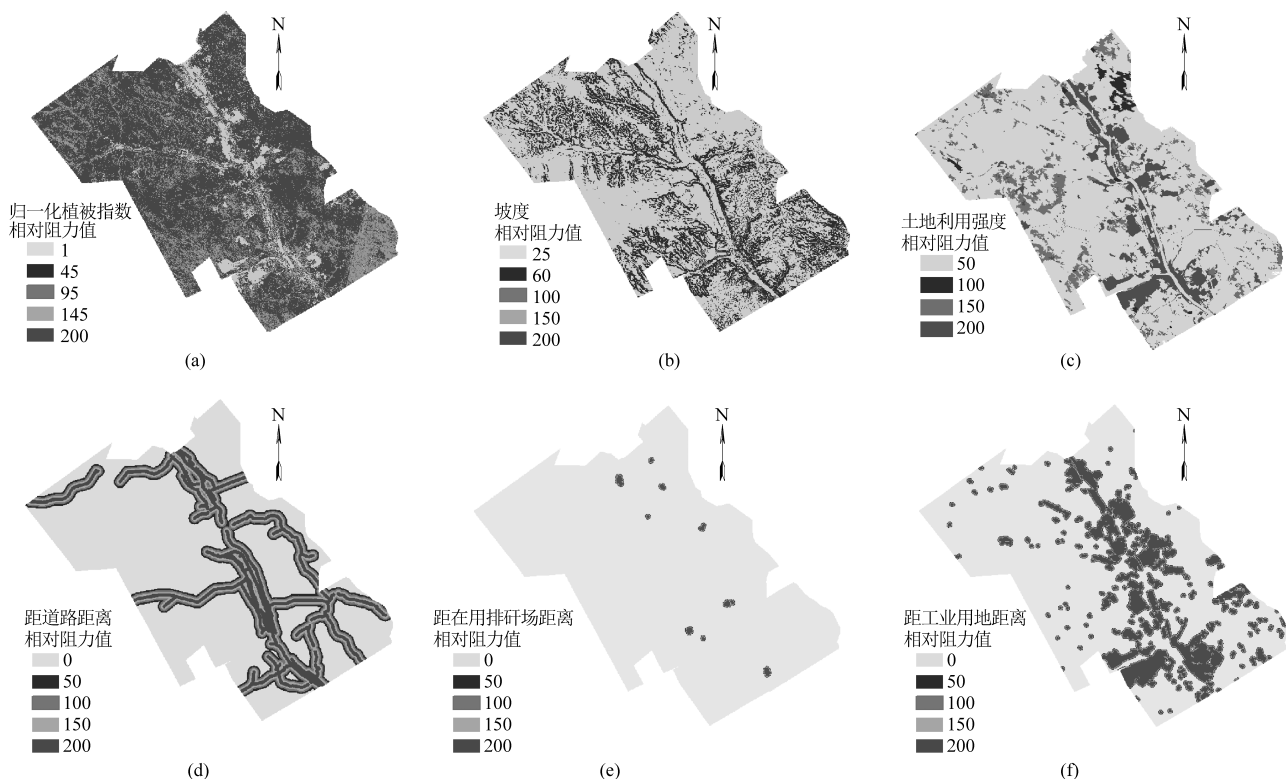


图4 神东矿区单因子阻力面

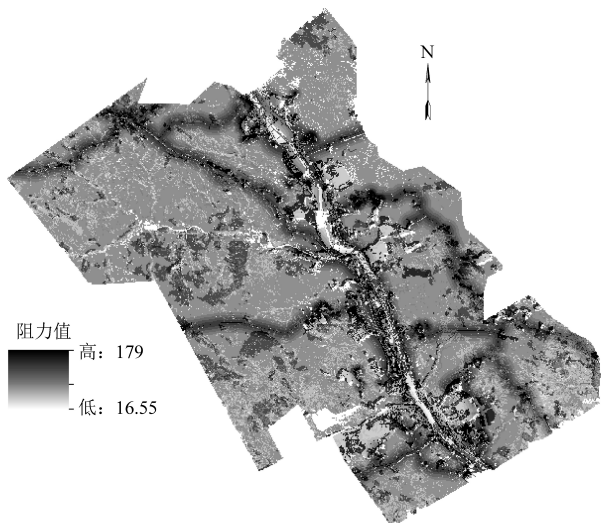


图5 神东矿区综合阻力面

连接生态廊道的生态节点也是生态环境保护的重要区域。对于神东矿区40个生态节点的保护应注重与周围景观相结合,提高生态节点稳定性,同时防止人类生产生活活动对生态节点周边环境的影响。把主要生态节点作为重要生态战略点加强建设和维护,对遭到损坏的节点进行重新构建,但重构时要尽量与周边生态环境相协调且以自然林地为主,通过战略点生态环境的回复,以此对周围较脆弱的景观形成辐射影响,对整体

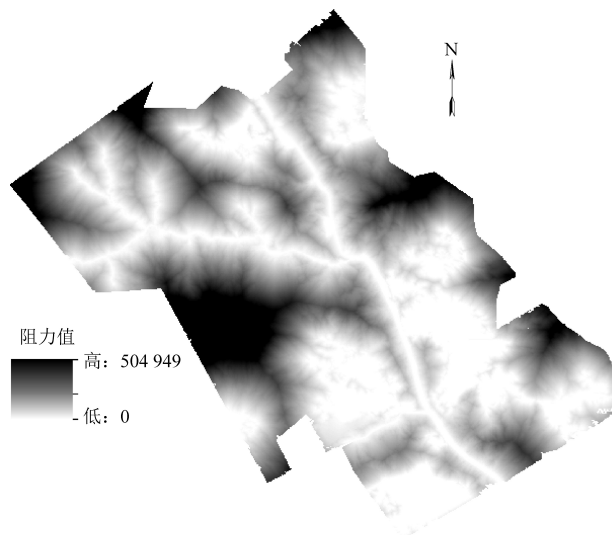


图6 神东矿区最小累积耗费距离表面

区域生态环境质量进行提升。

2.4 分析与讨论

MCR模型是一种生态安全格局构建的有效方法和手段,成功识别出神东矿区生态源地、生态廊道和生态节点,构建了神东矿区的景观安全格局,对研究区土地利用开发、生态安全保障提供科学指导。对于生态源地,建议纳入区域核心保护区规划范围内,进一步加强保护,并通过人工促进

措施改善植被现状,不断扩大源地面积和源地质量。对于生态廊道,建议及时应采取补种、维护、更新等方式,加强植被生长状况。对于生态节点的保护应注重与周围景观相结合,提高生态节点稳定性,进一步降低人类活动对生态节点影响,禁止在生态节点周边开展与生产有关的活动。

本研究基于 MCR 模型构建了神东矿区景观生态安全格局,在研究方法、研究区域等方面做了一些新的尝试,但因技术条件和数据获取等方面问题,仍有以下问题有待解决:(1) 本文从空间和数据信息两个层面验证了景观生态安全格局有效性可信度。除本文尝试的示范基地地区与生态安全格局叠置对比分析方法之外,生态安全格局构建有效性评价的其他定性或定量化研究方法还未完全成熟。因此,目前生态安全格局的可信度验证仍是一个有待解决的难点问题;(2) 阻力因子有待完善。本文以生态保护为目标,通过参考大量的文献和资料来选择阻力因子并构建阻力面,未来在大量社会经济发展数据和气象气候数据支撑作用下,考虑纳入更多因素,因此还需要做更进一步的探讨;(3) 未来应考虑进一步发展多模型、多方法的集成和应用,确保景观生态安全格局构建更加科学合理。

3 结论

基于景观生态安全格局和最小累积阻力(MCR)模型理论,通过对神东矿区生态源地、生态廊道和生态节点识别和分析,构建了神东矿区景观生态安全格局,得到如下结论:

(1) 神东矿区生态源地有 11 片,总面积为 142.95 km²,占总面积的 16.03%。生态源地的主要土地利用类型为林地、草地和水域,总体上均分布在人口密集的城镇和工业用地附近。

(2) 生态廊道 53 条,总长为 392.84 km,穿越住宅区与工业区的生态廊道比较密集,且长度较短;位于零散的各生态源间的生态廊道,长度相对较长,能够对研究区域生物多样性保持发挥关键作用。识别生态节点 40 个,主要分布在生态功能薄弱的工业用地、住宅用地和道路等部分地区,整体分布分散。

(3) 构建了基于生态源地-生态廊道-生态节点模式的神东矿区景观生态安全格局,对区域生态安全格局建设提出优化措施,以期为神东矿区及其他工业矿区土地可持续利用、生态系统管理、

生态安全维护提供科学依据。

参考文献

- [1] 蒙古军,王雅,王晓东,等. 基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25 (7): 1052-1061.
- [2] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999, 19 (1): 8-15.
- [3] Adriaenssens F, Chardon J P, Blust G D, et al. The application of 'least-cost' modeling as a functional landscape model [J]. Landscape and Urban Planning, 2003, 64: 233-247.
- [4] Greenberg JA, Rueda C, Hestir EL, et al. Least cost distance analysis for spatial interpolation [J]. Computers & Geosciences, 2011, 37: 272-276.
- [5] 李昊,李世平,银敏华. 中国土地生态安全研究进展与展望[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 30 (9): 50-56.
- [6] 尹婧博,李红,王冬艳,等. 生态脆弱区生物多样性保护安全格局研究-以吉林省大安市为例[J]. 资源开发与市场, 2019, 35 (1): 38-44.
- [7] 张玉虎,李义禄,贾海峰. 永定河流域门头沟区景观生态安全格局评价[J]. 干旱区地理, 2013, 36 (6): 1049-1057.
- [8] 李潇然,李阳兵,王永艳,等. 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[J]. 生态学报, 2005, 34 (7): 1959-1967.
- [9] 杜悦悦,胡熠娜,杨畅,等. 基于生态重要性和敏感性的西南山地生态安全格局构建-以云南省大理白族自治州为例[J]. 生态学报, 2017, 37 (24): 8241-8253.
- [10] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning [J]. Landscape and Urban Planning, 1992, 23 (1): 1-16.
- [11] Nikolakaki P. A GIS site-selection process for habitat creation: estimating connectivity of habitat patches [J]. Landscape and Urban Planning, 2004, 68: 77-94.
- [12] 俞孔坚. 景观生态战略点识别方法与理论地理学的表面模型[J]. 地理学报, 1998, 53: 12-20.
- [13] 陈利顶,傅伯杰,赵文武. "源" "汇" 景观理论及其生态学意义[J]. 生态学报, 2006, 26 (5): 1444-1449.
- [14] 李静,朱永明,张慧,等. 北戴河新区景观生态安全格局源地动态识别[J]. 水土保持研究, 2016, 23 (6): 340-344+351.
- [15] 蒙古军,王晓东,尤南山,等. 黑河中游生态用地景观连接性动态变化及距离阈值[J]. 应用生态学报, 2016, 27 (6): 1715-1726.
- [16] 毕晓丽,葛剑平. 基于 IGBP 土地覆盖类型的中国陆地生态系统服务功能价值评估[J]. 山地学报, 2004 (1): 48-53.
- [17] 黄鑫,曹学章,张明,等. 基于最小累积阻力模型的内蒙胜利煤田景观生态安全格局构建[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35 (1): 55-62.
- [18] 李晶,蒙古军,毛熙彦. 基于最小累积阻力模型的农牧交错带土地利用生态安全格局构建-以鄂尔多斯市准格尔

- 旗为例 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2013, 49 (4): 166-174.
- [19] 严军, 项竹君, 凌静. 石臼湖马鞍山环湖片区景观生态规划研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25 (9): 1375-1383.
- [20] 曾黎, 杨庆媛, 杨人豪, 等. 三峡库区生态屏障区景观格局优化: 以重庆市江津区为例 [J]. 生态学杂志, 2017, 36 (5): 1364-1373.
- [21] 潘竟虎, 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 [J]. 应用生态学报, 2015, 26 (10): 3126-3136.
- [22] 李晖, 易娜, 姚文璟, 等. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划 [J]. 生态学报, 2011, 31 (20): 5928-5936.

(上接 34 页)

- [16] 杨晓光, 倪文, 张箐, 等. 碱激发对粉煤灰活性的影响 [J]. 北京科技大学学报, 2007, 29 (12): 1195-1199.
- [17] 周玉兴, 于衍真, 范丽莎, 等. 粉煤灰制备聚硅酸盐絮凝剂的研究进展 [J]. 中国资源综合利用, 2013, 31 (3): 35-39.
- [18] 任书霞, 要秉文, 王长瑞. 粉煤灰活性的激发及其机理研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2008 (4): 50-52.