

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.02.013

CSTR:32311.14.rswc.2026.02.013

段宝玲, 冯强, 吕萌, 等. 基于生态系统服务供需的黄河中游地区生态安全格局构建[J]. 水土保持研究, 2026, 33(2): 355-363, 375.

Duan Baoling, Feng Qiang, Lyu Meng, et al. Construction of ecological security pattern in middle reaches of Yellow River based on supply and demand of ecosystem services[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(2): 355-363, 375.

基于生态系统服务供需的黄河中游地区 生态安全格局构建

段宝玲¹, 冯强¹, 吕萌¹, 王晶²

(1. 山西财经大学 资源环境学院, 太原 030006;

2. 中国科学院 生态环境研究中心 区域与城市生态安全全国重点实验室, 北京 100085)

摘要: [目的] 构建景观生态保育与生态系统服务亲近两种视角的生态安全格局, 为保障区域生态安全与提升居民福祉提供科学参考。[方法] 统筹考虑自然生态系统和人类需求, 利用 InVEST 模型、电路理论模型等方法, 从生态系统保护与人类亲近自然两个方面构建了黄河中游地区的生态安全格局。[结果] (1) 识别了 48 块生态源地, 主要分布于生态本底优良的中部及东南部山区; 识别了 20 块生态需求地, 主要分布于研究区东南部人口密集、经济发展水平较高的城市建成区。(2) 物种迁移阻力高值区集中在人类活动频繁的城市建成区, 低值区主要分布在人类扰动较少的山区; 居民出行阻力的低值区沿道路分布于整个研究区, 高值区散布在路网覆盖度较低的西北部。(3) 提取 98 条源间生态廊道以及 65 条需求生态廊道, 东南部生态廊道分布密集, 西北部较为稀少; 识别生态夹点 32 844 km², 集中分布于生态源地与廊道的连接处、廊道与廊道的交汇处, 以及生态源地附近区域; 生态障碍点达 1 133.8 km², 以点状形式分散在生态廊道周围, 与生态夹点位置相近但交错分布。[结论] 生态源地与需求地空间分布不均衡, 物种迁移阻力受人类活动影响, 居民出行阻力与道路分布密切相关, 形成两类生态廊道多分布于东南部的空间格局。生态修复中应重点保护现有生态源地, 分级保护源间生态廊道, 分类建设需求生态廊道, 促进区域生态安全与居民福祉的协同保障。

关键词: 生态安全格局; 生态系统服务供需; 电路理论模型; 黄河中游地区

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0355-09

Construction of ecological security pattern in middle reaches of Yellow River based on supply and demand of ecosystem services

Duan Baoling¹, Feng Qiang¹, Lyu Meng¹, Wang Jing²

(1. College of Resources and Environment, Shanxi University of Finance and Economics,

Taiyuan 030006, China; 2. State Key Laboratory of Regional and Urban Ecology, Research

Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: [Objective] This study aims to construct an ecological security pattern guided by the dual perspectives of landscape ecological conservation and proximity to ecosystem services, to provide a scientific reference for ensuring regional ecological security and improving residents' well-being. [Methods] This study integrated natural ecosystems and human demands, employing the InVEST model and circuit theory model to establish an ecological security pattern from the dual perspectives of ecosystem conservation and human proximity to nature. [Results] (1) A total of 48 ecological source areas were identified, mainly distributed in the central and southeastern mountainous regions with favorable ecological foundations. Twenty ecological demand areas were identified, primarily located in the southeastern urban built-up areas with dense populations and higher levels of

收稿日期: 2025-05-25

修回日期: 2025-06-22

接受日期: 2025-07-14

资助项目: 国家自然科学基金(42401129); 教育部人文社会科学研究规划项目(25YJAZH039)

第一作者: 段宝玲(1981—), 女, 副教授, 博士, 山西祁县人, 主要从事资源环境评价与区域规划研究。E-mail: sxndbl@163.com

通信作者: 冯强(1981—), 男, 副教授, 博士, 辽宁凌海人, 主要从事土地利用与生态系统服务研究。E-mail: fengqiang921@163.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

economic development. (2) High species migration resistance zones were concentrated in urban areas with intensive human activities, while low resistance zones were primarily situated in mountainous areas with minimal human disturbance. Low resistance zones for residents' travel were distributed along road networks across the entire study area, whereas high resistance zones were scattered in the northwestern region with sparse road coverage. (3) A total of 98 inter-source ecological corridors and 65 demand ecological corridors were extracted, showing dense distribution in southeastern areas and sparse patterns in the northwest. The ecological pinch points covered an area of 32 844 km², mainly concentrated at the connections between ecological sources and corridors, the intersections of corridors, and the vicinity of ecological sources. The ecological barriers covered an area of 1 133.8 km², distributed in a scattered pattern around the ecological corridors, with locations close to but interlaced with the ecological pinch points. [Conclusion] The spatial distribution of ecological source areas and demand areas is unbalanced. The resistance to species migration is affected by human activities, while the resistance to residents' travel is closely associated with road distribution, forming a spatial pattern where the two types of ecological corridors are mainly distributed in the southeastern region. In ecological restoration, it is essential to focus on protecting existing ecological sources, implement graded protection for inter-source ecological corridors, and to construct demand ecological corridors in a classified manner, so as to promote the coordinated safeguarding of regional ecological security and residents' well-being.

Keywords: ecological security pattern; supply and demand of ecosystem service; circuit theory model; middle reaches of the Yellow River

随着经济社会的高速发展,土地利用方式快速转变,生态系统面临的压力日益增加,生态环境问题接踵而至,包括水土流失、生物多样性锐减、生态灾害风险增加等,导致生态系统服务功能退化,对国家生态安全以及人类生存发展构成威胁。与此同时,人们对文化休闲与自然生态的需求日益增长,导致生态系统服务供需失衡,制约了人类福祉提升。生态安全格局是指对保障区域生态安全至关重要的生态要素如廊道、节点、斑块等在地理空间上的配置与分布^[1]。构建生态安全格局可以提升区域生态要素的连通性,保持生态系统的完整性与稳定性。生态安全格局构建是助力国土空间规划、实现可持续发展目标的关键策略,已经成为地理学与生态学的研究热点^[2]。

目前,生态安全格局构建逐步趋于完善,确立了涵盖“源地识别—阻力面构建—廊道提取”的研究架构。生态源地是指区域内生态系统服务价值较高的生态斑块,是生物移动与扩散的起点。通过多指标叠加分析法^[3]、综合指标体系评估法^[4]、形态学空间格局分析法^[5]可以定量识别生态源地。阻力面是提取生态廊道的关键要素,用于模拟区域环境中物种迁移的难易程度,其形成主要受土地利用类型与人类活动干扰的影响^[6]。构建阻力面的常规方法是基于土地利用类型直接赋值,数据获取便捷且操作简单,但未充分考虑土地利用类型内部的阻力差异,难以精准反映实际的阻力状况^[7]。学者们利用自然和社会经济因素对生态阻力面进行修正,包括夜间灯光指数、不透

水表面指数、生态敏感性指数及地形位指数等,有效提高了阻力面构建的科学性和准确性^[8-11]。生态廊道是在物种迁移过程中起重要作用的带状通道,连通生物网络内物质循环和能量流动,是维持区域生态过程及功能连通性的重要生态要素。廊道提取方法包括最小累积阻力模型^[12]、斑块重力模型^[13]、蚁群算法模型^[14]、电路理论模型等^[15]。尽管最小累积阻力模型能够快速识别生态流的最优路径,但其忽略了物种的随机游走特性,无法明确廊道具体范围与关键节点(如夹点)^[15]。2007年,McRae等^[16]将起源于物理学的电路理论引入生态学,首次将其应用于异质景观中的基因流研究。该理论通过将物种随机扩散行为类比为电流运动,精准预测复杂景观中的生物迁移模式;同时依据源地间电流强度量化生境斑块与廊道的相对重要性,客观反映生态流通过程,为生态安全格局构建提供科学支撑。目前电路理论模型已在生态保护修复中得到广泛应用^[7,15,17]。

生态系统服务是指人类从生态系统中获得的各种惠益,其有效链接了自然环境与人类社会。生态系统服务成为识别生态源地的依据,赋予电路理论模型生态学内涵;电路理论则通过电流密度图刻画生态系统服务流动路径,并定位夹点以消除传输瓶颈,生态系统服务与电路理论共同组成生态安全格局构建的基础。以往研究多依据生态系统服务的供给水平识别生态源地,对需求情况考虑不足^[18]。近年来生态系统服务供需匹配及耦合协调开始成为生

态安全格局构建的重要途径,在粤港澳大湾区、成渝经济圈、武汉城市群等区域均进行了一定研究^[19-21]。但是已有研究仅是将供需匹配/耦合关系作为生态源地识别的依据,仍然侧重于自然生态系统本身的规划与保护,较少考虑生态系统服务供给侧(生态源地)与需求侧在空间上的关联关系。生态系统服务的供需失衡状态推动其从自然生态系统向人类社会系统流转,也会让人类主动向生态空间移动以获取高质量的生态产品和更宜人的生态环境。总之,已有研究多聚焦于自然生态系统的生态源地以及源地间廊道的提取,仅关注源地间生态要素的流通,忽视生态系统服务需求这一关键因素对区域生态安全以及人类福祉所产生的深远影响,未能充分考虑如何将生态供给空间与人类需求空间进行有效衔接。因此,景观生态保育与生态系统服务亲近两种视角的生态安全格局尚需进一步研究^[22]。

黄河中游地区生态环境脆弱,水土流失问题突出,还是我国重化工能源区,经济发展与生态保护的冲突尤为显著。因此,构建黄河中游地区的生态安全格局成为建设黄河重点生态区的重要内容。本研究基于InVEST模型与电路理论等方法,将生态系统服务供给能力强的区域确定为生态源地,提取自然生态要素流动的源间生态廊道;识别生态系统服务

高需求区为生态需求地,构建连接源地与需求地的需求生态廊道来维系生态系统服务的供需平衡,最后形成黄河中游地区的生态安全格局。本研究旨在充实生态安全格局构建的理论体系与实践方法,支撑黄河流域生态保护与高质量发展。

1 研究区概况、数据与研究方法

1.1 研究区概况

黄河中游地区(33°45′—40°11′N,104°27′—113°39′E)涵盖内蒙古、宁夏、甘肃、山西、陕西和河南6省(自治区),总面积约为 $3.44 \times 10^5 \text{ km}^2$,占整个流域面积的43.27%。黄河中游地势起伏大,地貌类型多样,大部分流经黄土高原,主要涵盖陇中高原、山西高原、陕北高原、鄂尔多斯高原和关中盆地等地貌单元。黄土高原黄土层深厚,土壤质地疏松易受侵蚀,水土流失严重。该区是温带季风气候与温带大陆性气候过渡区,属典型大陆性季风气候。该区植被覆盖呈现显著的空间分异特征,整体上从东南向西北递减。该区能矿密集且人口众多,人地关系紧张,成为黄河流域生态保护与高质量发展障碍较多的区域。

1.2 数据来源

气象、土地利用、DEM、土壤等数据来源见表1,空间分辨率统一为1 km。

表1 数据来源列

Table 1 List of data sources

数据类型	数据来源	空间分辨率
降水量数据	https://www.geodata.cn/aboutus.html	1 km
潜在蒸散发数据	https://www.geodata.cn/aboutus.html	1 km
土地利用数据	https://www.resdc.cn/	1 km
DEM数据	https://www.gscloud.cn/	30 m
土壤数据	https://www.geodata.cn/aboutus.html	1 km
夜间灯光数据	https://data.tpdc.ac.cn/	1 km
NDVI数据	http://www.nesdc.org.cn/	30 m
道路矢量数据	https://www.resdc.cn/	
人口数据	https://landscan.ornl.gov/	1 km
社会经济数据	各省水资源公报、统计年鉴、中国能源统计年鉴	

1.3 生态系统服务供给与需求评估

通过修正通用土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)、InVEST模型等方法计算生态系统服务供给量与需求量,具体见表2。

1.4 生态安全格局构建

1.4.1 生态源地与生态需求地识别 本研究基于生态系统服务的供给与需求水平识别生态源地与生态需求地。首先对产水、土壤保持、固碳及游憩服务供给量与需求量进行归一化后等权叠加,再运用分位数法划分5个等级,最后将处于最高等级的区域确定

为生态源地与生态需求地。规模较小的生态源地与生态需求地对周边生态环境的影响有限,参考相关研究,确定 100 km^2 与 30 km^2 为最小面积阈值^[17],分别识别生态源地与生态需求地。

1.4.2 生态阻力面构建 (1) 物种迁移阻力面。生态阻力面表征生物在生态斑块间迁移的难度,本研究选择土地利用类型、高程、坡度和植被覆盖度体现自然阻力因素对生态进程的作用,选用与道路距离、夜间灯光指数表征人类活动对生态进程的干预程度,较为全面地反映物种迁移的生态阻力。参考已

有研究设置阻力值^[24],采用极差标准化对各项指标进行归一化,分别构建单因子阻力面。然后运用层次分析法得到各阻力因子权重,按照权重进行叠加处理,最终生成物种迁移阻力面。

表 2 生态系统服务供给与需求计算原理

Table 2 Calculation principles of supply and demand of ecosystem services

项目	供给量	需求量
固碳	固碳供给量为地上、地下、土壤等各部分碳储量之和: $C_t = C_{ab} + C_{be} + C_{so} + C_{de}$ 式中: C_t 为总碳储量(t/km^2); C_{ab} 、 C_{be} 、 C_{so} 、 C_{de} 分别为地上、地下、土壤和死亡有机质的碳储量(t/km^2)	通过煤炭、石油、天然气等各类能源的碳排放量表示固碳需求量,借助人口栅格数据将碳排放量空间化: $D_c = \rho_i \times D_{sum} / H$ 式中: D_c 为固碳需求量(t/km^2); D_{sum} 为碳排放总量(t); ρ_i 为栅格人口密度($人/km^2$); H 为常住人口数(人)。
土壤保持	利用RUSLE计算土壤保持服务供给量: $SC = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$ 式中: SC 为土壤保持供给量(t/km^2); R 为降雨侵蚀力因子($MJ \cdot mm / (km^2 \cdot h)$); K 为土壤可蚀性因子($t \cdot km^2 \cdot h / (km^2 \cdot MJ \cdot mm)$); LS 为地形因子; C 为植被覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子	土壤保持服务需求量指人们不希望发生土壤流失,因此将实际土壤流失量(USLE)作为需求量(t/km^2): $USLE = R \times K \times LS \times P \times C$
产水	运用InVEST模型Water Yield模块来测算产水服务供给量: $Y_{sum} = \left(1 - \frac{AET}{P}\right) \times P$ 式中: Y_{sum} 为产水服务供给量(m^3/km^2); AET 为年均实际蒸散发量(m^3/km^2); P 为年均降水量(m^3/km^2)	产水服务的需求量用生活、农业、工业、生态各项用水量之和来计算,具体计算公式如下: $D_w = D_{perwat} \times \rho_i$ $D_{perwat} = (W_{dom} + W_{agr} + W_{ind} + W_{eco}) / H$ 式中: D_w 为产水服务需求量(m^3/km^2); D_{perwat} 为人均用水量($m^3/人$); W_{dom} 、 W_{agr} 、 W_{ind} 和 W_{eco} 分别为生活、农业、工业和生态用水(m^3); H 为常住人口数(人); ρ_i 为栅格人口密度($人/km^2$)
游憩服务	把林地、草地、水体等具有休闲娱乐功能的用地类型界定为生态用地,用网格内生态用地的面积表示游憩服务供给量(km^2/km^2) ^[23]	将黄河中游地区的生态用地标准设定为 $60 m^2/人$,用网格内人口数量与生态用地标准的乘积表示游憩服务需求量(km^2/km^2) ^[23]

(2) 居民出行阻力面。居民在主动追求优质生态产品以及良好生态环境的过程中,往往倾向于选择地理位置上更便捷的区域。距离道路越近,通行成本越低,居民出行的阻力越小。参考已有研究^[22],提取黄河中游地区的县道、省道、国道、高速、铁路5类道路信息,以5,10,15,20 km的阈值对道路创建多环缓冲区,依次为其赋予10,30,50,70,100的阻力值,再进行归一化处理。

1.4.3 生态廊道提取方法 电路理论模型可借助电流流动模拟生物的随机游走,精准识别区域内物种迁徙扩散的最优成本路径及关键生态夹点,比最小阻力模型等方法能更接近生物迁徙的实际状况^[17,25]。本研究依托ArcGIS软件中的Linkage Mapper工具箱,结合Circuitscape程序提取源间生态廊道与需求生态廊道。利用生态源地之间成本加权距离(Cost-Weighted Distance, CWD)与最小成本路径长度(Least-Cost Path, LCP)的比值对生态廊道的阻力进行分级^[7],选取比值较大的前20%为高阻力廊道,比值较小的后20%为低阻力廊道,其余中间部分为中阻力廊道。

1.4.4 生态节点识别方法 生态节点是连接生态斑块的关键要素,在能量与信息的流动进程中发挥着极为重要的作用,主要由生态夹点和生态障碍点组

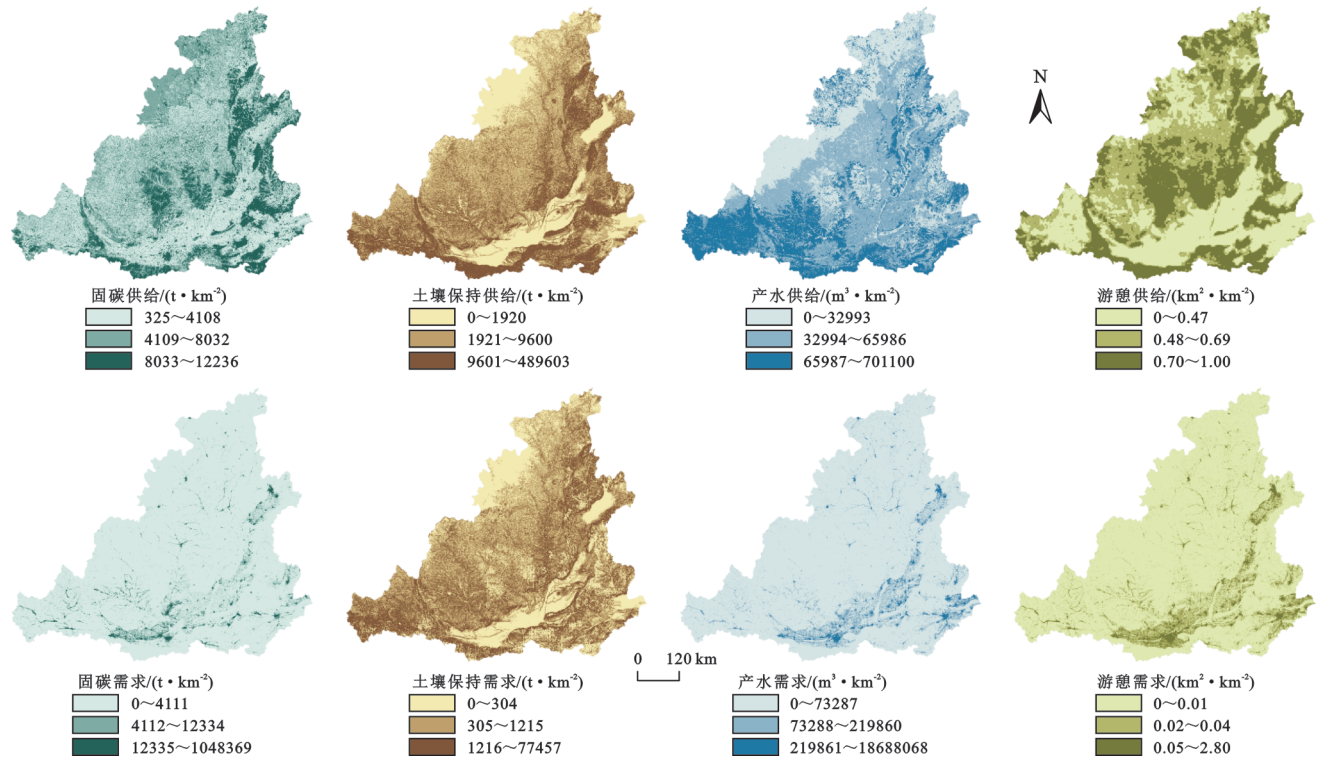
成。生态夹点是生物迁徙频繁且电流密度高的生态组分,对保障生态网络的连接性至关重要,在生物迁徙过程中发挥“垫脚石”作用。依托电路理论,利用Pinchpoint Mapper工具,将生态源地、阻力面和源间生态廊道等要素相结合,识别源地间电流密度高的区域为生态夹点区^[26]。

生态障碍点指物种在生境斑块间迁移时受阻的区域,属于生态过程中的脆弱节点,对其进行修复或移除能够显著增加区域间的生态连通性,提升区域生态安全水平。基于电路理论模型,运用Barrier Mapper工具,选择“maximum”模式迭代运算,将源地之间电流恢复值较大的区域判定为生态障碍点^[26]。

2 结果与分析

2.1 生态源地与生态需求地

2.1.1 生态源地 黄河中游地区生态系统服务供给量表现出明显的空间分异特征,固碳、土壤保持和游憩服务供给量的高值区集中分布于研究区东部、中部及南部的山区,山区林草覆盖度高,生态本底优越(图1)。产水服务供给量表现为东部和南部偏高而西北部较低的空间格局,主要受降水和蒸散发等自然条件的影响。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2024)0650号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图 1 黄河中游生态系统服务供给与需求的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of supply and demand of ecosystem services in middle reaches of Yellow River

基于生态系统服务供给量,共识别出生态源地 48 块,面积约为 44 851 km²,占黄河中游地区面积的 13.07%(图 2)。生态源地集中分布在研究区的中部及东南部,原因是研究区东部的吕梁山、太行山,中部的子午岭,南部的六盘山、秦岭、豫西山地等山区森林覆盖面积大,分布有山西芦芽山、黑茶山、庞泉沟、五鹿山、灵空山、历山国家级自然保护区及阳城莽河猕猴国家级自然保护区,河南伏牛山、小秦岭国家级自然保护区及太行山猕猴国家级自然保护区,陕西子午岭、太白山、周至国家级自然保护区及黄龙山褐马鸡国家级自然保护区等。这些自然保护地与生态源地分布重合,生态环境优良,生态系统服务供给能力强。研究区西北几乎无生态源地分布,原因是该区域自然条件恶劣,植被覆盖率低,在季节性气候变迁与人类活动干扰下,生态系统服务功能较差,水蚀风蚀问题严重。从省际差异来看,山西省的生态源地面积最大约为 20 713 km²,占源地面积的 46.18%,其次是陕西省约为 13 327 km²,占源地面积的 29.71%。从地类来看,生态源地以林地和草地为主,耕地次之。其中林地占生态源地总面积的 84.28%,草地占比 10.80%。

2.1.2 生态需求地 固碳、产水、游憩服务需求的高值区域均分布在研究区东南部的城市聚集区(图 1),该区域人口密度较大、城镇化率与经济发展水平高,用地

类型以建设用地为主。土壤保持服务需求的高值区域主要集中于研究区中部、东部及南部的山区,山区地形复杂,土壤侵蚀严重,对土壤保持服务的需求量大。

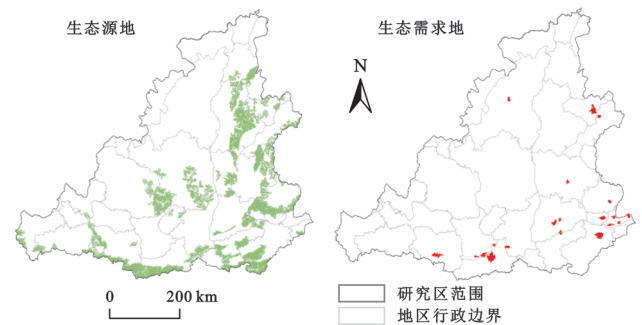


图 2 黄河中游生态源地与生态需求地空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of ecological source areas and ecological demand areas in middle reaches of Yellow River

基于生态系统服务需求结果,最终识别出 20 块生态需求地,面积约为 1 733 km²,占研究区总面积的 0.50%(图 2)。生态需求地散布于研究区东部及南部,其中陕西省的生态需求地面积最大约为 742 km²,占需求地面积的 42.82%,其次是河南省与山西省,面积分别约为 501 km²和 490 km²,占需求地面积的 28.91%和 28.27%。生态需求地主要位于城市建成区,南部的西安市和宝鸡市、东南部的洛阳市以及东北部的太原市生态需求地面积最大,这几个区域人口密集,对生态系统服务的需求高。从地类来看,建设用地与耕地为需求地用地类型的主体,其中建设

用地占比 69.47%，耕地占比 27.18%。总之，生态需求地人口密度与经济产出高，居民对绿色空间、休闲游憩和环境质量的需求更为迫切。

2.2 生态阻力面构建

2.2.1 物种迁移阻力面 黄河中游地区的物种迁移阻力值空间分布不均匀，呈现明显的集聚特征(图 3)。物种迁移阻力高值区和生态需求地具有空间一致性，主要集中于城市建成区，中心城区的生态阻力达到峰值，并以此为核心向毗邻县市呈辐射状扩展。高度城镇化与频繁的人类活动对生态系统造成了显著干扰，进而阻碍了生物物种的迁移及物质能量的顺畅流通。物种迁移阻力低值区的分布与生态源地一致，低值区主要位于研究区东部的吕梁山、太行山，中部子午岭，南部的六盘山、秦岭，这些山区林草覆盖面积大，人类活动强度较低，分布有多个国家级自然保护区，生态环境良好，对生物迁徙的阻力较小。

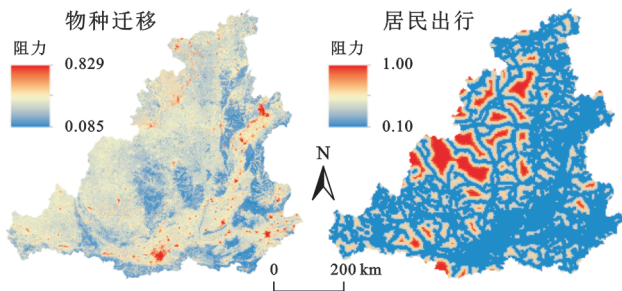


图 3 黄河中游物种迁移阻力面与居民出行阻力面
Fig. 3 Resistance surface of species migration and residents' travel in middle reaches of Yellow River

2.2.2 居民出行阻力面 基于道路信息构建居民出行阻力面，距离道路越近，通行成本越低，居民出行的阻力越小。当居民住宅或活动地点距离道路较近时，他们能够更直接、更快速地接入交通网络，这种便捷性不仅体现为物理距离的缩短，还体现在时间成本与体力消耗的降低。此外，邻近道路的居民在心理上亦能感受到更高的出行舒适度，他们往往认为自身的出行环境更为便捷且安全，从而增加出行倾向。黄河中游地区路网密度较高，但地理差异性显著，总体表现出“东南密集，西北稀疏”的空间分异特点(图 3)。因此，居民出行阻力低值区沿道路贯穿于整个研究区，在路网密集的东南部呈现集中连片的分布格局，而高值区散布在研究区西北部。

2.3 生态廊道提取

2.3.1 源间生态廊道 本研究共提取 98 条源间生态廊道，总长度达 4 005.83 km，其中最长廊道为 281.55 km，最短为 1.41 km。长度超过 100 km 的廊道共 10 条，不足 5 km 的则有 21 条。源间生态廊道与生态源地的分布密切相关，两者集中分布于研究区东南部，该区

域生境良好，便于物种迁徙、信息传递和能量流动(图 4)。研究区西北部没有生态源地分布，故而无生态廊道贯穿其中。山西省、河南省的生态源地分布较为集中且面积较大，因此其生态廊道较短；陕西省、甘肃省的生态源地面积较小且相对分散，因此廊道较长。

生态廊道的阻力大小直接关乎生物种群在迁移扩散过程中的难易程度与能量消耗水平，对于生物物种的生存与发展具有关键意义。当生态廊道的阻力较低时，物种穿越这一通道的阻碍较少，反之，则阻碍较多。本研究提取低阻力廊道 20 条，长度为 150.34 km，占廊道总长度的 3.75%，低阻力廊道长度较短，主要分布在源地密集且距离较近的区域，该区域生态条件良好，阻力值较低，有利于物种迁移和信息流动(图 4)。中阻力廊道共 57 条，长度达 2 700.36 km，占廊道总长度的 67.41%，分布广泛，与多数生态源地相接。高阻力廊道共 21 条，长度为 1 155.14 km，占廊道总长度的 28.84%，主要分布在生态阻力高值区，连接城市建成区两侧的生态源地，对生物物种迁移和能量流动阻力较大，可能有断裂的风险，需加强保护。

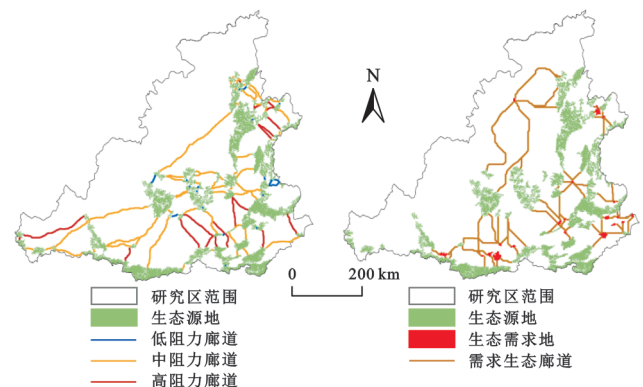


图 4 黄河中游源间生态廊道与需求生态廊道

Fig. 4 Inter-source ecological corridors and demand ecological corridors in middle reaches of Yellow River

2.3.2 需求生态廊道 生态系统服务的供需错配会导致生态系统服务从高供给区(生态源地)向高需求区流动，人类也会自主向生态空间迁移，旨在获得高质量的生态产品。需求生态廊道连接生态源地和生态需求地(图 4)，确保了自然资源的顺畅传递，是实现生态福祉的关键纽带。本研究提取需求生态廊道 65 条，总长度达 3 765.04 km。最长廊道为 318.78 km，最短为 1.41 km，100 km 以上的廊道共有 10 条，5 km 以下的则有 4 条。需求生态廊道大多处于空间距离和生态功能方面紧密相关的生态需求地和生态源地之间，由于研究区东南部生态需求地较多且相对集中，所以需求廊道分布密集，并且该区域源地与需求地距离较近，导致需求廊道长度较短。研究区西北部由于仅有一块生态需求地且几乎无生态源地，因而

需求廊道数量少且分布稀疏,因需求地与源地相距较远,所以廊道相对较长。

2.4 生态节点识别

2.4.1 生态夹点 生态夹点总面积达 32 844 km²,其中面积最大的生态夹点为 7 036 km²,最小为 10 km²(图 5)。生态夹点中耕地占比高达 41.16%,草地占比为 39.01%,林地占比为 14.99%,水域和建设用地占比最小,仅为 4.7%。生态夹点大多集中分布于生态源地和廊道交接的区域、廊道与廊道的交汇处,以及生态源地的周边地带,此类区域生态流量集中,生态活动频繁,生物物种与物质能量极有可能经过,成为生态过程的关键区域。这些生态夹点亟需得到重点保护,应采取相应措施将人类活动的负面影响降到最小,以确保区域生境的连通性。

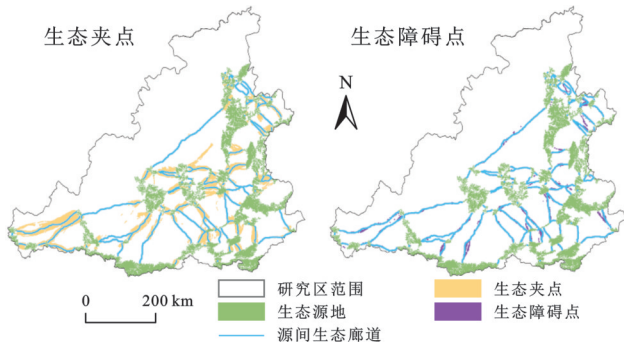


图 5 黄河中游生态夹点分布

Fig. 5 Distribution of ecological pinch points in middle reaches of Yellow River

2.4.2 生态障碍点 生态障碍点总面积为 1 133.8 km²,最大面积为 5.64 km²,最小面积仅有 0.03 km²(图 5)。生态障碍点主要以点状形态散布于生态廊道的周边区域,毗邻廊道周边的生态夹点区并与其呈现出一种交错分布的模式。从土地利用类型来看,生态障碍点以建设用地和耕地为主,人类活动密集,大规模的城市开发和农业活动可能造成绿地减少、水体污染、生物多样性下降等问题,而且建设用地和耕地扩张往往会阻断生态廊道,不利于生物物种迁移与物质能量交换,阻碍生态过程。修复或移除生态障碍点能够提升生态廊道连通度,保障区域生态安全。

3 讨论与结论

3.1 讨论

(1) 生态源地保护修复策略。扩张原有生态源地或新增集中连片生态源地的难度较大,因此需要重点保护现有生态源地。研究区生态源地以林地为主,空间分布不均,主要分布于研究区中部、东部和南部山区。应根据自然条件科学保护林地,对于半干旱/半湿润区(如吕梁山、子午岭等),侧重维持森

林生态系统稳定,防控林地退化,实施封山育林,补植耐旱灌木修复灌草层,增强地表覆盖与抗侵蚀能力;对于半湿润/湿润区(如秦岭、伏牛山等),重点维持森林生态系统完整性与原真性,严格保护天然林核心区,优化林分结构。同时,加强林地生态监测与评估,及时掌握林地资源和生态功能动态,调整和优化林地保护措施,严格管控林地向建设用地等其他用途的转换,维持并提升林地的生态系统服务供给能力。黄河中游水土流失严重的区域主要集中在黄土高原,要继续控制黄土高原水土流失,以小流域为单元,实施综合性的水土保持措施,包括植被恢复、梯田建设、淤地坝建设等,形成系统的水土保持体系。同时,依托现有生态源地,整合研究区内的森林公园、自然保护区等,大力推进自然保护地体系建设,以此强化对生态源地的保护与培育。

(2) 生态廊道保护修复策略。生态廊道是连接生境斑块的通道,对促进物种迁移、保障生态过程完整性具有重要意义。低阻力廊道主要分布在源地密集且距离较近的区域,该区域生态条件良好,对物种迁移最为有利,应该重点保护,应在其附近划定边界,严格禁止开发,并建设廊道缓冲区,限制人类活动。中阻力廊道数量多,占比大,连接多数生态源地,应推行全面且广泛的保护策略,强化廊道生态景观建设,减少人为破坏。高阻力廊道主要分布在生态阻力高值区,连接城市建成区两侧的生态源地,受人类活动扰动大,对生物物种迁移和基因流动阻力较大,可能存在断裂风险,可于廊道周边规划建设隔离带,避免城市扩张进程中廊道被建设用地与耕地挤占。此外,需要进一步强化对黄河及其支流的环境整治,保障其自然生态廊道功能^[17]。同时,交通道路是生物迁徙的关键阻碍因素^[27],建设生态绿色通道是一种行之有效的应对策略,帮助野生动物跨越公路、铁路阻隔,保障其通行安全^[28]。

需求生态廊道连接生态源地和生态需求地,是连通人类社会与自然环境的纽带。研究区东南部的源地与需求地距离较近,需求生态廊道长度较短,可以基于生态敏感性评估,科学规划选址,打造联通城市与生态源地的生态步道与骑行道。对于研究区内源地与需求地相距较远导致需求生态廊道较长的区域,可以依托交通线路打造自驾旅游公路。对沿途基础设施采取生态化改造,设置太阳能充电桩、风能路灯等绿色能源设施,在休息驿站的屋顶铺设光伏板,实现能源自给。根据不同生态源地的特点,设计特色主题游玩线路。总之,依托需求生态廊道建设生态步道、骑行道、自驾旅游公路,为市民和游客打

造兼具休闲游憩与自然教育功能的高质量绿色活动空间,促进城市发展与生态保护的协调统一,提升居民生态福祉。

(3) 生态节点保护修复策略。生态夹点区集中于生态源地与廊道的连接处、廊道与廊道的交汇处,以及生态源地周边地带,是生态功能相对较强的区域,土地利用类型以耕地、草地和林地为主。对于靠近生态源地的区域,应当划定红线禁止开发建设,维护生态源地的完整性与原生性;对于靠近城市的区域,需充分考虑城市发展方向、人口增长趋势以及资源利用状况,制定既符合城市长远发展又能改善生境质量的发展规划,通过增加城市绿地规模、提升绿化品质以及优化绿地布局等措施提升生态夹点功能。生态障碍点呈点状分布,分散在生态廊道周围,与生态夹点位置相近但交错分布,用地类型主要为建设用地和耕地,人类活动频繁,不利于生物物种迁移,修复或移除生态障碍点能够提高生态廊道的连通性。对于城市建设用地,提高土地的集约节约利用水平,加强城市绿化建设;对于耕地,采用等高耕作减缓坡面径流侵蚀,实施垄作区田以蓄水保墒增肥,构建农田防护林网防风固土、改善小气候,发展生态农业减少农药化肥使用。这些措施能有效减少水土流失、提升地力,在保障粮食产量的同时增强生态系统服务功能。

(4) 研究不足与展望。本研究基于生态系统服务供给与需求构建生态安全格局,对生态系统服务在廊道间流动的机理认识不足,未来应根据生态系统服务流动特点探索构建更加精细的生态安全格局,并以此为依据探究区域间的生态补偿机制,以维系区域生态系统服务的供需平衡。此外,当前生态廊道宽度确定缺乏科学依据和统一标准^[29-30],实际操作存在较大随意性和不确定性。本研究仅进行了生态廊道提取,未考虑廊道宽度,未来应针对生态廊道宽度开展科学研究,充分发挥廊道生态功能,提高生态保护成效。

3.2 结论

(1) 本研究共识别生态源地48块,总面积44 851 km²,集中分布于研究区中部及东南部山区,该区域林草覆盖率高,生态本底良好;识别20块生态需求地,总面积1 733 km²,集中分布于研究区东南部人口密集、经济发展水平较高的城市建成区。

(2) 研究区生态阻力空间分布不均,物种迁移阻力的高值区集中在人类活动频繁的城市建成区,与生态需求地的分布较为一致,低值区主要分布在人类扰动较少的山区,与生态源地的分布基本一致;居

民出行阻力的低值区沿道路分布于整个研究区,高值区散布在路网覆盖度较低的西北部。

(3) 本研究提取163条生态廊道,包含98条源间生态廊道以及65条需求生态廊道,东南部生态廊道分布密集,西北部较为稀少;识别生态夹点32 844 km²,集中分布于生态源地与廊道的连接处、廊道与廊道的交汇处,以及生态源地附近区域;生态障碍点达1 133.8 km²,以点状形式分布,分散在生态廊道周围,与生态夹点位置相近但交错分布。

(4) 生态安全格局修复策略:重点保护现有生态源地,推进自然保护地体系建设,治理黄土高原水土流失;分级保护低、中、高阻力生态廊道,整治黄河支流,架设生态绿桥,保障物种迁移;分类建设需求生态廊道,近距区建生态步道与骑行道,远距区依托交通线打造自驾旅游公路,提升人类亲近自然的通达性;根据生态夹点分布位置,近源地划定生态红线,近城区科学规划并增设绿地;生态障碍点需修复或移除,提升生态廊道连通性,促进生态保护与城市发展。

参考文献(References):

- [1] Yu K J. Security patterns and surface model in landscape ecological planning[J]. *Landscape and Urban Planning*, 1996,36(1):1-17.
- [2] Shu R, Ma G Q, Zou Y B, et al. Bibliometric analysis of ecological security pattern construction: current status, evolution, and development trends[J]. *Ecological Indicators*, 2024,169:112754.
- [3] 安睿, 窦超, 陆砚池, 等. 耦合SOM-MCR模型的多特征生态安全格局构建:以武汉城市圈为例[J]. *生态学报*, 2023,43(22):9486-9499.
An R, Dou C, Lu Y C, et al. Construction of multi-feature ecological security patterns by coupling SOM-MCR Model: a case study of Wuhan Metropolitan Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(22):9486-9499.
- [4] 孙梓渊, 王赛鸽, 陈彬. 基于生态系统服务的生态安全格局构建与生态韧性评估:以长株潭城市群为例[J]. *生态学报*, 2024,44(11):4650-4661.
Sun Z Y, Wang S G, Chen B. Construction of ecological security pattern and assessment of ecological resilience based on ecosystem services: a case study of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(11):4650-4661.
- [5] Vogt P, Ferrari J R, Lookingbill T R, et al. Mapping functional connectivity[J]. *Ecological Indicators*, 2009,9(1):64-71.
- [6] 彭建, 郭小楠, 胡熠娜, 等. 基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建:以云南省玉溪市为例[J]. *应用生态学报*, 2017,28(2):627-635.
Peng J, Guo X N, Hu Y N, et al. Constructing ecologi-

- cal security patterns in mountain areas based on geological disaster sensitivity: a case study in Yuxi City, Yunnan Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017,28(2):627-635.
- [7] 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.
- [8] Li Y Y, Wei M, Zhou R, et al. Identifying priority restoration areas based on ecological security pattern: implications for ecological restoration planning [J]. *Ecological Indicators*, 2025,174:113486.
- [9] Zhang L Q, Peng J, Liu Y X, et al. Coupling ecosystem services supply and human ecological demand to identify landscape ecological security pattern: a case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Urban Ecosystems*, 2017,20(3):701-714.
- [10] Tian J W, Zhang B L, Li J Y, et al. Incorporating stepping stone establishment into rural ecological security pattern optimization: a water-energy-food coupling perspective[J]. *Land*, 2025,14(4):862.
- [11] Peng J, Pan Y J, Liu Y X, et al. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape [J]. *Habitat International*, 2018,71:110-124.
- [12] 张慧,邱凯玉,王宇瑶,等.农业主产区土地生态安全格局构建:以克东县为例[J].*水土保持研究*,2021,28(6):274-282.
Zhang H, Qiu K Y, Wang Y Y, et al. Construction of land ecological security pattern in main agricultural production areas: taking Kedong County as an example[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28(6):274-282.
- [13] Kong F H, Yin H W, Nakagoshi N, et al. Urban green space network development for biodiversity conservation: identification based on graph theory and gravity modeling[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010,95(1/2):16-27.
- [14] Peng J, Zhao S Q, Dong J Q, et al. Applying ant colony algorithm to identify ecological security patterns in megacities [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019,117:214-222.
- [15] Peng J, Yang Y, Liu Y X, et al. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns[J]. *Science of the Total Environment*, 2018,644:781-790.
- [16] McRae B H, Beier P. Circuit theory predicts gene flow in plant and animal populations[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007,104(50):19885-19890.
- [17] 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.
Wang Z L, Qiao J J, Liu H L, 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*, 2024,40(19):231-239.
- [18] Wei W, Zhang Y L, Wei X X, et al. Construction and optimization of ecological security patterns based on ecosystem service function and ecosystem sensitivity in the important ecological functional area: a case study in the Yellow River Basin [J]. *Ecological Engineering*, 2025,215:107609.
- [19] Jiang H, Peng J, Dong J Q, et al. Linking ecological background and demand to identify ecological security patterns across the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in China [J]. *Landscape Ecology*, 2021,36(7):2135-2150.
- [20] Guan D J, Chang Q Y, Zhou L L, et al. Construction and optimization of ecological security pattern network based on the supply-demand ratio of ecosystem services: a study from Chengdu-Chongqing economic circle, China[J]. *Land*, 2024,13(6):844.
- [21] Liu H Y, Zhu J H, Zeng L X, et al. Identification of urban ecological security pattern based on ecosystem services supply-demand [J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2024,10:146.
- [22] 王晨旭,刘焱序,于超月,等.面向居民生态福祉的国土空间生态网络构建:以临沂市为例[J].*生态学报*,2022,42(21):8650-8663.
Wang C X, Liu Y X, Yu C Y, et al. Construction of terrestrial ecological network for the improvement of residents' ecological benefits: a case study of Linyi City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(21):8650-8663.
- [23] 陶芹,陶宇,欧维新.长三角地区休闲游憩服务供需关系研究[J].*生态学报*,2021,41(5):1777-1785.
Tao Q, Tao Y, Ou W X. Spatial variation of supply and demand relationships of recreational service in the Yangtze River Delta [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(5):1777-1785.
- [24] 朱宗斌,彭佳新,姚龙杰,等.整合结构连通与功能提升的黄土高原县域生态安全格局构建:以延安市安塞区为例[J].*应用生态学报*,2024,35(7):1915-1924.
Zhu Z B, Peng J X, Yao L J, et al. Construction of ecological security pattern in Loess Plateau counties by integrating structural connectivity and functional enhancement: a case study of Ansai District, Yan'an City, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024,35(7):1915-1924.