

# 基于水土流失治理的渭河流域绿色基础设施网络构建与优化研究

黄雪扬, 吴欣, 崔鹏

(西北大学 城市与环境学院, 西安 710127)

**摘要:** [目的] 构建并优化基于水土流失治理的渭河流域绿色基础设施网络, 为渭河流域水土流失治理与生态系统功能提升提供科学支撑。[方法] 以 2020 年渭河流域为例, 以缓解流域水土流失为目的, 基于“源地—廊道—战略点”的构建方式, 综合运用形态学空间格局分析法、生态系统服务和权衡的综合评估模型、最小累积阻力模型及电路理论构建并优化渭河流域绿色基础设施网络。[结果] (1) 共识别出渭河流域绿色基础设施源地 23 处, 总面积 24 566.06 km<sup>2</sup>, 占研究区总面积的 18.24%, 主要分布于秦岭、六盘山、陇山与子午岭等大型林地区域。(2) 生态廊道 46 条, 总长度 3 588.59 km, 主要分布在流域内地形较低的河谷、平原地带, 呈现中部密集东西稀疏的空间分布。(3) 生态夹点 63 处, 总面积 10 936.82 km<sup>2</sup>, 集中分布在流域中部的六盘山、陇山与子午岭区域。障碍点 35 处, 总面积 17 414.43 km<sup>2</sup>, 集中分布在陇中高原与关中平原区域。(4) 综合各要素构建出“三横、两纵、多中心”的渭河流域绿色基础设施网络, 通过源地分区优化、廊道分级提升和战略点保护与修复等方式对网络进行优化, 以实现水土治理目标。[结论] 基于水土流失治理需求构建并优化的渭河流域绿色基础设施网络, 可有效治理流域水土流失问题, 保障水土保持效能, 实现生态系统功能提升。

**关键词:** 绿色基础设施网络; 形态学空间格局分析(MSPA); 水土流失; 渭河流域

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0179-12

## Study on construction and optimization of green infrastructure network in Weihe River basin based on soil erosion control

Huang Xueyang, Wu Xin, Cui Peng

(College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to construct and optimize the green infrastructure network in the Weihe River basin based on soil erosion control, providing a scientific basis for controlling soil erosion and enhancing ecosystem functions in the basin. [Methods] Taking the Weihe River basin in 2020 as the study area, this study sought to mitigate soil erosion in the basin. Based on the “source -corridor-strategic point” framework, the morphological spatial pattern analysis, the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs model, the minimum cumulative resistance model, and circuit theory were employed to construct and optimize the green infrastructure network. [Results] (1) A total of 23 green infrastructure sources were identified in the Weihe River basin, covering a total area of 24 566.06 km<sup>2</sup> and accounting for 18.24% of the study area. These sources were primarily distributed in large forested regions, including the Qinling, Liupan, Longshan, and Ziwuling Mountains. (2) There were 46 ecological corridors, with a total length of 3 588.59 km. They were mainly located in the topographically low valleys and plains of the basin, exhibiting a spatial distribution pattern of being dense in the

收稿日期: 2025-07-11

修回日期: 2025-07-28

接受日期: 2025-08-14

资助项目: 陕西省财政厅产城融合研究专项(项目编号: 2050205)

第一作者: 黄雪扬(2001—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为城市与区域生态规划。E-mail: 18873239238@163.com

通信作者: 崔鹏(1981—), 男, 陕西汉中, 博士, 副教授, 主要从事城市与区域规划、国土空间规划研究。E-mail: cuipeng@nwu.edu.cn

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

central part and sparse in the eastern and western parts. (3) 63 ecological pinch points were identified, covering a total area of 10 936.82 km<sup>2</sup>, which were concentrated in the Liupan, Longshan, and Ziwuling Mountains in the central part of the basin. Additionally, there were 35 barrier points with a total area of 17 414.43 km<sup>2</sup>, which were concentrated in the Longzhong Plateau and Guanzhong Plain areas. (4) By integrating these elements, a “three-horizontal, two-vertical, and multi-center” green infrastructure network was constructed for the Weihe River basin. This network was optimized through source area zoning, corridor classification and enhancement, and protection and restoration of strategic points to achieve the soil and water conservation goals. [Conclusion] The green infrastructure network of the Weihe River basin, constructed and optimized based on the needs of soil and water conservation, can effectively mitigate soil erosion in the basin, ensure the effectiveness of soil and water conservation, and improve ecosystem functions.

**Keywords:** green infrastructure network; morphological spatial pattern analysis (MSPA); soil erosion; Weihe River basin

伴随我国经济的稳步增长以及城镇化建设的持续演进,渭河流域面临着水土流失日益严峻的挑战,《渭河流域重点治理规划》将水土流失问题划定为当前渭河流域存在的突出问题<sup>[1]</sup>。2022年中共中央、国务院印发《黄河流域生态保护和高质量发展规划》,清晰设定“重点推进黄河流域中游的水土保持工作,强化水土流失的综合整治力度”目标。对天然林实施全方位保护,不断夯实退耕还林还草、退牧还草现有成效,发展高效旱作农业,提升水土保持整体能力<sup>[2]</sup>。绿色基础设施网络凭借其丰富的自然生态资源,成为保障渭河流域水土流失治理的关键支撑<sup>[3]</sup>。绿色基础设施网络是指由自然生态系统、自然-人工复合生态系统、生态化各项基础设施构成的空间网络,由源地、廊道、战略点3个部分组成。源地是绿色基础设施网络中具有重要生态功能的核心区域,其通过植被和土壤的拦截、存储和渗透作用,能够有效调节降雨径流,减少地表径流的形成,降低水土流失的风险。廊道作为连接源地或不同生态区域的绿色通道,其中植被和地形可以有效阻隔地表径流,减弱水流对土壤的冲刷作用,减轻水土流失程度。战略点是生态系统的关键节点,通过实施重点保护和修复措施,能够有效提升区域水土保持能力<sup>[4-5]</sup>。三者共同组成的绿色基础设施网络能够维护生态环境质量,是保障区域水土环境可持续发展的核心支撑。

国内绿色基础设施网络的研究起源于21世纪初,已逐步构建出“社区—城市—区域”的多尺度研究体系。社区尺度绿色基础设施网络以满足社区居民日常游憩需求,提供社区生态服务为核心,研究侧重于空间可达性与资源分配公平性。城市尺度绿色基础设施网络侧重通过绿地的综合协调功能缓解城市生态问题,研究多从供需协调视角出发,构建自然

生态与人文游憩复合的城市绿色网络。区域尺度绿色基础设施网络以解决跨域生态环境问题,保障区域生态安全为目标,研究重点在于区域生态安全格局的构建<sup>[6-8]</sup>。而流域尺度作为连接各尺度的关键层级,既是微观生态要素功能整合的空间载体,亦是宏观生态格局落地实施的转化媒介,已成为绿色基础设施网络研究中亟待深化探索的重要方向。渭河流域是黄土高原生态脆弱区水土流失治理的典型流域,现有绿色基础设施网络研究已形成一定积累,研究聚焦于生境质量、水源涵养等生态系统服务要素评价与网络构建优化的关联分析,在一定程度上实现了二者的有效衔接<sup>[9-10]</sup>。然而,当前研究多集中于单一生态功能评估,对网络整体格局及多重服务的协同效应尚存拓展空间,优化策略在结合流域城镇化进程与水土流失等现实约束条件方面,仍有进一步深化的空间。

研究方法方面,现有研究主要基于景观生态学原理的“源地—廊道—战略点”的基本构建范式,运用形态学空间格局分析、最小累积阻力模型、电路理论模型等方法,进行绿色基础设施网络构建<sup>[11-13]</sup>。源地识别方面,形态学空间格局分析法(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)能够快速、精确地识别和分类景观要素,为构建绿色基础设施网络提供准确的空间信息。然而,形态学空间格局分析法侧重于景观的结构连通性分析,在评估同种类型斑块的生态质量差异方面存在不足。生态系统服务和权衡的综合评估模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs, InVEST)依托景观要素的功能属性,对生态系统服务的重要程度开展定量评价,能够兼顾多种因素,量化评估生境质量,揭示不同区域的生境质量差异,弥补形态学空间格局分析

局限,为源地的识别提供更精准的科学依据<sup>[14-15]</sup>。廊道与战略点构建方面,电路理论模型能够模拟生态流的随机扩散行为,评估多种分散路径在网络中的表现,从而识别出连通性较好的廊道路径,能够直观反馈生态廊道及节点的相对重要性。但是,电路理论模型模拟的生态廊道阈值取决于电流值频率分布,很难定义高电流范围,限制了廊道确定的准确性。最小累积阻力模型(minimum Cumulative Resistance Model, MCR)能够通过计算生态流在景观中传播的最小累积阻力路径,识别生态源地的最优连接路径,明确生态廊道的走向并对廊道的确定提供量化方法<sup>[16-17]</sup>。因此,将MSPA, InVEST模型、MCR模型与电路理论相结合,能够全面考量景观结构与功能的连通特征,提升对绿色基础设施源地、廊道及战略点识别的精确性,更科学地构建绿色基础设施网络。

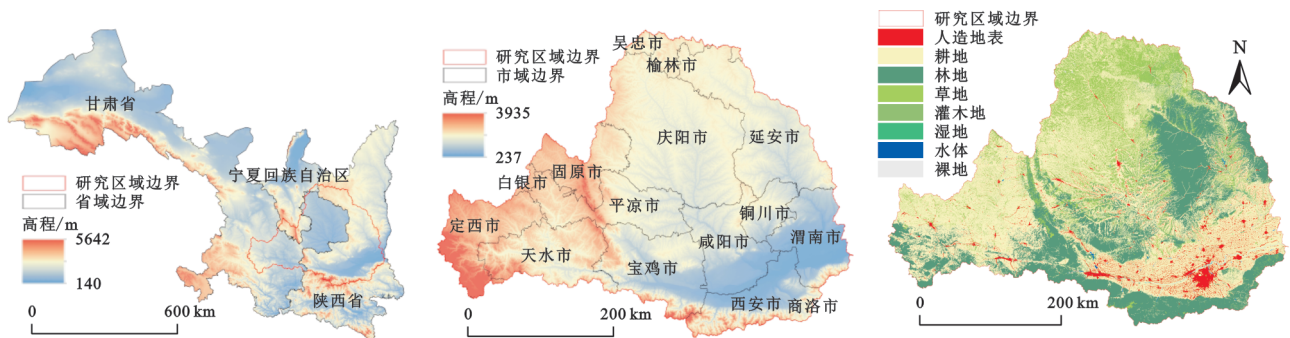
该研究以渭河流域为研究对象,结合流域水土流失现状,采用MSPA和InVEST模型综合识别绿色基础设施源地,借助MCR模型与电路理论模型提取生态廊道并识别其中的战略点,进而构建2020年渭河流域绿色基础设施网络并提出优化对策,旨在为渭河流域绿色基础设施网络的提质增效提供科学参考与可行性建议,使其能更有效地服务于水土流失治理工作,进而推动区域水土环境持续健康发展。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

渭河流域位于北纬 $103^{\circ}58'18''$ — $110^{\circ}16'58''$ ,东经 $33^{\circ}41'47''$ — $37^{\circ}24'30''$ ,流经甘肃省、陕西省与宁夏

回族自治区,干流全长818 km,流域总面积134 766  $\text{km}^2$ (图1)。流域处于大陆性季风气候区域,坐落于干旱与半湿润区域过渡地带,年均气温 $9.8^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量540 mm。渭河流域地处华北地台与秦岭造山带过渡带,地质构造复杂,以第四纪疏松黄土为主,黄土层遇水易崩解。受地质条件影响,流域地貌垂直分异显著,上游陇中高原多黄土丘陵沟壑,地形起伏大。中下游关中平原为冲积平原,地势平坦,地形差异为地表径流的侵蚀作用提供动力条件。流域土壤以黄土性土为主,粉砂占比50%~70%,黏粒<20%,抗蚀性差且遇水易分散,侵蚀敏感性高。流域植被呈“南丰北缺”空间分布,南部秦岭山区覆盖率超70%,以落叶阔叶林和针叶林为主;上游丘陵区覆盖率仅30%~40%,且多为退化草地,植被根系浅,对表土的固持能力有限。渭河流域不仅是国家“两屏三带”生态安全战略格局中黄土高原—川滇生态屏障的关键组成部分,也是黄河最大的支流流域,对西北地区乃至全国的生态平衡起到关键支撑作用。但是,在地质地貌、土壤植被等自然因素与土地不合理利用等人为因素的共同影响下,渭河流域成为黄河流域水土流失最严重的地区之一。根据统计,渭河流域水土流失面积达4.8万 $\text{km}^2$ ,约占流域总面积35.6%。多年平均输沙量4.58亿t,是黄河泥沙的主要来源地之一。中度以上侵蚀强度面积达3.36万 $\text{km}^2$ ,占水土流失总面积的70%。流域水土流失现状呈现出面积广、侵蚀强度大等特征。流域内每年因水土流失导致耕地退化约800  $\text{hm}^2$ ,泥沙淤积使渭河下游河床年均抬高2~3 cm,洪涝风险不断加剧。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2023)2767号的标准地图制作,底图未做修改,下图同

图1 研究区区位及土地覆被现状

Fig. 1 Location and current land cover of study area

### 1.2 数据来源与处理

研究使用的数据包括来源于全国地理信息资源目录服务系统的2020年土地覆被数据、高程数据与边界数据。国家地球系统科学数据中心的2020年归一化植被指数数据、土壤数据。OpenStreetMap的2020年

路网与水系数据,国家气象科学数据中心的2020年气温、降水量与蒸散量数据。具体数据信息见表1。所有数据均经过标准化处理,统一采用WGS1984坐标系。依据相关标准将土地覆被数据分为耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、人造地表和裸地8类。

表 1 数据说明与来源  
Table 1 Data description and sources

数据名称	数据类型	分辨率/m	数据来源
土地覆被数据	栅格数据	30	全国地理信息资源目录服务系统( <a href="https://www.webmap.cn">https://www.webmap.cn</a> )
高程数据	栅格数据	30	
边界数据	矢量数据	—	
归一化植被指数	栅格数据	1000	国家地球系统科学数据中心( <a href="https://www.geodata.cn">https://www.geodata.cn</a> )
土壤数据	栅格数据	1000	
路网数据	矢量数据	—	OpenStreetMap( <a href="https://www.openstreetmap.org">https://www.openstreetmap.org</a> )
水系数据	矢量数据	—	
气温数据	栅格数据	1000	国家气象科学数据中心( <a href="https://data.cma.cn">https://data.cma.cn</a> )
降水量数据	栅格数据	1000	
蒸散量数据	栅格数据	1000	

## 2 研究方法

### 2.1 绿色基础设施源地识别与分级

源地作为绿色基础设施网络中承担关键生态功能的核心生态单元,其植被能够固定土壤,削减地表径流,减少水土流失,是水土保持的关键区域。研究首先采用 MSPA 识别绿色基础设施构成要素,同时结合 InVEST 模型,对与流域水土状况紧密相关的土壤保持、水源涵养、生境质量、碳储量 4 项生态系统服务功能展开分析评估。将绿色基础设施要素识别结果与生态系统服务功能评估结果进行叠加处理,在此基础上借助景观连通性评价,选取生态服务重要性与连通性较强的区域作为绿色基础设施源地,并划分源地重要性等级。

2.1.1 基于 MSPA 的绿色基础设施要素识别 MSPA 是一种基于数学形态学运算的景观格局识别方法,其核心原理是通过腐蚀、膨胀等形态学操作,对二进制(前景/背景)景观图像进行空间结构解析,从而将景观划分为具有明确生态意义的空间类型。该方法能有效剥离景观中的核心功能区域与边缘、破碎化部分,为识别关键生态空间提供量化依据<sup>[18]</sup>。Guidos Toolbox 软件是用于 MSPA 分析的专业工具,为 MSPA 分析提供从数据预处理到结果输出的完整技术路径。在 Guidos Toolbox 的 MSPA 模块中,选择合适的邻域规则,自动执行形态学操作,精准识别出核心区、孤岛、穿孔、边缘、桥接区、环道、分支 7 类景观类型,为绿色基础设施网络的源地筛选、廊道识别等核心环节提供扎实的数据支撑<sup>[19]</sup>。研究结合流域基本条件,将流域内具有重要生态功能的林地、草地、灌木地、湿地及水体区域作为前景,将耕地、人造地表与裸地作为背景,通过 Guidos Toolbox 软件采用八邻域分析法对土地覆被数据进行处理,识别出各

类景观类型,最终得到研究区域景观要素识别结果。

2.1.2 基于 InVEST 的生态系统服务重要性评价 InVEST 模型作为一款开源生态评估工具,包含多个生态系统服务评估模块,通过输入土地覆被、气候、土壤、地形等基础数据,模拟生态系统的关键过程,进而量化这些过程所提供的生态系统服务。其核心优势在于通过标准化算法与多源数据输入,将复杂的生态过程量化为可比较的生态系统服务量化指标,进而实现对不同景观单元生态功能的定量化评估,精准识别出对水土流失治理具有关键意义的核心区域<sup>[20]</sup>。研究聚焦渭河流域水土流失治理需求,运用 InVEST 模型针对与水土流失密切相关的土壤保持、水源涵养、生境质量及碳储量 4 项服务分别开展评估。为整合各项生态系统服务评估结果,综合考虑不同生态系统服务单位差异较大、赋值主观性较强等限制因素,最终选择等权叠加法对生态系统服务重要性进行评价,具体评价方法详见表 2。

2.1.3 基于 Conefor 的绿色基础设施源地识别与分级 景观连通性指景观中不同生态要素相互联系与作用的能力,是划定源地等级的主要依据<sup>[21]</sup>。Conefor 软件作为一款基于图论的景观连接度分析工具,其通过构建“斑块—连接”的网络模型,计算多种连通性指数,量化景观斑块间的连接强度及单个斑块对整体连通性的贡献,为识别关键生态斑块提供科学依据<sup>[22]</sup>。研究使用 Conefor 软件,结合研究区域情况,参考相关研究进行多次测验,最终确定最佳距离阈值为 1 500 m,连通概率为 0.5,选择景观可能概率指数(Landscape Coincidence Probability, LCP)、可能连通性指数(Probability of Connectivity, PC)、整体连通性指数(Integral Index of Connectivity, IIC)3 种指标综合评价景观连通性(表 3),选取连通性较高且面积大于 50 km<sup>2</sup>的斑块作为绿色基础设施源地,并依据连通性水平划分源地等级。

表 2 生态系统服务重要性评价方法  
Table 2 Evaluation methods for importance of ecosystem services

生态系统服务类型	计算公式	指标说明
土壤保持	$RKLS_n = R_n \times K_n \times L_n \times S_n$ $USLE_n = RKLS_n \times C_n \times P_n$ $SK_n = RKLS_n - USLE_n$	RKLS <sub>n</sub> 为潜在土壤侵蚀量;USLE <sub>n</sub> 为实际土壤侵蚀量;SK <sub>n</sub> 为土壤保持量;R <sub>n</sub> 为降雨侵蚀力;K <sub>n</sub> 为土壤可蚀性;L <sub>n</sub> 为坡长因子;S <sub>n</sub> 为坡度因子;C <sub>n</sub> 为植被覆盖和管理因子;P <sub>n</sub> 为水土保持措施因子
水源涵养	$WR_{ij} = Y_{ij} - RO_{ij}$ $RO_{ij} = P_{ij} \times C_j$	WR <sub>ij</sub> 是单位年水源涵养量;Y <sub>ij</sub> 是单位年产水量;RO <sub>ij</sub> 是单位年地表径流量;P <sub>ij</sub> 是单位年降水量;C <sub>j</sub> 是单位地表径流系数
生境质量	$Q_{xj} = H_j \left( 1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right)$	Q <sub>xj</sub> 为土地利用类型j中单元栅格x上的生境质量;D <sub>xj</sub> 为土地利用类型j中单元栅格x所受胁迫水平;k为半饱和常数;H <sub>j</sub> 为土地利用类型j的生境适宜性;z为归一化常量
碳储量	$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}$	C <sub>total</sub> 为碳储量;C <sub>above</sub> 为地上碳储量;C <sub>below</sub> 为地下碳储量;C <sub>soil</sub> 为土壤碳储量;C <sub>dead</sub> 为枯落物碳储量

表 3 景观连通性评价方法  
Table 3 Evaluation methods for landscape connectivity

景观连通性指标	计算公式	指标说明
景观可能概率指数	$LCP = \sum_{i=1}^{N_c} \left( \frac{C_i}{A_L} \right)^2$	N <sub>c</sub> 为研究区中关键生态要素的个数;C <sub>i</sub> 表示生态关键要素区域的面积总和;A <sub>L</sub> 为景观L总面积
可能连通性指数	$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n P_{ij} A_i A_j}{AL^2}$	n为斑块总数;A <sub>i</sub> 、A <sub>j</sub> 分别为斑块i、j的面积;AL为景观总面积;P <sub>ij</sub> 表示物种在斑块i、j间扩散的最大距离
整体连通性指数	$IIC = n \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i a_j}{1 + nl_{ij}}}{AL^2}$	n为斑块总数;nl <sub>ij</sub> 为斑块i和斑块j之间的连接数量;a <sub>i</sub> 和a <sub>j</sub> 分别为斑块i和斑块j的面积;AL为景观总面积

2.2 绿色基础设施廊道提取与分级

2.2.1 基于MCR模型的生态阻力面构建 生态阻力面由多种阻力因素叠加构成,可量化不同区域的阻力值,是提取生态廊道的基础<sup>[23]</sup>。MCR模型是一种用于分析景观对生态过程阻碍程度的模型,其核心原理基于“源—阻力面”理论,模拟物种从源地向目标地迁移时所面临的最小累积阻力,以此量化分析景观对生态过程的阻碍程度,为生态廊道提取提供量化路径<sup>[24]</sup>。该模型能够对阻力面进行细化分析,识别出生态系统中的高阻力值和低阻力值区域,为生态廊道的精准规划提供支持。其计算公式为:

$$MCR = f \min \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (1)$$

式中:f为正函数;D<sub>ij</sub>为生态源地i到景观单元j的距离;R<sub>i</sub>为景观单元i的生态阻力系数;m为栅格单元总数;n为源地总数。

研究结合相关文献和渭河流域的生态特性,基于MCR模型,选择土地覆被类型、高程、坡度、归一化植被指数、距道路距离、距河流距离6类数据作为生态阻力面构建因素(图2)。分别对各阻力因子赋值,采用层次分析法确定各阻力因子权重,分级指标及权重详见表4。

2.2.2 基于电路理论模型的绿色基础设施廊道提取与分级 电路理论是一种将生态景观类比为“电路网络”的分析方法,将源地视为电路中的“电极”,景观单元对生态流的阻力类比为电路中的“电阻”,生态流的扩散过程则类似于电子在电路中沿着电阻最小的路径流动,且可通过多个并行路径同时流动,克服传统单一路径分析的局限性<sup>[25]</sup>。Linkage Mapper工具基于电路理论,整合生态源地数据与阻力面信息,模拟物种或生态流在景观中的迁移路径,进而识别潜在的低阻力生态廊道,并量化廊道的连通性特征,可系统性支撑生态网络的构建与评估<sup>[26]</sup>。Centrality Mapper模块作为Linkage Mapper工具中的重要组成部分,通过模拟生态流在源地间流动时各廊道承担的电流负荷,计算电流中心性,以此量化廊道的重要性<sup>[27]</sup>。研究基于电路理论,运用Linkage Mapper工具整合已识别的绿色基础设施源地与生态阻力面,构建不同源地间的低阻力生态廊道。调用工具中的Centrality Mapper模块计算生态廊道的中心性,确定景观连通性程度,划分廊道重要性等级。

2.3 绿色基础设施战略点选取

战略点是指在绿色基础设施网络中具有关键生

态功能与重要战略意义的节点或区域,包括生态夹点与障碍点两种类型。生态夹点是生态廊道中对维持连通性极为关键的区域,生态阻力较低,是生态流通过的主要通道。障碍点是对生态流传输过程构成较大阻碍的区域,会增加生态流通过的阻力,降低生态系统间的连通性<sup>[28-29]</sup>。Pinchpoint Mapper模块是用于识别生态夹点的专业工具,其基于电路理论模

拟生态流在廊道中的分布,通过计算电流密度识别承担大量生态流传输功能的高电流区域作为生态夹点。Barrier Mapper模块则聚焦于障碍点识别,通过分析生态流受阻前后的电流恢复率,将对生态流构成较强阻碍的高累积电流恢复区定位为障碍点<sup>[30]</sup>。研究采用Pinchpoint Mapper模块和Barrier Mapper模块分别识别渭河流域的生态夹点与障碍点。

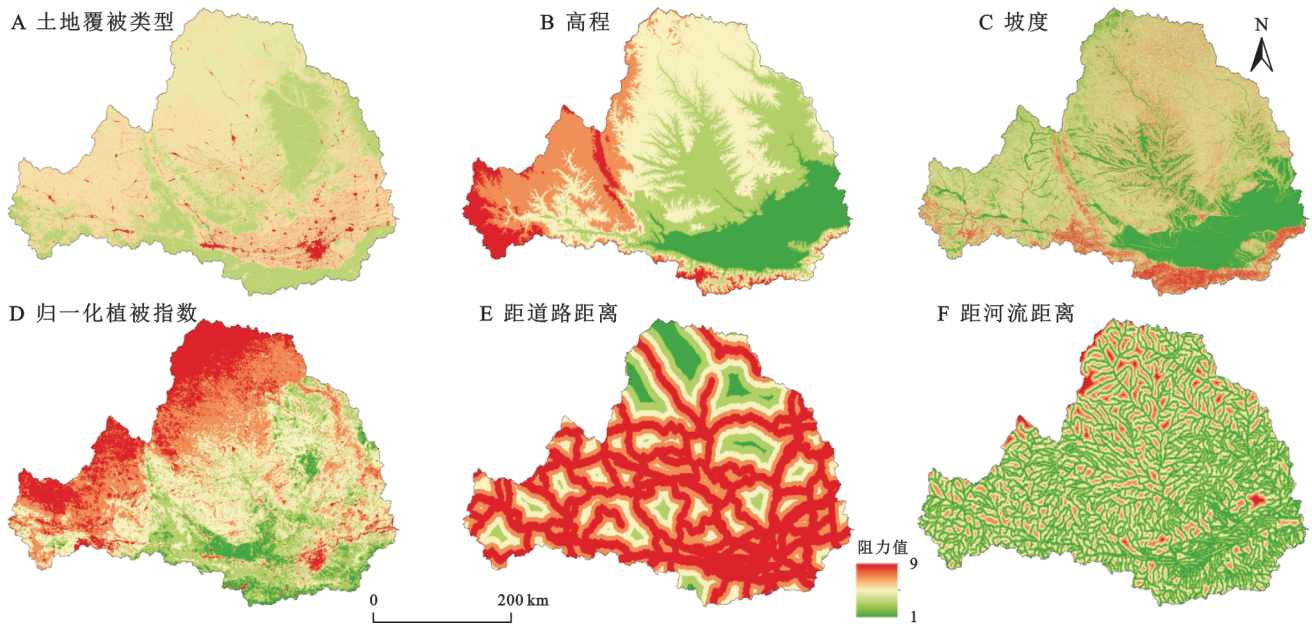


图2 研究区各阻力因子

Fig. 2 Resistance factors of study area

### 3 结果与分析

#### 3.1 绿色基础设施源地识别与分级结果

3.1.1 绿色基础设施要素识别分析 研究基于MSPA分析共识别出2020年渭河流域绿色基础设施64 800.09 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的48.10%(图3)。其中核心区面积为34 124.86 km<sup>2</sup>,占绿色基础设施面积的52.66%。核心区作为生态系统中具有相对完整生态功能的关键区域,是绿色基础设施的潜在源地。主要分布于秦岭、陇东高原、卧牛山、黄龙山、六盘山、陇山及子午岭等地区。秦岭山脉、黄龙山、六盘山、陇山及子午岭地区的核心区规模较大、形态相对完整,整体性强。黄土高原中部、陇东高原及卧牛山地区核心区面积较小、形态相对分散,破碎化程度高。边缘面积为8 889.24 km<sup>2</sup>,占绿色基础设施面积的13.72%,表明核心区抵御外部干扰能力较强。桥接、支线与环岛是构成物质交流运输通道、连接各核心区形成整体绿色基础设施的关键要素。其面积分别为8 908.27 km<sup>2</sup>,6 365.01 km<sup>2</sup>与3 443.41 km<sup>2</sup>,占绿色基础设施面积的13.75%,9.82%与5.31%。零散分布于黄土高原中部及渭河干、支流沿岸地区,导致

核心区连通性较弱。其他要素类型面积占比较小,边缘、孔隙面积分别为1 917.70 km<sup>2</sup>与1 151.60 km<sup>2</sup>,分别占绿色基础设施面积的2.96%与1.78%。

3.1.2 生态系统服务重要性分析 将水土保持、水源涵养、生境质量和碳储量4种生态系统服务评价结果等权叠加得到2020年渭河流域生态系统服务重要性综合评价结果(图4)。将结果划分为高、较高、中等、较低、低5个等级。结果显示:渭河流域生态系统服务重要性高和较高区域面积为65 009.09 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的48.26%,主要分布于秦岭、六盘山、陇山与子午岭等区域,区域用地类型以林地与草地为主,该区域植被根系发达、覆盖度高,能够有效涵养水源、保持水土。生态系统服务重要性中等区域面积为50 303.39 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的37.34%,主要分布于陇中高原、黄土高原中部及陇东高原部分区域,区域用地类型以草地与耕地为主,为核心生态空间保护提供缓冲带,以维持区域生态系统的稳定和平衡。生态系统服务重要性低与较低区域面积为19 397.63 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的14.40%。主要土地类型为人工地表与裸地,主要分布于渭河沿岸的城市建成区。区域内人类活动频繁、自然要素覆盖度较低、生态系统破碎。

表 4 阻力因子赋值及权重

Table 4 Assignment values and weights of resistance factors

阻力因子	分级指标	阻力值	权重
土地覆被类型	水体	1	0.382
	湿地	2	
	林地	3	
	草地	4	
	耕地	5	
	灌木地	6	
	裸地	7	
	人造地表	9	
	高程/m	237~800	
800~1300		3	
1300~1700		5	
1700~2200		7	
2200~3935		9	
坡度/(°)	<7.5	1	0.051
	7.5~15.0	3	
	15.0~22.0	5	
	22.0~30.0	7	
	30.0~76.8	9	
归一化植被指数	>0.5	1	0.213
	0.4~0.5	3	
	0.3~0.4	5	
	0.2~0.3	7	
	<0.2	9	
距道路距离/km	34.5~62.5	1	0.097
	22.0~34.5	3	
	12.5~22.0	5	
	5.5~12.5	7	
	<5.5	9	
距河流距离/km	27.0~51.0	1	0.071
	18.0~27.0	3	
	11.0~18.0	5	
	5.0~11.0	7	
	<5.0	9	

3.1.3 绿色基础设施源地识别与分级 研究将绿色基础设施要素识别结果与 InVEST 模型分析结果进行综合分析,从中筛选出整体结构完整且生态系统服务重要性较高的区域作为 2020 年渭河流域绿色基础设施源地(图 5)。借助 Conefor 软件对这些区域开展景观连通性评价,依据渭河流域现状特征与相关研究成果,最终筛选出景观连通性较高的 23 处核心区确定为绿色基础设施源地,总面积 24 566.06 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 18.24%,用地类型以林地为主。以 LCP, PC 与 IIC 为指标,将源地分为三级。LCP, PC, IIC 均

大于 10 的源地为核心源地,共 4 处,总面积 24 566.06 km<sup>2</sup>。主要分布于秦岭、六盘山西侧、陇山与子午岭等大面积森林区域,源地面积广阔、形态完整、生态重要性高。LCP, PC, IIC 均在 0.5~10 的源地为重要源地,共 10 处,面积 2 190.49 km<sup>2</sup>。主要分布于六盘山东侧、黄龙山区域,生态重要性较高,对核心源地起辅助支撑作用。LCP, PC, IIC 均小于 0.5 的源地为一般源地,共 9 处,面积 3 064.48 km<sup>2</sup>。主要分布于首阳山、岐山、千山与陇东高原部分区域,源地面积小、分布分散、生态重要性较低。各源地景观连通性详见表 5。

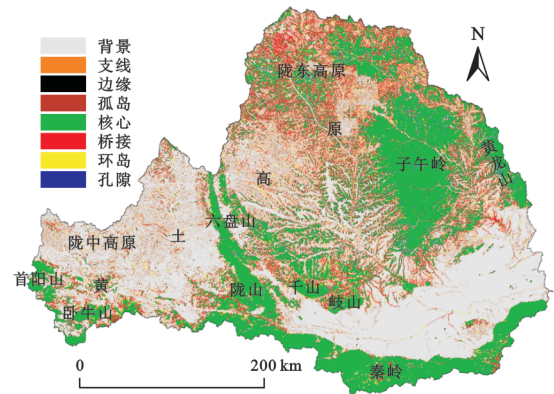


图 3 2020 年渭河流域 MSPA 景观要素分析结果  
Fig. 3 Analysis results of MSPA landscape elements in Weihe River Basin in 2020

### 3.2 绿色基础设施廊道提取与分级结果

3.2.1 生态阻力面分析 基于 ArcGIS 软件分析多重阻力因素,构建 2020 年渭河流域生态阻力面,并计算研究区综合阻力值(图 6A)。结果显示,渭河流域综合阻力值为 1.58~7.37,整体表现出西北高东南低的特征。阻力值较高的区域主要分布于关中平原城市建设区、陇中高原、陇东高原与黄土高原中部,主要用地类型为 人造地表与耕地,土地开发强度高、人类活动强度大,生态环境压力较大。阻力值较低的区域主要分布于秦岭、陇山、黄龙山及子午岭等山林地区,植被丰富、人类活动较少,对自然的影响程度较低,生态环境压力较小。

3.2.2 绿色基础设施廊道提取与分级 综合 2020 年绿色基础设施源地与生态阻力面构建结果,研究基于 MCR 模型,使用 Linkage Pathways Tool 模块共提取生态廊道 46 条,总长度 3 588.59 km,主要分布在流域内地形较低的河谷、平原地带(图 6B)。由于流域中部生态条件较好、地形较为平坦,廊道呈现中部密集东西稀疏的空间分布。为更精确地对生态廊道进行保护和修复,使用 Centrality Mapper 模块计算廊道中心性,以此判断廊道重要性等级,将廊道划分为一级廊道、二级廊道与三级廊道。共识别一级廊道 6 条,总长度 172.45 km,占总长度的 4.81%,廊道平均

长度较短,主要分布在六盘山、陇山等源地集中区域,在短距离源地建立网络核心骨架。二级廊道 9 条,总长度 529.87 km,占总长度的 14.76%,廊道平均长度适中,主要分布在六盘山—陇山—千山、子午岭—

黄龙山源地连接区域,延伸一级廊道以构建网络主体框架。三级廊道 31 条,总长度 2 886.26 km,占总长度的 80.43%,廊道平均长度较长,连接流域各级源地,增强网络整体覆盖范围和连通性。

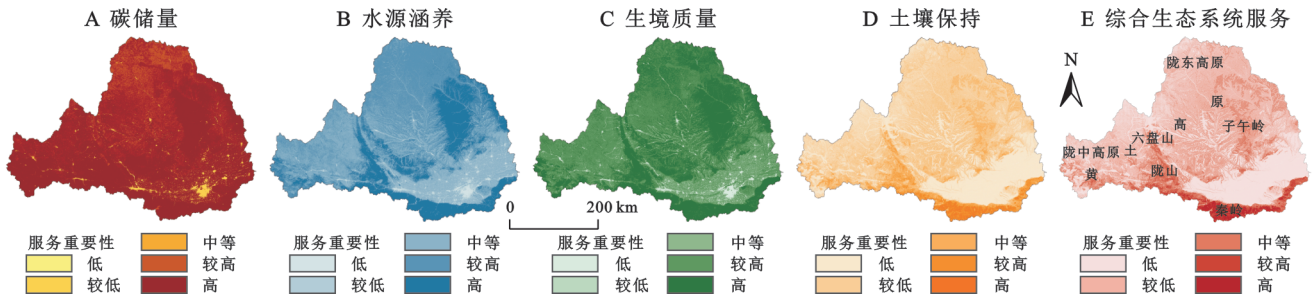


图 4 2020 年渭河流域生态系统服务重要性评价结果

Fig. 4 Evaluation results of ecosystem service importance in Weihe River Basin in 2020

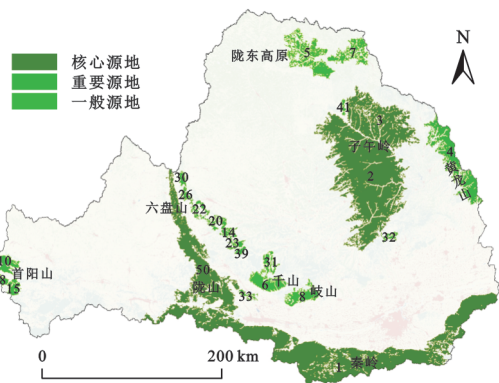


图 5 2020 年渭河流域绿色基础设施源地识别及分级结果

Fig. 5 Identification and classification results of green infrastructure sources in Weihe River Basin in 2020

### 3.3 绿色基础设施战略点选取

调用 Circuitscape 程序,结合 Pinchpoint Mapper 模块,使用多对一模式提取 2020 年研究区电流密度分布,将电流密度由高到低分为 5 类,选取电流密度最高的一类与生态廊道叠加,获得生态夹点区域。共识别出生态夹点 63 处,总面积 10 936.82 km<sup>2</sup>,其土地类型以林地、草地、湿地与水体为主,集中分布在流域中部源地集中、生态流通频繁的六盘山、陇山与子午岭区域周边。结合 Barrier Mapper 模块进行 2020 年生态廊道累积电流恢复模拟,将累积电流恢复值由高到低分为 5 类,选取电流恢复密度最高的一类与生态廊道叠加,获得障碍点区域。共识别出障碍点 35 处,总面积 17 414.43 km<sup>2</sup>,其土地类型以人造地表与耕地为主,集中分布在地形起伏较大的陇中高原与人类活动密集、开发强度大的关中平原区域(图 6C—D)。

### 3.4 绿色基础设施网络构建结果

在充分考虑渭河流域生态本底条件与水土流失治理需求的前提下,将绿色基础设施源地、廊道与战略点进行组合(图 6E)。形成以秦岭、六盘山、陇山及

子午岭为代表、以林地为主要构成的多个源地中心,与沿流域内地形较低的河谷、平原地带分布的廊道相互连接、彼此渗透,共同构成“三横、两纵、多中心”的 2020 年渭河流域绿色基础设施网络。通过生态电流与廊道叠加分析识别出的生态夹点与障碍点,也为廊道在各源地中心间的连通提供关键节点,进一步保障绿色基础设施网络的稳定性,从而提升网络水土保持能力。

表 5 源地景观连通性统计

Table 5 Statistics of landscape connectivity of source areas

重要等级	源地编号	源地面积/km <sup>2</sup>	景观可能概率指数	可能连通性指数	整体连通性指数
核心源地	1	7794.23	60.32	58.93	63.45
	2	6390.54	34.43	34.73	30.97
	50	2764.87	26.56	29.19	18.92
	3	2361.44	17.46	17.57	11.53
重要源地	26	84.44	7.07	2.36	2.20
	22	95.44	5.46	1.95	1.42
	20	112.54	4.52	1.76	1.06
	14	174.06	3.40	1.31	0.74
	23	92.50	1.59	0.50	0.52
	4	1348.04	0.86	2.20	0.99
	30	79.00	0.84	0.69	0.62
	33	73.57	0.78	1.64	0.44
	32	73.88	0.62	0.51	0.53
	39	57.01	0.61	0.59	0.51
一般源地	41	51.22	0.43	0.37	0.19
	5	928.31	0.41	0.40	0.47
	6	557.48	0.31	0.26	0.25
	8	410.16	0.16	0.38	0.14
	18	131.87	0.14	0.06	0.07
	10	269.09	0.13	0.08	0.08
	15	163.95	0.12	0.09	0.06
	7	476.62	0.11	0.18	0.12
31	75.78	0.10	0.22	0.05	

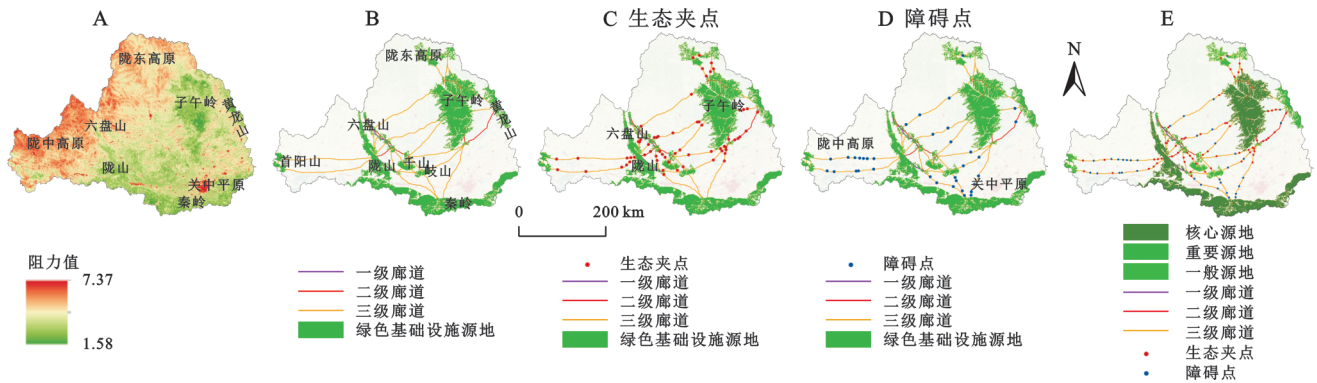


图6 2020年渭河流域生态阻力面构建(A)、绿色基础设施廊道提取及分级(B)、战略点选取(C,D)、网络构建结果(E)

Fig. 6 Construction results of ecological resistance surface(A), extraction and classification results of green infrastructure corridors(B), selection results of green infrastructure strategic points(C,D), construction results of green infrastructure network(E) in Weihe River Basin in 2020

## 4 基于水土流失治理的绿色基础设施网络优化策略

### 4.1 绿色基础设施源地分区优化

绿色基础设施源地通过植被覆盖、土壤固定与地表径流调节等多重功能,为水土流失治理提供天然屏障,是水土流失治理的关键区域。研究根据分级结果对源地进行分区优化,依据各级源地特点与在水土治理中承担的作用,将核心源地划定为核心涵养区,重要源地划定为重点调节区,一般源地划定为基础修复区。

核心涵养区主导关键生态过程,作为渭河流域水土治理的中心地带,具有不可替代性。应严格保护现有森林植被,通过对范围内疏林地、宜林荒山荒地实施人工造林或飞播造林等措施,提高林地覆盖率。对秦岭北麓、子午岭河谷等区域的陡峭坡体与破碎山体,采用“工程固坡+立体植被配置”模式,在坡顶线外设置截水沟,坡体采用菱形网格梁固定破碎岩体,网格内回填改良土,种植油松、绣线菊与葛藤等植被,形成复合防护体系。

重点调节区强化和补充核心涵养区的生态服务功能,与核心涵养区协同提升网络水土治理效能。应在靠近核心涵养区的区域,采用乔、灌、草相结合的方式,营造多层植被结构,通过多层次植被的协同作用,与核心涵养区紧密配合,共同发挥水土涵养作用。在黄土高原区域的重要源地修建水平梯田,梯田内采用“苜蓿+红豆草”混播模式,梯田上坡缘种植沙棘灌木带减缓坡面径流,下坡缘设置土埂拦截泥沙,减少入河泥沙量。

基础修复区为局部区域提供必要的生态服务,为网络提供广泛的基础支撑。对于退化严重的陇东高原草地,优先选用适应性较强的羊草与赖草,采取种子播种、植株补种、人工促进天然更新等措施,恢复草

地生态。对土壤结构退化的黄土高原丘陵区,实施深耕、客土回填与掺入秸秆碎料等措施,改善土壤结构。

### 4.2 绿色基础设施廊道分级优化

绿色基础设施廊道通过连接生态源地、增强网络连通性,有助于提升生态系统的自我修复能力,进一步增强水土保持功能,为水土流失治理提供生态纽带。研究结合流域环境特征,分别对一、二、三级廊道进行优化。

一级廊道是廊道系统的核心框架,对渭河流域水土保持起着源头保护和生态屏障作用。以六盘山—陇山段廊道为例,应以保障廊道连通性和提升廊道质量为目标,依据水土涵养需求与地形特征划定廊道宽度,在其外围种植油松、华北落叶松等乡土针叶树种构建防护林缓冲带,确保一级廊道的空间连通性。加强一级廊道植被管理,针对六盘山山麓的裸露坡地和陇山溪谷的植被退化区,优先种植披碱草、早熟禾等耐旱草本,配植山杨、白桦等落叶乔木形成“乔—灌—草”立体结构,以增强廊道生态质量。

二级廊道作为一级廊道的补充,是一级廊道的延伸与缓冲,进一步增强廊道系统水土流失拦截能力。以子午岭—黄龙山段廊道为例,应以强化廊道韧性为目标,将廊道划分为干旱区与湿润区,湿润区采用辽东栎、鹅耳枥等落叶阔叶乔木搭配绣线菊灌丛,干旱区采用杜松、侧柏等耐旱针叶树与沙棘灌丛组合,形成梯度植被配置以适应水土流失动态变化。在子午岭与黄龙山衔接处的沟谷汇水区设置生态强化区,采用蜂巢格室固土技术,格室内混播草木樨草种,强化关键区域水土保持适应能力。

三级廊道通过与二级廊道相连,将生态网络延伸到整个流域,是廊道系统的基础支撑。以黄土高原沟壑区段廊道为例,应以保护脆弱廊道为目标。规划建设时顺应“塬—坡—沟”三级地貌特征,将廊道线路沿沟道主轴线布设,避开塬面边缘的优质耕

地和沟谷谷底的天然淤池,在沟头位置修筑土谷坊拦截泥沙,减少水土流失。

### 4.3 绿色基础设施战略点保护与修复

生态夹点保护能够有效提升生态系统服务功能,降低水土流失风险。由于生态夹点所处环境复杂,易受各类因素干扰和破坏,应采取保护优先的优化目标,针对渭河流域内生态夹点的不同土地利用类型,制定相应的保护策略。以林地为主的六盘山—陇山浅山区,应实施封山育林,划定核心保护区,设置物理围栏,禁止采伐、放牧、开垦及矿产开采等人为活动。采用“块状抚育”模式,清除病死树木,保护现有华北落叶松、山杨等林地植被。以草地为主的子午岭东段,应通过围栏封禁,并补播冰草、羊草等乡土草种,形成复合草地防护体系,增强生态稳定性和水源涵养能力。以湿地及水体为主的千湖湿地保护区,应保护湿地缓冲带,在浅水区种植菹草、眼子菜等沉水植物,滨岸带种植香蒲、水葱等挺水植物,形成自然生态屏障。

生态障碍点修复可降低水流冲刷力、增强土壤稳定性,减少流域水土流失压力,应采取功能恢复的优化目标。以耕地为主的关中平原地区,应推广保护性耕作技术,针对小麦、玉米种植区保留部分秸秆覆盖地表,针对果园种植区,在果树行间套种毛苕子、箭筈豌豆等绿肥植物,改善土壤结构。以人造地表与裸地为主的关中平原城市建成区,由于已形成大面积城市建成区,应注重内部生态点修复。在城市内部建设雨水花园,种植鸢尾、萱草、千屈菜等耐涝植物。设置生态树池,种植法桐、女贞等乔木,搭配麦冬等地被植物,改善建成区整体水文条件,降低水流冲刷风险。

## 5 结论

(1) 基于MSPA与InVEST模型共识别出渭河流域绿色基础设施源地23处,总面积24 566.06 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的18.24%。以景观可能概率指数、可能连通性指数与整体连通性指数为判断指标,将源地划分为三级,分别为分布在秦岭、六盘山西侧、陇山与子午岭区域的核心源地,分布在六盘山东侧、黄龙山区域的重要源地和分布在卧牛山、千山、岐山与黄土高原北部区域的一般源地。分别采用核心涵养、重点调节与基础修复等策略对其进行优化。

(2) 基于MCR模型计算研究区阻力值并构建生态阻力面,流域综合阻力值整体表现出西北高东南低的特征,阻力值较高的区域主要分布于关中平原城市建设区、陇中高原及陇东高原区域。运用MCR

模型计算最小阻力路径,共提取46条生态廊道,总长3 588.59 km,呈现中部密集东西稀疏的空间分布。以廊道中心性为判断指标,将廊道划分为3级,分别为连接六盘山各核心源地的一级廊道、连接六盘山、子午岭和黄龙山各重要源地的二级廊道与串联流域各级源地的三级廊道。分别采用提升廊道质量、强化廊道韧性和保护脆弱廊道等措施进行优化。

(3) 基于电路理论分析渭河流域电流密度与累积电流恢复分布情况,共选取生态夹点63处,总面积10 936.82 km<sup>2</sup>,主要土地类型为林地、草地、湿地与水体,集中分布在六盘山、千山与子午岭区域周围。障碍点35处,总面积17 414.43 km<sup>2</sup>,主要土地类型为耕地与人造地表,集中分布在陇中高原与关中平原区域。分别提出生态保护与功能修复等策略进行优化。

与已有研究相比,本研究耦合MSPA与InVEST模型综合识别绿色基础设施源地,既发挥MSPA快速识别景观要素的特点,又能量化不同区域的生境质量差异,为源地识别提供更精准的科学依据。同时,本研究结合多因素构建综合阻力面,并采用电路理论提取生态廊道,可更精确地模拟生态流在景观中的动态变化,提高廊道构建合理性。此外,电流密度可供具体的数值指标,直观定位网络中的生态夹点与障碍点,降低区域生态网络评估的主观偏差。尽管如此,本研究仍存在不足之处。渭河流域绿色基础设施网络受自然、社会及经济等多种动态要素影响,在时空上不断发生动态变化,研究后续应逐步完善现有研究方法,进一步挖掘渭河流域绿色基础设施网络演变特征与驱动要素,对未来渭河流域绿色基础设施网络进行预测,推动未来流域生态系统的可持续发展。

### 参考文献(References):

- [1] 冯爱萍,王琦,罗仪宁,等.渭河流域(陕西段)面源污染总磷时空特征评估[J].农业环境科学学报,2024,43(12):2776-2785.  
Feng A P, Wang Q, Luo Y N, et al. Temporal and spatial assessment of total phosphorus from non-point source pollution in Weihe River basin, Shaanxi Province [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(12): 2776-2785.
- [2] 侯雪楠,吕春娟,屠程泓,等.沿黄丘陵沟壑区水土保持生态空间分布特征及时空演化:以山西省柳林县为例[J].中国生态农业学报(中英文),2024,32(11):1914-1926.  
Hou X N, Lyu C J, Tu C H, et al. Distribution characteristics and spatiotemporal evolution of soil and water conservation ecological spaces in the hilly and gully areas along the Yellow River: a case study of Liulin County, Shanxi Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,

- 2024,32(11):1914-1926.
- [3] 邓楚雄,朱大美,聂小东,等.生态系统服务权衡最新研究进展[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(10):1509-1522.  
Deng C X, Zhu D M, Nie X D, et al. Progress of research regarding the trade-offs of ecosystem services [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(10): 1509-1522.
- [4] 刘瑞雪,林小龙,李云.基于MSPA-生境质量评估和电路理论的城市绿色基础设施网络优化研究:以深圳市为例[J].中国园林,2024,40(10):68-74.  
Liu R X, Lin X L, Li Y. Optimization of urban green infrastructure network based on MSPA-habitat quality assessment and circuit theory: Case of Shenzhen [J]. Chinese Landscape Architecture, 2024, 40(10): 68-74.
- [5] 董毓伊,冯秀丽,黄俊杰,等.国土空间生态保护修复重点区域识别研究:以宁波市为例[J].中国土地科学,2023,37(6):96-105.  
Dong Y Y, Feng X L, Huang J J, et al. Research on the identification of key areas for ecological protection and restoration: a case study on Ningbo City [J]. China Land Science, 2023, 37(6): 96-105.
- [6] 刘世梁,王清波,缪驰远,等.基于生态网络的黄河上游(四川段)水源涵养生态安全格局构建[J].北京师范大学学报:自然科学版,2024,60(3):418-426.  
Liu S L, Wang Q B, Miao C Y, et al. Ecological security patterns of water conservation in the upper reaches of the Yellow River Basin(Sichuan section) with ecological network approach [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2024, 60(3): 418-426.
- [7] 张晓瑞,刘畅,王振波.马鞍山市绿色空间生态网络的识别、构建与优化[J].安徽农业大学学报,2025,52(2):228-238.  
Zhang X R, Liu C, Wang Z B. Identification, construction and optimization of Ma'anshan city urban green space ecological network [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2025, 52(2): 228-238.
- [8] 黄勇,冯盼盼,马志杰,等.中国绿色基础设施体系建构的兴起、发展与思考[J].中国园林,2023,39(7):40-46.  
Huang Y, Feng P P, Ma Z J, et al. The rise, development and thinking of China's green infrastructure system construction [J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39(7): 40-46.
- [9] 门丹,潘竟虎.基于生态系统服务供需与拓扑结构分析的渭河流域生态网络优化[J].农业工程学报,2024,40(15):212-221,293.  
Men D, Pan J H. Optimization of the ecological network in the Weihe River Basin using supply and demand of ecosystem service and topological structure analysis [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(15): 212-221, 293.
- [10] 曾莉,李晶,李婷,等.基于贝叶斯网络的水源涵养服务空间格局优化[J].地理学报,2018,73(9):1809-1822.  
Zeng L, Li J, Li T, et al. Optimizing spatial patterns of water conservation ecosystem service based on Bayesian belief networks [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(9): 1809-1822.
- [11] Ferreira J C, Monteiro R, Silva V R. Planning a green infrastructure network from theory to practice: the case study of setúbal, Portugal [J]. Sustainability, 2021, 13(15):8432.
- [12] Huang L, Wang D R, He C L. Ecological security assessment and ecological pattern optimization for Lhasa city (Tibet) based on the minimum cumulative resistance model [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(55):83437-83451.
- [13] 黄河,余坤勇,高雅玲,等.基于MSPA的福州绿色基础设施网络构建[J].中国园林,2019,35(11):70-75.  
Huang H, Yu K Y, Gao Y L, et al. Building green infrastructure network of Fuzhou using MSPA [J]. Chinese Landscape Architecture, 2019, 35(11): 70-75.
- [14] Yang R L, Bai Z K, Shi Z Y. Linking morphological spatial pattern analysis and circuit theory to identify ecological security pattern in the Loess Plateau: taking Shuozhou City as an example [J]. Land, 2021, 10(9):907.
- [15] 王维维,温彦平,陈万旭,等.长江经济带城市绿色基建与经济发展耦合协调关系及其影响因素[J].长江流域资源与环境,2025,34(6):1208-1221.  
Wang W W, Wen Y P, Chen W X, et al. Coupling coordination relationship between urban green infrastructure construction and economic development in the Yangtze River economic belt and the influencing factors [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2025, 34(6): 1208-1221.
- [16] Shi X M, Qin M Z, Li B, et al. A framework for optimizing green infrastructure networks based on landscape connectivity and ecosystem services [J]. Sustainability, 2021, 13(18):10053.
- [17] 张文萍,庄子薛,谢梦晴,等.基于电路理论的多尺度城市热环境网络构建及格局优化:以成都市中心城区为例[J].中国园林,2023,39(4):103-108.  
Zhang W P, Zhuang Z X, Xie M Q, et al. Construction and pattern optimization of multiscale urban thermal environment network based on circuit theory: a case study of the central urban area of Chengdu [J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39(4): 103-108.
- [18] 廖启鹏,许红梅,刘欣冉.面向绿色基础设施体系优化的矿业废弃地再生研究:以大冶为例[J].地质科技通报,2021,40(4):214-223.

- Liao Q P, Xu H M, Liu X R. Regeneration of mining wasteland in view of optimization of urban green infrastructure system: a case study of Daye[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(4): 214-223.
- [19] 黄杰, 黄义忠. 基于 InVEST-MSPA 的文山州区域生态网络构建[J]. *环境监测管理与技术*, 2024, 36(5): 41-46.
- Huang J, Huang Y Z. Construction of regional ecological network in Wenshan prefecture based on InVEST-MSPA[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2024, 36(5):41-46.
- [20] 丁金华, 褚涵, 杨阳. 基于电路理论的苏南水网地区绿色基础设施网络构建:以苏州南星湖片区为例[J]. *西北林学院学报*, 2025, 40(1):252-262.
- Ding J H, Chu H, Yang Y. Construction of green infrastructure network in water network area based on InVEST model and circuit theory: a case study of nanxing lake area[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2025, 40(1):252-262.
- [21] 马银, 郑敏睿, 郑新奇, 等. 基于 CA-Markov 和 MSPA 的绿色基础设施预测与时空演变分析:以京津冀城市群为例[J]. *生态学报*, 2023, 43(16):6785-6797.
- Ma Y, Zheng M R, Zheng X Q, et al. Prediction and spatiotemporal evolution analysis of green infrastructure based on CA-Markov and MSPA: a case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(16):6785-6797.
- [22] Luo J L, Zhu L, Fu H. Construction of wetland ecological network based on MSPA-Conefor-MCR: a case study of Haikou City[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 166:112329.
- [23] 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.
- [24] 赵海霞, 范金鼎, 骆新燎, 等. 绿色基础设施格局变化及其驱动因素:以南京市为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(18):7597-7611.
- Zhao H X, Fan J D, Luo X L, et al. Changes of green infrastructure pattern and its driving factors: taking Nanjing as an example[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(18):7597-7611.
- [25] 汪子茗, 吕梁, 汪峰. 基于多源数据的山地县域绿色基础设施网络构建及修复策略:以重庆市万州区为例[J]. *热带地理*, 2024, 44(2):303-314.
- Wang Z M, Lyu L, Wang F. Construction and restoration strategies of green infrastructure network in mountainous counties based on multi-source data: a case study of Wanzhou district, Chongqing [J]. *Tropical Geography*, 2024, 44(2):303-314.
- [26] 薛明月, 吴孟泉, 郑龙啸, 等. 基于电路理论的县域生态安全格局构建:以山东省栖霞市为例[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(10):3223-3232.
- Xue M Y, Wu M Q, Zheng L X, et al. The construction of county-level ecological security pattern based on circuit theory: a case study in Qixia City, Shandong Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(10):3223-3232.
- [27] 李涛, 巩雅博, 戈健宅, 等. 基于电路理论的城市景观生态安全格局构建:以湖南省衡阳市为例[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(7):2555-2564.
- Li T, Gong Y B, Ge J Z, et al. Construction of urban landscape ecological security pattern based on circuit theory: a case study of Hengyang City, Hunan Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(7):2555-2564.
- [28] 连虎刚, 刘春芳, 倪博文, 等. 西北干旱区自然保护地体系生态网络构建及优化:以河西走廊为例[J]. *应用生态学报*, 2025, 36(1):259-270.
- Lian H G, Liu C F, Ni B W, et al. Construction and optimization of ecological network of natural protected areas in the northwestern arid region: a case study of Hexi Corridor[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(1):259-270.
- [29] 费文君, 赵梦琴. 基于 MSPA 的南京市绿色基础设施网络构建[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2022, 46(3):50-56.
- Fei W J, Zhao M Q. Construction of Nanjing green infrastructure network based on MSPA [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2022, 46(3):50-56.
- [30] 殷飞笺, 陈华香, 黄发明, 等. 基于海岸带生态功能评估的陆海连通生态廊道识别与优化研究[J]. *应用海洋学报*, 2025, 44(1):84-98.
- Yin F J, Chen H X, Huang F M, et al. Research on the identification and optimization of land-sea ecological corridors based on the assessment of ecological functions in coastal zones [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2025, 44(1):84-98.