

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.04.002

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:赵菊花,王玉杰,杨永崇,王涛,田苗,邢晓露,郭志炜,苏文壮.基于遥感生态指数和MCR模型的沙漠丘陵区生态网络构建[J].西安理工大学学报,2023,39(4):464-475.

ZHAO Juhua, WANG Yujie, YANG Yongchong, WANG Tao, TIAN Miao, XING Xiaolu, GUO Zhiwei, SU Wenzhuang. Construction of ecological network in desert hilly region based on remote sensing ecological index and MCR model[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(4):464-475.

# 基于遥感生态指数和 MCR 模型的沙漠 丘陵区生态网络构建

赵菊花<sup>1</sup>, 王玉杰<sup>2</sup>, 杨永崇<sup>1</sup>, 王涛<sup>1</sup>, 田苗<sup>1</sup>,  
邢晓露<sup>3</sup>, 郭志炜<sup>1</sup>, 苏文壮<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054; 2. 北京洛斯达科技发展有限公司, 北京 100044;  
3. 河南交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 451460)

**摘要:**人类不合理的土地利用模式使沙漠丘陵区生态环境愈加恶化,构建生态网络对改善生态环境质量,维持生态系统稳定具有重要意义。本文以陕西省神木市为研究单元,引入耦合绿度、湿度、干度和热度四个指标的遥感生态指数(RSEI)进行生态环境质量评价,并以评价结果为依据识别生态源地;综合从地形因素、植被因素、人为因素和水资源因素四个方面选取8个阻力因子,通过空间主成分分析法(SPCA)构建研究区的综合生态阻力面;运用最小累积阻力模型(MCR)和重力模型提取研究区潜在生态廊道与节点,构建起“点-线-面”相互交融的生态网络框架。结果显示:①2015、2018年神木市生态遥感指数均值分别为0.473 3、0.507 5,整体生态环境质量处于中等水平,具有略微好转趋势,呈现出“西北差东南优”的空间分布特征。②以研究期间生态环境质量稳定且优良的区域为依据,确定了31个生态源地,面积共316.59 km<sup>2</sup>,占神木市总面积的4.15%,大部分集聚在研究区东南部,中部和西北部的生态源地破碎分散;源地的主要土地类型为草地、耕地及河流。③提取出神木市潜在生态廊道34条,生态节点22个,廊道总长度634.12 km,其中重要廊道20条,占总长度的57.58%,主要分布在研究区东南部,结合区域特征及研究结果提出了“一环四区”的生态网络框架布局。研究结果可为神木市区域生态安全规划与沙漠丘陵区生态网络构建提供科学参考。

**关键词:**生态网络;遥感生态指数;空间主成分分析;最小累积阻力模型;生态廊道;重力模型;沙漠丘陵区

中图分类号: X171.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2023)04-0464-12

## Construction of ecological network in desert hilly region based on remote sensing ecological index and MCR model

ZHAO Juhua<sup>1</sup>, WANG Yujie<sup>2</sup>, YANG Yongchong<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, TIAN Miao<sup>1</sup>,  
XING Xiaolu<sup>3</sup>, GUO Zhiwei<sup>1</sup>, SU Wenzhuang<sup>1</sup>

(1. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Beijing North-Star Technology Development Co., Ltd, Beijing 100044, China;

3. Henan Communications Planning & Design Institute Co., Ltd, Zhengzhou 451460, China)

收稿日期: 2022-07-04; 网络首发日期: 2023-04-25

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20230424.1526.022.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0119200); 国家自然科学基金资助项目(42271309)

第一作者: 赵菊花,女,硕士生,研究方向为地理空间信息技术与应用。E-mail: 1844764309@qq.com

通信作者: 王玉杰,男,硕士,中级工程师,研究方向为地理信息系统。E-mail: 1026071277@qq.com

**Abstract:** The unreasonable land use pattern of human beings makes the ecological environment in hilly desert region worse and worse. It is of great significance to construct ecological network in improving the ecological environment quality and maintaining the stability of ecological system. In this paper, Shenmu City of Shaanxi Province was taken as the research unit, with the ecological environment quality evaluated by using the remote sensing ecological index (RSEI) coupled with greenness, humidity, dryness and heat, and the ecological sources identified based on the evaluation results. Eight resistance factors were selected from terrain factor, vegetation factor, human factor and water resource factor, and the integrated ecological resistance surface was constructed by the spatial principal component analysis (SPCA). The minimum cumulative resistance (MCR) model and gravity model were used to extract potential ecological corridors and nodes in the study area, with the ecological network framework of “point-line-plane” integration constructed. The results showed are as follows: ①The mean ecological remote sensing indices of Shenmu City in 2015 and 2018 were 0.473 3 and 0.507 5, respectively. The overall ecological environment quality of Shenmu City was at a medium level with a slight improvement trend, showing a spatial distribution characteristic of “poor in northwest and excellent in southeast”. ②Based on the areas with stable and excellent ecological environment quality during the study period, 31 ecological sources were determined, covering a total area of 316.59km<sup>2</sup>, accounting for 4.15% of the total area of Shenmu City. Most of the ecological sources were concentrated in the southeast of the study area, and the ecological sources were fragmented in the middle and northwest of the study area. The main land types in the source area are grassland, arable land and river. ③34 potential ecological corridors and 22 ecological nodes were extracted in Shenmu City, with a total length of 634.12km, including 20 important corridors, accounting for 57.58% of the total length, and mainly distributed in the southeast of the study area. Based on regional characteristics and research results, the ecological network framework layout of “one ring and four districts” was proposed. The research results can provide scientific reference for Shenmu regional ecological security planning and desert hilly area ecological network construction.

**Key words:** ecological network; remote sensing ecological index; spatial principal component analysis; minimum cumulative resistance model; ecological corridor; gravity model; desert hilly region

随着社会经济的快速增长,人类对土地的开发利用程度不断增强,不合理的土地利用形式使得原本稳定的生态系统遭到破坏,生物多样性丧失,生态斑块破碎化程度增强,一系列生态问题严重威胁着区域生态系统的健康可持续发展<sup>[1]</sup>,生态网络能够加强生态斑块之间的连通性,有效保证各个斑块之间的物质能量交流与物种迁徙扩散。因此,构建生态网络被认为是维护生态系统健康稳定、提高生态系统服务功能和保障生物多样性持续恢复的重要途径<sup>[2]</sup>,目前已成为地理学、景观学及生态学等领域关注的焦点。

生态网络这一概念最早被用于生物保护领域,生态网络研究最具代表性的地区是欧洲和北美<sup>[3]</sup>,欧洲学者以构建过度开发区域的生态网络为主<sup>[4]</sup>,而北美学者则以构建类似自然保护区等未经开发土地的生态网络为主,一般称为“绿道网络”<sup>[5,6]</sup>。我国在生态网络构建方面的研究起步较

晚,但其研究领域、尺度与方法更为丰富。研究领域涉及生物多样性保护<sup>[7]</sup>、景观安全<sup>[8]</sup>、生物保护<sup>[9]</sup>、城市生态保护<sup>[10]</sup>等各个方面。研究尺度涵盖国家<sup>[11]</sup>、城市<sup>[12]</sup>、区域<sup>[13]</sup>各个层面。研究方法主要围绕“源地识别、阻力面构建、廊道提取”三大步骤展开,识别源地的方法分为直接识别与综合评价两种,直接识别法通常以自然保护区<sup>[14]</sup>、大型湿地或水域等<sup>[12]</sup>作为生态源,而综合评价法从生态系统服务价值<sup>[15]</sup>、景观连通性<sup>[16]</sup>、生态适宜性或敏感性<sup>[17]</sup>等角度,运用粒度反推和主成分分析法<sup>[18]</sup>、形态学空间格局法(MSPA)<sup>[16]</sup>等方法来筛选重要生态斑块。直接识别法关注生态斑块自身的属性,无法较好地结合区域整体生态环境,综合法多以生态系统的功能价值为依据,忽视了生态斑块的内部联系与稳定性<sup>[19]</sup>,对生态源地识别方法的研究仍在不断深入。构建生态阻力面的方法主要有土地利用数据直接赋值法<sup>[20]</sup>、多源要素综合赋值法<sup>[21]</sup>、生境质量评价

法<sup>[10]</sup>等。然而,大多数研究都未能与空间分析相结合,不能较好地体现生态阻力在空间上的分布情况,而将空间主成分分析法(SPCA)运用于生态阻力面构建,可有效解决此类问题<sup>[22]</sup>。生态廊道作为生态网络中物种迁移与交流的主要通道,提取方法主要包括最小累积阻力(MCR)<sup>[23]</sup>模型、电路理论<sup>[24]</sup>、重力模型<sup>[25]</sup>等。其中,MCR模型能够反映物种迁徙或扩散的潜在路径,并能较好地模拟景观对其运动过程的阻碍,在生态廊道提取中发挥了重要作用<sup>[26]</sup>。此外,目前的研究多集中于经济发展稳定的城市区域或人类活动较少的自然地域,往往忽视了经济落后、生态脆弱或开发强度较大的特殊地域。沙漠丘陵区作为我国西北地区典型的生态脆弱区,水土流失、土地荒漠化等问题严重,生态退化风险不断增加,生态恢复力较弱,目前针对该地区进行的生态网络构建研究相对较少。

神木市地处秦晋蒙三省(区)交界处,聚集高原、丘陵、沙地、草滩、湖泊等多种典型地貌,是“一带一路”、黄河“几”字弯城市群规划的实施对象,特殊的地理位置和复杂的地形地貌造就了其极度脆弱的生态环境。随着经济发展和人类活动对土地开发需求的不断增加,大型生态斑块或重要生物栖息地被建设用地、道路用地和煤炭基地拆分成支离破碎的生态岛,原本脆弱的生态环境愈加恶化,生态系统服务功能遭到严重破坏,经济发展与生态保护之间的矛盾日趋严重。鉴于此,本文以遥感数据为支撑,利用

RSEI识别生态源地,结合空间分析构建生态阻力面指标体系,运用MCR模型与重力模型提取潜在生态廊道与重要节点,完成了神木市生态网络的构建,并结合自然条件分析形成了“一环四区”的生态网络框架布局,可为神木市区域生态安全规划提供科学参考,并为类似沙漠丘陵型区生态网络的构建提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

神木市位于陕西省榆林市,是陕西省面积最大的县(市)。地处陕西北部、黄河西岸、秦晋蒙三省(区)交界处,东北与府谷县相连,西南与榆阳区、佳县相通,西北与内蒙古相邻,东南与山西省兴县相接,地理坐标 $38^{\circ}13'E \sim 39^{\circ}27'E, 109^{\circ}40'N \sim 110^{\circ}54'N$ ,全市占地面积 $7\,635\text{ km}^2$ 。地势由西北向东南倾斜,最大高差 $710\text{ m}$ 。地形地貌构成复杂多样,北部靠近毛乌素沙漠,为成片分布的沙漠草滩区,占区域面积的 $51.3\%$ ;中部为典型的黄土丘陵沟壑区,占比为 $37.8\%$ ;东南部黄河沿岸为水土流失严重的土石山区,占比为 $10.94\%$ ,整体属于沙漠丘陵地带。主要受极地大陆冷气团控制,大陆性气候较为显著,寒暑剧烈,气候干燥。境内水系较为发达,煤炭资源丰富,原煤主要分布在市境西北部,开采量大且分布广泛。神木市地理位置及2020年土地利用情况如图1所示。

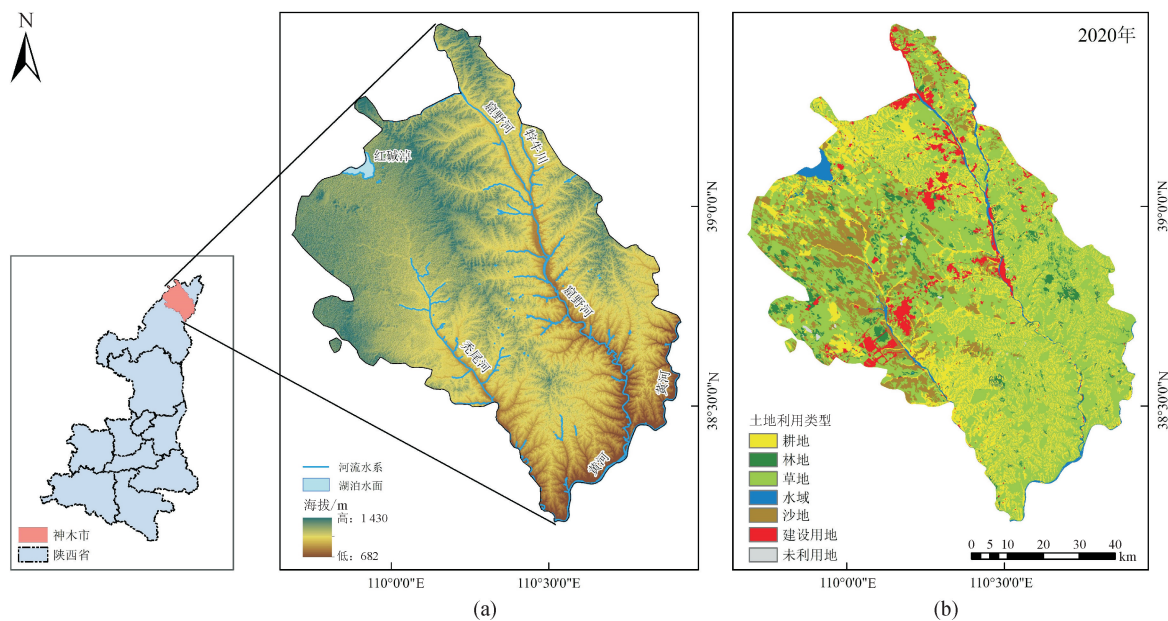


图1 研究区地理位置及2020年土地利用现状图

Fig.1 Geographical location of the study area and land use status map in 2020

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1822的标准地图制作,底图无修改。



## 1.2 数据来源

本研究所使用的数据包括:2015年7月1日和2018年5月22日的Landsat8 OIL影像数据、30m分辨率的数字高程模型(DEM)、2018年神木市土地利用现状数据、河流水系数据及道路交通数据。其中,遥感影像数据和DEM数字高程数据来源于国家地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn>);土地利用现状数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),根据研究需求可提取其中的工业用地和居民地作为阻力因子;河流水系与道路交通数据来源于Open Street Map平台(<http://www.openstreetmap.org>)。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 遥感生态指数

遥感生态指数(RSEI)由徐涵秋<sup>[27]</sup>提出,该指数集成了绿色、湿度、干度和热度四个指标因子,可对区

$$S_1 = [(\rho_{S1} + \rho_{red}) - (\rho_{NIR} + \rho_{Blue})] / [(\rho_{S1} + \rho_{red}) + (\rho_{NIR} + \rho_{Blue})] \quad (3)$$

$$I_{BI} = \left[ \frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} - \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} - \frac{\rho_{Green}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}} \right] / \left[ \frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} + \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} + \frac{\rho_{Green}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}} \right] \quad (4)$$

$$N_{DBSI} = (S_1 + I_{BI}) / 2 \quad (5)$$

式中: $\rho_{Blue}$ 、 $\rho_{Green}$ 、 $\rho_{Red}$ 、 $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{SWIR1}$ 、 $\rho_{SWIR2}$ 分别为遥感影像数据中蓝、绿、红、近红外、短波红外1、短波红外2波段的地物反射率。

4) 热度指标:一般可通过大气校正法反演得到地表温度LST,其计算公式为:

$$B(L_{ST}) = [L_{\lambda} - L_{\uparrow} - \tau(1 - \epsilon)L_{\downarrow}] / \tau \epsilon \quad (6)$$

$$L_{ST} = K_2 / \ln(K_1 / B(L_{ST}) + 1) - 273 \quad (7)$$

式中: $L_{ST}$ 为研究区的真实地表温度; $B(L_{ST})$ 为黑体热辐射亮度; $L_{\lambda}$ 为影像热红外波段的辐射亮度; $L_{\uparrow}$ 、 $L_{\downarrow}$ 、 $\tau$ 为大气剖面参数; $\epsilon$ 为地表比辐射率; $K_1$ 、 $K_2$ 为定标参数。详细计算过程可参考文献<sup>[28]</sup>。

5) 遥感生态指数计算:为消除量纲差异,计算前对各指标进行离差标准化处理,为避免极端值的影响,本研究选取累积概率5%~95%的DN值为置信区间。正规化处理计算如下:

$$N_i = (I_i - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad (8)$$

式中: $N_i$ 为正规化后的指标值; $I_i$ 为该指标在像元*i*的值; $I_{max}$ 、 $I_{min}$ 为该指标的最大、最小像元值。

考虑到水域会对真实湿度条件造成一定影响,本文使用改进归一化水体指数(MNDWI)<sup>[29]</sup>来去除研究区内主水体信息,水体掩膜计算如下:

$$M_{NDWI} = (\rho_{Green} - \rho_{SWIR1}) / (\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}) \quad (9)$$

对四个指标的结果耦合并进行主成分变换,选取第一主成分(PC<sub>1</sub>)标准化处理得到研究区的RSEI:

域内综合生态环境质量进行客观准确的分析与评价<sup>[19]</sup>。四个指标分别对应归一化植被指数、遥感影像湿度分量、建筑-裸土指数和地表温度,对四个指标进行主成分分析得到RSEI,各指标计算公式如下:

1) 绿色指标:归一化植被指数(NDVI)是反映植被生长情况的指标,其计算公式为:

$$N_{DVI} = (\rho_{NIR} + \rho_{RED}) / (\rho_{NIR} - \rho_{RED}) \quad (1)$$

2) 湿度指标:缨帽变换过程中的湿度分量(WET)能反映植被和土壤的含水状况,其计算公式为:

$$W_{ET} = (0.1511\rho_{Blue} + 0.1973\rho_{Green} + 0.3283\rho_{Red} + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2}) \quad (2)$$

3) 干度指标(NDBSI):由影响地面干度的裸土指数(SI)和建筑指数(ABI)的均值表示,其计算公式为:

$$R_{SEI0} = 1 - \{P_{C1} [f(N_{DVI}, W_{ET}, N_{DBSI}, L_{ST})]\} \quad (10)$$

$$R_{SEI} = \frac{(R_{SEI0} - R_{SEI0, \max})}{(R_{SEI0, \max} - R_{SEI0, \min})} \quad (11)$$

式中: $R_{SEI}$ 为正规化后的遥感生态指数,取值介于0~1之间,与生态环境呈正相关; $R_{SEI0}$ 、 $R_{SEI0, \min}$ 、 $R_{SEI0, \max}$ 分别为初始遥感生态指数及其最小值、最大值。

### 1.3.2 构建生态阻力面指标体系

生态阻力面指标体系的构建对研究区的生态安全评价具有重要意义,因此本研究结合神木市实际生态环境状况与数据的可获取性,参考相关文献,综合地形、植被、水资源和人为四方面因素,选取出8个因子构建生态阻力面指标体系,如表1所示。其中,坡度、高程和土地利用类型属于区域地形地貌特征,前两者关系到物种的空间分布情况,后者关系到生态源之间物质能量的交流畅阻;植被覆盖度属于植被影响因素,其覆盖程度将直接影响区域生物多样性的恢复情况;距水体的距离属于水资源因素,河流具有较高的生态系统服务价值,与水体之间的距离决定了生态源扩展的可能性;而工业用地、道路和居民地属于人为限制因素,会一定程度阻碍其周边土地及景观的发展。参考相关文献对各个阻力因子进行分级,各因子均分为四个等级,等级越高,阻力越大,耗费的成本也越高。此工作借助ArcGIS



10.2 软件的欧氏距离和重分类工具实现,各因子的单因子阻力面如图 2 所示。

SPCA 分析法综合了统计学原理与 GIS 技术,不仅能够使主成分分析结果更直观地展现在空间上,而且可通过计算准确客观地确定各指标的权重<sup>[24]</sup>。考虑到各阻力因子的选取具有一定的随机

性和人为性,且各因子对研究区生态安全的阻力强度存在差异,因此本研究通过 SPCA 分析得到的特征值、方差贡献率和载荷矩阵来确定各阻力因子的权重,权重越大,说明对综合阻力面的影响越强烈(见表 1)。借助 GIS 的栅格计算工具加权叠加 8 个阻力因子,从而得到神木市的综合生态阻力面。

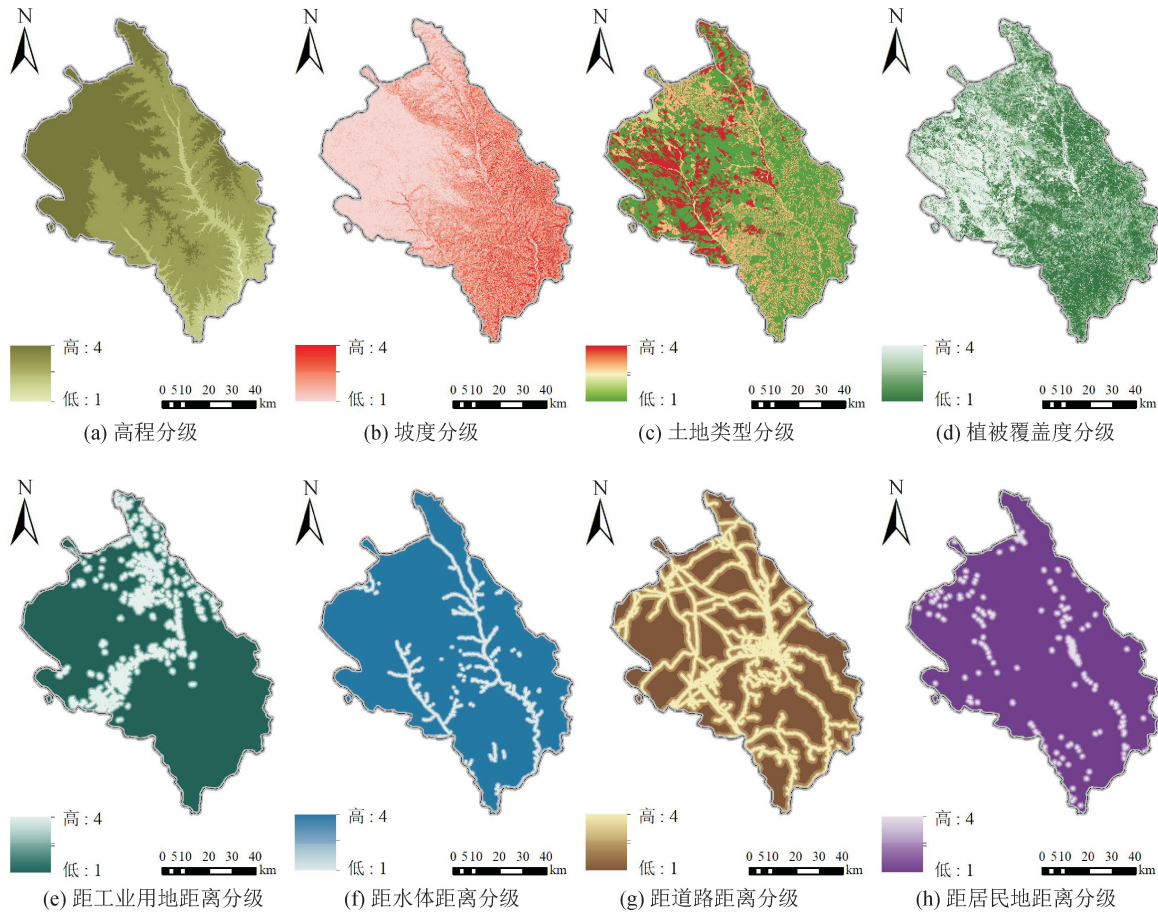


图 2 神木市单因子生态阻力面分级图

Fig. 2 Classification map of single factor ecological resistance surface in Shenmu City

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改。

表 1 神木市生态阻力因子等级划分

Tab. 1 Classification of ecological resistance factors in Shenmu City

评价因子	参考文献	阻力值 $x$				权重
		一级	二级	三级	四级	
高程/m	王琦等 <sup>[23]</sup>	$x < 800$	$800 \leq x < 1\ 000$	$1\ 000 \leq x < 1\ 200$	$x \geq 1\ 200$	0.15
坡度/(°)	蒙吉军等 <sup>[30]</sup>	$x < 7$	$7 \leq x < 15$	$15 \leq x < 25$	$x \geq 25$	0.13
土地利用类型	齐松等 <sup>[16]</sup>	林地、草地	水域	耕地	建设用地、其它用地	0.26
植被覆盖度/%	谢花林 <sup>[31]</sup>	$x \geq 65$	$50 \leq x < 65$	$35 \leq x < 50$	$x < 35$	0.13
距工业用地距离/m	李玉平等 <sup>[32]</sup>	$x \geq 1\ 500$	$1\ 000 \leq x < 1\ 500$	$500 \leq x < 1\ 000$	$x < 500$	0.08
距水体距离/m	杨珊珊等 <sup>[33]</sup>	$x < 100$	$100 \leq x < 500$	$500 \leq x < 1\ 000$	$x \geq 1\ 000$	0.12
距道路距离/m	刘孝富等 <sup>[34]</sup>	$x \geq 2\ 000$	$1\ 000 \leq x < 2\ 000$	$500 \leq x < 1\ 000$	$x < 500$	0.08
距居民地距离/m	王石英等 <sup>[35]</sup>	$x \geq 1\ 500$	$1\ 000 \leq x < 1\ 500$	$500 \leq x < 1\ 000$	$x < 500$	0.05

### 1.3.3 最小累积阻力模型

最小累积阻力(MCR)模型最早由 Knaapen 等<sup>[36]</sup>提出,后由俞孔坚<sup>[37]</sup>修改并广泛应用于生态廊道的识别研究中。该模型通过分析生物从生态源到其他目标源运动过程中所克服的空间阻力,从而得出其累积耗费阻力最小的路径,能够准确反映源地间的连通性与物种间的通行可达性<sup>[38]</sup>,主要用来反映从目标点到源地的最小成本路径,该路径是生物物种迁徙和扩散的最佳路径。其计算如公式为:

$$M_{CR} = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (12)$$

式中: $M_{CR}$ 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; $D_{ij}$ 为生态源地 $j$ 到景观 $i$ 的空间距离; $R_i$ 为景观单元 $i$ 对生物运动的阻力系数。

### 1.3.4 重力模型

判断潜在生态廊道之间的相对重要性有助于确立生态保护的优先级,从而促进生态建设工作高效而有序的开展。重力模型能够较好地量化不同生态源地间的相互作用强度,从而反映出各个生态廊道的重要程度<sup>[13]</sup>。其计算公式为:

$$G_{ab} = \frac{N_a \times N_b}{D_{ab}^2} = \frac{L_{\max}^2 \times \ln S_a \times \ln S_b}{L_{ab}^2 \times P_a \times P_b} \quad (13)$$

式中: $G_{ab}$ 为生态源地 $a$ 与 $b$ 之间的相互作用强度; $N_a$ 和 $N_b$ 为生态源地 $a$ 和 $b$ 的权重值; $D_{ab}$ 为生态源地 $a$ 和 $b$ 之间生态廊道阻力的标准化值; $P_a$ 和 $P_b$ 为生态源地 $a$ 和 $b$ 的阻力值; $S_a$ 和 $S_b$ 为生态源地 $a$ 和 $b$ 的面积; $L_{ab}$ 为生态源地 $a$ 和 $b$ 之间生态廊道的累积阻力值; $L_{\max}$ 为全部生态廊道累积阻力的最大值。

## 2 结果与分析

### 2.1 生态环境质量评价

遥感生态指数(RSEI)以遥感影像信息为基础,集成了多重监测指标,能够更加直接快速地定量反映研究区生态质量的优劣。参考已有研究和《生态环境状况评价技术规范》(HJ 192—2015),以0.2为间距将生态环境质量划分为5个等级,分别为差等(0,0.2]、较差等(0.2,0.4]、中等(0.4,0.6]、较优等(0.6,0.8]、优等(0.8,1]。由评价结果可知,神木市2015年、2018年的RSEI均值分别为0.4733、0.5075,按照上述分级标准,研究期间其生态质量处于中等水平,并有略微好转趋势。

为进一步保证生态环境质量评价结果的可信度及真实性,对2015、2018年生态质量评价结果进行等权叠加分析,得到研究期间神木市生态质量综合评价结果,如表2、图3所示。2015—2018年间,研究区生态环境质量处于中等水平且呈现好转趋势,较优和优等土地面积占比分别由19.21%、12.13%增加到24.77%和13.40%,较差与差等土地面积相对减少,中等土地面积占比基本保持不变。其生态质量在空间分布上较为稳定,主要表现为:西北部生态质量差等斑块集中分布,该区域地势较高,多以草地、沙地型灌木林地为主,工业用地与建设用地分布广泛;东北部与南部生态质量优等斑块居多,分布较为零散,该区域地势较低,多以草地、耕地为主,居住密度小,工业用地稀少,靠近水源;北部地区与中部丘陵区生态质量多处于中等状态,该区域建筑用地分布较为集中,受人类活动干扰强烈。综合来看,神木市生态环境质量处于“西北差东南优”的不平衡发展状态。

表2 2015—2018年生态质量等级面积及百分比

Tab.2 Area and percentage of ecological quality grade from 2015 to 2018

等级	2015年		2018年		2015—2018年综合	
	面积/(km <sup>2</sup> )	百分比/%	面积/(km <sup>2</sup> )	百分比/%	面积/(km <sup>2</sup> )	百分比/%
差	1 206.59	16.33	1 013.06	13.76	1 041.93	14.17
较差	1 736.87	23.50	1 430.56	19.43	1 544.99	21.00
中等	2 130.79	28.83	2 108.79	28.64	2 187.02	29.73
较优	1 419.56	19.21	1 823.31	24.77	1 790.33	24.34
优	896.66	12.13	986.32	13.40	791.31	10.76

### 2.2 生态源地选取与分析

生态源地是生态价值较高的区域,能够促进物质、能量及功能服务的顺畅流动,具有良好的生态稳定性和扩展性,是构建生态安全网络的重要基础。一般在选取时主要考虑生态功能强、生物多样性好

的区域。本研究将RSEI计算结果作为选择生态源地的依据,为确保所选取的生态源地斑块的稳定性,避免单期数据的评价结果存在波动,本文选取2015—2018年生态环境质量综合评价结果为优的斑块作为神木市的生态源地,以1.8km<sup>2</sup>为阈值剔除

零碎斑块选取出 20 个符合条件的生态斑块,考虑到河流作为物质交流的重要场所,生态系统服务价值较高,故以 0.4 km<sup>2</sup> 为阈值筛选出 11 个河流斑块作为河流型生态源地,其中包含了中国最大的沙漠湖泊红碱淖(位于研究区北部的尔林兔镇,将其确定为生态源地对提高西北部沙漠草滩区的生态连通性具

有重要作用)。最终共确定了 31 个生态源地,面积为 316.59km<sup>2</sup>,占神木市土地总面积的 4.15%。鉴于研究结果中生态源地的小型斑块居多,且分散状态明显,可将生态质量中等以上的土地斑块设置为生态源地缓冲区,以便为核心生态源地的保护与扩展提供参考。

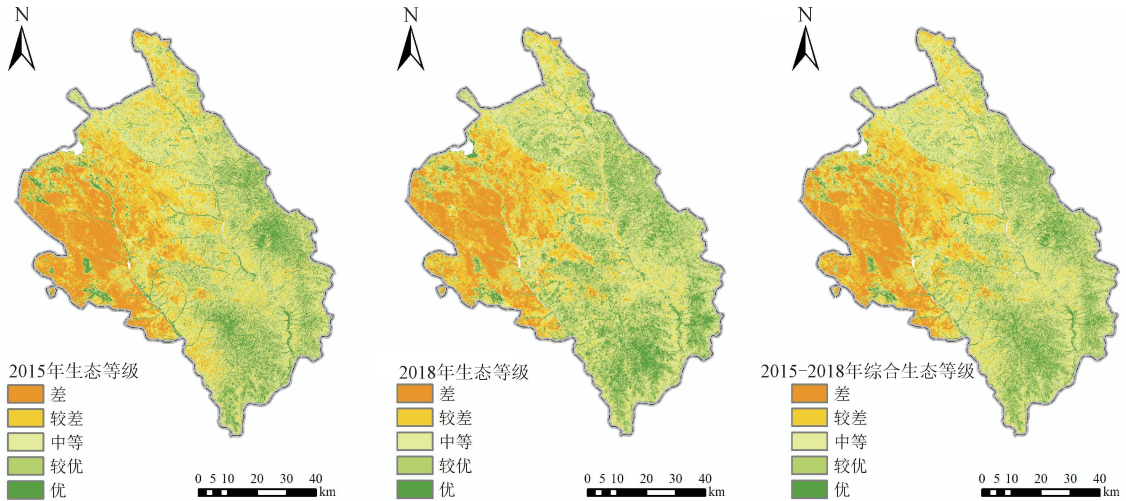


图 3 2015—2018 年神木市生态环境质量分级

Fig. 3 Ecological and environmental quality classification of Shenmu City from 2015 to 2018  
注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改。

生态源地选取结果如图 4 所示。

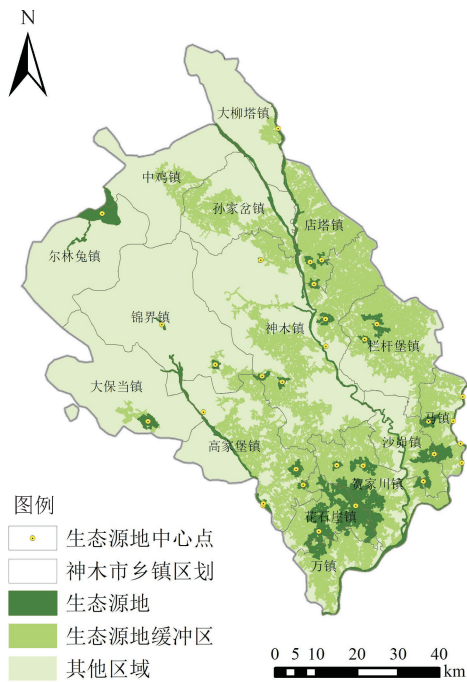


图 4 神木市生态源地及生态缓冲区选取结果

Fig. 4 Selection results of ecological source area and ecological buffer zone in Shenmu City

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改。

可以看出,生态源地斑块在南部较为集聚,自南

向北逐渐分散化,大型源地斑块较为稀少,以连通南北的河流生态源地为主;生态源地土地类型主要为草地、耕地及河流;域内贺家川镇和花石崖镇的生态源地面积最大,呈现集聚状态,沙峁镇、马镇、栏杆堡镇和店塔镇生态源地破碎化严重,小型生态源地斑块居多。总体来看,域内生态源地大多靠近水系,说明河流在区域生态安全网络构建中占据重要地位,西北部与东南部的生态源地在空间分布上呈现出明显差异,说明南北地区生态连通性较差。研究区生态源地缓冲区集中分布在生态质量优良的东南部土石山区,对于中心生态源地的保护和扩展具有积极作用。

### 2.3 生态阻力面构建

根据各指标权重,对 8 个生态阻力因子运用叠加分析得到综合生态阻力面,如图 5 所示。由图 5 可以看出,综合阻力面的空间分布情况与土地利用类型、植被覆盖度和坡度基本相符,研究区阻力值较大的区域主要分布在西北部的沙漠草滩区,在生态质量优良的东南部阻力值相对较小。

对综合阻力面结果运用成本距离分析生成神木市生态源地的最小累积耗费阻力面,使用自然间隔法将研究区的累积阻力分为高、较高、中等、较低和最低阻力五个等级,如图 6 所示。由图 6 可以看出,研究区物种的生态过程所受阻力越大、等级越高,越不利于生态环境的扩展与优化;域内低阻力与较低阻



力主要分布在东南部,该区域集中着生境质量较高的土地斑块(靠近河流,植被覆盖度高),有助于维持物种多样性。高阻力区主要分布在工业用地居多、水系不发达的西北沙漠草滩区,对比图 4 可以看出,越接近生态源地,累积耗费阻力越小。

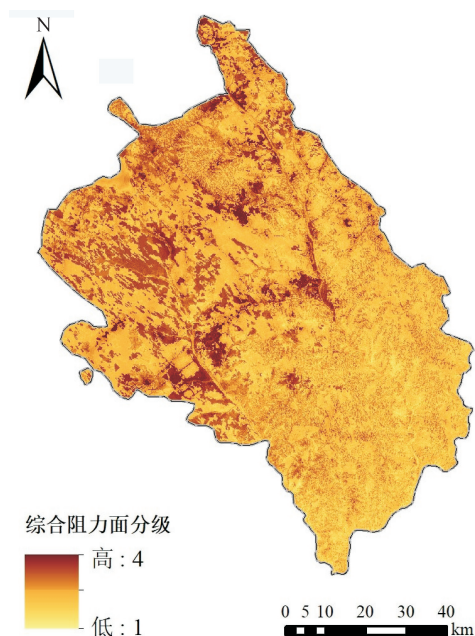


图 5 神木市综合生态阻力面分级图

Fig. 5 Classification map of comprehensive ecological resistance surface in Shenmu City

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改。

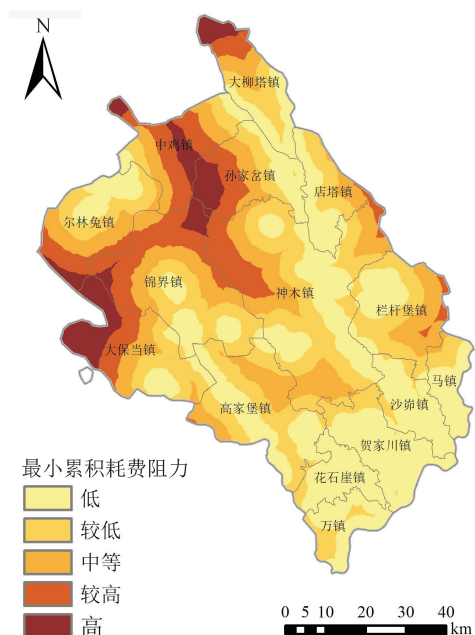


图 6 神木市最小累积耗费阻力面

Fig. 6 Resistance surface of minimum cumulative consumption in Shenmu City

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改。

## 2.4 生态廊道识别

基于最小累积阻力(MCR)模型,使用成本路径分析工具,计算得出每一个生态源地与其他源地间的最小累积成本距离,经过叠加得到各源地与其目标源地间的最小耗费路径,此路径是物种在迁移与扩散过程中能够有效避免外界干扰的最优路径,剔除重复路径后,最终识别出 34 条潜在生态廊道,总长度为 634.12km。由图 7 可以看出,源地 8、10,源地 4、11、6、7,源地 1、3、9、21 之间各形成了与河道分布相一致的河流型生态廊道,其余廊道大多为河流型廊道与周边各生态源地的连通线;由于研究区西北部环境质量整体较差,生态源地斑块稀少,该区域存在生态廊道单一甚至匮乏的情况,仅在源地 1、3、9 之间有一条维系南北物种交流的廊道。总体来看,研究区南北部生态廊道间阻力较大,部分区域呈现断裂不连通的状态。

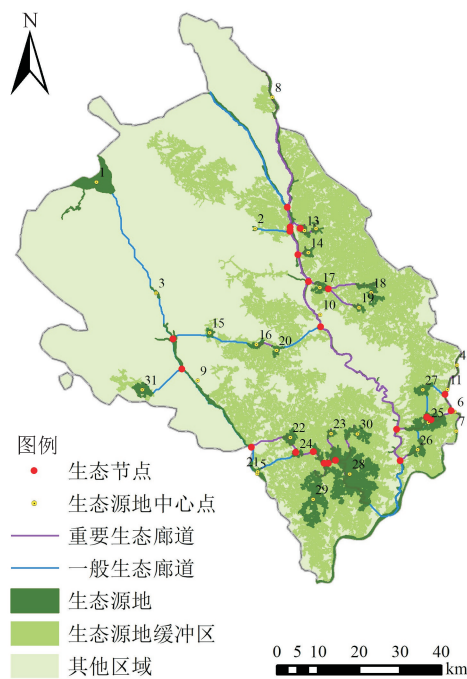


图 7 神木市潜在生态廊道及安全网络

Fig. 7 Potential ecological corridors and safety network in Shenmu City

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改。

鉴于每条生态廊道在生态网络中所起的桥梁贯通作用不尽相同,因此本文根据重力模型对各源地间生态廊道的重要性进行计算,在此基础上,可对研究区内重要性较高的生态廊道采取重点保护措施。将结果中作用力值较大的源地间的生态廊道确定为生态网络中的重要廊道,其余均视为一般廊道。结果显示,31 个生态源地两两之间的作用强度存在显著差距,其中,源地 28 与 29 之间的相互作用强度最

大,说明该源地间生态廊道在生态网络构建中起到重要作用,廊道 11 与 14、10 与 14、6 与 7、12 与 13 的重要性仅次于廊道 28 与 29,在未来规划中,应将这 5 条生态廊道及其周边生态系统划入重点保护区域;源地 4、6、8 之间,源地 3、10 之间的相互作用力最小,这两处源地相距较远,中间累积阻力大,极易形成廊道断裂和不连通的情况,未来需注意加强“脚踏板”建设。最终,以相互作用强度 100 000 作为阈值筛选出 20 条重要生态廊道,占有潜在廊道总长度的 57.58%,将其作为神木市生态网络构建中重点保护的對象。

## 2.5 生态网络构建

生态节点是物种迁徙与信息能量交流的拐点,通常处于生态功能最薄弱的位置,具有“脚踏板”的作用。一般由最小路径与最大路径的相交点或最小路径的汇聚点组成<sup>[39]</sup>。本研究以最小耗费路径的汇聚点作为生态节点,利用 ArcGIS 10.2 的空间分析功能提取出 22 个生态节点。提高生态节点的环境质量能有效减少生态过程所受阻力,从而增强区域生态系统服务功能与生态结构稳定性,故在未来规划中,应尽可能提高节点位置的环境质量。

生态网络主要由核心斑块、连通廊道和关键节点组成,生态网络是自然界物质信息交流的主要途径,对区域生态安全建设意义重大。本研究最终选取 31 个生态源地、34 个生态廊道与 22 个生态节点共同构成区域“点-线-面”相互交融的生态网络框架(图 7),该框架可有效加强神木市生态建设与发展。其中,生态源地包括 20 个生态质量优质土地斑块和 11 个天然河流斑块;潜在生态廊道共有 34 条,包括 7 条河流型生态廊道,其中 20 条为需要优先保护的重要生态廊道;生态节点包括研究区所有生态廊道之间的交点。

本研究针对所构建的生态网络,结合研究区自然条件,提出了构建神木市“一环四区”的生态网络框架布局,如图 8 所示。“一环”是指串联研究区各生态源地的河流型生态廊道形成的生态主环,主要起到维持其天然水生生态环境和连接东南与西北地区综合生态环境的重要作用;“四区”是指以研究区地形特征为基础,结合生态源地和生态廊道分布情况,划分出四片生态保护区,包括南部的生态保护区、东北部和西部的生态过渡区、西北部的生态修复区,四区之间相互协调共同促进区域生态网络全方位稳定发展。“一环四区”的生态网络框架布局能够更好地保证研究区内主要生态源地间的连通性,促进各物种间信息能量的交换,对维持研究区生态系

统健康可持续发展具有重要意义,同时,可为类似沙漠丘陵区生态网络的构建提供借鉴。

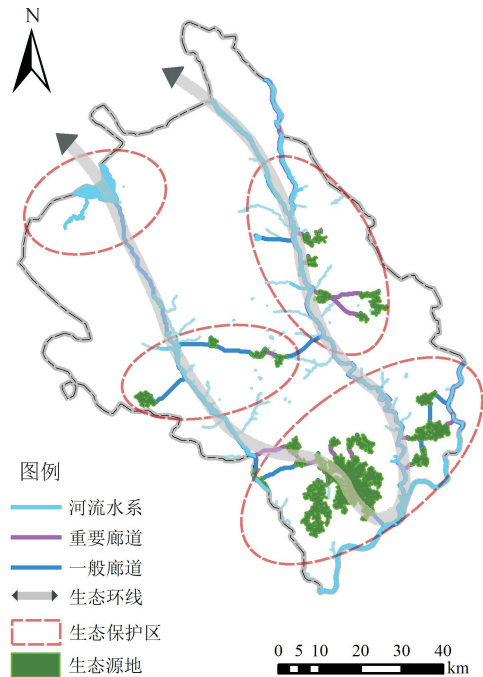


图 8 神木市“一环四区”生态网络框架布局

Fig. 8 Layout of ecological network framework of

“One Ring and four Districts” in Shenmu City

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为

GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改。

## 3 讨论

生态网络能有效提高生态系统的连通性,对区域生态安全建设具有重要指导意义。目前,生态网络构建的相关研究逐渐由城市转向自然地貌区域。神木市属于典型的沙漠丘陵区,地貌特征复杂,其生态网络构建不同于其他生态系统整体服务功能较好的区域。受自然因素的影响,沙漠丘陵区的生态环境质量多呈现出明显的空间分布不平衡;生态源地破碎化严重且分布不均,土地利用类型多以草地和耕地为主;生态阻力空间分异性强且与区域地形地貌特征密切相关;生态廊道结构简单、数量稀少,多数廊道跨度较长、生态连通功能较弱;生态网络整体密度较低。基于此,在类似神木市的沙漠丘陵区生态网络构建过程中,可结合水源涵养、沙地植被生境特征、物种多样性等方面综合选取优质生境斑块。未来生态保护建设中,可依据生态源地缓冲区划定保护范围;针对源地稀少、廊道单一的生态功能薄弱区域,可考虑新增绿地作为“脚踏板”以增强区域生态网络的稳定性。

在研究方法方面,本研究引入遥感生态指数(RSEI)来评价生态环境质量,并将其作为识别生态

源地的依据,相较于单期人工解译的土地利用分类数据,两期遥感影像数据具有较高的准确性和科学性,且具有动态评价的特点;遥感生态指数耦合了4个能够客观准确反映生态环境现状的指标,与基于经验值确定评价指标体系的方法相比,能有效避免人为因素对研究结果的干扰;运用空间主成分分析法(SPCA)构建了生态阻力面指标体系,相较于选取经验值作为各阻力因子的权重,其精确性更高。

受各方面因素限制,本研究还存在一些不足之处:在数据源获取过程中,研究所使用的遥感影像分辨率为30m,这会对评价结果的精度造成一定程度的影响,在后续研究中还需提高数据源的分辨率;在阻力面构建过程中,生态阻力因子的选取综合考虑了多方面因素,但对各阻力因子进行分级时,未能充分结合研究区实际情况,因而生态阻力因子的分级标准还有待深入研究;在生态网络构建过程中,本研究确定的生态网络框架布局具有一定的主观性,未来需参考当地相关发展规划做进一步完善。

#### 4 结 论

本文以神木市为研究对象,通过引入遥感生态指数模型,计算得到2015年、2018年的RSEI,进而对神木市生态环境质量进行了评价,并以此为依据选取生态源地;采用SPCA构建了生态阻力面指标体系,形成了生态综合阻力面和生态源地累积耗费阻力面;最后运用MCR模型和重力模型识别并提取出研究区潜在的生态廊道,构建了神木市生态网络框架。

1) 遥感生态指数显示,2015、2018年神木市RSEI均值分别为0.4733、0.5075,生态环境质量处于中等水平且呈现好转趋势;东北部与南部生态质量优等斑块居多,北部地区与中部丘陵区生态质量多为中等水平,而西北部差等斑块集中分布,呈现出“西北差东南优”的空间分布特征,整体处于不平衡的发展状态。未来需加强对西北部生态环境的保护与治理。

2) 以生态质量结果为依据,共选取生态源地31个,面积共316.59km<sup>2</sup>,占神木市总面积的4.15%,其中11条为河流生态源地;大部分源地集聚在东南部,西北地区和中部地区相对分散且破碎化程度严重,源地的土地类型以草地、耕地及河流为主,南北地区生态源地连通性较差。

3) 识别出神木市潜在生态廊道共34条,总长度634.12km,廊道主要以境内河流为主线相互连通。其中,提取重要廊道20条,占廊道总长度的57.58%,生态节点22个,结合生态源地共同构成研究区生态网络。结合区域发展现状,依托河流生态

廊道构建出“一环四区”的生态网络框架布局,可为神木市生态安全建设与沙漠丘陵区生态网络构建提供参考。

#### 参考文献:

- [1] PENG Jian, YANG Yang, LIU Yanxu, et al. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644:781-790.
- [2] JONGMAN R H G, BOUWMA I M, GRIFFIOEN A, et al. The pan European ecological network: PEEN[J]. *Landscape Ecology*, 2011, 26(3):311-326.
- [3] 曲艺,陆明. 生态网络规划研究进展与发展趋势[J]. *城市发展研究*, 2016, 23(8):29-36.  
QU Yi, LU Ming. Research progress and development trend of ecological network planning[J]. *Urban Development Studies*, 2016, 23(8): 29-36.
- [4] JONGMAN R H G, KÜLVIK M, KRISTIANSEN I. European ecological networks and greenways[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2004, 68(2-3): 305-319.
- [5] CONINE A, XIANG W N, YOUNG J, et al. Planning for multi-purpose greenways in Concord, North Carolina[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2004, 68(2-3):271-287.
- [6] FABOS J G. Greenway planning in the United States: its origins and recent case studies[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2004, 68(2-3):321-342.
- [7] 汉瑞英,赵志平,肖能文. 生物多样性保护优先区生态网络构建与优化——以太行山片区为例[J]. *西北林学院学报*, 2021, 36(2):61-67.  
HAN Ruiying, ZHAO Zhiping, XIAO Nengwen. The eco-network construction and optimization in biodiversity conservation priority area: a case study of the Taihang Mountain area[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2021, 36(2): 61-67.
- [8] 梁艳艳,赵银娣. 基于景观分析的西安市生态网络构建与优化[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11):3767-3776.  
LIANG Yanyan, ZHAO Yindi. Construction and optimization of ecological network in Xi'an based on landscape analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(11): 3767-3776
- [9] 李慧,李丽,吴巩胜,等. 基于电路理论的滇金丝猴生境景观连通性分析[J]. *生态学报*, 2018, 38(6): 2221-2228.  
LI Hui, LI Li, WU Gongsheng, et al. Analysis of the landscape-level connectivity of the Yunnan snub-nosed monkey habitat based on circuit theory[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6):2221-2228.
- [10] 沈钦炜,林美玲,莫惠萍,等. 佛山市生态网络构建及优化[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(9):3288-3298.  
SHEN Qinwei, LIN Meiling, MO Huiping, et al. Ec-



- ological network construction and optimization in Foshan City, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(9):3288-3298.
- [11] 俞孔坚,李海龙,李迪华,等. 国土尺度生态安全格局[J]. *生态学报*,2009,29(10):5163-5175.  
YU Kongjian, LI Hailong, LI Dihua, et al. National scale ecological security pattern[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10): 5163-5175.
- [12] 傅强,宋军,毛锋,等. 青岛市湿地生态网络评价与构建[J]. *生态学报*,2012,32(12):3670-3680.  
FU Qiang, SONG Jun, MAO Feng, et al. Evaluation and construction of wetland ecological network in Qingdao City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(12): 3670-3680.
- [13] 陈小平,陈文波. 鄱阳湖生态经济区生态网络构建与评价[J]. *应用生态学报*,2016,27(5):1611-1618.  
CHEN Xiaoping, CHEN Wenbo. Construction and evaluation of ecological network in Poyang Lake Eco-economic Zone, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5):1611-1618.
- [14] 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.  
LI Hui, YI Na, YAO Wenjing, et al. Shangri-La county ecological land use planning based on landscape security pattern[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(20):5928-5936.
- [15] 荣月静,严岩,王辰星,等. 基于生态系统服务供需的雄安新区生态网络构建与优化[J]. *生态学报*,2020,40(20):7197-7206.  
RONG Yuejing, YAN Yan, WANG Chenxing, et al. Construction and optimization of ecological network in Xiong'an New Area based on the supply and demand of ecosystem services[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(20): 7197-7206.
- [16] 齐松,罗志军,陈瑶瑶,等. 基于MSPA与最小路径方法的袁州区生态网络构建与优化[J]. *农业现代化研究*,2020,41(2):351-360.  
QI Song, LUO Zhijun, CHEN Yaoyao, et al. Construction and optimization of ecological network in Yuanzhou district based on MSPA and the least-cost path method[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2020, 41(2): 351-360.
- [17] 陈瑶瑶,罗志军,齐松,等. 基于生态敏感性与生态网络的南昌市生态安全格局构建[J]. *水土保持研究*,2021,28(4):342-349.  
CHEN Yaoyao, LUO Zhijun, QI Song, et al. Ecological security pattern construction of Nanchang City based on ecological sensitivity and ecological network[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(4): 342-349.
- [18] 李延顺,廖超明,段炼,等. 滨海地区生态网络构建及其评估——以广西北海市为例[J]. *南宁师范大学学报:自然科学版*,2020,37(3):90-98.  
LI Yanshun, LIAO Chaoming, DUAN Lian, et al. Construction and evaluation of ecological network in coastal areas: a case study of Beihai City in Guangxi[J]. *Journal of Nanning Normal University (Natural Science Edition)*, 2020, 37(3): 90-98.
- [19] 黄苍平,尹小玲,黄光庆,等. 厦门市同安区生态安全格局构建[J]. *热带地理*,2018,38(6):874-883.  
HUANG Cangping, YIN Xiaoling, HUANG Guangqing, et al. Construction of ecological security pattern of Tong'an District, Xiamen City[J]. *Tropical Geography*, 2018, 38(6): 874-883.
- [20] 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.  
MENG Jijun, WANG Ya, WANG Xiaodong, et al. Construction of landscape ecological security pattern in Guiyang based on MCR model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(7): 1052-1061.
- [21] 高阳,刘悦忻,钱建利,等. 基于多源数据综合观测的生态安全格局构建——以江西省万年县为例[J]. *资源科学*,2020,42(10):2010-2021.  
GAO Yang, LIU Yuexin, QIAN Jianli, et al. Improving ecological security pattern based on the integrated observation of multiple source data: a case study of Wannian County, Jiangxi Province[J]. *Resources Science*, 2020, 42(10): 2010-2021.
- [22] 李航鹤,马腾辉,王坤,等. 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[J]. *生态与农村环境学报*,2020,36(8):1036-1045.  
LI Hanghe, MA Tenghui, WANG Kun, et al. Construction of ecological security pattern in northern Peixian based on MCR and SPCA[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(8):1036-1045.
- [23] 王琦,付梦娣,魏来,等. 基于源-汇理论和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建——以安徽省宁国市为例[J]. *环境科学学报*,2016,36(12):4546-4554.  
WANG Qi, FU Mengdi, WEI Lai, et al. Urban ecological security pattern based on source-sink landscape theory and MCR model: a case study of Ningguo City, Anhui Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(12): 4546-4554.
- [24] HUANG Jiuming, HU Yecui, ZHENG Fangyu. Research on recognition and protection of ecological security patterns based on circuit theory: a case study of Jinnan City[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(11): 12414-12427.

- [25] 徐伟振,黄思颖,耿建伟,等. 基于MCR和重力模型下的厦门市生态空间网络构建[J]. 西北林学院学报, 2022,37(2):264-272.  
XU Weizhen, HUANG Siying, GENG Jianwei, et al. Construction of ecological space network in Xiamen City based on MCR and gravity model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2): 264-272.
- [26] 彭建,赵会娟,刘焱序,等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. 地理研究,2017,36(3):407-419.  
PENG Jian, ZHAO Huijuan, LIU Yanxu, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction [J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 407-419.
- [27] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. 中国环境科学,2013,33(5):889-897.  
XU Hanqiu. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. China Environmental Science, 2013, 33(5): 889-897.
- [28] 伍健恒,孙彩歌,樊风雷. 高原地区城市不透水面与地表温度时空分布研究[J]. 华南师范大学学报:自然科学版,2020,52(3):92-100.  
WU Jianheng, SUN Caige, FAN Fenglei. An analysis of the spatiotemporal distribution of impervious surface and land surface temperature in plateau areas[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2020, 52(3): 92-100.
- [29] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报,2005,9(5):589-595.  
XU Hanqiu. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) [J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 589-595.
- [30] 蒙古军,朱利凯,杨倩,等. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建[J]. 生态学报,2012,32(21):6755-6766.  
MENG Jijun, ZHU Likai, YANG Qian, et al. Building ecological security pattern based on land use: a case study of Ordos, Northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(21): 6755-6766.
- [31] 谢花林. 土地利用生态安全格局研究进展[J]. 生态学报,2008,28(12):6305-6311.  
XIE Hualin. Review and the outlook of land use ecological security pattern [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6305-6311.
- [32] 李玉平,蔡运龙. 河北省土地生态安全评价[J]. 北京大学学报:自然科学版,2007,43(6):784-789.  
LI Yuping, CAI Yunlong. Security evaluation of land ecology in Hebei Province[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2007,43(6):784-789.
- [33] 杨姗姗,邹长新,沈渭寿,等. 基于生态红线划分的生态安全格局构建——以江西省为例[J]. 生态学杂志,2016,35(1):250-258.  
YANG Shanshan, ZOU Changxin, SHEN Weishou, et al. Construction of ecological security patterns based on ecological red line: a case study of Jiangxi Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(1): 250-258.
- [34] 刘孝富,段培强,王维,等. 成都地震重灾区生态影响分区及恢复对策[J]. 环境科学研究,2010,23(6):711-718.  
LIU Xiaofu, DUAN Peiqiang, WANG Wei, et al. Research on ecological impact regionalization and restoration strategy in areas of Chengdu heavily impact by earthquake[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(6):711-718.
- [35] 王石英,蔡强国,吴淑安. 首都圈上风向农牧交错带的土地利用评价[J]. 资源科学,2004,26(S1):67-73.  
WANG Shiyong, CAI Qianguo, WU Shu'an. GIS-based land-use evaluation for dust storm prevention in the windward metropolitan region of Beijing, China [J]. Resources Science, 2004, 26(S1):67-73.
- [36] KNAAPEN J P, SCHEFFER M, HARMS B. Estimating habitat isolation in landscape planning [J]. Landscape and Urban Planning,1992, 23(1):1-16.
- [37] 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.  
YU Kongjian. Landscape ecological security patterns in biological conservation[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(1): 8-15.
- [38] 黄木易,岳文泽,冯少茹,等. 基于MCR模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化[J]. 自然资源学报,2019,34(4):771-784.  
HUANG MUYI, YUE WENZE, FENG SHAORU, et al. Analysis of spatial heterogeneity of ecological security based on MCR model and ecological pattern optimization in the Yuexi County of the Dabie Mountain Area [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(4): 771-784.
- [39] 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.  
PAN Jinghu, LIU Xiao. Assessment of landscape ecological security and optimization of landscape pattern based on spatial principal component analysis and resistance model in arid inland area: a case study of Ganzhou District, Zhangye City, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 3126-3136.