

DOI: 10.20103/j.stxb.202307241578

孙宝娣, 钟城豪, 崔东旭, 韩青, 唐敬超, 陈亚男. 区域协同视角下黄河流域生态安全格局构建. 生态学报, 2024, 44(11): 4624-4636.

Sun B D, Zhong C H, Cui D X, Han Q, Tang J C, Chen Y N. Constructing ecological security patterns through regional cooperation in the Yellow River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 4624-4636.

区域协同视角下黄河流域生态安全格局构建

孙宝娣^{1,2}, 钟城豪¹, 崔东旭^{3,*}, 韩青^{1,2}, 唐敬超¹, 陈亚男³

1 青岛理工大学, 青岛 266033

2 城市信息模型山东省工程研究中心, 青岛 266033

3 山东建筑大学, 济南 250101

摘要: 近些年黄河治理卓有成效, 但因黄河生态底子薄弱, 还存在生物多样性降低、生态系统不稳定和退化等问题。以区域协同视角构建黄河流域生态安全格局, 主要贡献在于融合生态、经济和社会层面的集成数据为基础, 从自然环境(地)、人类活动(人)和地物阻隔(人地耦合)三方面构建流域综合阻力评价体系, 提出一个在黄河全流域地区构建生态安全格局的新框架。具体内容包括: ①基于形态学空间格局和景观连通性进行黄河流域生态源地识别; ②从自然环境、人类活动和地物阻隔三方面构建流域综合阻力评价体系, 并对黄河流域生态安全进行分级; ③结合最小累积阻力模型进行黄河流域生态廊道提取及战略点识别。结果表明黄河流域生态源地斑块数量为 75 个, 面积为 23.13 万 km², 占流域总面积的 29.09%; 流域高度安全区域面积为 17.83 万 km²、中度安全区域面积为 27.83 万 km²、较低与低安全区域面积为 33.84 万 km², 占流域总面积的比例分别为 22.43%、35.00% 和 42.57%; 流域具有 94 条生态廊道, 平均长度为 37503 m, 主要用地类型为草地和森林; 流域生态战略点共有 12 个, 主要分布于黄河流域东部, 阻力值相对较高, 容易成为影响黄河流域连通性的“瓶颈”。最后探讨生态安全格局构建对黄河流域整体生态保护以及现有《黄河流域生态环境保护规划》的影响, 并从利用水资源评估体系优化生态源地的识别、基于电路理论结合指示性物种的迁移优化生态廊道和战略点识别, 提出未来黄河流域生态安全格局优化建议, 以期构建面向流域国土空间生态修复的黄河流域资源时空配置, 提供评价与优化的策略和方法; 同时也为协同推动黄河流域经济高质量发展和生态环境高水平保护, 提供有效保证。

关键词: 生态安全格局; 生态源地; 生态廊道; 生态战略点; 黄河流域

Constructing ecological security patterns through regional cooperation in the Yellow River Basin

SUN Baodi^{1,2}, ZHONG Chenghao¹, CUI Dongxu^{3,*}, HAN Qing^{1,2}, TANG Jingchao¹, CHEN Yanan³

1 Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China

2 Shandong Engineering Research Center of City Information Modeling, Qingdao 266033, China

3 Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

Abstract: The Yellow River Basin has been successfully managed in recent years. However, due to the weak ecological foundation of the Yellow River Basin, problems such as reduced biodiversity, ecosystem instability, and degradation remain. The main problems of ecological environment protection in the source, upper, middle, lower reaches, and deltas of the Yellow River Basin are different. In the context of the Yellow River strategy, the problem of a fragile ecological background is becoming increasingly evident. Regional coordinated development is the target direction of the Yellow River Basin governance. Constructing a multi-objective ecological security pattern and realizing a harmonious coexistence between

基金项目: 国家自然科学基金项目(32301382); 山东省人文社会科学课题(2023-ESDZ-032); 山东省自然科学基金项目(ZR2020QC027); 山东省高等学校青年创新团队项目(2022KJ161)

收稿日期: 2023-07-24; **网络出版日期:** 2024-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cdx0109@sdjzu.edu.cn

man and nature are the focus of ecological research in the Yellow River Basin. This study constructs an ecological security pattern for the Yellow River Basin from the perspective of regional cooperation. The main contribution is to construct a comprehensive resistance evaluation system for the basin from three aspects: natural environment (land), human activities (people), and land barrier (human-land coupling), based on the integrated data from ecological, economic, and social levels, and to propose a new framework for constructing ecological security pattern in the entire Yellow River Basin. Specific contents include: (1) identifying ecological source areas in the Yellow River Basin based on morphological spatial pattern and landscape connectivity methods; (2) constructing a comprehensive resistance evaluation system from three aspects—natural environment, human activities and land barrier—and ranking the ecological security of the Yellow River Basin; and (3) combining it with the minimum cumulative resistance model, the ecological corridor extraction and strategic point identification were carried out in the Yellow River Basin. The results showed that the number of ecological source patches in the Yellow River Basin was 75, covering $23.13 \times 10^4 \text{ km}^2$, accounting for 29.09% of the total area of the basin. The high security area was $17.83 \times 10^4 \text{ km}^2$, the medium security area was $27.83 \times 10^4 \text{ km}^2$, and the low security area was $33.84 \times 10^4 \text{ km}^2$, accounting for 22.43%, 35.00% and 42.57% of the total basin area, respectively. The basin had 94 ecological corridors with an average length of 37,503 m, and the main land types were grassland and forest. There were 12 ecological strategic points in the basin, mainly distributed in the east of the Yellow River Basin, with relatively high resistance values. This can easily become a “bottleneck” affecting the connectivity of the Yellow River Basin. Finally, the impact of ecological security pattern construction on the overall ecological protection of the Yellow River Basin and the existing ecological environment protection plans for the Yellow River Basin were discussed. Suggestions for future ecological security pattern optimization in the Yellow River Basin were proposed by optimizing the identification of ecological source areas using a water resource assessment system, optimizing the identification of ecological corridors and strategic points based on circuit theory combined with the migration of indicator species, to provide evaluation and optimization strategies and methods for constructing the spatial and temporal allocation of resources in the Yellow River Basin. Genetic analysis showed that the prominent ecological degradation problems, such as grassland desertification and wetland meadow reduction, water-sediment relationship, soil problems and river pollution, water and sediment change, agricultural non-point source pollution, and wetland biodiversity reduction were the reasons for the low ecological security level in the upper, middle, and lower reaches for the Yellow River Basin. Simultaneously, this study establishes a basin-scale paradigm of ecological protection allocation pattern and jointly promotes high-quality economic development and high-level ecological environment protection in the Yellow River Basin.

Key Words: ecological security pattern; ecological source areas; ecological corridor; ecological strategic points; the Yellow River Basin

黄河战略背景下生态本底脆弱问题日渐显著,区域协同发展是黄河流域治理的目标方向。构建多目标的生态安全格局,实现人与自然和谐共生是目前黄河流域生态研究的重点。流域生态安全格局,即指维持流域空间生态安全的配置方案^[1-2],主要通过选择生态源地和生态廊道将生态过程相联系。20 世纪 60 年代,西方国家提出城市增长边界概念^[3],主要目的是防止城市无序蔓延;并于 20 世纪 80 年代出现生态网络概念^[4],包括由生态廊道、节点、缓冲区等组成的网络状景观,以应对因人类活动破碎的景观和萎缩的生境面积。

20 世纪 90 年代,我国开始关注生态系统服务及其可持续发展。俞孔坚等引进生态安全格局研究,以点、线、面形成的生态网络结构,优化配置系统要素,保证生态系统稳定,并从生物多样性保护方面提出构建景观生态格局的思路和框架^[5-6];傅伯杰将“景观空间的负荷指数”纳入生态安全格局的识别研究中^[7];马克明等提出和阐释“区域生态安全格局”的概念和理论^[8]。随后,越来越多学者围绕村落生态安全、生态系统服务价值、城镇生态安全、景观格局优化、生态敏感性、生态红线等开展生态安全格局研究^[9-12],涉及全国尺度、省域

尺度、地市群、市域和县域等多个空间研究尺度^[13-14],逐步完善和形成“生态源地-生态阻力面-生态廊道”生态安全格局构建的基本模式^[15-17]。生态源地识别指提取生态用地,即对维护区域和流域生态安全极具关键意义的生态用地,生态源地识别方法主要包括生态功能重要性和生态适宜性评价^[18-19]。生态源地识别过程中,提取潜在生态廊道、选择重要廊道和构建最合理的生态网络,是目前生态安全格局构建研究中的难点^[20-21],需结合最小阻力模型^[22]、图论法^[23]、电流理论^[24]等模型理论,同时需打破现有多以行政单元为研究范围的局限,以完整的自然地理格局为研究范围,保持流域生态安全格局的完整性。

目前黄河流域生态安全格局研究,主要集中在甘肃段^[25-26]、内蒙古段^[27-28]、豫鲁段^[29]等部分区段,缺少区域协同、整体视角的黄河全流域生态安全格局构建研究。考虑到黄河流域治理的问题涉及生态、经济和社会等多层面,并且相互影响;而现有生态环境治理体制条块分割,多为沿黄 9 省的行政单元为边界进行分段研究,因此黄河流域生态环境亟需区域协同治理。本文以区域协同的整体视角为切入点,即建立融合黄河全流域生态层面、经济层面和社会层面的指标体系,集成区域协同的基础数据,提出一个在黄河全流域地区构建生态安全格局的新框架,具体从生态源地识别、生态廊道提取和战略点识别实现黄河流域生态安全格局模式构建;首先采取形态学空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)和景观连通性评价进行黄河流域生态源地识别;其次以黄河流域区域协同即融合生态、经济和社会层面的集成数据为基础,从自然环境(地)、人类活动(人)和地物阻隔(人地耦合)三方面构建流域综合阻力评价体系,即识别生态廊道而建立的阻力面综合指标体系,并对黄河流域生态安全进行分级;再其次采用最小累计阻力模型(Minimum Cumulative Resistance, MCR)进行黄河流域生态廊道提取,并借助 ArcGIS 软件提取最小累计阻力表面阻力值^[30],获取黄河流域生态战略点。最后探讨生态安全格局构建对黄河流域整体生态保护及现有《黄河流域生态环境保护规划》影响,并从利用水资源评估体系优化生态源地的识别、基于电路理论结合指示性物种的迁移优化生态廊道和战略点识别,提出未来黄河流域生态安全格局优化建议。研究以期建立生态保护配置格局的流域尺度范式,以及协同推动黄河流域经济高质量发展和生态环境高水平保护。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

黄河,全长约为 5464.00 km,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东 9 个省(自治区),是中国第二长河。其流域位于 96°—119°W、32°—42°N 之间,流域总面积 79.50 万 km²(图 1)。近些年黄河治理卓有成效,但因黄河生态底子薄弱,还存在生物多样性降低、生态系统不稳定和退化等问题。黄河流域源头、上中下游和黄河三角洲生态环境保护的主要问题各有不同:黄河源区重在保护湿地生态系统,要在治理草原退化;上游重在保护河湖湿地水资源,要在治理土地盐碱化;中游重在巩固退耕还林草成果,要在治理水土流失和环境污染;下游重在维护黄河长久安澜,要在平衡水沙关系;黄河三角洲重在保护河口湿地生态系统,要在治理海水倒灌。

1.2 数据来源与预处理

(1)生态源地数据预处理。考虑到林地、草地、水域等土地类型在改善环境、维持生物多样性和区域生态平衡方面发挥的重要作用以及其存在的巨大生态系统服务价值^[31-33],本研究以林地、草地和水域作为生态用地,从中提取黄河流域生态源地。基于 2020 年全球地表覆盖数据 Globe Land 30 采用 ArcGIS 进行重分类,进而转化为 TIFF 格式二值图,利用 GuidosToolbox 2.8 软件将生态要素划分成核心区、孤岛、孔隙、边缘区、连接桥、环岛和支线 7 种景观类型。

(2)阻力面指标体系及数据库。以景观生态安全格局作为目标层,以自然环境、人类活动和地物阻隔作为准则层^[34],以海拔(DEM)、坡度、归一化植被指数(NDVI)、地质灾害容易发生性、国内生产总值、夜间灯光指数、人口密度、土地利用类型、距道路距离、距水体距离、距自然和人文景观距离、距建设用地距离等 12 个指标作为二级指标建立阻力面指标体系,其数据来源、数据类型、数据年份以及空间分辨率详见表 1。



图 1 研究区地理位置图

Fig.1 The Geographical location map of the Yellow River Basin

表 1 阻力面指标体系及数据说明

Table 1 Resistance surface index system and data description

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	名称 Name	数据类型 Data type	数据年份 Data year	空间分辨率 Spatial resolution	数据来源 Data source
生态安全格局 Ecological security pattern	自然环境	海拔	栅格	2020	30 m	全球海陆数据库 (https://www.gebco.net/)
		坡度	栅格	2020	30 m	通过 DEM 数据处理获得
		归一化植被指数	栅格	2020	1 km	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=254)
		地质灾害容易发生性	点	2019	—	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=254)
	人类活动	国内生产总值	栅格	2020	1 km	中国科学院资源环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=252)
		夜间灯光指数	栅格	2020	1 km	经过矫正的中国长时序夜间灯光数据集 (https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/GIYGJU)
		人口密度	栅格	2020	1 km	第七次人口普查

续表

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	名称 Name	数据类型 Data type	数据年份 Data year	空间分辨率 Spatial resolution	数据来源 Data source
	地物阻隔	土地利用类型	栅格	2020	30 m	全球地表覆盖数据 Globe Land 30(http://globallandcover.com/)
		距道路距离	栅格	2020	30 m	基础地理信息数据中心(http://www.ngcc.cn/) 再经 ArcGIS10.7 处理获得
		距水体距离	栅格	2020	30 m	全球地表覆盖数据 Globe Land 30(http://globallandcover.com/) 再经 ArcGIS10.7 处理获得
		距自然和人文景观距离	栅格	2020	30 m	百度数据再经 ArcGIS10.7 处理获得
		距建设用地距离	栅格	2020	30 m	全球地表覆盖数据 Globe Land 30(http://globallandcover.com/) 再经 ArcGIS10.7 处理获得

基于建立的阻力面指标体系,通过 ArcGIS 进行生态安全等级划分并赋值,结合主成分分析方法(PCA)确定各指标的权重,加权叠加权重后得到阻力面。

2 研究方法

生态安全格局构建研究主要包括三部分:生态源地识别、生态廊道提取和战略点识别。本研究立足区域协同,识别黄河全流域生态网络要素,综合构建黄河流域生态安全格局,分析黄河流域生态战略点。主要研究方法如下:

2.1 基于形态学空间格局分析(MSPA)的生态源地识别

形态学空间格局分析(MSPA)描述地图元素的连通性和几何排列,是一种将图形进行分割、识别和分类的图像处理方法^[35],该方法基于斑块面积和空间拓扑关系等空间形态属性指导生境源地识别。本研究以林地、草地、水域作为前景数据,通过 ArcGIS 中 Guidos 工具箱的 MSPA 分析工具识别出研究区的核心区、孤岛、孔隙、边缘等 7 种不同且互不相交的景观类型,以确定生态源地。此外,景观连通性作为维持生态斑块功能和生态流平稳运行的重要前提,在 Conefor 中分析可能连通性指数(Probability of Connectivity, *PC*)和整体连通性指数(Integral Index of Connectivity, *IIC*),综合源地面积大小和相对重要性指数识别生态源地。

2.2 综合阻力评价体系构建与空间主成分分析

结合黄河流域实际情况,从自然环境、人类活动和地物阻隔三方面选取海拔、坡度、NDVI、地质灾害容易发生性、国内生产总值、夜间灯光指数、人口密度、土地利用类型、距道路距离、距水体距离、距自然和人文景观距离、距建设用地距离等 12 个指标作为综合阻力评价因子,同时进行阻力赋值,得到黄河流域综合阻力评价指标体系(表 2)。为消除各因子之间多重共线性的干扰,使用 ArcGIS 中的空间主成分的特征值、贡献值和荷载矩阵,得到生态阻力指标因子的权重,利用 ArcGIS 加权叠加工具构建综合阻力面。

2.3 基于最小累计阻力模型(MCR)的生态廊道提取

MCR 模型表示某物种在克服阻力面的状态下从生态源地转移到目的地的最小成本路径^[30]。通过对最优路径的提取与保护,可以实现生态系统服务价值最大化。研究通过确定的生态源地,结合 ArcGIS 中的成本距离和成本路径,识别和提取所有潜在生态廊道。

最后,借助 ArcGIS 软件中的水文分析工具,通过领域分析等操作提取最小累计阻力表面阻力值最高的“脊线”^[36—37],再利用相交功能以获取“脊线”与生态廊道的交点,即能够识别黄河流域生态战略点。

研究中所用主要模型方法见表 3。

表 2 黄河流域生态综合阻力评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of ecological comprehensive resistance for the Yellow River Basin

类型 Type	阻力因子 Resistance factor	阻力赋值 Resistance assignment			
		1	2	3	4
自然环境 Natural environment	海拔/m	[0, 1135)	[1135, 2345)	[2345, 3715]	>3715
	坡度/(°)	[0, 0.5)	[0.5, 15)	[15, 35]	>35
人类活动 Human activities	归一化植被指数	[0.61, 1]	[0.48, 0.61)	[0.36, 0.48)	[0, 0.36)
	地质灾害容易发生性	低风险地区	中风险地区	高风险地区	极高风险地区
	国内生产总值/(万元/km ²)	[0, 657)	[657, 2795)	[2795, 6575]	>6575
	夜间灯光指数	[0, 6)	[6, 20)	[20, 40]	>40
地物阻隔 Land barrier	人口密度/(人/km ²)	[0, 3351)	[3351, 18093)	[18093, 61652]	>61652
	土地利用类型	林地、水体	草地	耕地	其他用地
	距道路距离/km	>0.367	[0.173, 0.367]	[0.055, 0.173)	[0, 0.055)
	距水体距离/km	[0, 0.332)	[0.332, 0.676)	[0.676, 1.213]	>1.213
	距自然和人文景观距离/km	>0.332	[0.197, 0.332]	[0.086, 0.197)	[0, 0.086)
	距建设用地距离/km	>4.047	[2.232, 4.047]	[0.836, 2.232)	[0, 0.836)

表 3 研究方法及其对应公式、参数说明

Table 3 The description of methods, corresponding formulas and parameters

研究目的 Purposes	模型方法 Methods	研究公式 Formulas	参数说明 Parameters description
生态源地识别 Identification of ecological source areas	形态学空间格局分析 (Morphological spatial pattern analysis, MSPA)	$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \times a_j \times p_{ij}^*}{A_L^2}$ $dPC = \frac{PC - PC_{remove,k}}{PC} \times 100$ $IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i \times a_j}{1 + nl_{ij}}}{A_L^2} n$	PC 为可能连通性指数;n 为黄河流域斑块总数量;a_i 和 a_j 分别为斑块 i、j 的面积;p_{ij}^* 代表物种在斑块 i、j 间单向扩散的最大概率;A_L 为景观总面积;dPC 代表移除斑块对维持景观连通性的重要程度,值越大则表示此斑块对整体景观的贡献越大;PC_{remove} 代表从景观中移除此斑块后的 PC 值;IIC 为整体连通性指数。其中, $0 < PC < 1$, 数值随着景观连接度的增加而增加; $0 \leq IIC \leq 1$, 当 $IIC = 1$ 时,代表整个景观均为连通状态;当 $IIC = 0$ 时,代表各斑块之间没有连接。MSPA 方法中 PC 可能连通性指数和 IIC 整体连通性指数组成景观连通性水平评价,取连通性较好的斑块为生态源地。
生态廊道提取 Ecological corridor extraction	最小累计阻力模型 (Minimum cumulative resistance, MCR)	$R_{MC} = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i$	R_{MC} 为最小累计阻力值;$f_{\min}$ 为反映某点到基面最小累计阻力与生态过程的正相关函数;D_{ij} 为生态源地 j 到景观单元 j 的实际距离;R_i 为研究区域内景观单元 i 对物种迁徙的阻力系数。MCR 模型是基于 Knaapen 等人研究的费用距离修改而来,可以反映物种运动的潜在可能性及趋势,能模拟生物穿越不同景观基面的过程。
战略点识别 Strategic point identification	ArcGIS 水文分析	—	借助 ArcGIS 的水文分析工具,通过领域分析等操作提取最小累计阻力表面阻力值最高的“脊线”,再利用相交功能以获取“脊线”与生态廊道的交点。

3 结果与分析

3.1 黄河流域生态源地识别

由黄河流域景观类型面积统计(表 4)和空间分布(图 2)可看出,研究区域核心区面积为 259151 km²,占整个黄河流域面积的 32.60%,占全流域生态用地面积的 52.43%,主要分布在黄河流域的西南部、北部和南部,中部和东部核心区斑块较少且呈破碎化态势,分散的斑块连通性差,不利于物种迁徙过程中能量与物质交

换;连接桥作为景观生态安全格局的结构性廊道,其面积为 98918 km²,占流域生态用地的 20.01%,而由于在城镇区的分布较少,在城镇内部绿地斑块与外部自然斑块进行物种迁移时难以提供最佳路径;边缘区面积为 51552 km²,占流域生态用地的 10.43%;支线代表生态廊道之间出现连接中断,占流域生态用地的 6.36%;孤岛是单独且破碎的小斑块,占流域生态用地的 4.54%;孔隙仅占流域生态用地的 3.27%,表明生态用地边缘效应较差,容易受外界因素影响;环岛面积最小,是斑块内部生物迁移的捷径,占流域生态用地的比例为 2.96%。

同时,黄河流域上中游区域拥有较大林草水域覆盖面积,但下游区域以及中部部分区域源地面积小且连接桥占比较少,斑块呈破碎化态势,不利于物种扩散、物质能量交换,生物多样性仍受威胁。

表 4 基于 MSPA 黄河流域景观类型和面积统计

Table 4 Statistics of landscape types and areas based on MSPA method for the Yellow River Basin

序号 No.	景观类型 Landscape type	面积/(km ²) Areas	占研究区域的百分比/% Percentage of the study area	占生态用地的百分比/% Percentage of ecological land use
01	核心区	259151	32.60	52.43
02	孤岛	22422	2.82	4.54
03	孔隙	16179	2.04	3.27
04	边缘区	51552	6.48	10.43
05	连接桥	98918	12.44	20.01
06	环岛	14637	1.84	2.96
07	支线	31460	3.96	6.36
	合计	494319	62.18	100.00

基于以上分析结果,本研究借助 Conefor 2.6 软件,将斑块连通性距离阈值设置为 3000 m,连通的概率为 0.50,计算核心区潜在源地斑块重要性,利用自然断点法分为 8 个等级,选取前 5 个等级即 dPC>0.8 的斑块作为生态源地。提取的生态源地共 75 个斑块(图 3),面积共计 23.13 万 km²,占研究区域总面积的 29.09%。

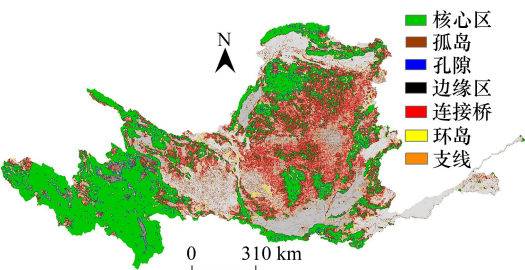


图 2 基于 MSPA 的黄河流域景观类型

Fig.2 Landscape types based on MSPA method for the Yellow River Basin

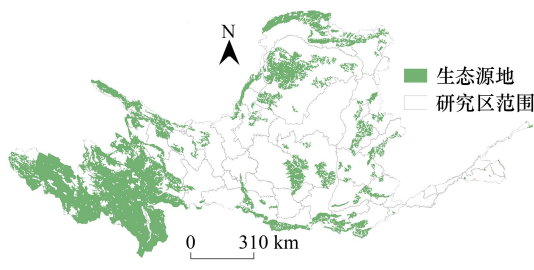


图 3 黄河流域生态源地分布

Fig.3 Distribution of ecological source areas in the Yellow River Basin

3.2 黄河流域综合阻力面构建及生态安全评价指标的等级分布

根据表 2,将黄河流域 12 个综合阻力面指标因子的数据可视化(图 4),运用空间主成分法对研究区生态安全指标进行降维,提取得到 12 个主成分特征值、贡献率及载荷矩阵(表 5 和表 6)。由表 4 可知,前 8 个主成分(海拔 DEM、坡度、归一化植被指数 NDVI、地质灾害容易发生性、国内生产总值 GDP、夜间灯光指数、人口密度、土地利用分析)的累计贡献率达到了 96.10%,这说明前 8 个主成分能够充分体现黄河流域生态安全信息。同时,这 8 个主成分也体现和包含了黄河流域区域协同即融合生态、经济和社会层面的集成数据,涵盖了自然环境、人类活动和地物阻隔三方面指标。

由表 5 可以看出,前 8 个主成分对应的距建设用地距离、距水体距离、距自然和人文景观距离、归一化植被指数 NDVI、距道路距离、距建设用地距离、土地利用和地质灾害容易发生性载荷较高,分别为 0.64072、

0.83906、0.75738、0.82508、0.63328、0.51255、0.83166 和 0.57390,说明建设面积、水资源、自然和人文景观、植被覆盖面积、路网、土地利用类型以及地质灾害的发生是影响生态安全的重要因素。

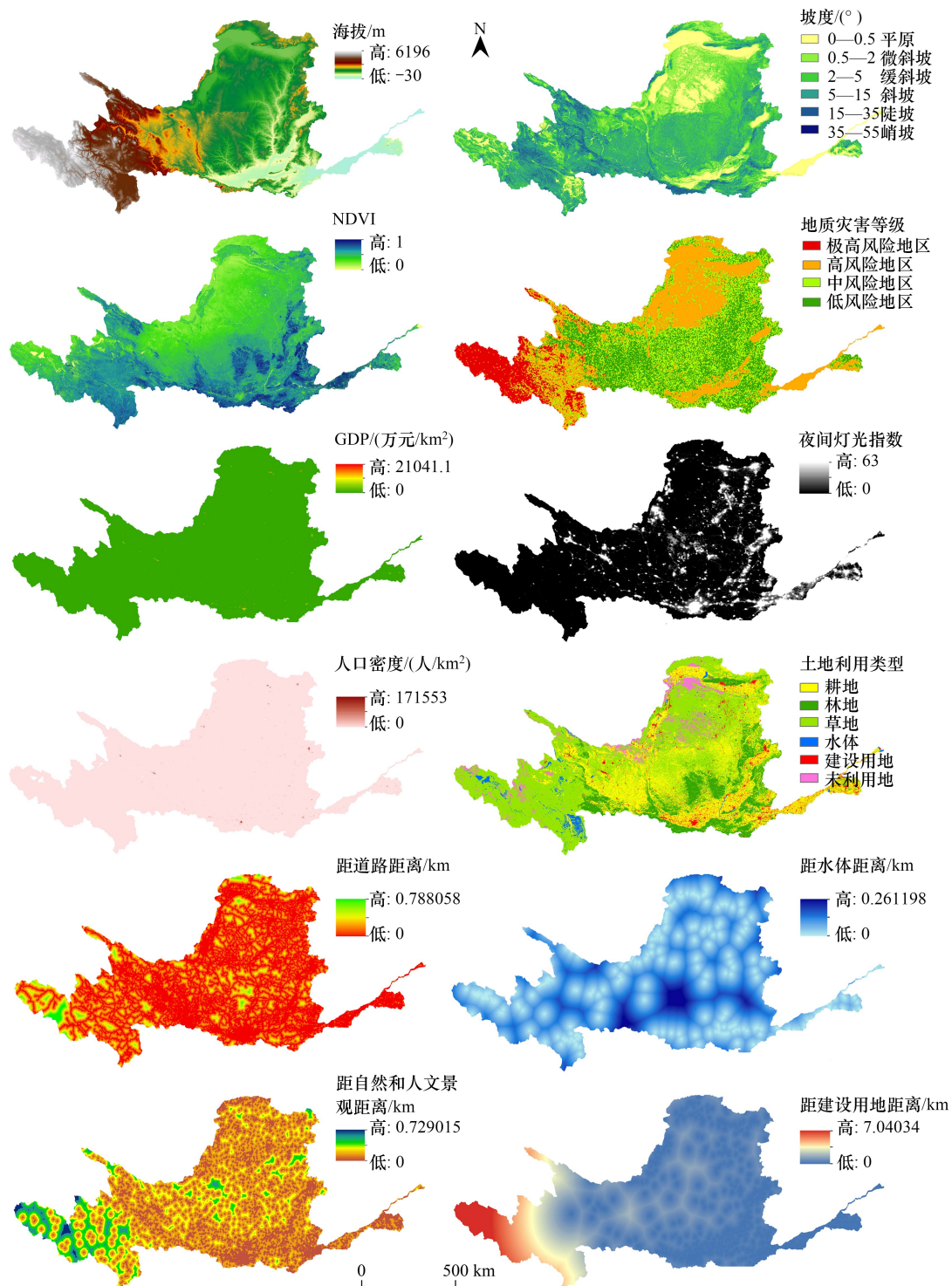


图4 黄河流域12个综合阻力面指标因子的数据可视化

Fig.4 Data visualization of 12 integrated resistance factors for the Yellow River Basin

黄河流域生态安全评价指标等级分布见图5,海拔的生态安全等级呈阶梯状分布,坡度的生态安全信息分布分散且差异性较低,植被覆盖、地质灾害容易发生性和土地利用类型的生态安全等级分布都较为分散;

GDP、夜间灯光、人口密度、距道路距离、距自然和人文景观距离、距建设用地这 6 个为负向指标,表明人类活动越频繁的区域受干扰胁迫越大,生态安全等级越低且生境破碎程度越严重;而距水体越近,安全等级越高。

表 5 主成分的特征值及贡献率

Table 5 Eigenvalues and contribution rates of principal components

序号 No.	主成分 Principal components	特征值 Eigenvalues	贡献率/% Contribution rates	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
1	海拔	1.25513	30.8737	30.8737
2	坡度	0.72446	17.8203	48.6941
3	归一化植被指数	0.41632	10.2406	58.9347
4	地质灾害容易发生性	0.38055	9.3607	68.2953
5	国内生产总值	0.34992	8.6073	76.9027
6	夜间灯光指数	0.30643	7.5375	84.4402
7	人口密度	0.25516	6.2765	90.7167
8	土地利用类型分析	0.21765	5.3536	96.0703
9	距道路距离	0.10794	2.6551	98.7254
10	距水体距离	0.04440	1.0922	99.8176
11	距自然和人文景观距离	0.00535	0.1316	99.9492
12	距建设用地距离	0.00206	0.0508	100.0000

表 6 主成分载荷矩阵

Table 6 The load matrix of principal components

指标 Index	主成分 Principal component												权重 Weight
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	0.25617	-0.2147	0.28663	-0.15081	0.33183	0.40873	-0.09281	-0.49085	0.43277	-0.26335	-0.00201	-0.00088	0.043
2	-0.01972	0.02182	0.03517	-0.12676	-0.00959	0.05431	0.05754	-0.26792	0.16580	0.93604	0.00014	-0.00517	0.072
3	0.00856	-0.17187	-0.15882	0.82508	0.31818	-0.16273	0.28541	-0.22432	0.05519	0.04306	-0.00401	-0.00056	0.070
4	-0.16362	-0.34505	0.23061	0.20615	0.29543	0.37069	-0.33145	0.57390	-0.20771	0.22679	0.00132	-0.00080	0.074
5	0.00422	-0.00732	0.00137	0.00240	-0.00573	-0.0031	0.00043	0.00670	0.01964	0.00434	0.27048	0.96243	0.108
6	0.06477	-0.00273	-0.03248	0.07807	-0.12125	-0.14523	0.00821	0.47019	0.85266	0.00345	-0.06827	-0.00315	0.095
7	0.00608	-0.00789	-0.00040	0.00748	-0.01231	-0.00766	0.00751	0.02856	0.05582	-0.00215	0.96020	-0.27139	0.066
8	-0.02599	-0.05044	0.05639	-0.07594	-0.14613	0.47937	0.83166	0.20469	-0.04954	-0.02484	-0.00694	0.00179	0.103
9	0.38440	-0.20369	0.15634	-0.39082	0.63328	-0.38808	0.25654	0.12199	-0.03392	0.00821	0.00028	-0.00035	0.047
10	-0.27003	0.83906	0.17763	0.07659	0.40265	0.02612	0.06048	0.13686	0.00937	0.01488	0.00997	0.00556	0.128
11	0.52058	0.12063	0.75738	0.25863	-0.2478	0.03377	-0.04473	-0.09534	-0.01073	-0.01243	-0.00382	-0.00242	0.110
12	0.64072	0.20518	-0.45204	0.02298	0.20114	0.51255	-0.18304	-0.03253	0.06850	-0.00906	0.00245	0.00045	0.084

此外,对生态安全空间分布依据空间主成分分析结果进行加权叠加,再通过 ArcGIS 软件 Spatial Analyst 模块中的 Reclassify 工具将其划分为四个等级,得到黄河流域生态安全等级分布图(图 6)。图中高度安全区域面积为 17.83 万 km²,占研究区面积的 22.43%;而较低与低安全区域面积总计 33.84 万 km²,占研究区总面积的比例高达 42.57%,说明黄河流域总体生态安全水平不高。

最后,通过 ArcGIS 软件 Spatial Analyst 模块中的成本距离工具进行空间分析,以生态源地为要素源数据,将生态安全评价结果作为成本栅格数据,得到研究区阻力分布,再进行重分类,最终获得黄河流域阻力等级空间分布图(图 7)。经空间特征分析,研究区中低阻力面占比最大达 72.28%,其面积为 57.46 万 km²;高阻力面占比最小为 1.48%,其面积为 1.18 万 km²,主要分布在山东河南交界、济南等地。中等和较高等级阻力面积总计 22.62 万 km²,占比约 28.45%,主要分布在甘肃东南部、陕西西南部和东北部、河南西部、山西东南部和东北部、山东西南部以及内蒙古西南部。表明这些区域与大型生态源地距离较远,阻力值相对较高。

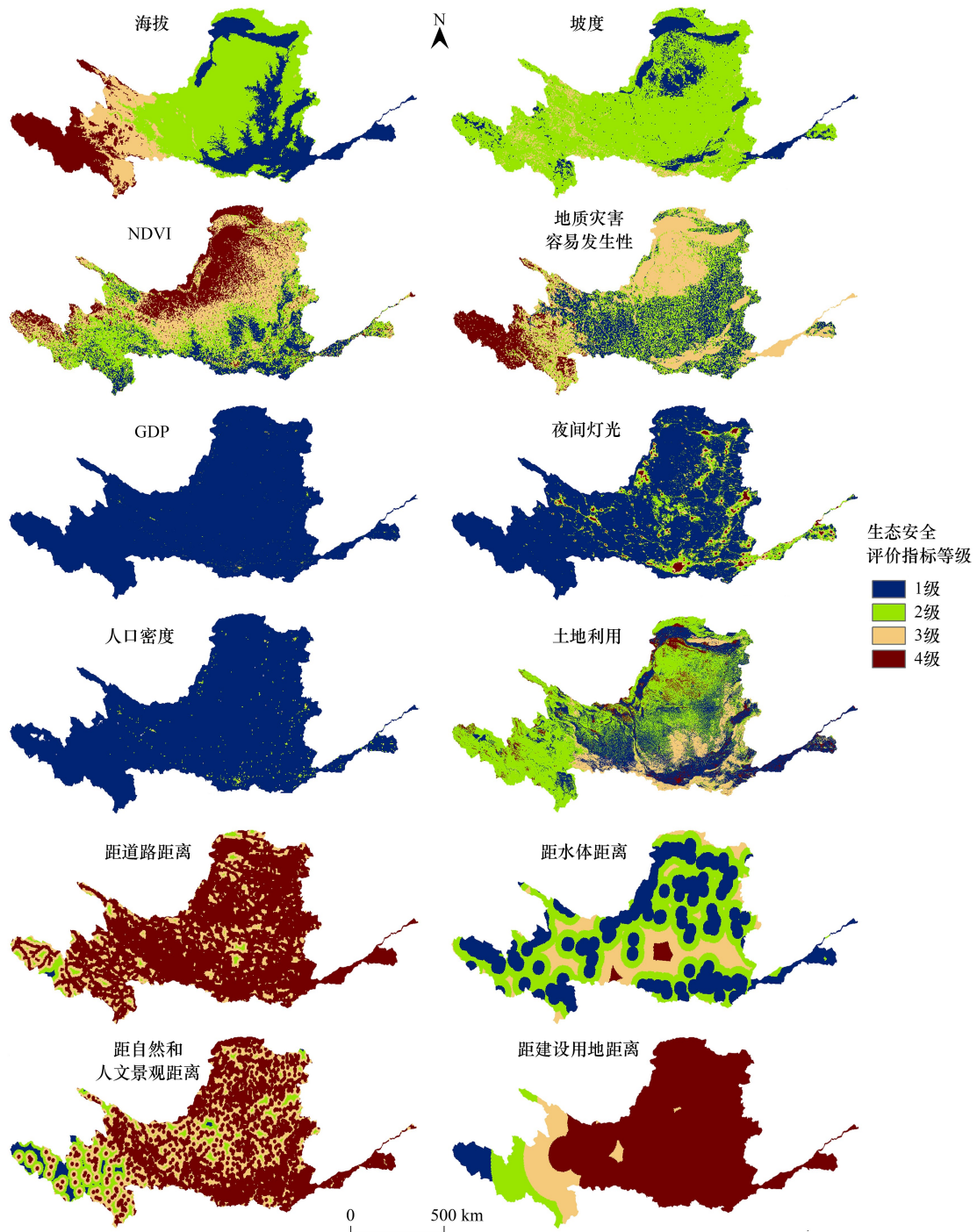


图 5 黄河流域生态安全评价指标等级分布图

Fig.5 Grade distribution of ecological security assessment indicators for the Yellow River Basin

3.3 黄河流域生态廊道提取及战略点识别

基于 2.3 部分 MCR 模型方法,研究最终确定 94 条生态廊道(图 8),平均长度为 37503 m,主要用地类型为草地和森林。由图 9 可看出,生态廊道基本有效连接了所有生态源地,黄河流域内廊道空间分布差异明显:东南部地区廊道复杂,连通性强;中部地区缺少生态源地,无廊道连通。即生态廊道主要分布于黄河流域东南部和西部地区,东南部地区生态廊道短且密集,说明较能满足其物种迁移需求;由于受所选取研究范围以及生

态源地面积大小、连通性影响,山东省生态廊道表现为廊道线性分布且存在部分源地未连接、廊道未识别的现象,而作为重点保护生态区域的泰山、东平湖以及黄河入海口的黄河口国家森林公园,对黄河流域山东段的物种种群繁衍、生态系统稳定发挥了关键作用。

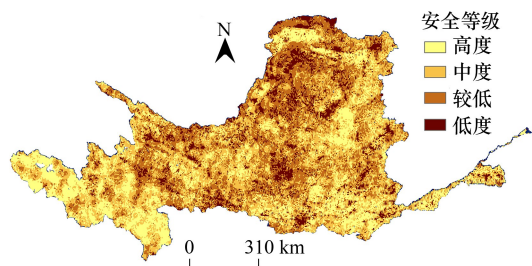


图6 黄河流域生态安全等级分布

Fig.6 Distribution of ecological security levels for the Yellow River Basin

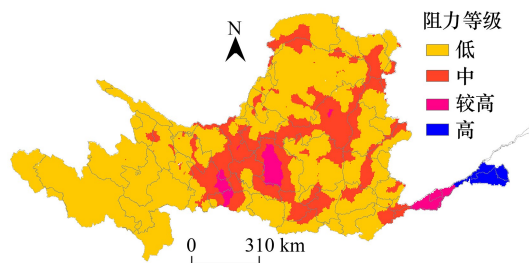


图7 黄河流域阻力等级分布

Fig.7 Resistance grade distribution for the Yellow River basin

最后,研究借助 ArcGIS 的水文分析工具,通过领域分析等操作提取最小累计阻力表面阻力值最高的“脊线”,再利用相交功能以获取“脊线”与生态廊道的交点,即生态战略点(图9)。由图9可知,黄河流域生态战略点共12个,主要分布于研究区东部,土地利用类型以耕地和城镇用地为主,阻力值相对较高,容易成为影响黄河流域连通性的“瓶颈”,故应作为重点区域加以保护。

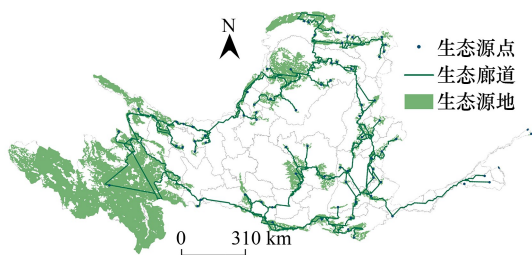


图8 黄河流域生态廊道分布

Fig.8 Distribution of ecological corridors for the Yellow River Basin

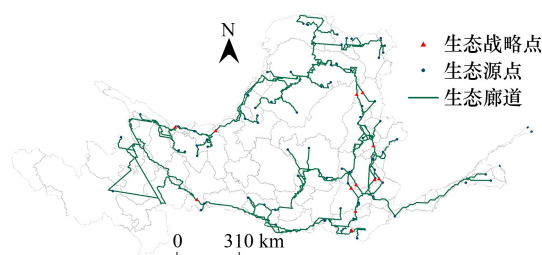


图9 黄河流域生态战略点分布

Fig.9 Distribution of ecological strategic points for the Yellow River Basin

4 讨论

4.1 生态安全格局构建对黄河流域整体生态保护的影响

黄河流域因其复杂的地理环境和脆弱的生态本底受到国内外学者广泛关注,但由于其上中下游各区域的生态、经济和社会层面的发展差异大,整体的生态保护推进困难。目前,流域生态安全格局研究中缺少对区域协同视角的考虑,建立的阻力面指标体系中涵盖的指标较少且不足以体现区域差异,并且现有研究大多忽略了人类活动对阻力值的影响,阻力值的计算过于主观。因此,本文以区域协同的视角出发,考虑到生态、经济和社会层面的区域特征,从自然环境(地)、人类活动(人)和地物阻隔(人地耦合)三方面建立了12个综合阻力面指标体系,采用 MSPA-MCR 模型结合 SPCA 空间主成分分析法构建了黄河流域生态安全格局。据生态安全评估结果可知,青藏高原和秦岭、东部平原的过渡地区的生态安全等级明显高于其他区域。研究识别出的生态源地大致与生态安全评估结果一致,从各指标因子的数据可视化图分析,值得注意的是,北部和西部地区本身生态环境脆弱,加之经济发展的落后和社会关注程度不够,在生态保护配置中需要着重考虑周边城市群的溢出效应。

研究中确定和提取的生态廊道可以有效连接黄河流域的东部、南部和西部,呈现出稳定的网状分部。黄

河流域的东部地区所识别出的战略点最多,作为障碍点和突破口,应该被视为是生态安全保护的关键区域。

4.2 研究结果对现有《黄河流域生态环境保护规划》的影响

根据《黄河流域生态环境保护规划》,到 2030 年完成生态安全格局初步构建,并在未来生态环境保护中提到促进经济社会发展格局与资源环境承载能力相适应的主要原则。目前,采取的封育保护、“退耕还林还草”、国家公园体制试点及国家级自然保护区建立等政策使得流域生物多样性水平明显提升,有助于生态源地的保护和新增。但流域内的高原冰川、草原植被、湿地生态易遭受破坏,经济发展模式严重影响了流域生态保护,黄河流域北部和西部地区的生态资源少,短时间难以形成有效的生态保护配置格局。综合黄河流域生态安全评价分区研究结果,凸显了所需设立的优先保护区域,对区域协同下的流域生态安全格局构建具有一定启示。

4.3 局限性与展望

本文以区域协同视角开展了黄河流域生态安全格局构建研究,提出了生态、经济和社会层面发展差异下的综合评估体系,有助于流域生态安全保护的推进。然而,本研究仍存在一定的局限性。首先,在源地识别中,仅考虑了景观连通性的影响,所设置的距离阈值和连通性概率数值是否合理需要进一步分析。其次,“四水四定”实施框架下,水资源承载能力的评估对生态源地识别也至关重要。再次,生态廊道的建立过程中物种的随机迁移和种群扩散特性值得注意,本文运用的方法未能表现该特性。因此,在今后的研究中,一方面,可以利用水资源评估体系优化生态源地的识别,另一方面,可以基于电路理论结合指示性物种的迁移优化生态廊道和战略点的识别,为黄河流域的高质量发展路径提供更科学可行的研究方案。

此外,本文的主要贡献在于以区域协同视角为创新,集成黄河全流域生态、经济和社会层面数据,从自然环境(地)、人类活动(人)和地物阻隔(人地耦合)三方面构建流域综合阻力评价体系,进而提出了黄河全流域地区构建生态安全格局的新框架。今后还需加强历史数据分析,包括植被变化、土地利用变化以及气候降雨等因素变化的长时间序列数据,对黄河流域生态安全格局动态演变进行归因分析,进而为协同推动黄河流域经济高质量发展和生态环境高水平保护,提供有效保证。

5 结论

研究以区域协同的整体视角为切入点,从生态源地识别、生态廊道提取和战略点识别进行黄河流域生态安全格局的构建。通过 MSPA 识别黄河流域生态源地数量为 75 个,结合 MCR 提取黄河流域生态廊道 94 条和识别黄河流域战略点 12 个。黄河流域总体生态安全水平不高,其中高度安全区域、中度安全区域、较低与低安全区域占流域总面积的比例分别为 22.43%、35.00%和 42.57%。同时通过分析生态安全格局构建对黄河流域整体生态保护以及现有《黄河流域生态环境保护规划》影响表明:黄河流域东部地区战略点最多,应该被视为生态安全保护的关键区域;综合黄河流域生态安全评价分区并设立优先保护区域,为形成有效的黄河流域生态保护配置格局提供启示性方案。

参考文献(References):

- [1] 石敏俊,陶卫春,赵学涛,宋现锋.生态重建目标下石羊河流域水资源空间配置优化——基于分布式水资源管理模型.自然资源学报,2009,24(7):1133-1145.
- [2] 彭建,赵会娟,刘焱序,吴健生.区域生态安全格局构建研究进展与展望.地理研究,2017,36(3):407-419.
- [3] Halpern M. Modernization without revolution: Lebanon's experience. by elie adib Salem. (bloomington: Indiana university press, 1973. pp. 174. \$7.95. American Political Science Review, 1976, 70: 1365-1366.
- [4] Mori W, Ichinose T. The factory tree planting proposal as a base of an ecological network. Reports of the City Planning Institute of Japan, 2007.
- [5] 俞孔坚.生物保护的景观生态安全格局.生态学报,1999,19(1):8-15.
- [6] 俞孔坚,李迪华,段铁武.生物多样性保护的景观规划途径.生物多样性,1998,6(3):205-212.
- [7] 傅伯杰,陈利顶,王军,孟庆华,赵文武.土地利用结构与生态过程.第四纪研究,2003,23(3):247-255.
- [8] 马克明,傅伯杰,黎晓亚,关文彬.区域生态安全格局:概念与理论基础.生态学报,2004,24(4):761-768.

- [9] 王晨茜, 张琼锐, 张若琪, 孙学超, 徐颂军. 广东省珠江流域景观格局对水质净化服务的影响. *生态环境学报*, 2022, 31(7): 1425-1433.
- [10] Fang Z, Bai Y, Jiang B, Alatalo J M, Liu G, Wang H M. Quantifying variations in ecosystem services in altitude-associated vegetation types in a tropical region of China. *Science of the Total Environment*, 2020, 726: 138565.
- [11] 孙宝娣, 于德湖, 崔东旭. 流域生态系统服务和水土资源匹配研究进展. *生态学报*, 2023, 43(10): 4308-4318.
- [12] Gao J B, Du F J, Zuo L Y, Jiang Y. Integrating ecosystem services and rocky desertification into identification of Karst ecological security pattern. *Landscape Ecology*, 2021, 36(7): 2113-2133.
- [13] Li H L, Li D H, Li T, Qiao Q, Yang J, Zhang H M. Application of least-cost path model to identify a giant panda dispersal corridor network after the Wenchuan earthquake—case study of Wolong Nature Reserve in China. *Ecological Modelling*, 2010, 221(6): 944-952.
- [14] 王玉莹, 金晓斌, 沈春竹, 鲍桂叶, 刘晶, 周寅康. 东部发达区生态安全格局构建——以苏南地区为例. *生态学报*, 2019, 39(7): 2298-2310.
- [15] Klar N, Herrmann M, Henning-Hahn M, Pott-Dörfer B, Hofer H, Kramer-Schadt S. Between ecological theory and planning practice: (Re-) Connecting forest patches for the wildcat in Lower Saxony, Germany. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 105(4): 376-384.
- [16] Dong J Q, Peng J, Xu Z H, Liu Y X, Wang X Y, Li B. Integrating regional and interregional approaches to identify ecological security patterns. *Landscape Ecology*, 2021, 36(7): 2151-2164.
- [17] 胡浩穹. 国土空间规划背景下城市群生态安全格局和生态修复体系的构建与耦合[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- [18] Peng J, Ma J, Du Y Y, Zhang L Q, Hu X X. Ecological suitability evaluation for mountainous area development based on conceptual model of landscape structure, function, and dynamics. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 500-511.
- [19] 刘晓阳, 魏铭, 曾坚, 张森. 闽三角城市群生态网络分析与构建. *资源科学*, 2021, 43(2): 357-367.
- [20] Teng M J, Wu C G, Zhou Z X, Lord E, Zheng Z M. Multipurpose greenway planning for changing cities: a framework integrating priorities and a least-cost path model. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(1): 1-14.
- [21] 潘越, 龚健, 杨建新, 杨婷, 王玉. 基于生态重要性和 MSPA 核心区连通性的生态安全格局构建——以桂江流域为例. *中国土地科学*, 2022, 36(4): 86-95.
- [22] Walker N J, Schaffer-Smith D, Swenson J J, Urban D L. Improved connectivity analysis using multiple low-cost paths to evaluate habitat for the endangered San Martin titi monkey (*Plecturocebus oenanthe*) in north-central Peru. *Landscape Ecology*, 2019, 34(8): 1859-1875.
- [23] Yang J, Zeng C, Cheng Y J. Spatial influence of ecological networks on land use intensity. *Science of the Total Environment*, 2020, 717: 137151.
- [24] 王双明. 科学施策, 构建黄河流域生态安全新格局. *科技导报*, 2020, 38(17): 1.
- [25] 潘竞虎, 李磊. 利用 OWA 和电路模型优化黄河流域甘肃段生态安全格局. *农业工程学报*, 2021, 37(3): 259-268.
- [26] 赵诚诚, 潘竞虎. 基于供需视角的黄河流域甘肃段生态安全格局识别与优化. *生态学报*, 2022, 42(17): 6973-6984.
- [27] 奚雪松, 高俊刚, 郝媛媛, 郭恺, 贾宪, 梁诗繁, 路畅. 多维复合空间视角下的黄河生态带构建——以黄河流域内蒙古段为例. *自然资源学报*, 2023, 38(3): 721-741.
- [28] 冯琰玮, 甄江红. 黄河流域内蒙古段生态安全格局优化研究. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(10): 129-138.
- [29] 常咏梅. 黄河流域豫鲁段景观生态安全格局研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2021.
- [30] 李航鹤, 马腾辉, 王坤, 谭敏, 渠俊峰. 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. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(8): 1036-1045.
- [31] Sun B D, Tang J C, Yu D H, Song Z W. Coupling coordination relationship between ecosystem services and water-land resources for the Daguhe River Basin, China. *PLoS One*, 2021, 16(9): e0257123.
- [32] Sun B D, Cui L J, Li W, Kang X M, Pan X, Lei Y R. A meta-analysis of coastal wetland ecosystem services in Liaoning Province, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 200: 349-358.
- [33] Lique C, Kleeschulte S, Dige G, Maes J, Grizzetti B, Olah B, Zulian G. Mapping green infrastructure based on ecosystem services and ecological networks: a Pan-European case study. *Environmental Science & Policy*, 2015, 54: 268-280.
- [34] Zubkova M, Boschetti L, Abatzoglou J T, Giglio L. Changes in fire activity in Africa from 2002 to 2016 and their potential drivers. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(13): 7643-7653.
- [35] 苏王新, 张刘宽, 常青. 基于 MSPA 的街区蓝绿基础设施格局及其热缓解特征. *生态学杂志*, 2022, 41(6): 1173-1181.
- [36] Peng J, Pan Y J, Liu Y X, Zhao H J, Wang Y L. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. *Habitat International*, 2018, 71: 110-124.
- [37] Liu Z Y, Gan X Y, Dai W N, Huang Y. Construction of an ecological security pattern and the evaluation of corridor priority based on ESV and the “importance-connectivity” index: a case study of Sichuan Province, China. *Sustainability*, 2022, 14(7): 3985.