

黄河中游地区生态安全格局时空演变及优化策略

王争磊¹, 乔家君^{1*}, 刘海龙², 王改艳², 冯琰玮³, 朱乾坤¹

(1. 河南大学黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室/地理与环境学院, 开封 475004; 2. 山西师范大学地理科学学院, 太原 030000; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 把握生态安全格局动态变化的趋势和特征, 识别亟需修复的生态区域, 对维系区域生态安全, 促进区域可持续发展具有重要意义。基于形态学空间格局分析方法并叠加国家自然保护区筛选生态源地, 使用电路理论模型识别生态廊道、生态夹点区和生态障碍区, 构建黄河中游地区 2000—2020 年的生态安全格局并分析其时空动态变化特征。结果表明: 生态源地的数量和面积基本保持稳定, 东部盆地和山区分布密集, 西部高原分布较为稀疏。生态廊道由 2000 年的 96 条演变为 2020 年的 103 条, 密集分布在山地广布的东部, 西部生态廊道稀疏且跨越距离较长。生态夹点区面积保持稳定, 障碍区面积呈小幅下降趋势, 夹点区和障碍区以源地和廊道连接的区域及廊道的中间位置分布最为密集。生态安全格局呈现东南密集、西北稀疏的空间格局, 夹点保护区在西部廊道稀疏区域变动频繁, 障碍修复区集中分布在人类活动强度较大的盆地或平原, 源地保护区稀疏的区域更需要稳定的“中转站”以维持长距离的廊道连接, 廊道数量和长度呈增加趋势, 生态安全格局整体朝着良好方向发展。黄河中游地区东部和西部生态安全格局的空间差异是由东部集中分布的高强度人类活动与生态环境良好的山区、西部脆弱的生态环境与不合理的开发活动共同作用所导致的。针对黄河中游生态安全格局存在的具体问题及实际生态状况, 提出了保护与修复生态源地、生态廊道等生态要素的措施。研究结果可为黄河中游地区生态安全格局的优化及生态环境高质量发展提供科学参考与借鉴。

关键词: 生态; 模型; 安全格局; 电路理论; 形态空间格局; 时空演变; 黄河中游地区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305059

中图分类号: X321; F301.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-19-0231-09

王争磊, 乔家君, 刘海龙, 等. 黄河中游地区生态安全格局时空演变及优化策略[J]. 农业工程学报, 2024, 40(19): 231-239. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305059 <http://www.tcsae.org>

WANG Zhenglei, QIAO Jiajun, LIU Hailong, et al. Spatio-temporal evolution and optimization strategy of ecological security pattern in the Middle Reaches of the Yellow River of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(19): 231-239. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305059 <http://www.tcsae.org>

0 引言

城市化进程的快速推进导致建设用地范围迅速扩大, 大量生态用地被侵占, 生物栖息地环境遭到破坏, 生物多样性减少, 生态系统功能退化, 对区域可持续发展产生严重威胁^[1]。联合国《2030 年可持续发展议程》呼吁加强陆地生态系统的保护与恢复, 遏制生物多样性丧失。构建生态安全格局对保护生物多样性具有重要意义, 受到学者们的密切关注。生态安全格局是通过点线面的空间规划形成对区域生态系统要素空间流动具有潜在作用的空间格局^[2]。构建生态安全格局是维持生态系统功能完整和稳定的基础^[3], 对保障生态安全底线, 促进区域可持续发展具有重要意义。如何构建科学合理的生态安全格局是地理学、生态学、环境科学等领域关注的热点, 也是涉及社会经济可持续发展的重要内容之一。

国外学者多基于“斑块-廊道-基质”的景观生态学模式^[4]开展生态安全格局方面的研究, 主要利用生态斑块、生态阻力面等对廊道体系^[5]、景观连通性^[6]、生态系统服务功能等进行探讨, 识别并划分出优先保护区域^[7], 建立生物保护地体系, 设定不同功能的生态廊道以提高生物迁徙能力, 保护生物多样性^[8]。国内研究集中在生态安全格局构建、优化^[9]和预测^[10]方面, 主要基于静态和动态景观斑块的配置等对分析土地利用变化^[11], 对生态红线划定^[12]、生态系统服务价值评估^[13]等进行详细探讨。目前生态安全格局构建研究已经形成“源地识别-阻力面构建-廊道提取”的成熟模式^[14]。通过生态斑块识别生态源地, 利用最小阻力模型^[15]、电路理论^[16]、蚂蚁算法等识别生态廊道, 构建生态安全格局, 并在构建的具体环节中融入生境质量^[17]、生态敏感性^[18]、生态系统服务^[19]、生态系统服务供需^[20]、产业布局^[21]等要素, 以识别国土障碍修复区, 优化土地利用结构^[22], 维持区域景观的连通性和完整性。总体来看, 目前学界构建了不同区域的生态安全格局, 成果丰硕, 但仍存在有待拓展之处。1) 研究区域选择上, 已有研究多以小范围而较少以大范围流域为研究区构建生态安全格局。生态安全的尺度效应表明需要在更大范围内平衡生态系统, 维护生态

收稿日期: 2024-05-01 修订日期: 2024-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42371223; 42071220)

作者简介: 王争磊, 博士生, 研究方向为乡村地理、区域可持续发展。

Email: wangzhenglei0814@163.com

*通信作者: 乔家君, 博士, 二级教授, 研究方向为乡村地理、区域可持续发展。

Email: jjqiao@henu.edu.cn

系统功能的完整与可持续性^[23], 所以有必要构建大范围流域的生态安全格局, 维护生态系统功能的完整性。2) 研究方法上, 已有研究多采用最小阻力模型识别生态廊道, 但该模型对廊道宽度和位置信息反映不足且空间精度存在缺陷^[17]。人工筛选廊道具有主观性, 无法完整反映实际廊道状况。电路理论模型能够将景观连通与生态过程相联系, 通过模仿电子在电路中的随机流动, 科学识别具有宽度信息的最优廊道, 比最小阻力模型更具合理性, 被广泛应用于生物多样性保护之中^[24]。3) 研究视角上, 已有研究主要关注某地区生态安全格局现状, 忽略了生态系统要素复杂、动态连续变化等特征, 较少从时空动态角度进行生态安全格局的“格局-过程”耦合分析, 未能全面反映区域的生态本底特征^[25]。

黄河流域作为“三区四带”生态保护工程空间布局的核心部分, 是中国重要的生态屏障, 在生态环境保护具有重要战略地位^[26], 尤其是黄河中游地区, 涵盖了主体功能区划中的水土保持功能区和生态建设重点区, 也是中国人口稠密、生态压力较大的集聚区^[27]。构建生态安全格局有利于识别生态脆弱区域, 对维系生态保护屏障具有重要现实意义。基于此, 本文围绕“典型流域生态安全格局演变特征揭示及生态修复区域识别”这一科学问题, 使用形态学空间格局分析方法识别核心区域并叠加国家级自然保护区科学筛选生态源地, 使用电路理论模型识别生态廊道, 构建 2000—2020 年黄河中游地区的生态安全格局, 实现对生态安全格局的动态变化监测, 把握其变化的趋势和特征, 旨为黄河中游地区生态环境修复与高质量发展决策提供科学参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河中游地区北起内蒙古自治区河口镇, 南至河南省郑州市桃花峪口, 覆盖面积达 $3.440 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占黄河流域总面积的 43.27% (图 1), 涵盖甘肃、内蒙古、陕西、山西等 6 个省区的 30 个地级市, 是中国水土功能重点保持区、粮食主产区以及经济发展的重要区域。黄河中游地区流经黄土高原、关中平原、临汾盆地等多个地貌类型区, 生态本底较差且差异较大, 生态环境脆弱, 截至 2022 年底, 黄河流域水土流失面积高达 $2.555 \times 10^5 \text{ km}^2$, 水土保持率为 67.85%。由于流经黄土高原, 黄河中游地区成为黄河流域水土流失最为严重的区域。水土流失严重、资源环境承载能力弱、水资源短缺等问题一直制约着该区域的发展。目前黄河中游地区人口稠密, 农业发展需求较大, 经济发展迅速, 城镇化进程加快, 生态环境遭受着较大压力^[26], 亟需构建科学合理的生态安全格局促进生态环境和社会经济的协同发展。

1.2 数据来源

本文研究时段为 2000、2005、2010、2015 和 2020 年。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn/), 分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$; 高程数据来源于地理空间数据云平台 (http://www.gscloud.cn)

GDEM V2 30 m 数字高程数据集; 土壤侵蚀数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (http://www.crensdc.ac.cn) 世界土壤数据库提取的中国土壤数据集, 分辨率为 $300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$, 并使用土壤流失方程计算得出; 植被覆盖数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn/); 自然保护区数据来源于中国自然保护区标本资源共享平台 (http://www.papc.cn/); 行政边界数据来源于自然资源部标准地图服务网站 (http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/), 审图号为 GS (2019) 1822 号, 底图无修改; 社会经济数据来源于研究区内各地对应年份的统计年鉴、国民经济统计公报等。所有数据分辨率统一处理为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。

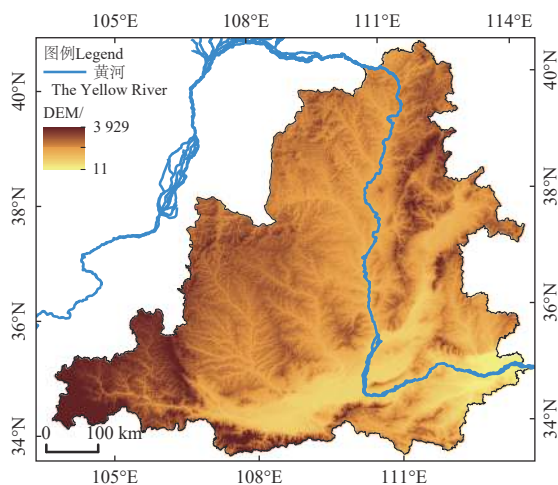


图 1 黄河中游地区区位图

Fig.1 Location map of the Middle Reaches of the Yellow River

2 研究方法

基于多源数据收集与处理, 本研究主要分为 4 个部分。1) 基于自然保护区和形态学空间格局分析的核心区域叠加以识别较为稳定且较大面积的生态源地。2) 基于土地利用、土壤侵蚀等数据构建综合生态阻力面。3) 基于电路理论模型, 识别生态廊道、生态夹点区、生态障碍区等重要生态要素, 并分析上述内容的时空演变特征。4) 基于上述识别结果, 构建多年份的生态安全格局, 把握生态安全格局的动态变化特征, 识别亟需修复与保护的区域。最后根据具体生态问题及区域实际生态状况提出对应的优化策略。

2.1 生态源地识别

形态学空间格局分析能够精准地对栅格图像的空间格局在功能型结构上进行分类, 从像元方面识别区域内不同地类对整体景观连通性发挥重要作用的斑块^[15], 提高源地选取的科学性。结合研究区实际生态情况, 将林地作为前景数据, 耕地、建设用地等地类作为背景数据, 使用 Gudios Toolbox 软件进行腐蚀、膨胀、开闭等运算, 获取核心区、支线、孤岛等 7 种景观类型。核心区面积较大, 生态功能较为稳定, 对维持景观连通性具有重要意义。筛选大于 $10\,000 \text{ hm}^2$ 的核心区^[28]并叠加国家自然

保护区，得到黄河中游地区 2000—2020 年的生态源地。

2.2 综合生态阻力面构建

层次分析法是基于专家知识经验进行指标赋权的科学方法。参考相关研究^[28-30]，结合研究区实际生态状况，共选取 7 个阻力因子以较为全面地反映实际生态阻力。

使用层次分析法对各阻力因子进行赋权（表 1），结果显示一致性指标 CI 值为 0.11，一致性比率 CR 值为 0.08，通过了一致性检验，表明专家对指标重要性的判断具有稳定性和逻辑性。使用 ArcGIS 中栅格计算器对阻力因子进行加权叠加，得到研究区综合生态阻力面。

表 1 黄河中游地区生态阻力系数和权重
Table 1 Ecological resistance coefficients and weights in the Middle Reaches of the Yellow River

阻力因子 Resistance factor	赋值 Assignment					权重 weight
	5	4	3	2	1	
景观类型 Landscape type	建设用地、未利用土地	耕地	草地	林地	水域	0.19
植被覆盖度 Vegetation cover	<0.3	[0.3, 0.5)	[0.5, 0.6)	[0.6, 0.8)	>0.8	0.16
距水源距离 Distance from water source /m	≥1 000	[500, 1000)	[200, 500)	[100, 200)	<100	0.19
距居民点距离 Distance from residential area /m	<200	[200, 500)	[500, 1000)	[1 000, 2 000)	≥2000	0.10
高程 Elevation	根据自然断点法分为 5 类并由大到小分别赋值为 5、4、3、2、1					0.07
坡度 Slope	根据自然断点法分为 5 类并由大到小分别赋值为 5、4、3、2、1					0.11
土壤侵蚀度 Soil erosion degree	根据自然断点法分为 5 类并由大到小分别赋值为 5、4、3、2、1					0.18

2.3 重要生态要素识别

电路理论模型能够通过电流移动模仿生物随机游走的过程，识别区域内部适合物种迁徙扩散的最优成本路径以及重要的生态夹点等，比最小阻力模型等方法更加符合生物迁徙的实际情况。因此，本文采用电路理论模型识别构建生态安全格局所需要的生态廊道、生态夹点区、生态障碍区等重要生态要素。

2.3.1 生态廊道识别

生态廊道是生态源地之间物质能量流动交换的重要通道，廊道周围阻力较小。潜在生态廊道是生态源地之间存在较大的廊道连接可能性而模拟的生态廊道。潜在生态廊道可能因阻力值超过廊道阻力临界点或迁徙距离过长缺乏中转区域等因素而暂时无法连接。电路理论模型 Linkage Mapper 工具箱中的 Linkage Pathways Tool 工具能够基于生态源地和生态阻力面识别并绘制源地之间的最优生态廊道。本文使用该工具识别黄河中游地区的生态廊道和潜在生态廊道，模型参数设置为 20 000^[31]。

2.3.2 生态夹点区识别

生态夹点区是生态廊道中电流密度较大且物种迁徙的必经区域。Linkage Mapper 工具箱中的 Pinch point 工具能够进行迭代运算，识别生物迁徙过程中发挥“垫脚石”作用的生态夹点区。本文使用 Pinch point 工具识别黄河中游地区的生态夹点区，并使用自然断点法并按照重要程度由大到小分为 3 类，依次是一级、二级和三级夹点区，等级越高对区域景观连通的作用越大^[32]。

2.3.3 生态障碍区识别

生态障碍区是阻碍物种在生态斑块间迁徙的区域。使用电路理论模型中的 Barrier Mapper 工具以改进后的最大模式搜索黄河中游地区的障碍区，最大搜索半径为 1 500，最小搜索半径为 500，步长为 500^[32]。使用自然断点法并按照障碍程度由大到小分为 3 类，依次是一级、二级和三级障碍区，等级越高对生态流动阻碍作用越大，清除障碍区有利于改善源地间的景观连通性^[33]。

2.4 生态安全格局构建

参考相关研究^[28-30,32]，基于对黄河中游地区生态源

地、生态廊道、生态夹点区、生态障碍区的识别结果以及生态系统服务流密度结果，分别对各年份的各关键生态要素进行空间叠加，构成黄河中游地区 2000—2020 年的生态安全格局。步骤如下：1）使用自然断点法将电路理论模型计算出的生态系统服务流从大到小分为 3 类，并将前 2 类作为重点改善区；2）将识别出的一级和二级生态夹点区作为夹点保护区；3）将一级和二级生态障碍区作为障碍修复区；4）将生态源地作为源地保护区；5）将长度大于 10 km 的生态廊道作为重点保护廊道，将长度大于 10 km 的潜在廊道为潜在修复廊道。

综合考虑研究区实际生态状况，结合对 2000—2020 年黄河中游地区各重要生态要素的变化特征、生态安全格局变化趋势和特征，提出生态环境修复保护策略。

3 结果与分析

3.1 生态源地识别

2000—2020 年，5 个年份分别识别出 42、42、45、46、45 块生态源地，面积分别为 3.335×10⁶、3.324×10⁶、3.382×10⁶、3.387×10⁶、3.346×10⁶ hm²，占研究区总面积比例分别为 9.69%、9.66%、9.83%、9.85%、9.73%。整体上，生态源地的数量和面积浮动范围较小，基本保持稳定，体现出研究区大面积生态斑块的稳定性。生态源地呈现东南密集、西北稀疏的空间格局（图 2），主要分布在山西吕梁山、太行山、陕西秦岭北部等山区以及鄂尔多斯遗鸥、哈巴湖等自然保护区，这些山区或自然保护区受人为活动扰动较小，森林覆盖面积大或受到政府部门的严格保护，生态环境良好，生态系统功能较好。研究区东部的盆地和北部高原区域的源地分布稀疏且破碎，景观连通主要依靠山西、陕西等地山地内的源地维持。盆地内部人口分布密集，人类活动频繁，土地类型以生态功能较低的耕地和建设用地为主，生态功能有限，源地分布稀疏破碎。北部高原区域的水土流失、土壤侵蚀等问题较为严重，植被以草地为主且易受季节、游牧等因素影响而无法保持稳定，区域内缺乏大面积稳定的绿色斑块，源地稀疏甚至无源地分布。

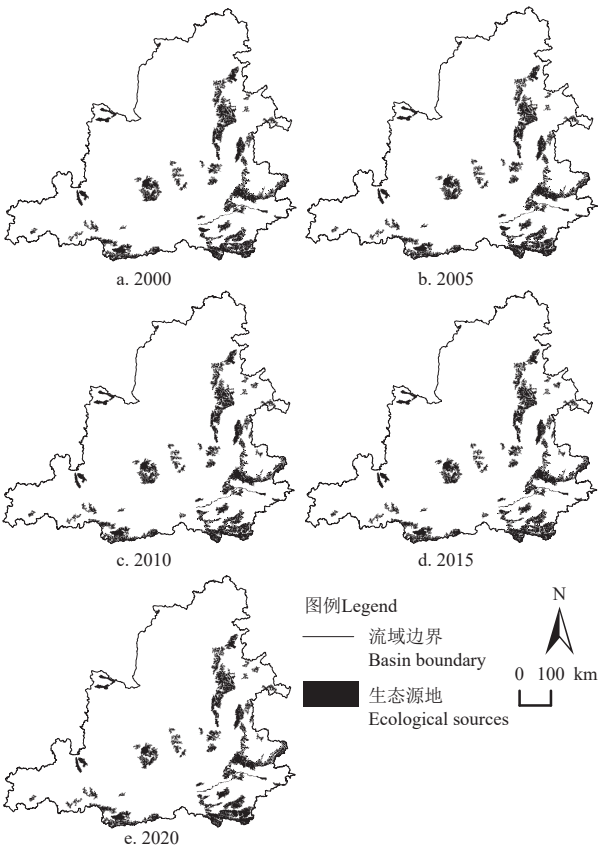


图2 2000—2020 年黄河中游地区生态源地空间分布
Fig.2 Spatial distribution of ecological sources in the Middle Reaches of the Yellow River from 2000 to 2020

3.2 生态廊道识别与时空演变

2000—2020 年，黄河中游地区的生态廊道和潜在生态廊道数量和长度呈小幅增加趋势（表 2）。廊道数量由 2000 年的 96 条增加为 2020 年的 103 条，长度由 7 632.72 km 增加为 8 205.00 km，由前文可知，源地数量增多引起廊道数量和长度有所增加。潜在生态廊道由 2000 年的 11 条变化为 2020 年的 15 条，长度由 1 698.19 km 增加为 2 062.84 km，表明不同源地之间虽然存在形成新廊道的可能性，但廊道距离增加意味着克服较大阻力才能完成迁徙，景观连通性有待改善。生态廊道空间分布分布差异明显（图 3），总体呈现东南密集、西北稀疏的空间格局，以东西向为主，密集分布在东部和南部林地广布的山地及自然保护区（如吕梁山、黄河湿地自然保护区等），多为短距离的低阻力廊道。北部廊道稀疏（如黄土高原与毛乌素沙漠交界地带等），东西之间廊道的距离较长（如芦芽山和鄂尔多斯遗鸥自然保护区之间的廊道），以高阻力廊道为主，因为研究区北部景观连通受黄土高原及鄂尔多斯高原地区影响较大，而黄土高原等地的生态源地分布稀疏且破碎，廊道连接需克服较大阻力，连接较为困难。部分廊道因周围生态阻力减小而促使廊道弯曲程度下降，向南侧或北侧移动，说明物质能量在新廊道位置流动更为便利。潜在生态廊道主要分布在边界区域且距离较长，部分年份的潜在生态廊道转变为生态廊道，表明边界地带具有培育新廊道的可能性，应注重对边界区域生态源地的培育，促进形成新

的生态廊道。

表 2 黄河中游地区生态廊道数量和长度统计
Table 2 Statistics on the number and length of ecological corridors in the Middle Reaches of the Yellow River

年份 Year	生态廊道 Ecological corridors		潜在生态廊道 Potential ecological corridors	
	数量 Quantity	长度/km Length/km	数量 Quantity	长度/km Length/km
2000	96	7 632.72	11	1 698.19
2005	95	8 028.83	12	1 148.02
2010	103	7 655.91	12	1 404.76
2015	103	7 479.69	13	973.12
2020	103	8 205.00	15	2 062.84

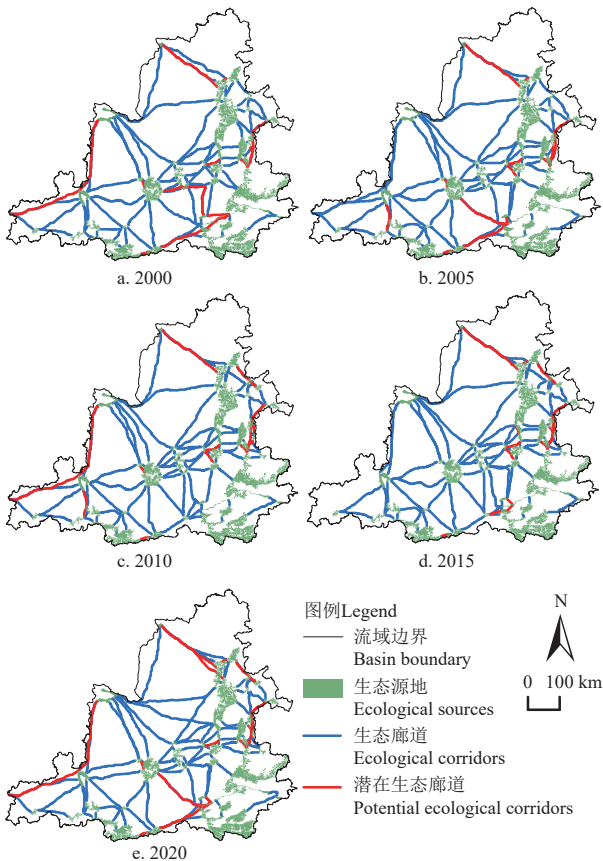


图3 2000—2020 年黄河中游地区生态廊道空间分布
Fig.3 Spatial distribution of ecological corridors in the Middle Reaches of the Yellow River from 2000 to 2020

3.3 生态夹点区时空演变

2000—2020 年，黄河中游地区生态夹点区面积总体降幅较小，由 2000 年的 $2.644 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 变化为 2020 年的 $2.618 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ，占研究区总面积比例由 76.87% 变化为 76.10%，基本保持稳定。一级夹点区面积呈增加趋势，占比由 2000 年的 1.06% 增加为 2020 年的 1.48%，二、三级夹点区面积降幅较小，降幅分别为 1.63% 和 1.55%，表明区域内对生物迁徙具有关键作用的高级夹点区的空间趋同性有所增强，发挥的作用更大。夹点区呈现北部稀疏，南部密集的空间格局（图 4），主要分布在生态廊道附近，源地和廊道连接的区域以及廊道的中间位置分布较为密集（如黄河湿地保护区与小秦岭之间的夹点区）。不同等级的夹点区在北部鄂尔多斯高原、陇东黄

土高原、东北部太原盆地等地变化较为频繁，说明此类地区夹点区较不稳定，与高原地区以未利用地、草地和耕地为主的土地类型和脆弱的生态本底、盆地区域密集的人口分布和剧烈的人类干扰等因素有关。

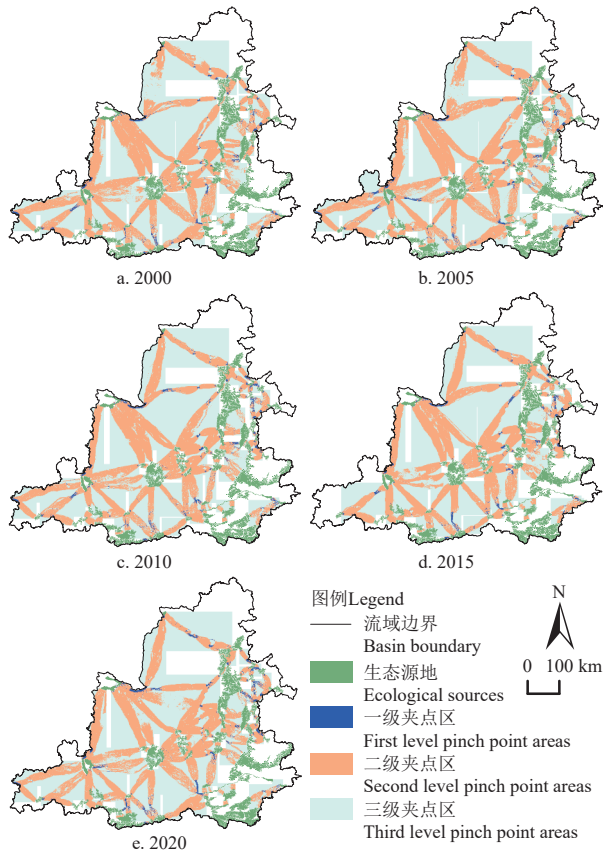


图 4 2000—2020 年黄河中游地区生态夹点区空间分布
Fig.4 Spatial distribution of ecological pinch point areas in the Middle Reaches of the Yellow River from 2000 to 2020

3.4 生态障碍区时空演变

2000—2020 年，黄河中游地区生态障碍区面积在波动中呈下降趋势，由 2000 年的 $1.202 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 下降为 2020 年的 $1.165 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ，占研究区面积比例由 34.93% 下降为 33.87%。一、三级障碍区面积虽有小幅增加，但总体基本稳定，二级障碍区面积有所下降，占比由 2000 年的 0.73% 下降为 2020 年的 0.69%。一、三级障碍区增加和二级障碍区面积减少说明影响物质能量流动区域逐渐集中且障碍程度的差异有所变大，不利于增强区域景观连通。生态障碍区（图 5）呈现北疏南密的格局，空间范围整体呈现缩小趋势，主要分布在研究区东部和南部，如东北部太原盆地、南部运城临汾盆地附近，此类地区多以耕地和建设用地为主，生态阻力较大，容易对廊道连接产生影响，由此形成障碍区域。由不同等级障碍区的分布可知，障碍区等级与周围区域人类活动关系较为密切，人类活动频繁区域的高等级障碍区较多，如一、二级障碍区分布在东北部芦芽山南侧、南部运城盆地等附近。

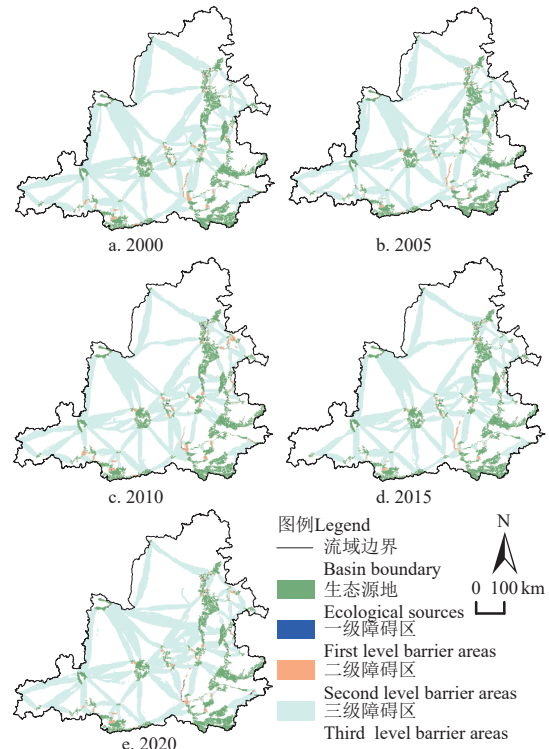


图 5 2000—2020 年黄河中游地区生态障碍区空间分布
Fig.5 Spatial distribution of ecological barrier areas in the Middle Reaches of the Yellow River from 2000 to 2020

3.5 生态安全格局的构建与时空演变

根据生态安全格局构建的思路与步骤，使用 ArcGIS 软件分别对各年份的重要生态要素进行空间叠加，得到 2000—2020 年黄河中游地区生态安全格局空间分布（图 6）。

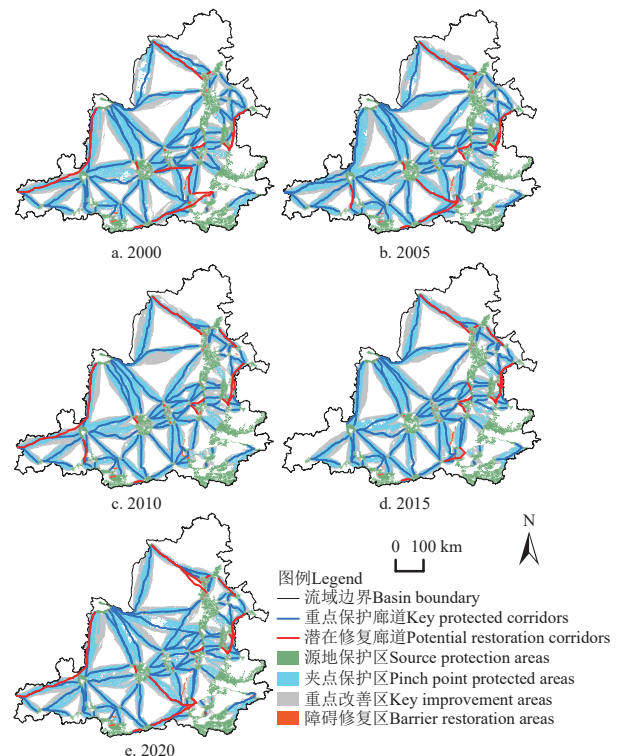


图 6 2000—2020 年黄河中游地区生态安全格局空间分布
Fig.6 Spatial distribution of ecological security pattern in the Middle Reaches of the Yellow River from 2000 to 2020

2000—2020 年,黄河中游地区生态安全格局中源地保护区数量和面积浮动范围较小,基本保持稳定,体现了研究区大面积生态斑块的稳定性。夹点保护区面积由 2000 年 $1.113 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 减少为 2015 年的 $1.050 \times 10^7 \text{ hm}^2$,并在 2020 年小幅增加为 $1.110 \times 10^7 \text{ hm}^2$,呈现在小幅波动中基本稳定的态势。障碍修复区面积由 2000 年的 $2.680 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 增加 2010 年的 $3.551 \times 10^5 \text{ hm}^2$,并在 2020 年下降为 $2.692 \times 10^5 \text{ hm}^2$,总体保持稳定。障碍修复区与夹点保护区基本保持稳定,因为夹点区和障碍区多存在于廊道周围的生态脆弱区域,物种迁徙中需加强保护夹点区以发挥“垫脚石”作用。若夹点区被周围的障碍区所侵蚀,则会导致夹点区连接断裂,不利于区域景观连通。重点改善区面积呈下降趋势,由 2000 年 $1.096 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 减少为 2020 年的 $1.049 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 。重点保护廊道由 2000 年的 76 条增加为 2015 年的 83 条,总长度由 7 556.27 km 增加为 7 403.28 km。2020 年的重点保护廊道为 83 条,保持稳定,但长度由 7 403.28 km 增加为 8 129.63 km。潜在修复廊道由 2000 年的 11 条增加为 2020 年的 15 条,长度由 1 698.19 km 增加为 2 062.84 km。重点保护廊道和潜在修复廊道数量变化与源地保护区数量变化具有直接关系,源地保护区数量增加意味着有更多源地之间组合连接形成新廊道的可能性。个别年份廊道数量未发生变化,廊道长度却有所增加,因为源地之间生态廊道是根据迁徙路径上生态阻力大小判断是否进行连接,若廊道原本位置的阻力变大,为寻找低生态阻力区域,廊道的迁徙距离可能会增加。廊道距离过长也反映出生态廊道周围生态环境不稳定。研究区的生态安全格局呈现东南密集、西北稀疏的空间格局(图 6),源地保护区稳定分布在东部吕梁山脉、太行山脉等地。重点改善区和夹点保护区主要分布在生态廊道周围,且重点改善区的空间范围呈缩小趋势。障碍修复区在南部运城盆地西侧和北部吕梁山北侧较为密集,且运城盆地西侧的空间范围扩大、密集程度提高。重点保护廊道稳分布在源地保护区密集区域(如吕梁山附近的生态廊道),源地保护区稀疏区域的重点保护廊道位置和弯曲度变化频繁(如六盘山和陕西子午岭之间的生态廊道),易受周围区域生态阻力变化的影响。

潜在修复廊道主要分布在研究区边缘地带且变动较为频繁,以太行山东侧和北部黄土高原附近为主,东南部黄河湿地附近也出现了多条潜在修复廊道,因为在源地分布密集的区域,不同源地之间可能会组合形成多条廊道,但会周围环境的阻碍作用而无法连接。应注重对潜在修复廊道的培育与保护,提升整体生态网络密度,提高区域的景观连通性。

3.6 生态安全格局优化策略

综合前文对 2000—2020 年黄河中游地区生态安全格局的具体分析结果以及该区域实际生态状况,提出以下优化策略:

1) 保护并积极培育新的生态源地。稳定的生态源地能够为物种提供良好生存环境,对生态系统的循环发展

具有重要作用。为改善黄河中游地区生态源地东密西疏、分布不均的状况,应继续实施森林封育保护、退耕还林还草、国家公园体制试点等措施,保护现有天然林(如保护吕梁山和太岳山等地的核心林地),种植优质人工林(如继续加强“三北”绿色生态屏障建设),以加强对生态源地的培育,为东部和西部生态廊道的连接提供基础,增强区域景观连通性。

2) 维系现有生态廊道连接,发挥人工廊道与天然河道的生态作用。生态廊道是连接生态源地,实现生态流迁移扩散的重要通道。研究区西部生态廊道稀疏,南北之间移动频繁且出现较多潜在生态廊道,景观连通性较差。为此,应加强东西部之间现有生态廊道的保护,在距离较长的廊道周围设置隔离带,避免被建设用地或耕地侵蚀,维持廊道稳定。同时可将生态环境较好区域附近的公路等培育为人工廊道。另外,应继续推进实施“七河生态修复工程”“渭河流域综合治理”等措施,加大对黄河干支流的环境修复与生态补水力度,发挥河流天然生态廊道作用^[28]。

3) 保护生态夹点区域,修复生态障碍区。生态夹点区以源地和廊道连接的区域以及廊道的中间位置分布最为密集,应加强源地边缘夹点区的保护,尤其应保护源地稀疏区域的生态夹点区,修复改造成成本较低的夹点区,扩大“脚踏石”的范围,形成更大范围的生态缓冲空间。生态障碍区集中分布在北部太原盆地、南部运城盆地等人类活动较为频繁的盆地或平原附近,对夹点区和生态廊道的连接产生阻碍作用,影响物种迁徙,应被重点修复和清除。

4) 对研究区实际生态问题进行针对性的修复工作。水土流失和土壤侵蚀是黄河中游地区目前面临较为严峻的生态问题,应对水土流失和土壤侵蚀较为严重的区域进行修复与治理,如对水土流失严重的区域实施生态修复工程,通过植树造林等增加地表植被覆盖,稳固地表土壤,减少水土流失;对土壤侵蚀严重的区域修建梯田,进行沟壑治理等,减缓雨水冲刷强度,缓解土壤侵蚀状况;调整坡度较大且人口密集区域的农业生产方式,推广水土保持型农业技术、实施有机生态农业等,减少人类生产活动对土壤的损害。

4 讨论

黄河中游地区是中国北方重要的绿色生态屏障,具有重要的战略地位。本文考虑研究区实际状况,构建科学的生态安全格局,识别亟需修复的生态区域,并提出针对性的优化策略。考虑到景观结构的空间连通性,将形态学空间格局分析的识别结果和国家自然保护区叠加以综合识别生态源地,发现生态源呈现东南密集、西北稀疏的空间格局,空间位置相对稳定,与已有研究结果相符^[10]。为避免当前多数研究使用最小阻力模型识别廊道后人工筛选廊道的主观性影响,本文使用能够模拟生物的真实迁徙路线的电路理论模型,科学识别生态廊道。同时根据电路理论模型识别了对生态安全格局至为重要

的生态要素。为弥补当前研究忽略生态系统要素复杂、动态连续性特征,把握生态安全格局动态变化的趋势和特征,从时空动态角度对生态安全格局进行“格局-过程”分析,丰富了相关研究内容。根据生态安全格局分析结果以及研究区的实际生态状况,提出生态安全格局优化策略,对黄河流域生态脆弱区域的修复治理具有参考价值 and 借鉴意义。

黄河中游地区东部和西部生态安全格局中生态要素空间差异明显。黄河中游地区东部和西部自然地理条件和人口经济分布差异较大。东部区域因山地广布、人口分布密集、经济活动集中等因素使山地生态系统本底相对较好,生态源地和生态廊道在山地分布密集、盆地分布稀疏。西部因多高原,降雨量少、森林覆盖率低等自然因素和人类不合理活动共同导致水土流失、土壤侵蚀等生态问题,缺乏大面积绿色斑块,生态源地分布稀疏,生态廊道稀疏且距离较长,景观连通性较差。因此,本文认为黄河中游地区东西之间生态安全格局空间差异是由东部集中分布的高强度人类活动与山区良好的生态环境、西部脆弱的生态本底与不合理的开发活动共同作用导致。对黄河中游地区进行生态环境修复时应充分考虑东西部之间的生态差异,合理制定生态修复与保护措施。

5 结 论

本文使用电路理论模型识别 2000—2020 年黄河中游地区的重要生态要素,构建生态安全格局,把握生态安全格局的动态变化特征,并结合区域实际情况,提出针对性的优化策略。结论如下:黄河中游地区生态源地的数量和面积浮动范围较小,基本保持稳定,在空间上呈现东南密集、西北稀疏的空间格局,主要分布在东部和南部的山区及国家自然保护区,山区和盆地、高原的生态源地空间差异显著。生态廊道由 2000 年的 96 条变化为 2020 年的 103 条,呈现东南部密集、西北部稀疏的空间格局,廊道方向以东西向为主,山地广布的东部廊道密集且距离较短,西部生态廊道稀疏且跨越距离较长。生态夹点区和生态障碍区主要分布在生态廊道的附近区域,以源地和廊道连接的区域以及廊道的中间位置分布最为密集。生态安全格局呈现东南密集、西北稀疏的空间格局,夹点保护区在西部廊道稀疏区域变动频繁,障碍修复区集中分布在人类活动强度较大的盆地或平原,源地保护区稀疏区域更需要稳定的“中转站”以维持长距离的廊道连接,廊道数量和长度呈增加趋势,生态安全格局整体朝着良好方向发展。黄河中游地区东部和西部生态安全格局的空间差异是由东部集中分布的高强度人类活动与生态环境良好的山区、西部脆弱的生态环境与不合理的开发活动共同作用所导致的。

物质能量流动过程中生态阻力涉及的因素较为复杂,本文仅使用 7 种阻力面反映研究区的生态阻力有些许不足,未来研究中需综合更多生态阻力因子,以构建能够最大程度反映实际阻力情况的综合生态阻力面。本文从整体角度构建生态安全格局,对多尺度嵌套下的生态安

全格局差异与关联考虑不足,构建多尺度嵌套的生态安全格局是未来研究的重要方向。

【参 考 文 献】

- [1] 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 Wangya, XIA Shuangshuang, ZHOU Wei, et al. Constructing ecological security pattern based on ecological corridor identification in Lhasa River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8948-8957. (in Chinese with English abstract)
- [2] 朱炳臣,李同昇,陈谢扬,等.汉江流域生态综合网络构建与生态安全格局识别研究[J].长江流域资源与环境,2024,33(2):362-373. ZHU Bingchen, LI Tongsheng, CHEN Xieyang, et al. Research on the construction of ecological integrated network and identification of ecological security pattern in the Han River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(2): 362-373. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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.
- [4] FORMAN R T T. Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions [M]. New York: Cambridge University Press, 1995: 3-38.
- [5] CHEN R, CARRUTHERS-JONES J, CARVER S, et al. Constructing urban ecological corridors to reflect local species diversity and conservation objectives[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 907: 167987.
- [6] TARABON S, DUTOIT T, ISSELIN-NONDEDEU F. Pooling biodiversity offsets to improve habitat connectivity and species conservation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 277: 111425.
- [7] HARVEY M S, RALPH G M, POLIDORO B A, et al. Identifying key biodiversity areas as marine conservation priorities in the greater Caribbean[J]. *Biodiversity Conservation Biology*, 2021, 30(13): 4039-4059.
- [8] KIETZKA G J, PRYKE J S, GAIGHER R, et al. Webs of well-designed conservation corridors maintain river ecosystem integrity and biodiversity in plantation mosaics[J]. *Biological Conservation*, 2021, 254: 108965.
- [9] 潘竟虎,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[J].农业工程学报,2021,37(3):259-268. PAN Jinghu, LI Lei. Optimization of ecological security pattern in Gansu section of the Yellow River Basin using OWA and circuit model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(3): 259-268. (in Chinese with English abstract)
- [10] MEN D, PAN J H. Ecological network identification and connectivity robustness evaluation in the Yellow River Basin under a multi-scenario simulation[J]. *Ecological Modelling*, 2023, 482: 110384.
- [11] 王学,徐晓凡.中国耕地景观细碎度时空变化特征及其影响因素[J].农业工程学报,2022,38(16):11-20. WANG Xue, XU Xiaofan. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of landscape fragmentation of cultivated

- land in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(16): 11-20. (in Chinese with English abstract)
- [12] 罗莎莎, 赖庆标, 王旭东, 等. 基于生态保护红线的生态安全格局构建与国土空间修复分区[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(7): 288-297.
- LUO Shasha, LAI Qingbiao, WANG Xudong, et al. Construction of ecological security pattern and land-space restoration zoning based on ecological protection red line[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(7): 288-297. (in Chinese with English abstract)
- [13] 孙丽慧, 刘浩, 汪丁, 等. 基于生态系统服务与生态环境敏感性评价的生态安全格局构建研究[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(11): 2508-2517.
- SUN Lihui, LIU Hao, WANG Ding, et al. Research on ecological security pattern construction based on the evaluation of ecosystem services and eco-environmental sensitivity[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(11): 2508-2517. (in Chinese with English abstract)
- [14] STACCIONE A, CANDIAGO S, MYSLAK J. Mapping a green infrastructure network: A framework for spatial connectivity applied in Northern Italy[J]. *Environmental Science Policy*, 2022, 131: 57-67.
- [15] 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.
- WANG Xueran, WAN Rongrong, PAN Peipei. Construction and adjustment of ecological security pattern based on MSPA-MCR model in Taihu Lake Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(5): 1968-1980. (in Chinese with English abstract)
- [16] DICKSON B G, ALBANO C M, ANANTHARAMAN R, et al. Circuit-theory applications to connectivity science and conservation[J]. *Conservation Biology*, 2019, 33(2): 239-249.
- [17] 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 Wenyue, YE Hongyu. 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. (in Chinese with English abstract)
- [18] 胡西武, 贾天朝. 基于生态敏感性与景观连通性的三江源国家公园生态安全格局构建与优化[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(8): 1724-1735.
- HU Xiwu, JIA Tianchao. Construction and optimization of ecological security pattern in Three-River-Source National Park based on ecological sensitivity and landscape connectivity[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(8): 1724-1735. (in Chinese with English abstract)
- [19] 赵宇豪, 罗宇航, 易腾云, 等. 基于生态系统服务供需匹配的深圳市生态安全格局构建[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(9): 2475-2484.
- ZHAO Yuhao, LUO Yuhang, YI Tengyun, et al. Constructing an ecological security pattern in Shenzhen, China, by matching the supply and demand of ecosystem services[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(9): 2475-2484. (in Chinese with English abstract)
- [20] 闫豫疆, 李建贵, 李均力, 等. 面向生态系统服务供需的开都-孔雀河流域生态安全格局研究[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(5): 829-839.
- YAN Yujiang, LI Jianguai, LI Junli, et al. Construction of ecological security patterns in the Kaidu-Kongque River Basin based on the supply and demand of ecosystem services[J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(5): 829-839. (in Chinese with English abstract)
- [21] 戴璐, 刘耀彬, 黄开忠. 基于 MCR 模型和 DO 指数的九江滨水城市生态安全网络构建[J]. *地理学报*, 2020, 75(11): 2459-2474.
- DAI Lu, LIU Yaobin, Huang Kaizhong. Construction of an ecological security network for waterfront cities based on MCR model and DO index: A case study of Jiujiang city[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(11): 2459-2474. (in Chinese with English abstract)
- [22] 蒙吉军, 燕群, 向芸芸. 鄂尔多斯土地利用生态安全格局优化及方案评价[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(2): 590-596.
- MENG Jijun, YAN Qun, XIANG Yunyun. The optimization of ecological security pattern based on land use and assessment of schemes in Ordo[J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(2): 590-596. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王争磊, 刘海龙, 丁娅楠, 等. 山西省生态安全时空演变特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2022, 42(18): 7470-7483.
- WANG Zhenglei, LIU Hailong, DING Yanan, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and influencing factors of ecological security in Shanxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(18): 7470-7483. (in Chinese with English abstract)
- [24] LI Y G, LIU W, FENG Q, et al. The role of land use change in affecting ecosystem services and the ecological security pattern of the Hexi Regions, Northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 855: 158940.
- [25] 李凯, 侯鹰. 景观规划导向的绿色基础设施研究进展——基于“格局—过程—服务—可持续性”研究范式[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(2): 435-448.
- LI Kai, HOU Ying. Research progress of green infrastructure oriented by landscape planning: From the perspective of "pattern-process-services-sustainability" research paradigm[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(2): 435-448. (in Chinese with English abstract)
- [26] 赵雪雁, 杜昱璇, 李花, 等. 黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 131-147.
- ZHAO Xueyan, Du Yuxuan, LI Hua, et al. Spatio-temporal changes of the coupling relationship between urbanization and ecosystem services in the Middle Yellow River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1): 131-147. (in Chinese with English abstract)
- [27] 戴铁军, 王婉君, 刘瑞. 中国社会经济系统资源环境压力的时空差异[J]. *资源科学*, 2017, 39(10): 1942-1955.
- DAI Tiejun, WANG Wanjuan, LIU Rui. Spatio-temporal variation of resource and environmental pressure in China[J]. *Resources Science*, 2017, 39(10): 1942-1955. (in Chinese with English abstract)
- [28] LIU H L, WANG Z L, ZHANG L P, et al. Construction of an ecological security network in the Fenhe River Basin and its temporal and spatial evolution characteristics[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 417: 137961.

- [29] 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. (in Chinese with English abstract)
- [30] 冯琰玮, 甄江红, 马晨阳. 内蒙古生态承载力评价及生态安全格局优化[J]. 地理研究, 2021, 40(4): 1096-1110.
- FENG Yanwei, ZHEN Jianghong, MA Chenyang. Evaluation of ecological carrying capacity and optimization of ecological security pattern in Inner Mongolia[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(4): 1096-1110. (in Chinese with English abstract)
- [31] 朱捷, 苏杰, 尹海伟, 等. 基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建[J]. 自然资源学报, 2020, 35(8): 1986-2001.
- ZHU Jie, SU Jie, YI Haiwei, et al. Construction of Xuzhou ecological network based on comprehensive source identification and multi-scale nesting[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(8): 1986-2001. (in Chinese with English abstract)
- [32] 朱琪, 袁泉, 于大炮, 等. 基于电路理论的东北森林带生态安全网络构建[J]. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3463-3473.
- ZHU Qi, YUAN Quan, YU Dapao, et al. Construction of ecological security network of Northeast China Forest Belt based on circuit theory[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(11): 3463-3473. (in Chinese with English abstract)
- [33] 潘竟虎, 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.
- PAN Jinghu, WNAG Yun. Ecological security evaluation and ecological pattern optimization in Taolai River Basin based on CVOR and circuit theory[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(7): 2582-2595. (in Chinese with English abstract)

Spatio-temporal evolution and optimization strategy of ecological security pattern in the Middle Reaches of the Yellow River of China

WANG Zhenglei¹, QIAO Jiajun^{1*}, LIU Hailong², WANG Gaiyan², FENG Yanwei³, ZHU Qiankun¹

(1. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. School of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030000, China; 3. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The Yellow River Basin is geographically critical to protect the ecological environment in China. But there is a large demand for agriculture, rapid economy as well as ecological and environmental pressure in the Yellow River Basin, especially in the Middle Reaches of the Yellow River (MRYR) at present. An ecological security pattern (ESP) is also very urgent to clarify the ecological bottom line and areas for restoration, in order to maintain a green ecological protection barrier. Taking MRYR as the study area, this study aims to construct a scientific ESP for the restoration and protection of the ecological environment. Firstly, the core area was calculated using morphological spatial pattern analysis. The national nature reserve was also superimposed to screen the ecological sources. Secondly, a comprehensive system was constructed for the resistance surface indicator. Then the circuit theory model was used to identify the ecological corridors, ecological pinch points, and barrier areas. The ESP of MRYR was constructed to obtain the dynamic trends and features of ESP from 2000 to 2020. Finally, some strategies were proposed to optimize the ESP for ecological and environmental protection, according to specific ecological conditions. The results showed that the number and area of ecological sources remained basically stable. The eastern basin and mountains were distributed densely, while the western plateau was distributed more sparsely. The number of ecological corridors evolved from 96 in 2000 to 103 in 2020. There was a dense distribution in the eastern part of the country, where the mountains were widespread. While in the western part of the country, the ecological corridors were sparse and spanned longer distances. The area of ecological pinch points remained stable. A slight decreasing trend was observed in the area of barrier areas. The pinch points and barrier areas were most densely distributed in the connecting area of the source and the corridor and in the middle of the corridor. The ESP presented a dense spatial pattern in the southeast, while the sparse spatial pattern in the northwest. Pinch-point protection areas were changed frequently in the sparse western corridors. The barrier restoration areas were concentrated in the basins or plains with high human activity intensities. The sparse source-protected areas required stable "staging areas" to maintain corridor connectivity over long distances. The number and length of corridors showed an increasing trend. The ESP shared the promising potential during this time. The spatial difference in the ESN between the eastern and western parts of the MRYR was attributed to the combination of high-intensity human activities and ecologically sound mountainous areas concentrated in the eastern part of the region, and fragile ecological environments and irrational development activities in the western part of the region. According to the specific ESP and the actual ecological situation in the region, some measures were proposed to restore and protect the ecological sources, and corridor elements. The finding can provide a strong reference to optimize the ESP in MRYR, particularly for the high-quality development of the ecological environment.

Keywords: ecology; model; security pattern; circuit theory; morphological spatial pattern; spatial and temporal evolution; Middle Reaches of the Yellow River