

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.016; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.016.

宋桂冠, 张小平. 基于“源地-阻力-廊道”范式的黄河流域甘肃段生态安全格局构建[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1): 273-283.

Song Guiguan, Zhang Xiaoping. Construction of ecological security pattern for Gansu section of Yellow River Basin based on “source-resistance-corridor” paradigm[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1): 273-283.

# 基于“源地-阻力-廊道”范式的黄河流域 甘肃段生态安全格局构建

宋桂冠, 张小平

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

**摘要:** [目的] 构建基于“源地-阻力-廊道”范式的黄河流域甘肃段生态安全格局, 为保障区域生态安全、促进经济与生态的协同发展提供科学依据。[方法] 通过生态系统服务重要性、生态敏感性和景观连通性综合识别生态源地, 根据MSPA景观类型、土地利用类型、植被覆盖度、距道路距离和高程5个影响因子建立生态阻力面, 利用Linkage Mapper工具识别不同类别生态廊道, 形成“源地-阻力-廊道”的基本范式, 以此构建黄河流域甘肃段生态安全格局。[结果] (1) 共识别出生态源地96个, 主要集中在研究区的西北、西南和庆阳东部, 呈现出明显的空间集聚特征。(2) 综合阻力值较高的区域主要聚集在研究区的中北部, 而综合阻力值较低的区域主要分布在其西南和庆阳东部地区。(3) 共识别出生态廊道158条, 总长度为5 286 km, 平均长度为33.5 km, 主要呈网状分布在研究区中西部, 其中关键生态廊道20条, 重要生态廊道40条, 一般生态廊道98条; 生态夹点63处, 面积共计 $6.87 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ , 主要分布在西南部的甘南地区; 生态障碍点共108处, 总面积 $3.67 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ , 主要分布在研究区中部; 生态断裂点168处, 主要分布于中部地区。[结论] 黄河流域甘肃段呈现“三区两核”的生态安全格局, 应当采取生态空间分区治理, 将保护生态廊道、修复生态夹点、清理与完善障碍点作为治理策略, 以提升区域生态系统的稳定性和可持续性。

**关键词:** 生态安全格局; 源地识别; 生态廊道; 电路理论; 黄河流域甘肃段

中图分类号: X321

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0273-11

## Construction of ecological security pattern for Gansu section of Yellow River Basin based on “source-resistance-corridor” paradigm

Song Guiguan, Zhang Xiaoping

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to construct an ecological security pattern for the Gansu section of the Yellow River Basin based on the “source-resistance-corridor” paradigm, providing a scientific basis for ensuring regional ecological security and promoting the coordinated development of economy and ecology. [Methods] Ecological sources were identified by comprehensively evaluating ecosystem service importance, ecological sensitivity, and landscape connectivity. An ecological resistance surface was established based on the five influencing factors of morphological spatial pattern analysis (MSPA) landscape types, land use types, fractional vegetation cover, distance from roads, and elevation. Different types of ecological corridors were identified using the Linkage Mapper tool to form the basic “source-resistance-corridor” paradigm, which was then used to construct the ecological security pattern of the Gansu section of the Yellow River Basin. [Results] (1) A total of 96 ecological sources were identified, primarily concentrated in the northwest and southwest of the study area and eastern Qingyang, showing distinct spatial clustering characteristics. (2) The areas with higher

收稿日期: 2025-04-08

修回日期: 2025-04-27

接受日期: 2025-05-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“西北内陆新区演化与中心城市空间重构的互动机理和发展模式研究: 以兰州为例”(41961029)

第一作者: 宋桂冠(2001—), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事生态地理学、环境影响评价研究。E-mail: 1983561483@qq.com

通信作者: 张小平(1967—), 女, 甘肃会宁人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事环境影响评价、区域环境与生态产业研究。E-mail: zxp296@163.com.

<http://stbcyj.paperonice.org>

comprehensive resistance values were mainly concentrated in the central and northern parts of the study area, while the areas with lower comprehensive resistance values were mainly distributed in the southwestern and eastern Qingyang. (3) A total of 158 ecological corridors were identified, with a total length of 5 286 km and an average length of 33.5 km. They were distributed in a network pattern in the central and western parts of the study area. Among them, 20 were critical ecological corridors, 40 were significant ecological corridors, and 98 were general ecological corridors. Additionally, 63 ecological pinch points were identified, covering a total area of  $6.87 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , mainly concentrated in the Gannan region in the southwest. 108 ecological barrier points were identified, with a total area of  $3.67 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , mainly distributed in the central part of the study area. Furthermore, 168 ecological break points were mainly distributed in the central region. [Conclusion] The Gansu section of the Yellow River Basin exhibits an ecological security pattern of “three zones and two cores”. Ecological spatial zoning governance should be adopted, with the protection of ecological corridors, restoration of ecological pinch points, and removal and improvement of barrier points as governance strategies to enhance the stability and sustainability of the regional ecosystem.

**Keywords:** ecological security pattern; source identification; ecological corridors; circuit theory; Gansu section of Yellow River Basin

生态安全格局是保障生态系统稳定与完整,支撑人类健康与可持续发展的基础架构<sup>[1]</sup>。然而随着人口增长和经济活动扩张,导致生态系统退化与物种多样性减少,生态危机显现,严重威胁生态环境安全。加之气候变化导致的环境退化加剧,生态安全面临更大的挑战,影响到人类的生存和发展,生态安全保障已成为可持续发展的当务之急。因此,建立生态安全框架,对于维持生态系统的稳固性,促进生态健康,确保国家生态安全具有至关重要的作用,是实现可持续发展的必由之路。

20世纪80年代初期,生态安全成为国际生态系统研究的热点<sup>[2]</sup>,涉及景观格局、生态连接度等方面。中国的生态安全格局研究始于20世纪90年代,学者俞孔坚等提出生态安全格局的概念,是以点、线、面形成的生态网络结构,其优化配置系统要素,保证生态系统稳定是生态安全的基础,并在生物多样性保护领域提出了构建区域景观生态框架的思路与体系架构。构建生态安全格局的主流范式为“源地确定—阻力面构建—廊道提取”,其综合考虑了不同生态要素的内在关系,并进行统一规划,可直观反映出生态系统的完整性和连续性<sup>[3]</sup>。生态源地是维系生态系统功能、保障生态系统结构完整性的核心斑块,对生态系统的稳定与持续发展起着至关重要的作用,主要通过生态系统服务<sup>[4]</sup>、生态保护红线<sup>[5]</sup>、自然保护区、生态敏感性等<sup>[6]</sup>与形态学空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)等<sup>[7]</sup>方法进行识别;生态阻力面表征物种迁移时的阻碍与干扰强度,其构建主要采用综合指标评价方法<sup>[8]</sup>,结合区域特点,可选择夜间灯光<sup>[9]</sup>、地形位指数等<sup>[10]</sup>方法进行修正;生态廊道作为生态景观中的线性或带状连接要素,将各个生态斑块紧密地联

结在一起,促进斑块间的物质循环与能量流动,为物种的迁徙、扩散等生态过程提供重要通道,确保了生态系统的连通性和稳定性<sup>[11]</sup>。其主要通过最小累积阻力模型<sup>[12]</sup>、电路理论<sup>[13]</sup>、重力模型<sup>[14]</sup>与水文分析等<sup>[15]</sup>方法进行提取。相比而言,电路理论结合随机游走理论,为模拟生态系统中生物的迁徙行为提供有效手段,通过模拟生物在景观中的随机移动,能够准确揭示生态流动的主要路径,为理解生物迁徙、生态连通性及生态保护提供重要科学依据<sup>[16]</sup>,可以识别出带有宽度的潜在生态廊道,克服了最小累积阻力模型操作过程复杂且生成的廊道冗杂<sup>[17]</sup>的局限性,更具备实际应用价值,在生态安全格局中具有独特技术优势。

黄河流域甘肃段位于黄河上游,是西北地区重要的生态安全屏障,素有“中华水塔”的美称<sup>[18]</sup>。黄河流域甘肃段作为国家战略发展的重点区域,肩负着优化地域发展布局与促进经济高质量发展的双重任务。在《黄河流域生态保护与高质量发展规划纲要》中,明确指出应加大上游水域涵养功能的构建强度,守护关键水源补给区域,并着重对重点荒漠化地带进行治理与修复,以确保生态安全及可持续发展。但由于黄河流域甘肃段特殊的地理位置和气候条件,生态环境问题较为突出,目前面临生态系统退化、水土流失、土地荒漠化、土壤盐碱化等一系列问题。因此,本文通过综合分析生态系统服务重要性、生态敏感性和景观连通性评价结果识别生态源地,选取一系列阻力要素来构建综合的生态阻力面,运用Linkage Mapper技术提取生态廊道,构建黄河流域甘肃段的生态安全格局,为黄河流域甘肃段的生态保护与安全提供保障,还可为黄河流域生态保护与高质量发展战略的制定提供科学依据。

# 1 研究区概况与数据来源

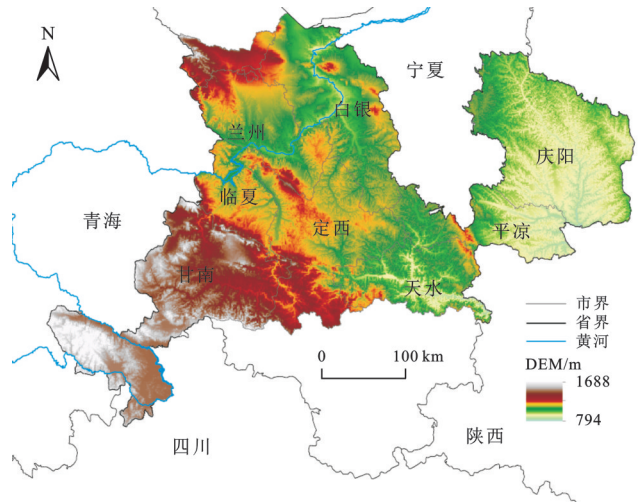
## 1.1 研究区概况

黄河流域甘肃段(100°—108.5°E, 33°—37.5°N, 图 1)地处黄河的上游地带,紧邻黄土高原的西部边缘区域,总面积  $1.43 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占流域总面积的比例达到 17.65%。在气候特征上,该区域属于典型的温带大陆性气候类型,年平均降水量 400 mm 左右,年平均气温则稳定在 7℃ 左右。其地貌形态复杂多样,主要涵盖黄土高原丘陵沟壑区和甘南高寒区这两大地貌单元。黄河流域在甘肃省境内包括兰州、甘南、平凉、天水、庆阳、白银、武威、定西及临夏共计 9 个市(州),构成甘肃省内独特的自然地理环境和生态格局。

## 1.2 数据来源

本文所采用的数据涵盖多个方面,包括 2020 年的气象、土地利用、标准化植被指数、地形高程等数据。土地利用数据源自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/data.aspx>),分辨率为 1 km。气象数据和归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)数据则获取自国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/home>),其空间分辨率分别为 1 km 和 250 m。基于 NDVI 数据,采用像元二分法模型来估算植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)。数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据来源于地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn>),再进一步计算得到地形坡度。还有土壤数据来源于世界土壤数据库

(Harmonized World Soil Database, HWSD)的中国土壤数据集,分辨率为 1 km。本文所采用的河流与道路相关数据源自国家基础地理信息中心(<https://www.webmap.cn>)。为减小数据误差,保障空间参考的一致性,各因子空间参考统一设置为 WGS\_1984-Albers。为便于后续的数据统计与分析工作,本文将所有获取的空间数据,包括上述各类数据,均进行统一的处理,即将其重采样至 1 km 的空间分辨率。



注:基于标准地图服务系统下载的标准图号 GS(2020)4619 号的标准地图制作,底图未做修改,下同

图 1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area

## 2 研究方法

本文运用“源地识别—阻力面构建—生态廊道提取”的技术框架,其技术路线如图 2 所示。

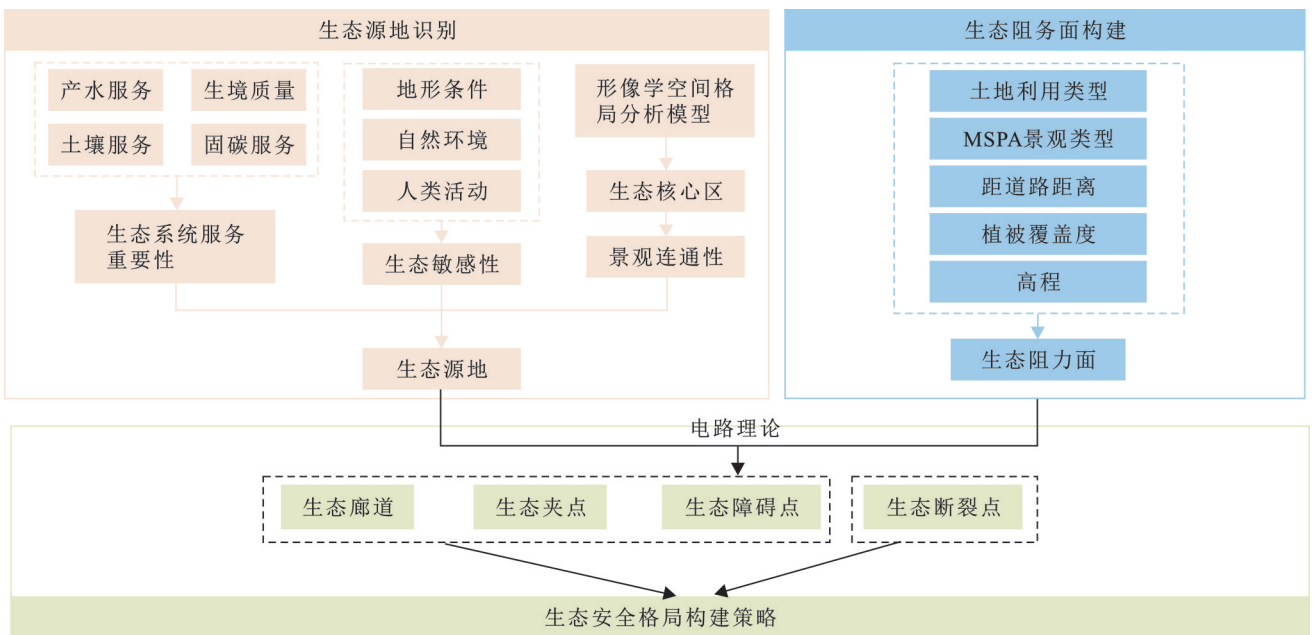


图 2 技术路线

Fig.2 Technical route

## 2.1 生态源地识别

将生态系统服务重要性、生态敏感性与景观连通性三项重要性评价结果叠加处理,利用自然断点法进行分级,为生态源地的科学识别奠定坚实基础,提供可靠的理论依据。

**2.1.1 生态系统服务重要性评价** 生态系统服务是人类从生态系统中获取的直间益处及收益<sup>[19]</sup>,生态系统服务功能的重要性评估成果,能够为生态系统的科学管理以及生态保护与建设工作提供直接的决策依据<sup>[20]</sup>。根据黄河流域甘肃段生态环境特征,结合相关研究<sup>[21]</sup>,本文采用 InVEST 模型中的 Annual Water Yield 模块、Habitat Quality 模块、Sediment Delivery Ratio 模块和 Carbon 模块分别对其产水服务、生境质量、土壤保持和固碳服务进行评估,以此确定其生态系统服务重要性。参考相关研究<sup>[6]</sup>,将产水服务、土壤保持、生境质量和固碳服务 4 个生态系统服务分别以 0.2, 0.2, 0.3, 0.3 的权重进行分配与叠加,并将所得的评估结果归一化标准处理,从而得到其重要性程度分级。

**2.1.2 生态敏感性评价** 生态敏感性反映出生态系

统对人类干扰与自然变化的响应,揭示生态问题潜在风险与发生概率<sup>[22]</sup>。参考已有研究<sup>[23]</sup>,选取地形条件、自然环境和人类活动为一级评价要素,构建针对黄河流域甘肃段的生态敏感性评价指标体系(表 1)。其中地形条件包括坡度、坡向和高程 3 个阻力因子;自然环境包括植被覆盖、降雨侵蚀力和水域缓冲区 3 个阻力因子;鉴于人类对土地的开发利用对生态环境状况具有直接影响,本文特选取土地利用类型作为衡量人类活动强度的指示因子。采用层次分析法确定各因子权重。一致性检验结果显示 CR 值为 0.023, 低于 0.1 的阈值,表明通过检验。数据经过归一化处理后,采用自然断点法对数据进行划分与定级,并为各个等级赋予相应的敏感性分数,计算公式如下:

$$P_i = \sum_{i=1}^n N_i W_i \quad (1)$$

式中:  $P_i$  为生态敏感性评价价值;  $W_i$  为各类敏感性因子权重;  $N_i$  为生态敏感性因子等级赋值,分为低敏感、中低敏感、中敏感、中重敏感和高敏感的 5 个等级并分别赋值为 1, 3, 5, 7, 9。

表 1 生态敏感性评价指标体系

Table 1 Evaluation indicator system for ecological sensitivity

评价指标	低敏感	中低敏感	中敏感	中高敏感	高敏感	权重	
地形条件	高程/m	<1500	1500~2000	2000~2500	2500~3000	>3000	0.066
	坡度/(°)	0~5	5~10	10~20	20~25	>25	0.040
	坡向	平地、正南	东南、西南	正东、正西	东北、西北	正北	0.034
自然环境	植被覆盖度	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	>0.8	0.269
	降雨侵蚀力	<1000	1000~1500	1500~2000	2000~2500	>2500	0.133
	水域缓冲区	>4000	3000~4000	2000~3000	1000~2000	<1000	0.150
人类活动	土地利用类型	建设用地	未利用土地、耕地	草地	林地	水域	0.308
	赋值/分	1	3	5	7	9	

**2.1.3 景观连通性** 形态学空间格局分析是由 Vogt 等所提出,依据数学形态学的基本原理对光栅图像中的空间模式进行识别、量化以及分割处理<sup>[24]</sup>。本文运用 Guidos Toolbox 3.0 软件,将林地、草地以及水域设定为前景类别,而将其他土地类型均视为背景,通过此设定进行分析后,获得包括核心区、孤岛状斑块、孔隙区域、边缘地带、支线区域、环岛区域以及连接桥在内的 7 种不同的景观类型,并进一步从中提取出核心区,将其作为景观连通性分析的基础数据。

景观连通性评估生态流动促进与阻碍,其反映出生态过程与功能关系<sup>[25]</sup>。维护景观连通性对生物多样性保护、生态系统稳固及区域生态进程发展至关重要。整体景观连通性指数(IIC)以及潜在景观连通性指数(PC)是有效量化景观连通性状态的重要指

标,能够进一步用于评估景观中各个斑块对整体连通性的贡献程度或重要性分值。潜在连通性指数(PC)的数值越高,表明斑块的连通性越强;斑块重要程度指数(dPC)的数值越大,则斑块的连通重要性愈发显著。计算公式是:

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j p_{ij}^*}{A_L^2} \quad (2)$$

$$dPC = \frac{PC - PC_{remove}}{PC} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $a_i$  和  $a_j$  分别为斑块  $i$  和斑块  $j$  的面积;  $n$  为景观内生境节点的总数;  $p_{ij}^*$  为斑块  $i$  和斑块  $j$  之间的所有路径最终连通性的最大数值;  $A_L$  为研究区总面积。式中  $PC_{remove}$  为删除该斑块后的景观(可能)连通性指数。

### 2.2 阻力面构建

生态阻力是指生物物种在从一处生态源地迁徙到另一处生态源地时,所需跨越的障碍或遭遇的阻力要素<sup>[26]</sup>。参考相关研究结果<sup>[21]</sup>与专家意见,选取土地利用

类型、MSPA 景观类型、距道路距离、坡度作为阻力因子,赋予阻力系数与权重(表 2),并进行加权求和来构建综合阻力面。并采用层次分析法对各因子的权重系数进行科学分配,通过一致性验证以确保其合理性。

表 2 阻力因子及阻力值

Table 2 Resistance factors and resistance values

阻力因子	阻力系数					权重
	1	3	5	7	9	
土地利用类型	林地、水域	草地	耕地	未利用地	建设用地	0.3863
MSPA 景观类型	核心区	桥接区	环岛区、支线	孤岛、边缘区	孔隙、背景	0.2456
植被覆盖度	0.8~1	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2	0.1611
距道路距离/m	>4000	3000~4000	2000~3000	1000~2000	0~1000	0.0852
高程/m	<1500	1500~2000	2000~2500	2500~3000	>3000	0.1217

### 2.3 基于电路理论的生态要素识别

生态要素涵盖生态廊道、生态夹点和生态障碍点等关键组成部分。生态廊道作为一种低阻力的生态通行路径,能够有效地连接多个孤立的生态景观单元,促进物种的扩散、迁移和基因交流。借助 Linkage Mapper 工具箱内的 Linkage Pathways Build Network and Map Linkages 工具,采用最小成本路径法,对研究区内的生态廊道进行识别与分析。选用 Linkage Mapper 工具箱中的 Centrality Mapper Tool,计算生态廊道的中心性指数,进而对生态廊道的重要性等级进行量化评估与分析。生态夹点指的是生态网络中电流密度较高的区域,通常被称作“瓶颈区域”,这些区域是物种迁徙过程中通过概率较高或构成必不可少迁徙路径的关键所在<sup>[27]</sup>。而生态障碍点指的是那些限制物种在不同斑块间迁移的区域,对这些区域进行生态修复和恢复,能够有效增强生态源地的连接性和通达性<sup>[28]</sup>。依据已识别的生态廊道信息,利用 Linkage Mapper 工具箱中的 Circuitscape 程序,具体采用其 Pinchpoint Mapper 功能模块与

Barrier Mapper 功能模块,分别对研究区域内的生态夹点和生态障碍点进行识别与分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 生态源地识别及空间分布

3.1.1 生态系统服务重要性空间分布 采用自然断点分类方法,将重要性评估结果划分为 5 个等级:即重要、较重要、一般、较不重要、不重要,分别对应高、较高、中、较低、低。结果显示(图 3):黄河流域甘肃段产水服务的高值区面积为  $3.85 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,占比为 2.69%,该区域主要分布在玛曲、碌曲、卓尼各县以及合作市和岷县等地区,其土地利用类型主要以林地和草原为主。土壤保持高值区面积较小( $2.4 \text{ 万 hm}^2$ ),占比仅为 0.17%,主要分布在甘南地区,其余市州呈零星点状分布;固碳服务以中高值为主,其中高值区面积为  $1.8 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占比高达 12.52%,主要分布在甘南地区、天水东南部以及庆阳东部。生境质量高值区面积为  $1.62 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占比为 11.32%,主要分布在甘南地区以及庆阳东部。

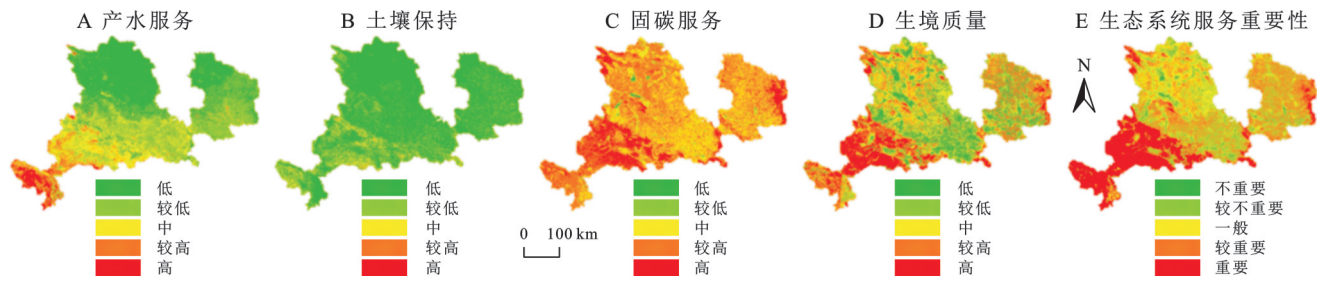


图 3 生态系统服务重要性评估结果

Fig. 3 Evaluation results of ecosystem service importance

综合以上各类服务的重要性分析结果,黄河流域甘肃段生态系统服务重要区域主要分布在研究区的西南部,其分布位置与生境质量高值区分布大致相同,其面积总计约为  $3.09 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占整个研究区域面积的 21.6%;而较重要区域则主要集中于中部和东

部地带,面积约为  $4.35 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占研究区总面积的 30.5%。其他等级区域分布较为分散,面积占比比较少。  
3.1.2 生态敏感性评价 综合各单因子的生态敏感性分布,按自然断点法,将黄河流域甘肃段的生态敏感性依次分为高敏感、中高敏感、中敏感、中低敏感、

低敏感(图4)。高敏感所占面积最小,其占比仅为7.51%,主要分布在研究区西南部的甘南地区,其区内生物多样性丰富,水源涵养、气候调节功能较强,应以保护为主。中敏感所占面积最大,达到 $4.10 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占比为29.43%,在研究区内呈分散分布。

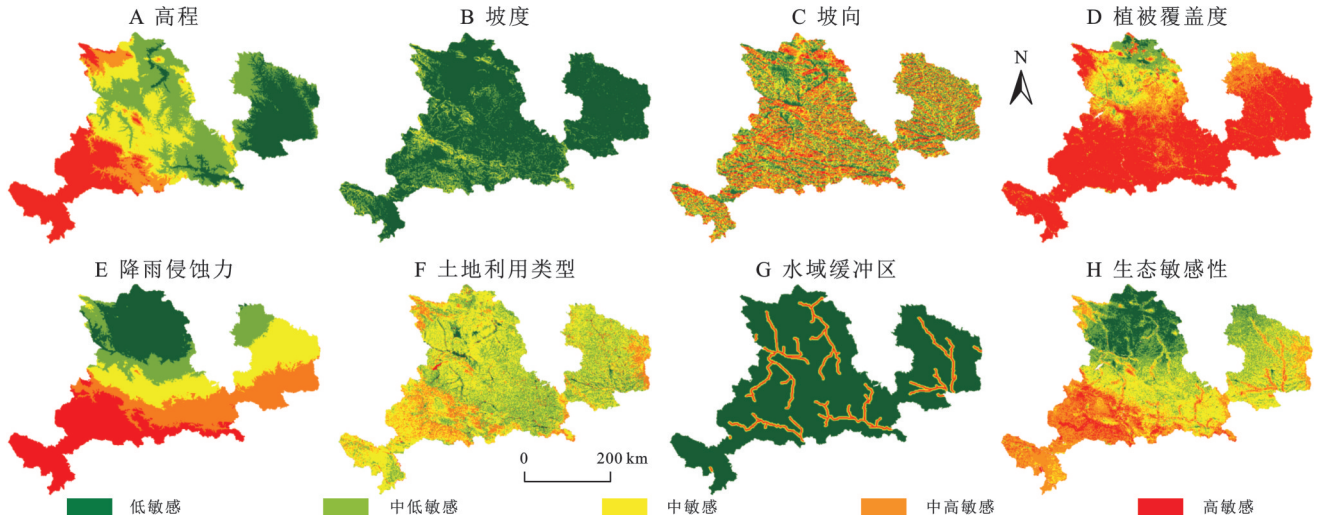


图4 单因子生态敏感性和综合生态敏感性空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of single-factor and comprehensive ecological sensitivity

3.1.3 景观连通性评价 运用Guidos Toolbox软件得到研究区的MSPA的景观类型(图5A),核心区总面积约为 $3.45 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占比为24.08%,主要分布在甘南地区、庆阳东部和天水南部。连接桥作为景观生态中的结构性通道元素,对于物种的迁移和扩散过程发挥着极其关键的生态学作用,其面积约为 $3.35 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占比为23.38%。支线区域是指那些仅有一端与边缘地带、桥接区域、环岛区域或孔隙区域相连接的特定区域,具有一定的连通作用,占研究区总面积的6.41%。生态景观斑块的外部边界称为边缘区,而斑块内部的边界则被称作孔隙,这两者均是边缘效应产生的区域,分别占据总面积的7.85%和1.18%。孤岛状生境斑块是景观中独立存在的部分,它们如同踏脚石一般,为物种的迁徙提供关键的中转站,这些斑块在研究区域内呈零散分布,所占面积比例相对较小。而环岛区域则为物种迁移提供一条可选的、更为直接的通道,在研究区域内的面积较为有限,占比仅为1.94%,这一现状导致物种在研究区域内进行迁徙时,需要消耗更多的能量,是区域生态修复的关键。

本文借助Conefor3.0软件,选取核心区面积大于 $300 \text{ hm}^2$ 的区域斑块,计算得到斑块重要性指数(dPC)值,然后运用自然断点分类方法,将斑块的重要性程度细分为5个等级:极度重要、高度重要、中等重要、较为重要以及一般重要,并据此得到核心区重要性的空间分布图(图5B)。通过对各等级斑块所占

低敏感区域占研究区总面积的14.3%,主要集中于植被覆盖较少且人类活动密集的兰州—白银一带,说明该区域内的部分地段具备开发潜力和环境容纳空间,需要平衡好“人地”关系,以保持生态系统的稳定。

面积比例进行统计分析,结果显示,极度重要级别的斑块面积达到 $1.9 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,其占比为13.29%,主要位于研究区西南部的甘南地区,该区域的土地覆盖类型以林地、草地以及水域为主,生态环境质量好,受人类活动的干扰影响相对较为有限。高度重要斑块面积为 $3.16 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,占比仅为2.2%,主要紧邻极度重要斑块,分布在岷县、漳县、榆中县和靖远县等地。

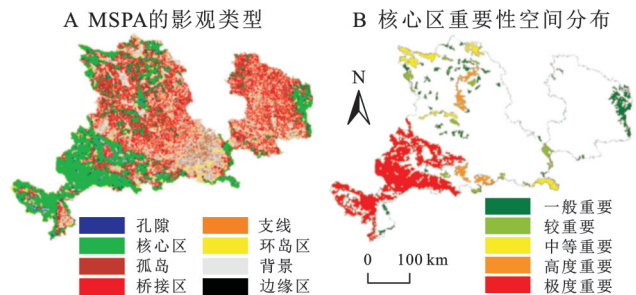


图5 景观连通重要性评价结果

Fig. 5 Evaluation results of landscape connectivity importance

3.1.4 生态源地的空间分布 通过对研究区的生态系统服务重要性、生态敏感性以及景观连通性进行综合分析,将这三项重要性评价结果叠加(图6),并采用自然断点分类法进行分类处理,将生态系统服务的重要性细分为5个不同层级。在生态源地识别的过程中,面积较小的斑块生态辐射功能弱,不具备作为生态源地的条件,因此本文采用最小面积阈值法对源地斑块数量进行剔除。最终识别出96个生态

源地,总面积为  $1.51 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占研究区总面积的比例为 10.6%,主要集中分布于西北、西南部和庆阳东部,叠加土地利用类型可知,生态源地主要以林地、草地和耕地为主。

### 3.2 生态阻力面及空间分布

通过将土地利用类型、MSPA 景观类别、植被覆盖程度、距道路距离以及高程这 5 个单一因子进行加权求和,得出综合阻力值分布图(图 7)。综合阻力值较低的区域主要分布在研究区的西南和庆阳东部地区,其生态基底条件良好,是生态保护的重点区域。相反,综合阻力值较高的区域主要聚集在研究区的

中北部,该区域产业密集,人类生产及生活活动频繁,对生态环境产生的负面影响较为显著。

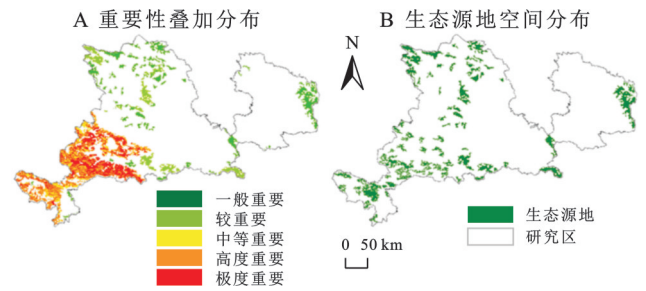


图 6 生态源地分布

Fig. 6 Distribution of ecological sources

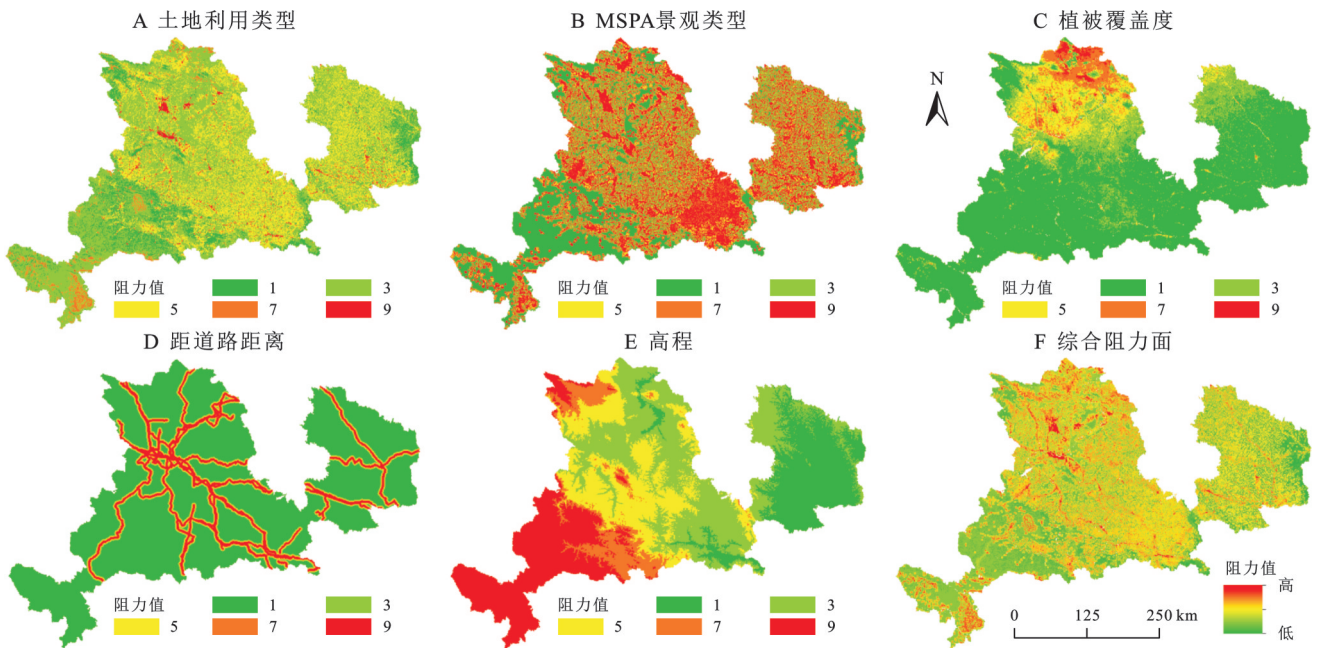


图 7 单因子阻力面和综合阻力面

Fig. 7 Single-factor and composite resistance surfaces

### 3.3 生态廊道空间分布及生态修复关键区识别

3.3.1 生态廊道空间分布特征 基于已识别的生态源地和构建的综合阻力面,采用 Linkage Pathways 工具中的 Build Network and Map Linkages 功能模块,来识别生态廊道的空间分布,共识别出生态廊道 216 条。借鉴相关研究<sup>[29]</sup>,综合考虑生态廊道长度与廊道的可替代性,筛选保留其中的 158 条生态廊道,得到其空间分布(图 8)。生态廊道的总体长度达到 5 286 km,其平均长度为 33.5 km。在这些廊道中,最短的一条长度为 5 km,最长的一条则延伸至 221.6 km,其相互连通呈网状分布。选用 Linkage Mapper 工具箱中的 Centrality Mapper Tool 模块来计算得出生态廊道的中心性指数,运用自然断点分类法,根据中心性指数从高到低的排序,将生态廊道划分为 3 个等级。其中,第一等级为关键生态廊道,共计 20 条;第二等级为重要生态廊道,数量达到 40 条;第三等级为一般生态廊道,总数为 98 条。总体来看,西南部和北部的生

态廊道分布密集且长度较短,这部分廊道连接面积较大分布集中的生态源地;中部的廊道空间布局展现出一种从长条形且分布稀疏,逐渐过渡到短小型且密集分布的变化趋势,主要连接北部、南部和东部;位于东部的生态廊道数量少且长,使得物种迁徙和景观间物质能量流动受限。

3.3.2 生态修复关键区识别 生态修复关键区由生态夹点、生态障碍点和生态断裂点这三大要素共同构成。生态夹点是保障生态廊道连通性和生态功能有效发挥的关键。将“all to one”模式下生态电流密度识别结果利用自然断点法分为五级,其中,电流密度最高的一级被选定为研究区生态夹点区域,处理分析后,共识别出生态夹点 63 处(图 9),面积 6.87 万  $\text{hm}^2$ ,主要分布在甘南地区、临夏州和天水等地的关键生态廊道和重要生态廊道上,其中最大的生态夹点面积为 1.48 万  $\text{hm}^2$ ,分布在生态源地多,植被覆盖度高且阻力值较小的碌曲县和玛曲县,与四条关键生态廊道相

连,是沟通源地斑块的重要区域。将土地利用数据与生态夹点信息进行叠加分析,表明生态夹点的土地利用类型主要以耕地、草地和林地为主。

生态障碍点指自然界中能够阻碍或限制物种在不同生态斑块间的自由移动或迁徙的特定区域或地点。利用 Linkage Mapper 模块中的 Barrier Mapper

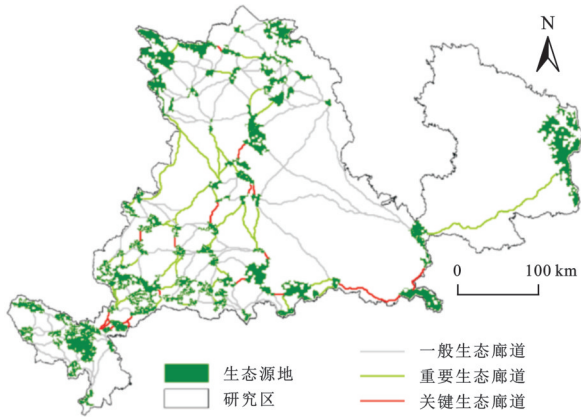


图 8 生态廊道空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of ecological corridors

生态断裂点是交通道路与生态廊道的交点,对生态源地与廊道的连通性和完整性有重要影响,加剧景观破碎化,直接或间接切断景观的连通性。识别研究区高速公路、铁路、国道与廊道,共得到 168 处生态断裂点(图 10)。其中,国道分布有 70 处断裂点,高速公路分布有 50 处断裂点,铁路分布有 48 处断裂点。其主要分布在研究区交通道路较为密集的中部。针对铁路与公路上存在的待修复生态断裂点区域,可以依据实际情况,因地制宜地规划并建设野生动物通道,并同步开展对这些通道的监测工作。研究结果显示,部分识别出的生态夹点、障碍区域、断裂带与生态廊道在空间分布上存在相互重叠的现象,这些区域展现出较高的物种迁徙活跃度,然而其迁移路径阻碍较大,流动性受限,针对这一现象需特别关注并采取有效的修复措施,以维护生态系统的健康与平衡。

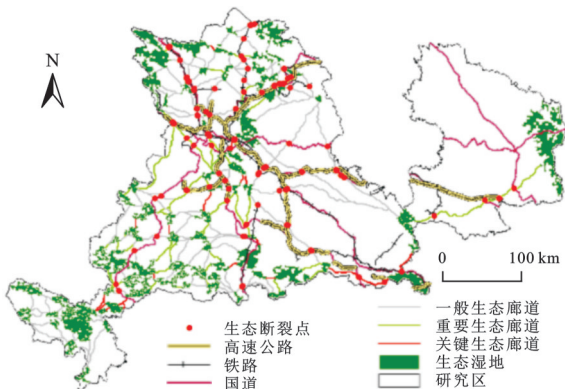


图 10 生态断裂点的空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of ecological break points

工具,对研究区域内的生态廊道的高度障碍区域进行识别与分析,得到生态障碍点共 108 处(图 9),总面积  $3.67 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,主要分布在阻力值较高或景观连通性较低的兰州—白银一带。而研究区西南部生态基底较好,阻力值较低,景观连通性高,生态障碍点分布较少。

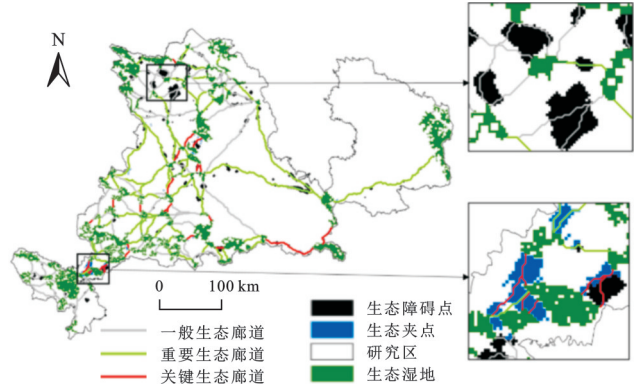


图 9 生态夹点和生态障碍点的空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of ecological pinch points and ecological barrier points

### 3.4 生态安全格局及优化

以生态源地为基底,结合生态阻力值和生态廊道空间分布及识别的生态修复关键区,对生态廊道连通的各部分进行生态功能分区,由此构建“三区两核”的生态安全格局(图 11)。“三区”指甘南水源涵养生态保护区、陇中生态建设关键区和陇东水土保持生态修复区。“两核”指甘南—陇中生态核心区和陇东生态核心区。

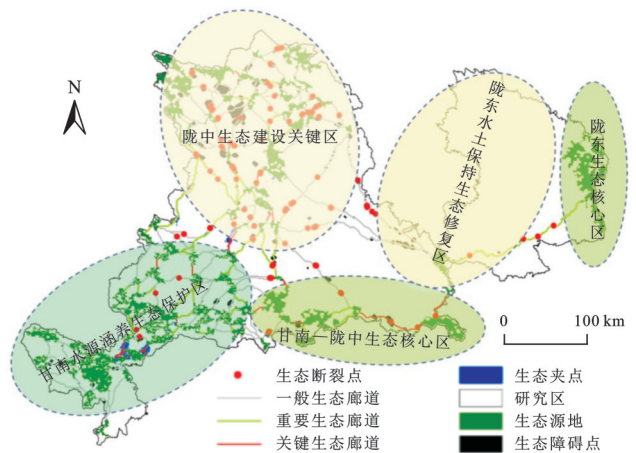


图 11 黄河流域甘肃段生态安全格局

Fig. 11 Ecological security pattern in Gansu section of Yellow River Basin

甘南水源涵养生态保护区,位于研究区西南部,生态源地较多,生态敏感性高,生态阻力值较小,生态夹点最多,生境质量高。该区应科学规划林草植被保护建设,包括天然林保护,营造林建设,以恢复并扩大森林面积,从而提升森林生态系统的质量与

稳定性。同时,针对甘南高原草原退化问题,仍需进一步提高水源涵养功能,加强重点生态功能区保护与修复,加快推进黄河湿地保护修复和退化草原治理、改良,严格落实草原禁牧、轮牧等措施,从而实现草畜平衡,提高草原生态系统的生产力和生态服务功能,增强甘南山地生态屏障。

陇中生态建设关键区,主要分布于兰州—白银一带,其生态源地较多,生态廊道和交通道路分布密集,产业聚集程度高,但生态阻力值也高,是生态障碍点和生态断裂点的集中区域,对廊道完整性和区域连通性有严重影响,导致景观破碎化程度高,生态环境质量较低。针对该区特点,需加大生态建设力度,修复其生态基底。可通过人工干预建设生态斑块的方法,来扩大公共绿地面积,并将林、草植被建设等作为关键基础设施纳入城镇化规划,减少物种迁徙阻力,提升廊道连通性能,修复改善已遭受破坏的生态环境的效果。同时,开展铁路、公路、街道沿线的绿化美化工程,促进生态环境与社会经济的协调发展。

陇东水土保持生态修复区,该区的特点是生态源地和生态廊道稀少,景观连通性差,缺少生态夹点。其面临的主要问题是土质疏松与长期侵蚀导致的丘陵沟壑地貌及水土流失等问题,应以水土保持为重点,树立绿水青山就是金山银山的理念,统筹山水林田湖草沙系统治理。可通过水土流失综合治理,统筹实施国家水土保持重点工程、坡耕地水土流失综合治理、黄土高原地区淤地坝建设等工程,以及实施小流域综合治理,建立以沟道坝系、坡改梯和林草植被为主体的防治体系,加大流域治理和水土流失综合治理力度。

甘南—陇中生态核心区和陇东生态核心区,生态源地是其重要成分。生态源地对于物种的迁徙与扩散具有关键作用,周边分布的绿化设施及林地同样发挥重要的缓冲与连接作用,应进一步加强源地建设。陇东生态核心区周边生态廊道稀缺,景观连通性较弱,限制物种迁徙和物质能量流动。为此,需要科学规划廊道布局,加强生态保护修复,积极推进廊道建设,有助于改善景观连通性,保障生态系统稳定,促进陇东地区生态良性发展;针对甘南—陇中生态核心区存在断裂点多的问题,可结合实际状况采取一系列有效修复策略。具体而言,可划定生态保护核心区,构建生态连通廊道,并实施必要的工程修复手段,以修复生态核心区域内的断裂点,确保生态系统的完整与稳定。

## 4 讨论

黄河流域甘肃段是黄河流域生态保护和高质量

发展的重要阵地,识别黄河流域甘肃段生态保护与修复关键区域,提出整体生态修复策略,对于强化该流域甘肃段的生态屏障功能及促进区域社会经济和谐发展,具有深远的实践指导意义。本文依照“识别生态源地—构建阻力面—提取生态廊道”基本研究范式,构建黄河流域甘肃段的生态安全格局。通过叠加生态系统服务重要性、生态敏感性与景观连通重要性评价结果,依据研究区特性识别生态源地,兼顾其结构与功能,摒弃单一要素叠加评价,确保识别科学全面,为后续生态修复提供依据。并利用MSPA进一步降低研究区景观破碎化的影响。基于层次分析法综合考虑选取多个阻力因子构建生态阻力面,使生态阻力面的构建更加合理。采用电路理论的连接度模型识别生态廊道,能够更为准确地模拟物种迁徙的真实状况。为此构建的生态安全格局基本符合研究区的实际状况,提出的优化措施更具有针对性。

本文的研究也存在着局限性。第一,未对黄河流域甘肃段生态安全格局进行多年时间跨度演变分析。第二,阻力面构建的合理性。阻力面指标的选择和阻力值的划定往往根据已有成果并结合研究区实际情况进行调整,具有一定的主观性,因此对生态廊道的确定也会产生一定影响。第三,本文未将生态保护红线、自然保护区和生态源地范围进行对比,若将二者进行叠加,能够进一步增强生态源地选取的科学性,使生态源地的识别结果更加准确。

## 5 结论

(1) 黄河流域甘肃段共识别出96个生态源地,总面积为 $1.51 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占研究区总面积的10.6%,呈斑块状主要集中分布在研究区的西南部、东北部,中部斑块破碎化程度较高,土地利用类型主要以林地和草地为主。

(2) 综合阻力值较高的区域主要聚集在研究区的中北部,而综合阻力值较低的区域主要分布在其西南和庆阳东部地区。

(3) 黄河流域甘肃段共识别出生态廊道158条,主要呈网状分布在研究区中西部,包含关键生态廊道20条,重要生态廊道40条,以及一般生态廊道98条;生态夹点63处,主要分布在西南部的甘南地区;生态障碍点共108处,主要分布在研究区中部;生态断裂点168处,主要分布于中部地区。

(4) 基于“源地-阻力-廊道”的基本范式,构建“三区两核”的生态安全格局,并针对生态安全格局存在的问题提出优化措施,可为黄河流域甘肃段生态保护和修复提供借鉴。

## 参考文献 (References):

- [1] Kang P, Chen W P, Hou Y, et al. Linking ecosystem services and ecosystem health to ecological risk assessment: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 1442-1454.
- [2] Wu J G. Urban ecology and sustainability: the state-of-the-science and future directions [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 209-221.
- [3] 王琦, 王辉, 虞虎. 基于生态安全格局的国家公园边界划定: 以雅鲁藏布大峡谷国家公园为例 [J]. *自然资源学报*, 2023, 38(4): 951-965.  
Wang Q, Wang H, Yu H. Demarcation of national park boundary based on ecological security pattern: a case study of Yarlung Zangbo Grand Canyon National Park [J]. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(4): 951-965.
- [4] 陈振, 张宇, 郭杰, 等. 基于生态安全格局优化的土地利用及生态系统服务价值情景模拟 [J]. *水土保持研究*, 2025, 32(4): 375-385.  
Chen Z, Zhang Y, Guo J, et al. Scenario simulation of land use and ecosystem service value based on ecological security pattern optimization [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(4): 375-385.
- [5] 闫昊婷, 乔伟峰, 李语旻, 等. 基于生态安全格局的县域生态保护红线优化研究: 以常州市金坛区为例 [J]. *地理研究*, 2024, 43(8): 2141-2157.  
Yan H T, Qiao W F, Li Y M, et al. Optimization of county ecological protection red line based on ecological security pattern: a case study of Jintan district, Changzhou city [J]. *Geographical Research*, 2024, 43(8): 2141-2157.
- [6] 包玉斌, 黄涛, 王耀宗, 等. 基于生态重要性与敏感性的六盘山区生态保护修复分区 [J]. *干旱区地理*, 2023, 46(11): 1778-1791.  
Bao Y B, Huang T, Wang Y Z, et al. Zoning for ecological conservation and restoration in Liupan Mountain area based on ecological importance and sensitivity evaluation [J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(11): 1778-1791.
- [7] 许忠洋, 王琤, 顾彤, 等. 基于生态网络的生态修复关键区识别: 以延安市为例 [J]. *干旱区地理*, 2024, 47(6): 1073-1083.  
Xu Z Y, Wang C, Gu T, et al. Identification of the key areas of ecological restoration based on the ecological network: a case study of Yan'an City [J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(6): 1073-1083.
- [8] Zhou G J, Huan Y Z, Wang L Q, et al. Linking ecosystem services and circuit theory to identify priority conservation and restoration areas from an ecological network perspective [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 873: 162261.
- [9] 柳建玲, 李胜鹏, 范胜龙, 等. 基于生态安全格局的厦漳泉州地区国土空间生态保护修复区与预警点识别 [J]. *生态学报*, 2021, 41(20): 8124-8134.  
Liu J L, Li S P, Fan S L, et al. Identification of territorial ecological protection and restoration areas and early warning places based on ecological security pattern: a case study in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(20): 8124-8134.
- [10] Ran Y J, Lei D M, Li J, et al. Identification of crucial areas of territorial ecological restoration based on ecological security pattern: a case study of the central Yunnan urban agglomeration, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109318.
- [11] Peng J, Zhao H J, Liu Y X. Urban ecological corridors construction: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(1): 23-30.
- [12] 张晓东, 赵志鹏, 赵银鑫, 等. 银川市景观生态风险评价与生态安全格局优化构建 [J]. *干旱区地理*, 2022, 45(5): 1626-1636.  
Zhang X D, Zhao Z P, Zhao Y X, et al. Landscape ecological risk assessment and ecological security pattern optimization construction in Yinchuan City [J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(5): 1626-1636.
- [13] 杨艳萍, 干晓宇, 吴潇. 基于电路理论的岷江流域生态安全格局构建研究 [J]. *水土保持研究*, 2025, 32(2): 263-275.  
Yang Y P, Gan X Y, Wu X. Study on the construction of ecological security pattern in Minjiang River Basin based on circuit theory [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(2): 263-275.
- [14] 范强, 隋属棋, 张津宁. 基于“供需平衡-敏感性-连通性”的赤峰生态安全格局构建与优化 [J]. *环境科学*, 2025, 46(04): 2450-2462.  
Fan Q, Sui S Q, Zhang J N. Construction and Optimization of ecological security pattern in Chifeng based on “supply-demand balance-sensitivity-connectivity” [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(04): 2450-2462.
- [15] 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.  
Kong F H, Yin H W. Developing green space ecological networks in Jinan City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1711-1719.
- [16] 杨文越, 叶泓好. 基于生境质量的粤港澳大湾区生态网络识别 [J]. *生态学报*, 2023, 43(24): 10430-10442.  
Yang W Y, Ye H Y. Identification of ecological networks in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on habitat quality assessment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(24): 10430-10442.
- [17] 韦宝婧, 苏杰, 胡希军, 等. 基于“HY-LM”的生态廊道

- 与生态节点综合识别研究[J].生态学报,2022,42(7):2995-3009.
- Wei B J, Su J, Hu X J, et al. Comprehensive identification of eco-corridors and eco-nodes based on principle of hydrological analysis and Linkage Mapper[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(7):2995-3009.
- [18] 许静,廖星凯,甘崎旭,等.基于MSPA与电路理论的黄河流域甘肃段生态安全格局构建[J].生态环境学报,2023,32(4):805-813.
- Xu J, Liao X K, Gan Q X, et al. Construction of ecological security pattern based on MSPA and circuit theory in Gansu section of the Yellow River Basin[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(4):805-813.
- [19] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. nature, 1997, 387(6630):253-260.
- [20] 王治江,李培军,万忠成,等.辽宁省生态系统服务重要性评价[J].生态学杂志,2007,171(10):1606-1610.
- Wang Z J, Li P J, Wan Z C, et al. Assessment of ecosystem service importance in Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007,171(10):1606-1610.
- [21] 俞金凤,杜怀玉,王家亮,等.基于Zonation-MSPA耦合模型的甘肃沿黄地区生态安全格局构建与评估[J].环境科学,2025,46(5):3085-3097.
- Yu J F, Du H Y, Wang J L, et al. Construction and assessment of ecological security pattern in gansu along the Yellow River based on Zonation-MSPA coupling model[J]. Environmental Science, 2025,46(5):3085-3097.
- [22] 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J].生态学报,2000,20(1):10-13.
- Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. China's eco-environmental sensitivity and its spatial heterogeneity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000,20(1):10-13.
- [23] 董晓媛,胥德泽,施小斌,等.黄河流域甘肃段生态敏感性评价研究:以广河县为例[J].干旱区地理,2024,47(4):599-611.
- Dong X Y, Xu D Z, Shi X B, et al. Ecological sensitivity evaluation of the Gansu section of the Yellow River: a case study of Guanghe County[J]. Arid Land Geography, 2024,47(4):599-611.
- [24] Soille P, Vogt P. Morphological segmentation of binary patterns[J]. Pattern recognition letters, 2009, 30(4):456-459.
- [25] 吴茂全,胡蒙蒙,汪涛,等.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[J].生态学报,2019,39(13):4720-4731.
- Wu M Q, Hu M M, Wang T, et al. Recognition of urban ecological source area based on ecological security pattern and multi-scale landscape connectivity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(13):4720-4731.
- [26] 韩王亚,夏双双,周维,等.基于生态廊道识别的拉萨河流域生态安全格局构建[J].生态学报,2023,43(21):8948-8957.
- Han W Y, Xia S S, Zhou W, et al. Constructing ecological security pattern based on ecological corridor identification in Lhasa River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(21):8948-8957.
- [27] 李和平,牟玲利,林涛.总体国家安全观下的西部地区规划建设:以重庆为例[J].城市发展研究,2024,31(2):53-61.
- Li H P, Mou L L, Lin T. Planning and construction of western region under a holistic approach to national security: a case study of Chongqing[J]. Urban Development Studies, 2024,31(2):53-61.
- [28] 王海云,匡耀求,文薪荐,等.粤港澳大湾区生态网络构建及廊道优化[J].中国环境科学,2022,42(5):2289-2298.
- Wang H Y, Kuang Y Q, Wen X J, et al. Ecological network construction and corridor optimization in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. China Environmental Science, 2022,42(5):2289-2298.
- [29] 曹秀凤,刘兆顺,李淑杰,等.基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别:以吉林省松原市为例[J].中国环境科学,2022,42(6):2779-2787.
- Cao X F, Liu Z S, Li S J, et al. Identification of key areas of ecological protection and restoration based on the pattern of ecological security: a case of Songyuan City, Jilin province[J]. China Environmental Science, 2022,42(6):2779-2787.