

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.008.

张纹嘉, 付勇勇, 王晓军. 基于生态系统服务价值评价的忻州市生态安全格局构建[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 355-364.

ZHANG Wenjia, FU Yongyong, WANG Xiaojun. Construction of Ecological Security Pattern in Xinzhou City Based on Evaluation of Ecosystem Service Value[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 355-364.

# 基于生态系统服务价值评价的忻州市 生态安全格局构建

张纹嘉<sup>1</sup>, 付勇勇<sup>2</sup>, 王晓军<sup>1</sup>

(1.山西大学 环境与资源学院, 太原 030006; 2.山西财经大学 资源与环境学院, 太原 030006)

**摘要:** [目的] 准确识别生态保护的重要节点和区域, 进而合理布局及建设生态廊道, 维护生态系统可持续发展。 [方法] 以忻州市为例, 基于生态源地-阻力面-生态网络的生态安全格局构建方法, 通过生态系统服务价值评价及形态学空间格局分析方法 (MSPA) 识别生态源地; 基于熵权法和多阻力因子构建阻力面; 运用电路理论模拟分析生态廊道和生态节点, 确定生态修复的一些关键区域。 [结果] (1) 研究区内含有生态源地 59 处, 总面积为 2 355 km<sup>2</sup>, 呈现出东部集中, 中西部分散的空间分布格局。 (2) 研究区共有生态廊道 100 条左右 (总长度为 1 637.58 km), 生态夹点 111 处 (总面积为 3.16 km<sup>2</sup>) 以及生态障碍点 83 处 (总面积为 48.7 km<sup>2</sup>), 生态廊道按其重要程度呈现自内向外的环形分布, 而生态夹点则主要散布在生态源地和廊道相互毗邻的区域。 [结论] 生态安全格局能够有效识别生态廊道以及生态修复的重要区域。在生态保护与恢复中, 应将“保护廊道、修复夹点区域、剔除和完善障碍区域”作为总体治理策略。

**关键词:** 生态安全格局; 生态系统服务价值; 形态空间学分析方法; 最小累计阻力模型

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0355-10

## Construction of Ecological Security Pattern in Xinzhou City Based on Evaluation of Ecosystem Service Value

ZHANG Wenjia<sup>1</sup>, FU Yongyong<sup>2</sup>, WANG Xiaojun<sup>1</sup>

(1.College of Environment & Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2.College of Resources and Environment, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to accurately identify key nodes and regions of ecological protection, and to construct ecological corridors in a reasonable way for the sustainable development of the ecosystem. [Methods] Taking Xinzhou City as a case study, this research proposes an ecological security pattern construction method, which is based on the paradigm of ‘ecological source-resistance surface-ecological network’. The ecological source is identified by combining the evaluation of ecosystem service value and morphological spatial pattern analysis (MSPA). The resistance surface is constructed based on entropy weight method and multi-resistance factor. The circuit theory is used to simulate and analyze ecological corridor and ecological nodes. [Results] (1) A total of 59 ecological sources covering an area of 2 355 km<sup>2</sup> were identified in the study area, showing a spatial distribution pattern of eastern concentration and central and western dispersion. (2) Additionally, the study identified approximately 100 ecological corridors (with a total length of 1 637.58 km), 111 ecological pinch points (with a total area of 3.16 km<sup>2</sup>), and 83 ecological obstacle points (with a total area of 48.7 km<sup>2</sup>) in the study area. According to the important values, ecological

收稿日期: 2022-06-05

修回日期: 2022-06-19

资助项目: 国家自然科学基金(42101404), 浙江省农业遥感与信息技术重点研究实验室开放基金

第一作者: 张纹嘉(1996—), 女, 山西忻州人, 硕士研究生, 研究方向为生态安全格局。E-mail: z1459657238@163.com

通信作者: 付勇勇(1993—), 男, 山西太原人, 博士, 讲师, 主要从事方向资源环境遥感、机器学习研究。E-mail: yyong\_fu@zju.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

corridors showed an annular distribution from inside to outside. And the ecological pinch points mainly distributed in the adjacent areas between the ecological source area and corridor. [Conclusion] Building an ecological security pattern can effectively identify the ecological corridor and the key areas for ecological restoration. In the process of ecological protection and restoration, ‘protecting corridors, repairing pinch areas, removing and improving obstacle areas’ should be taken as a general strategy.

**Keywords:** ecological security pattern; ecosystem services value; morphological spatial analysis method; minimum cumulative resistance model

近年来,随着社会经济快速发展,人为活动对生态环境的影响日益显著<sup>[1]</sup>,引发了一系列生态环境问题,导致生态网络中重要的源地及动物迁移路径逐渐退化或消失<sup>[2]</sup>。因此,需要构建科学合理的生态安全格局<sup>[3]</sup>,准确地识别与恢复生态过程中起着重要作用的生态节点区域,调节生态系统中的特定生态过程,确保生态服务的价值和功能不断获得<sup>[4]</sup>,最终实现社会发展过程中生态服务的稳定供给<sup>[5]</sup>。

20世纪90年代,俞孔坚<sup>[6]</sup>最先提出生态安全格局研究的理论与方法,并且他对这个理论进行了多角度的研究<sup>[7]</sup>。目前,“源地-阻力面-廊道”法<sup>[8]</sup>和“供给-需求”法是研究生态安全格局的两种主流方法。在当前的研究中,用得较多的是“源地-阻力面-廊道”的研究方法,即通过“生态系统服务价值”“形态学空间格局分析(MSPA)”<sup>[9]</sup>方法、“InVEST模型”<sup>[10]</sup>等来识别生态源地;采用直接选取土地利用类型<sup>[11]</sup>或者使用“赋值法”<sup>[12]</sup>等方式构建阻力面,并以夜间灯光数据进一步校正<sup>[13]</sup>;最后,利用“最小累积阻力模型(MCR)”<sup>[14]</sup>“电路理论”<sup>[15]</sup>“重力模型”等方法提取生态廊道等,构建区域生态安全格局。然而,目前国内外大多数研究从静态的角度考虑生态源地的选择,导致对源地的长期发展状况关注不够,获取的源地容易稳定性不足<sup>[16]</sup>。此外,由于主要关注斑块自身的生态特性,忽略了斑块的整体功能结构对景观的影响程度,导致对斑块与周围环境的关系关注不足<sup>[17]</sup>。因而,本文基于生态系统服务价值,即水源涵养功能、水土保持功能、生物多样性的保持功能、碳储量功能的长期稳定性评估结果,利用MSPA模型对生态系统服务功能进行重新分析,选取忻州市2000—2020年动态稳定的斑块作为生态源地,以获取更具代表性的分析结果。

忻州市矿产资源丰富,农业资源独特,旅游资源汇集,既是资源大市、农业大市,也是文旅康养名市,在全省占有重要地位。近年来,随着温室效应的增强和气温的逐渐升高,人们在生产和发展过程中不合理开发或利用自然资源造成的生态环境破坏,以及人类过度放牧造成的土壤荒漠化,对生态环境构成威胁,亟需建立生态安全格局,对区域生态环境进行修复。因此本文基于生态系统服务价值从动态角度选取源地,根据电路理论从阻力面角度构建生态廊道和生态节点,确定忻州市生态恢复的重点区域,并提供相应的修复意见,从而为区域生态修复提供理论依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

忻州市(110°53′3″—113°58′E, 38°6′5″—39°40′N),其位于山西省中北部,北面和大同市、内蒙古自治区和朔州市接壤,西部与陕西省和内蒙古自治区毗邻,东靠太行山和河北省相接,南抵石岭关与太原市、阳泉市以及吕梁市接壤。忻州市是山西省唯一一个横跨省际东西、连接太行、吕梁两山的市,总面积 $2.515 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是山西省面积最大的市。忻州地区海拔范围在519~3 091 m,整体地貌特点:东部群山环抱;西部丘陵起伏,沟壑纵横。

### 1.2 数据来源

本文使用的数据主要有:2000年、2010年、2020年山西省忻州市土地利用分类数据,忻州市的行政区划数据以及空间分辨率30 m的数字高程数据(DEM),忻州市的年均降雨量数据,蒸散发数据和植被覆盖度数据,忻州市的人口数据以及道路交通数据,数据来源详见表1。

表1 数据来源

数据类型	数据来源
土地利用数据	GLOBELAND 30 ( <a href="http://www.globallandcover.com/">http://www.globallandcover.com/</a> )
数字高程数据	地理空间数据云 ( <a href="http://www.gscloud.cn">http://www.gscloud.cn</a> )
道路交通数据	Open Street Map 平台 ( <a href="http://www.openstreetmap.org">http://www.openstreetmap.org</a> )
人口数据以及年均降雨量数据	中国科学院资源环境科学数据中心 ( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )
蒸散发数据	全球变化科学研究数据出版系统 ( <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a> )
植被覆盖度	中国生态系统评估与生态安全数据库 ( <a href="https://www.ecosystem.csdb.cn/index.jsp">https://www.ecosystem.csdb.cn/index.jsp</a> )

2 研究方法

采用生态源地-阻力面-廊道的研究框架,首先分析 2000—2020 年研究区的生态系统服务功能,即生物多样性、水土保持、水源涵养、碳储量的重要程度,并将分析结果进行 MSPA 模型的再分析进而识别生态源地。之后,从土地利用类型、地形起伏、坡度、坡向、人口密度和与主要道路的距离这 6 个角度出发,构建研究区的综合阻力面;最后,利用电路理论模拟分析研究区域的生态廊道和生态节点,构建生态安全格局。

2.1 生态源地的识别

生态源地是物种生存的“源”,其对于物种的生存发展有着重要作用<sup>[18]</sup>。本文主要评价忻州市 2000—2020 年的生物多样性、水源涵养、水土保持和碳储量 4 类生态系统服务价值;之后对结果进行 MSPA 模型的分析,得出 7 类景观形态,其中核心区生态环境较好,适宜物种生存,可作为备选源地,最终选取动态稳定的斑块作为最终源地。

2.1.1 生态系统服务价值评价 忻州市有其独特的地理位置,气候水源条件等,孕育了独特的生态系统。因此,结合忻州市独特的自然地理环境,主要选取生物多样性、水源涵养、水土保持、碳储量 4 类生态系统

服务价值建立评价体系,最后采用多因子加权法对生态系统综合服务价值重要性进行分析和评估。

(1) 生物多样性重要性评估。目前国内外对于生物多样性的研究大部分采用的是 InVEST 模型,此模型总体分为许多的模块,其中生境质量模块对于分析生态适宜性方面有一定的权威性。本研究基于土地利用,将水域、林地、草地这些生态适宜性较高的区域作为生态用地,耕地、城市建设用地等受人类活动影响较大的区域作为威胁源。计算公式如下:

$$Q_{xj}=H_j\left(1-\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z+k^z}\right)$$
 (1)

式中: $Q_{xj}$  为  $j$  类土地  $x$  像元所代表的生境质量; $H_j$  为  $j$  类土地代表的生境适宜度; $D_{xj}$  为网格像素  $x$  在  $j$  中的威胁级别; $z$  为一个常数,常设成 2.5; $k$  为半饱和常数,常设成 0.5。

(2) 水土保持重要性评估。水土保持是指由于流水造成的土壤侵蚀,导致生态系统结构和过程的减少。根据 2020 年的《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南(试行)》,对水土保持重要性的评估,主要是通过研究区植被覆盖度、生态系统类型以及地形特征的差异这些因子进行评估其重要性,分级阈值见表 2。

表 2 水土保持功能重要性分级阈值

植被类型	乔木林	灌木林	其他林地、其他草地	内陆滩涂	裸岩石砾地、商服、工矿仓储、住宅、公共管理与公共服务、交通运输用地、水域
坡度等级/(°)	>25	15~25	8~15	3~8	<3
赋值	9	7	5	3	1

(3) 水源涵养重要性评估。水源涵养指的是生态系统通过其与水作用的能力对降水进行拦截、积累等,以及通过蒸发作用来实现水的循环。本文主要用水量平衡法,即从降水中减去蒸散量和地表径流,可计算出水源涵养量。计算公式如下:

$$TQ=1000\times\sum_{i=1}^j(P_i-R_i-ET_i)\times A_i$$
 (2)

式中:TQ 为水源涵养总量; $P_i$  为多年平均降水量; $R_i$  为多年平均径流量; $ET_i$  为蒸发量; $A_i$  为景观类型面积; $i$  为研究区  $i$  型生态系统类型; $j$  为生态系统的数量。

(4) 碳储量重要性评价。本文在评价碳储量功能重要性时主要是利用 InVEST 模型的碳固定模块进行。根据不同土地利用类型的分布和平均碳密度,计算研究区的碳储量。公式如下:

$$C=C_{above}+C_{soil}+C_{dead}+C_{below}$$
 (3)

式中: $C$  为总碳储量; $C_{above}$  为地上碳储量; $C_{soil}$  为土壤碳储量; $C_{dead}$  为死亡碳储量; $C_{below}$  为地下碳储量。

2.1.2 形态学空间格局分析方法 形态学空间格局分析方法(MSPA)是一种基于数学方法的操作序

列,它可以将栅格图像分为 7 类:核心区、孤岛、孔隙、边缘区、桥接区、环岛、支线<sup>[19]</sup>。本文主要是对生态系统服务价值评估结果按照自然断点法进行分级,将极重要区域和重要区域作为 MSPA 模型的前景分析数据,一般重要区域作为其背景分析数据,利用 Guidos 软件进行 MSPA 分析,最终得到 7 类景观,其中,核心区的生态环境良好,可作为备选生态源地,然后综合 2000 年、2010 年、2020 年的分析结果,将动态稳定的斑块提取出来,作为最终源地。

2.2 生态阻力面的构建

(1) 最小累积阻力模型。最小累积阻力模型(MCR)描述了物种在生态斑块间迁移过程中受到的空间阻力,其将物种迁移的难易程度进行了量化。参考一些研究后<sup>[20]</sup>,本文主要选取了 6 类阻力因子作为 MCR 模型的构建指标,即土地利用类型、地形起伏度、坡向、坡度、与道路的距离和人口密度,来评价物种运动过程。参考前辈的研究<sup>[21-22]</sup>,分别给这些因子进行了赋值,给其赋 1~9 的系数和一定的权重值,



即表3, 赋的阻力系数高, 表明物种在斑块间移动过程中受到的阻力越大, 反之, 受到的阻力越小。MCR模型公式如下:

$$MCR = f \min_{j=n}^{i=m} \sum (D_{ij} \times R_i) \quad (4)$$

式中: MCR 为最小累积阻力值;  $f$  表明在生态过程中与 MCR 呈正相关;  $D_{ij}$  为源地  $j$  到  $i$  的距离;  $R_i$  为目标源  $i$  受到的阻力系数。

表3 阻力系数及权重的设置

指标	分类	阻力系数	权重
土地利用类型	耕地	5	0.4
	林地	1	
	草地、水域	3	
	建设用地	9	
	未利用地	3	
坡度/(°)	<8	1	0.1
	8~15	3	
	15~25	5	
	25~35	7	
	>35	9	
坡向	平地	3	0.1
	阳坡	1	
	半阳坡	5	
	半阴坡	7	
	阴坡	9	
起伏度/(°)	<8	1	0.15
	8~15	3	
	15~25	5	
	25~50	7	
	>50	9	
人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	<80	1	0.13
	80~200	3	
	200~500	5	
	500~900	7	
	>900	9	
距离道路的路程/m	<1000	9	0.12
	1000~2000	7	
	2000~3000	5	
	3000~4000	3	
	>4000	1	

(2) 阻力面的修正。人类活动对土地利用的影响是相对比较大, 使得土地利用现状呈现出空间异质性的特征, 因此本文选取夜间灯光数据对阻力值进行校正, 其对于经济活动的空间表达更加具象和客观。对土地利用现状阻力面进行修正, 其计算公式如下:

$$R' = \frac{L_i}{L_a} \times R \quad (5)$$

式中:  $R'$  为校正后的土地利用阻力面;  $L_i$  为像元  $i$  的

夜间灯光指数;  $L_a$  为土地利用  $a$  对应的平均夜间灯光指数;  $R$  为土地利用阻力面。

坡度对于物种在生态系统间流通的影响也相对比较大, 因此需要通过坡度因子对生态阻力面进行修正:

$$R_{\text{final}} = R_i (1 + \alpha \times S_i) \quad (6)$$

式中:  $R_{\text{final}}$  为一个栅格的最终阻力值;  $R_i$  为栅格  $i$  校正前的阻力值;  $S_i$  为栅格  $i$  的百分比坡度;  $\alpha$  为坡度控制系数, 参考前人研究成果<sup>[23]</sup>, 取值为 1。

## 2.3 生态廊道的构建

生态廊道是源地之间物质能量流通的重要通道, 对生态过程的实现起着重要作用<sup>[24]</sup>。生态廊道一般有两种结构, 即线状或者带状, 它们是集生态功能和社会功能于一体的生态景观。这些走廊是生态系统间进行流通的重要通道。因此, 生态廊道对于维持生态系统的稳定性具有非常重要的作用。在生态廊道的附近存在着夹点以及障碍点。夹点是生态系统之间物质能量流通的频繁区域, 是构建生态安全格局的关键节点<sup>[25]</sup>, 应该被保护起来, 不能被破坏。障碍点则是严重阻碍生态流通的区域<sup>[26]</sup>, 因此, 识别和修复障碍区域对生态系统的连通性具有非常重要的作用。

**2.3.1 生态廊道的提取** 生态廊道作为生态系统中物质能量流通的重要通道, 在生态系统中占有非常重要的地位。本文采用电路理论<sup>[27]</sup>, 在综合阻力面的基础上, 借助 Linkage Mapper 中的 Linkage pathway tool 工具来提取生态廊道。

**2.3.2 生态夹点以及生态障碍点的提取** 运用一个开源程序 Circuitscape 来提取生态节点, 主要是采用电路理论来进行景观连通性的模拟和分析。生态夹点是指廊道电流密度大的地方, 对维持网络的连通性起着重要的作用。本研究使用 Linkage Mapper 工具中的 Pinchpoint Mapper 模块来提取生态夹点, 对于生态夹点的提取主要有两种方法, 即成对模式 (Pair-wise) 以及多对一模式 (All-to-one)。在成对模式下斑块都会进行两两分组, 一个斑块输 1 A 的电流, 一个接地, 算二者之间的电流值, 依次进行模拟, 最终合成累积电流, 电流值高的地方, 表示景观的连通性较高, 即为生态夹点, 其是进行生态保护的重点地区; 在多对一模式下, 1 个接地, 其他输入 1 A 的电流, 然后进行迭代, 一直到所有都接地, 从而得到累积电流值。本文主要采用成对模式识别生态夹点。

采用 Linkage Mapper 中的 Barrier Mapper 模块来模拟分析生态障碍点, 即主要是运用移动窗口法来识别障碍点, 通过计算去除障碍区域后的电流值, 累积电流恢复值的大小能反映出物种在该区域迁徙受



到的空间阻力的大小,累积恢复值大,说明物种在此区域迁移受到的空间阻力大,反之,迁移过程中受到的空间阻力相对较小。

3 结果与分析

3.1 生态源地识别

对忻州市 2000—2020 年的生态系统服务功能进

行评估,运用自然断点法将评估结果划分等级,将其分为了 3 级,即极重要区域、重要区域、一般重要区域,结果见图 1,之后利用加权求和方法得出综合评估结果,见图 2。从图中可以看到在 2000—2020 年忻州市的生态服务功能重要区域以及极重要区域在东部和西南部总体上呈现减少的趋势,中部则总体呈现增加的趋势。

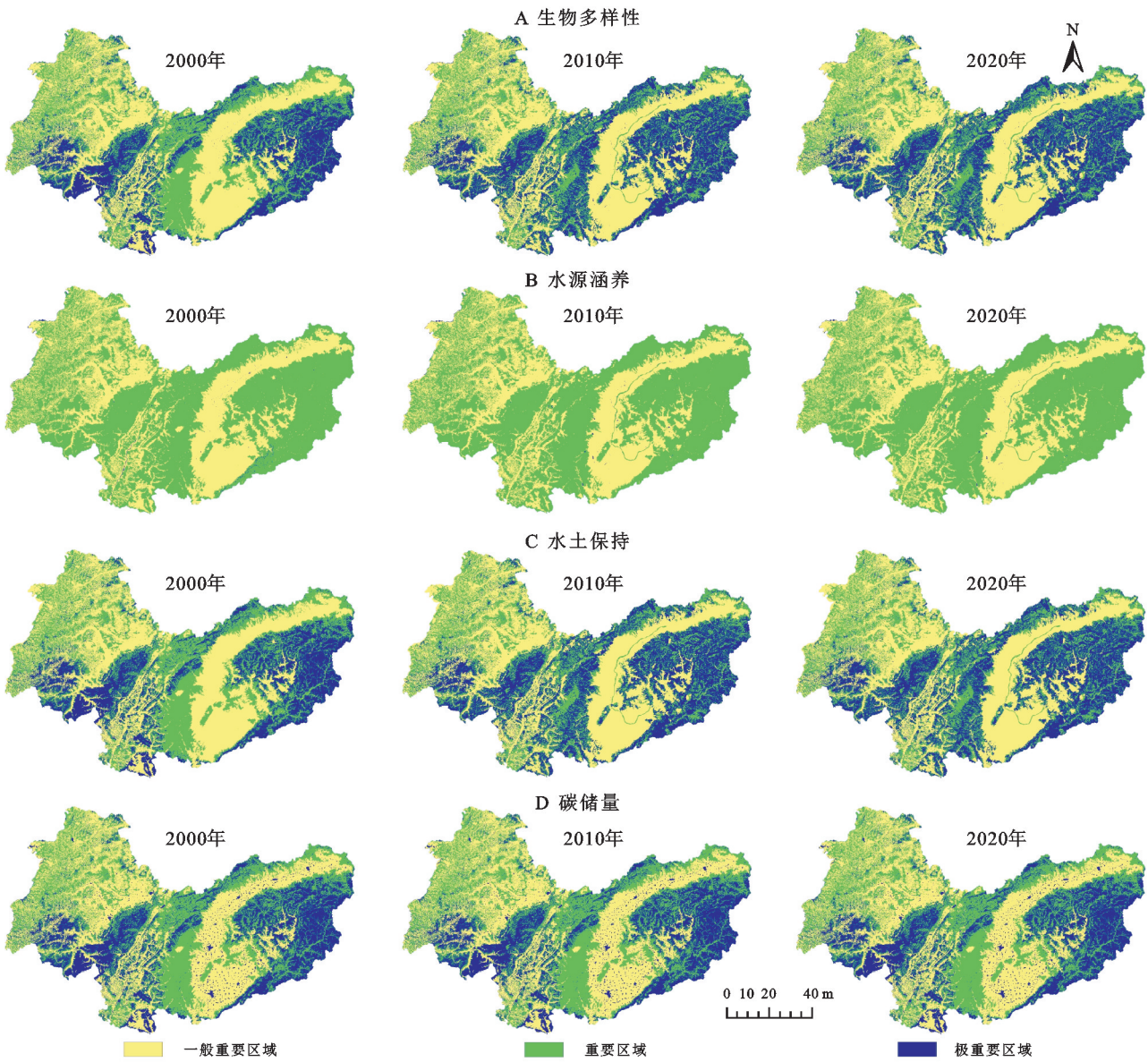


图 1 忻州市 2000 年、2010 年、2020 年生态系统服务功能评估

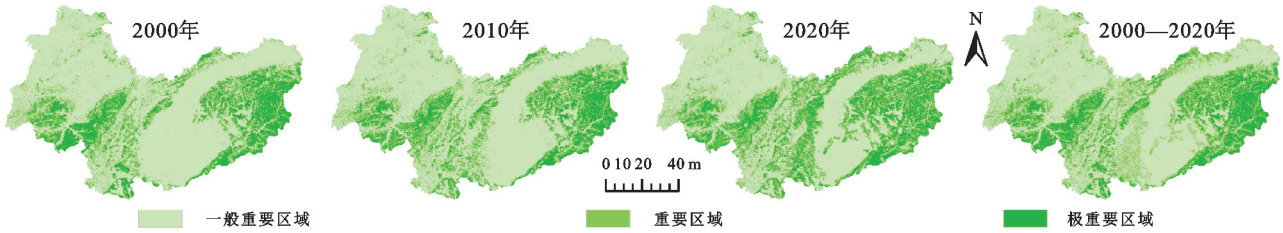


图 2 忻州市 2000 年、2010 年、2020 年生态系统服务功能综合评估

由图 3 可知,核心区的分布相对稳定,但从图中也不难发现中部地区的核心区呈现逐渐增加的趋势,

而东部地区在 2000—2010 年核心区的变化不是特别明显,但是在 2010—2020 年核心区的分布则变得更

加分散,在一定程度上呈现减少的趋势;西南部地区在2000—2010年核心区的面积有一定程度的减少,

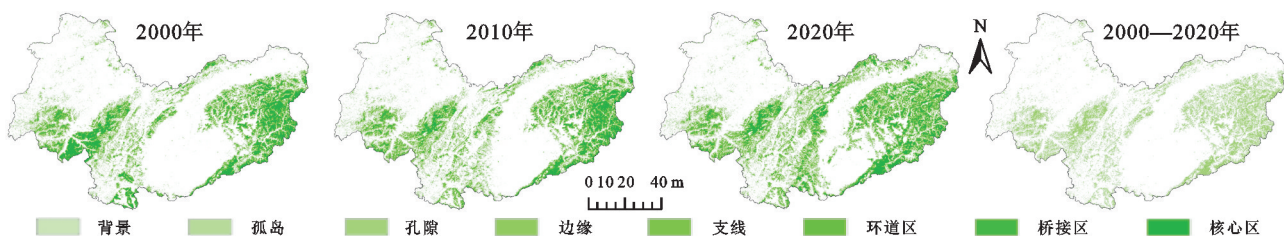


图3 忻州市2000年、2010年、2020年MSPA分析

通过MSPA的分析,最终将景观连通性较好以及生物多样性良好的核心斑块提取出来作为备选生态源地,提取2000—2020年42 849处动态稳定的斑块作为初选生态源地,总面积3 578 km<sup>2</sup>,大约占总面积的14%。设置8 km<sup>2</sup>为最小面积阈值,将初选生态斑块中的一些面积小于8 km<sup>2</sup>的分散斑块进行剔除,最终提取出59处斑块,作为生态源地,总面积为2 355 km<sup>2</sup>,大致呈现东部相对集中,中西部分散的分布格局,见图4。其中源地主要集中分布在岢岚县、宁武县、静乐县、繁峙县、五台县、定襄县,主要是这几个县域林地、草地所占面积较大,而且城镇化水平较低,开发程度低,生态环境较好,并且地形高度也相对适宜,有利于生态流通。结合生态系统服务功能性评价,可以发现,这些地区的生物多样性、水土保持、水源涵养、碳储量的评估都是极高的,生态良好,适宜物种生存流通。忻府区和原平市相对其他县开发程度较高,对生态环境的破坏性较大,而且其耕地面积以及建设用地面积所占比重较大,生态源地在这两个县的分布极少;偏关、河曲、神池、保德、五寨,这些县经济水平相对较低,县域的土地利用70%以上都为耕地,生境质量有待提高,因此几乎没有生态源地的分布。根据这些分析可以看到,忻州市的经济发展、城镇化建设,以及以煤炭为基础的能源结构,在一定程度上使得土地使用不当,对环境造成一定污染,造成生态环境破坏。因此,研究区的生态环境有很大的修复空间。

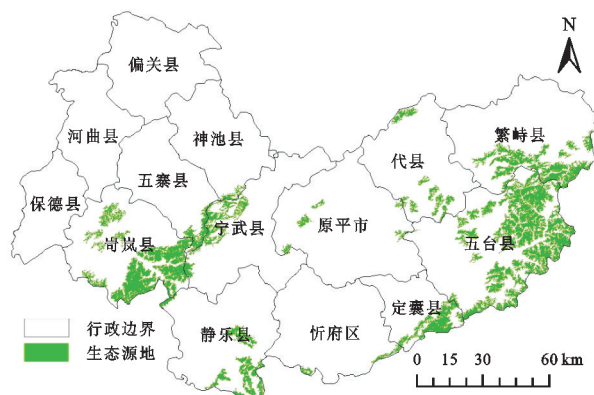


图4 生态源地分布

但是在2010—2020年核心区的分布相对稳定,变化不明显。

### 3.2 综合阻力面的构建

研究区的阻力值为1~8.24,平均阻力是3.315。总的来说,阻力面分布相对细碎,阻力面分布与当前土地利用非常相似,见图5。阻力高的区域主要集中于忻府区、原平市、代县、定襄县等,这些区域的土地利用方式中,耕地和城镇建设用地所占面积偏大,林地草地的分布所占比重较少,地形总体相对平缓,同时,这几个县域交通条件良好,汇集多条主干道,为人类生存提供了方便,成为了适宜人类生存和活动的空间;以五台县、繁峙县、岢岚县等地区为低阻力区,这些县域的土地利用方式以林地和草地为主,人口密度相对较低,并且主要的交通干线分布较少,生境质量优良,成为适宜物种生存的空间。

### 3.3 生态廊道的提取

使用电路理论提取生态廊道,可以充分表现出物种在移动过程中的多路径性。利用Linkage mapper一共提取出了143条潜在生态廊道,将长度在1 000 m以下的廊道剔除,最后一共提取出了100条廊道,总长度是1 637.58 km,主要分布在岢岚县、静乐县、五台县等地区,廊道具体分布见图6。使用成本加权距离和最小成本路径的比值对廊道的连通程度进行等级划分,二者的比值小,说明该廊道在斑块间的连通性相对较强,反之,连通性较弱。最终,得到32条关键生态廊道,总长度494.78 km,占比30%;重要生态廊道45条,总长度906.46 km,占比55%;一般生态廊道23条,总长度236.34 km,占比15%。

按等级划分后的生态廊道大致呈现环状分布的格局,主要表现为关键生态廊道总体上分布在源地的中心,而重要和一般生态廊道则是依次由源地向外扩散。关键生态廊道主要分布于五台县、静乐县、岢岚县等地区,这些地区的土地利用方式主要是以林地和草地为主,这些景观类型使得廊道阻力较小,连通性较强,在未来的规划布局中需要重点保护;重要廊道与关键廊道相比,阻力相对较大,连通性也较弱,主要分布于忻府区、宁武等地区,主要是由于耕地和建设用地阻



隔使得物种在迁移的过程中受到的阻力增大,并且区域内的林地以及草地的分布相对破碎,廊道多次穿越增大了阻力;一般生态廊道较其他而言阻力是最大的,主要分布于代县、繁峙县等地区,其景观类型主要以耕地为主,廊道所受阻力较大,因此其连通性相对较弱,有待进一步修复,增强其连通性。

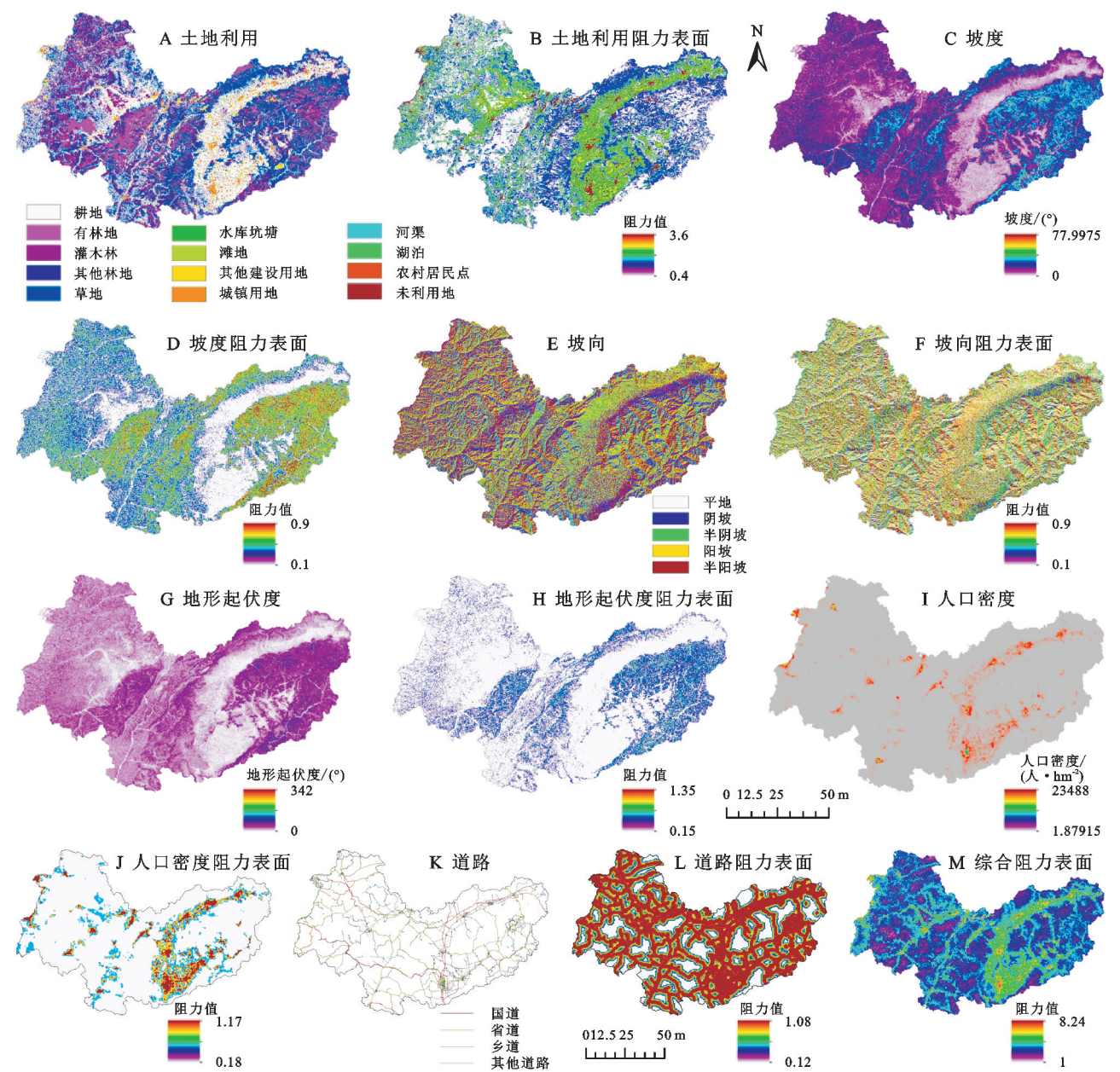


图 5 综合阻力面

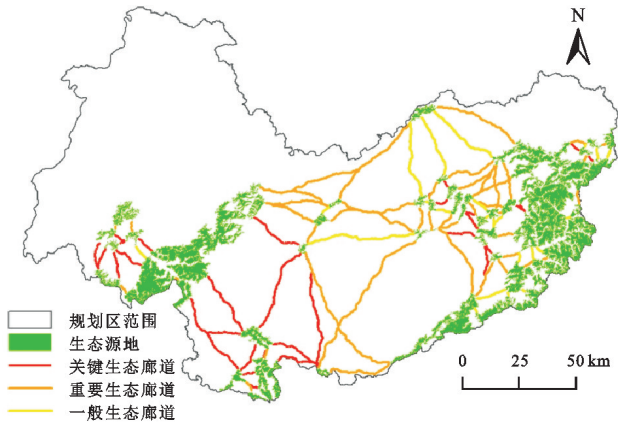


图 6 生态廊道分布

3.4 生态修复重点区域

3.4.1 生态夹点 采用 Pinchpoint Mapper 工具获得研究区的电流密度分布见图 7。忻州市的夹点区域主要分布在岢岚县、静乐县、五台县等地,总面积 3.16 km<sup>2</sup>,夹点附近高阻力区域的土地利用方式主要是耕地以及建设用地等。夹点的成因主要是物种在迁徙过程中受到的阻力值较小,生物在该区域的循环量相对较大,但是其周边地区的空间阻力相对较大,因而生态夹点的区域相对狭窄。

将得到的生态夹点与生态廊道进行综合分析,发现研究区共得到 111 处生态夹点,其中有 26 处生态



夹点位于关键生态廊道,56处位于重要生态廊道以及有29处分布于一般生态廊道。分布于岢岚县的生态夹点相对较多,是由于该地区的林地和草地景观类

型分布较多,生态源地面积较大,利于物种迁徙。生态夹点分布区域物种的迁徙路径较多,是进行生态保护的重点区域。

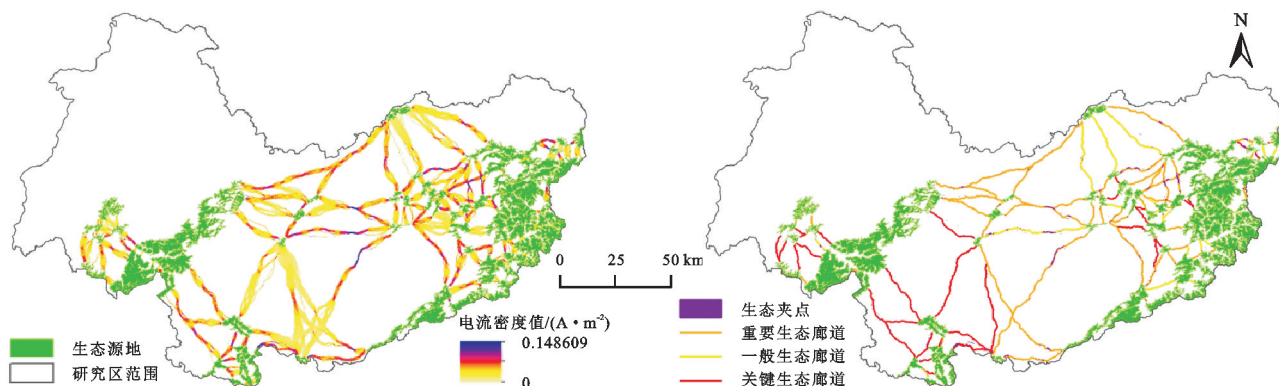


图7 生态廊道电流密度及生态夹点的分布

3.4.2 生态障碍点 运用Barrier Mapper工具,设置不同的搜索半径并检测不同大小的障碍区域。小半径可以搜索较大的一些狭窄的障碍区域,如高速公路,大半径可以搜索障碍区域,如耕地。本文用200,400,600,800,1 000,1 200 m共6个搜索半径计算每个像素的最大改进分数。得出的障碍点的分布区域如图8所示。

结果一共识别出83处生态障碍点,总面积为48.7 km<sup>2</sup>,有8处在关键生态廊道,47处在重要生态廊道,

28处在一般生态廊道。从县域分析生态障碍区域,忻府区、原平市、代县等县域内障碍区域数量相对较多,面积较大,主要是由于城市建设,人口相对聚集等使得这些地区的生态保护压力较大,物种的生存环境遭到威胁,在一定程度上阻碍着物种的流通性。总体而言,超过一半的生态障碍点处在重要生态廊道上,移除这些障碍点成为生态修复的关键,有助于重要生态廊道向关键生态廊道的转化。

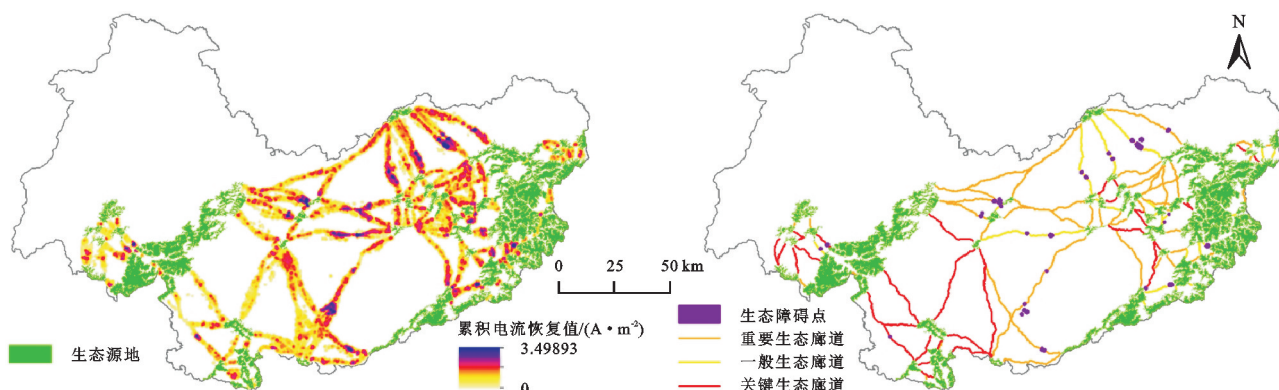


图8 累积电流恢复值及生态障碍点的分布

### 3.5 生态修复与保护的对策及建议

忻州市生态保护与修复的重点区域主要是生态廊道与节点区域。在分析时发现,部分生态障碍区域与生态夹点区域有重叠,说明这些地区对于生物流通非常重要。在生态保护与修复原则的基础上,提出了“保护廊道、修复夹点区域、剔除和完善障碍区域”的建议,并且结合土地利用类型,提出保护生态廊道与修复生态节点等的综合整治建议,有利于保障忻州市生态安全格局的稳定性,提升生态系统服务功能的重要性。

3.5.1 修复生态夹点区域 生态夹点区域的治理原则总体上坚持“保护为主,修复为辅”。耕地在一定程度上会直接影响区域的物种流通性,对物种的迁徙产生极大的阻力,因此,可在其周边种植树木,建设一些

林带,以减少该地区的生态阻力,提高区域的景观连通性;对于土地利用现状为林地和草地的区域,需要加强林草培护,采用林农混作等森林生态工程措施,改善区域生态环境,为物种流通提供良好的空间;对于水域用地,如河流湖泊,需要维护水域功能整体的稳定性,着重注意水环境的治理,污染防治等工程,营造良好的绿色优质空间<sup>[28]</sup>。

3.5.2 移除及改进生态障碍点 生态障碍点的移除与改进能够极大地减少生态阻力、增强生态流通性,优化区域生态安全格局。生态障碍点区域应该采取修复改进为主,保护并重的原则。生态修复的重点是提高耕地等高阻力区域的生态服务功能,在条件允许的情况下,积极推进退耕还林还草工作;需要进一步

加强林地和草地面积的管理和保护,扩大其面积,提高林草覆盖率,达到改善景观连通性的目的;对于水域用地,采取水生态功能调节,污染治理等措施,增强水源供给,径流调节,维护生物栖息地以及生物多样性保护等;对于裸地等区域采取相应的生物与技术措施,努力从根本上修复、减少危害,促进抗旱草地的培育以及退化土地的修复和治理,实现区域生态环境的恢复,为生物生存提供空间;对于建设以及交通用地,物种的流通阻力较大,尤其是一些交通路线无法移除,修复时,应在其周围添加一些小型的斑块,如修隧道等,以保障物种流通的顺利进行。

## 4 讨论

忻州市生态安全格局的构建在一定程度上能够提高区域生态系统的服务功能,保护生物多样性。本文通过对忻州市 2000—2020 年的生态系统服务功能进行评估,并运用形态空间学分析方法(MSPA)进行生态源地的识别,弥补了以往研究方法单一、研究与物种活动不够紧密<sup>[29]</sup>并且是从静态角度研究的不足,从动态角度展现了源地的动态稳定性,使得源地的识别更具有代表性。通过对多种要素赋值来构建综合阻力面,而且用夜间灯光数据修正,弥补了传统数据无法体现异质性的不足,对经济活动的空间表达更加的具象和客观,然而,阻力系数的选择和赋值没有一个固定标准,赋值中有一定的主观性。电路理论能够模拟物种在区域内流通的随机性,除此之外,还能够识别生态节点,但目前国内外的研究中对于廊道的宽度没有一个明确的界定,缺乏实证研究,在实际应用中应结合区域实际,对该阈值进行不断的调整改进<sup>[30]</sup>。

当前,区域生态安全格局的研究在识别生态源地时多从静态的角度出发考虑,对于动态角度研究源地仍然较少,本文可为动态角度选取源地构建区域生态安全格局提供参考。在今后研究中考虑源地动态性,将有助于构建更加科学的生态安全格局。

## 5 结论

(1) 研究区一共得到 59 处生态源地,总面积为 2 355 km<sup>2</sup>,空间特征相对明显,大致呈现东部相对集中,中西部分散的分布格局。其中源地主要集中分布在岢岚县、宁武县、静乐县、繁峙县、五台县、定襄县等县域,且相对集中。(2) 研究区生态修复区主要包括:100 条生态廊道,总长度是 1 637.58 km,111 处生态夹点,总面积 3.16 km<sup>2</sup>以及 83 处生态障碍点,总面积为 48.7 km<sup>2</sup>,按等级划分后的生态廊道大致呈现环状分布的格局,主要表现为关键生态廊道总体上分布在源地的中心,

而重要和一般生态廊道则是依次由源地向外扩散。夹点区域则是大致位于源地和廊道相接的区域,耕地和建设用地在生态障碍区域中的比例较高,影响区域内物种的循环。因此,该区域的生态修复工作有待进一步落实。(3) 在未来的生态保护与恢复中,应将“保护廊道、修复夹点区域、剔除和完善障碍区域”作为总体治理策略,对生态节点以及生态退化区域采取不同的措施进行分区分类治理,进而改善生态源地内部人口结构,为生物生存提供适宜的空间。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 于成龙,刘丹,冯锐,等.基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建[J].生态学报,2021,41(1):290-301.
- [3] 叶鑫,邹长新,刘国华,等.生态安全格局研究的主要内容与进展[J].生态学报,2018,38(10):3382-3392.
- [4] 王雪然,万荣荣,潘佩佩.太湖流域生态安全格局构建与调控:基于空间形态学-最小累积阻力模型[J].生态学报,2022,42(5):1968-1980.
- [5] 马克明,傅伯杰,黎晓亚,等.区域生态安全格局:概念与理论基础[J].生态学报,2004,24(4):761-768.
- [6] 俞孔坚.生物保护的景观生态安全格局[J].生态学报,1999,19(1):10-17.
- [7] 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.
- [8] 薛强,路路,牛韧,等.基于地质灾害敏感性的生态安全格局关键区识别与修复:以济南市为例[J].生态学报,2021,41(22):9050-9063.
- [9] 于亚平,尹海伟,孔繁花,等.基于 MSPA 的南京市绿色基础设施网络格局时空变化分析[J].生态学杂志,2016,35(6):1608-1616.
- [10] 吴哲,陈歆,刘贝贝,等.InVEST 模型及其应用的研究进展[J].热带农业科学,2013,33(4):58-62.
- [11] 孔繁花,尹海伟.济南城市绿地生态网络构建[J].生态学报,2008,28(4):1711-1719.
- [12] 潘竞虎,王云.基于 CVOR 和电路理论的讨赖河流域生态安全评价及生态格局优化[J].生态学报,2021,41(7):2582-2595.
- [13] 张亮,岳文泽,陈阳.基于斑块复合属性特征的城市生态安全格局构建:以杭州市为例[J].生态学报,2021,41(11):4632-4640.
- [14] 高梦雯,胡业翠,李向,等.基于生态系统服务重要性和环境敏感性的喀斯特山区生态安全格局构建:以广西河池为例[J].生态学报,2021,41(7):2596-2608.
- [15] Peng J, Yang Y, Liu Y, et al. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns[J]. Science of the Total Environment, 2018,644:781-790.
- [16] Pecl G T, Araujo M B, Bell J D, et al. Biodiversity redistri-

- bution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being[J]. *Science*, 2017, 355(6332):1389-1399.
- [17] Soille P, Vogt P. Morphological segmentation of binary patterns[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2009, 30(4): 456-459.
- [18] 王晓玉,冯喆,吴克宁,等.基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护与修复[J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8725-8732.
- [19] Yu K. Security patterns and surface model in landscape ecological planning[J]. *Landscape & Urban Planning*, 1996, 36(1):1-17.
- [20] 杨志广,蒋志云,郭程轩,等.基于形态空间格局分析和最小累积阻力模型的广州市生态网络构建[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(10):3367-3376.
- [21] 张美丽,李智,张益琛,等.基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别:以河北省阜平县为例[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(3):299-307.
- [22] Zeng L, Schmitt M, Li L, et al. Analysing changes of the Poyang Lake water area using Sentinel-1 synthetic aperture radar imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(23):7041-7069.
- [23] 刘佳,尹海伟,孔繁花,等.基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化[J]. *生态学报*, 2018, 38(12): 4363-4372.
- [24] 苏泳娴,张虹鸥,陈修治,等.佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案[J]. *生态学报*, 2013, 33(5): 1524-1534.
- [25] 宋利利,秦明周.整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(10):3344-3352.
- [26] Huang J M, Hu Y C, Zheng F Y. Research on recognition and protection of ecological security patterns based on circuit theory: A case study of Jinan City[J]. *Environment Science and Pollution Research*, 2020, 27(11):12414-12427.
- [27] Liu X Y, Wei M, Zeng J. Simulating urban growth scenarios based on ecological pattern: A case study in Quanzhou, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(19): 7282.
- [28] 吴健生,马洪坤,彭建.基于“功能节点-关键廊道”的城市生态安全格局构建:以深圳市为例[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(12):1663-1671.
- [29] 方莹,王静,黄隆杨,等.基于生态安全格局的国土空间生态保护修复关键区域诊断与识别:以烟台市为例[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1):190-203.
- [30] 陈南南,康帅直,赵永华,等.基于 MSPA 和 MCR 模型的秦岭(陕西段)山地生态网络构建[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(5):1545-1553.

(上接第 354 页)

- [19] 冯应斌,龙花楼.基于乡村人口转移和乡村道路建设的空间贫困破解机理及其对策研究:以贵州省为例[J]. *地理研究*, 2019, 38(11):2606-2623.
- [20] 罗玉杰,李会琴,侯林春,等.可持续生计视角下乡村旅游地返贫风险识别及预警机制构建:以湖北省恩施州 W 村为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(2):186-193.
- [21] 尚海洋,宋妮妮.返贫风险、生计抵御力与规避策略实践:祁连山国家级自然保护区内 8 县的调查与分析[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(6):1784-1795.
- [22] 凌经球.论可持续脱贫[J]. *桂海论丛*, 2007(2):42-45.
- [23] 胡原,曾维忠.稳定脱贫的科学内涵、现实困境与机制重构:基于可持续生计-脆弱性-社会排斥分析框架[J]. *四川师范大学学报:社会科学版*, 2019, 46(5):121-128.
- [24] 王富珍,周国华,唐承丽,等.基于可持续生计分析框架的山区县域脱贫稳定性评价[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(2):270-277.
- [25] 戴琼瑶,刘家强,唐代盛.我国直过民族脱贫人口稳定脱贫指数及政策含义:以独龙族为例[J]. *人口研究*, 2019, 43(6):75-89.
- [26] 檀学文,白描.论高质量脱贫的内涵、实施难点及进路[J]. *新疆师范大学学报:哲学社会科学版*, 2021, 42(2): 29-40, 2.
- [27] 冯家臻,赖作莲,梁裕晨.关于建立和完善深度贫困县稳定脱贫长效机制的调研与思考[J]. *新西部*, 2018(34):69-73.
- [28] 郑秉文.“后 2020”时期建立稳定脱贫长效机制的思考[J]. *宏观经济管理*, 2019(9):17-25.
- [29] 程静.西吉县县内生态移民村韧性及其影响机制研究[D].银川:宁夏大学,2021.
- [30] 汤青.可持续生计的研究现状及未来重点趋向[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(7):823-833.
- [31] 苏胜亮,高明,徐锦娟,等.宁夏海原县生态脆弱性与经济贫困空间耦合关系[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(3): 327-333.
- [32] 谭雪兰,王振凯,余航菱,等.基于农户视角的脱贫类型划分与路径研究:以新晃侗族自治县 84 个出列村为例[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(2):396-407.