DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.040 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.040
刘园园, 马彩虹 . 黄土丘陵区生态网络空间模拟优化及韧性评估:以宁夏西吉县为例[J]. 水土保持研究,2026,33(6):349-357.
Liu Yuanyuan, Ma Caihong. Spatial simulation optimization and resilience assessment of ecological networks in loess hilly region: a case study of Xiji County, Ningxia[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):349-357.

黄土丘陵区生态网络空间模拟优化及韧性评估
——以宁夏西吉县为例

刘园园[1,2], 马彩虹[2]
(1.西北大学 城市与环境学院, 西安 710127; 2.宁夏大学 地理科学与规划学院, 银川 750021)

摘 要:[目的]黄土高原地区的生态网络连通性和整体结构均表现出较高的脆弱性。韧性评估有助于识别系统中的薄弱环节,为区域生态空间可持续治理提供重要的决策参考。[方法]以宁夏西吉县为黄土丘陵区典型区,运用PLUS模型模拟自然发展情景下2030年生态网络空间结构,结合形态空间格局分析与Linkage Mapper等方法,从点、线、面视角构建生态网络,并评估其空间韧性及优化效果。[结果]到2030年,西吉县土地利用发生明显变化,耕地、林地、草地和水域呈扩张趋势,水域扩张面积最大,建设用地基本保持稳定,未利用地面积减少;识别生态源地53个,提取生态廊道138条,生态网络呈现"南北密集、中部稀疏"的不均衡格局;优化方案中,提取生态障碍点54个和生态夹点30个,可有效提升生态网络的整体韧性与稳定性。[结论]优化后生态网络在蓄意攻击与随机攻击下的韧性均显著增强,同等节点移除率下功能维持能力更好。建议在今后国土空间保护与修复中,采用"分区管控、廊道修复、节点提升"的差异化策略。

关键词:生态网络; 空间韧性; PLUS模拟; 网络优化; 黄土丘陵区
中图分类号:TU984.115; X171.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0349-09

Spatial simulation optimization and resilience assessment of ecological networks in loess hilly region
—a case study of Xiji County, Ningxia

Liu Yuanyuan[1,2], Ma Caihong[2]
(1.*College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an* 710127, *China*;
2.*School of Geography Science and Planning, Ningxia University, Yinchuan* 750021, *China*)

Abstract: [**Objective**] The ecological network connectivity and overall structure of the Loess Plateau region both exhibit high vulnerability. Assessing resilience helps identify weak links within the system, providing an important decision-making reference for the sustainable governance of regional ecological space. [**Methods**] Taking Xiji County, Ningxia, as a typical loess hilly region, the PLUS model was used to simulate the spatial structure of the ecological network in 2030 under a natural development scenario. Morphological spatial pattern analysis (MSPA), Linkage Mapper, and other methods were combined to construct the ecological network from the perspectives of points, lines, and areas, and its spatial resilience and optimization effects were then evaluated. [**Results**] By 2030, significant land use changes were projected in Xiji County. Cultivated land, forest land, grassland, and water bodies showed an expansion trend, with water bodies experiencing the largest area increase. Construction land remained largely stable, while unused land area decreased. A total of 53 ecological sources were identified,

收稿日期:2025-11-17 **修回日期:**2025-12-20 **接受日期:**2026-01-09
资助项目:宁夏自然科学基金重点项目(2024AAC02022);宁夏自然科学基金项目(2024AAC03054);国家重点研发计划项目子课题(2023YFF1304705)
第一作者:刘园园(1998—),女,宁夏中卫人,博士研究生,研究方向为国土空间分析与生态系统服务价值分析。E-mail:lyy980617@163.com
通信作者:马彩虹(1974—),女,宁夏西吉人,教授,博士研究生导师;主要从事资源环境评价与GIS/RS应用。E-mail:mchyanni@163.com

and 138 ecological corridors were extracted. The ecological network exhibited an unbalanced pattern, being "dense in the north and south, sparse in the central region". In the optimization scheme, 54 ecological barrier points and 30 ecological pinch points were identified, which could effectively enhance the overall resilience and stability of the ecological network. [**Conclusion**] The optimized ecological network demonstrates significantly enhanced resilience under both deliberate and random attacks, showing better functional maintenance capability at equivalent node removal rates. It is recommended that future territorial space protection and restoration adopt differentiated strategies such as "zone-based management, corridor restoration, and node enhancement".

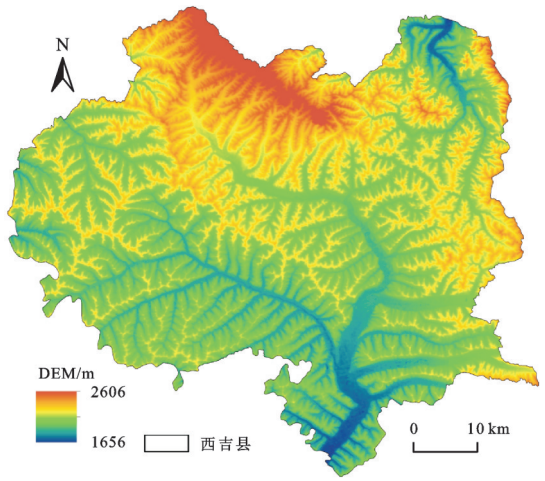
Keywords: ecological network; spatial resilience; PLUS simulation; network optimization; loess hilly region

全球自然与社会环境正经历剧烈变动,生态环境问题逐渐由"单一性"向"系统性""碎片化"向"网络化"演变[1]。在此背景下,韧性理论因其系统性、非均衡性与非线性等特征,在阐释人地系统复杂性问题方面展现出独特优势[2]。黄土丘陵区是我国典型的生态脆弱区,其生态系统结构复杂且对外界的干扰敏感。构建并优化生态网络是提升区域连通性、保障生态过程完整、提升区域生态韧性的有效途径[3-4]。随着景观生态理论与地理信息技术的发展,生态网络构建与模拟研究已在我国不同区域广泛开展,产生了一批很有价值的成果。总体来看,现有研究中,学者多侧重从于静态时间界面视角进行生态网络格局的识别与构建,对生态网络结构的动态演化模拟与优化分析仍然不足[5],如贾朝阳等[6]以黑龙江西部半干旱区为例,提出了结合生态系统服务与形态学空间格局分析的生态源地识别方法,并采用电路理论划定生态安全格局;刘园园等[7]基于$MSPA_p$-MCR_f方法构建了中卫市的生态网络;杜萧宇等[8]通过形态学空间格局分析、连通性分析和最小累积阻力模型等方法综合构建了生态网络。随着韧性理论的应用,学界对国土空间韧性的关注度日益提升。从生态网络视角切入,是国土空间韧性研究的重要视角[9]。李远航等[10]从景观连通性视角构建了云南省临沧市荒野网络;林佳怡等[11]从景观连通性及环境公平性视域构建并优化了福州市中心城市网络;黄秋淞等[12]耦合生态系统服务及景观连通性,探究了环塔里木盆地绿洲区生态安全格局。近年来,为应对不确定性环境变化,生态网络韧性研究开始注重未来情景预测[13],但现有案例多集中于城市群或者生态条件相对优越的地区,对生态脆弱区尤其是像宁夏西吉县这样地处黄土高原腹地、水土流失严重、人类活动与生态矛盾突出的典型县域,其生态网络的构建、模拟与优化及韧性量化评估研究仍较为缺乏[14]。该区域面临生态源地破碎、廊道连通性不足、生态过程受阻等现实问题,亟须通过整合动态模拟、空间优化与韧性评估方法开展实证研究,以弥补当前理论与实践的不足。本文聚焦于如何在生态脆弱区构建生态网络并进行优化及韧性评估这一科学问题,选取宁夏西吉县为典型区域,以2030年自然发展情景为模拟目标,融合PLUS模型、MSPA、Linkage Mapper与复杂网络分析等方法开展研究,为提升生态敏感脆弱区生态空间韧性提供一定的决策参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

西吉县隶属于宁夏回族自治区固原市,地理坐标介于东经105°20′—106°04′、北纬35°35′—36°14′,区域南北跨度74 km,东西宽度67 km。该县坐落于宁南山区六盘山西麓,地处陇西黄土高原沟壑区核心地带,东与原州区接壤,南连固原市隆德县及甘肃省静宁县,西接甘肃省会宁县,北邻中卫市海原县(图1)。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2023)2763号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

西吉县地形地貌多样,水资源较为短缺,土壤肥力分布不均,植被覆盖度不高,生态环境较为脆弱[15]。截至2023年7月,西吉县行政区域总面积3 130 km^2,下辖4个镇、15个乡、295个行政村以及13个居委会,总人口47.5万人[16]。

1.2　数据来源与处理

本文主要用到栅格数据、矢量数据、统计数据等。其中,栅格数据包括由GEE平台生成的遥感影像数据、源于中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/Default.aspx)的土地利用/覆被变化数据及源于地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)DEM数据等,DEM空间分辨率30 m,坡度数据由DEM数据生成。矢量数据包括源于全国地理信息资源目录服务系统(https://www.webmap.cn)的道路数据及水系数据、源于Open Street Map(https://www.openstreetmap.org/)的距政府距离、距道路距离数据以及源于国家基础地理信息中心(https://www.ngcc.cn/)的行政区数据等。统计数据一般包括源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)的1 km分辨率的人口数据、经济数据等。数据统一重采样为30 m,空间参考统一为WGS_1984_UTM_Zone_36 N。

1.3　研究方法

1.3.1　生态网络模拟　PLUS模型是一个集成了机器学习和元胞自动机优势的先进土地利用变化模拟平台。通常用于在更高的空间细节上,模拟和预测未来多种土地利用类型的空间分布和变化[17]。公式如下:

$$W_i=\frac{\mathrm{TA}_i-\mathrm{TA}_{\min}}{\mathrm{TA}_{\max}-\mathrm{TA}_{\min}} \tag{1}$$

式中:W_i为第i类土地类型领域权重;TA_i为第i类土地利用扩张的面积;$\mathrm{TA}_{\min}$与$\mathrm{TA}_{\max}$分别为所有地类面积的最小值与最大值。通过历史数据模拟测试,最终设定耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地的领域权重分别为1,0.55,0.1,0.55,1.54,0.5。该设定反映了建设用地和耕地因其社会经济驱动力而具有强扩张性,而草地扩张能力最弱的现实情况。

1.3.2　生态网络构建　(1)形态空间格局分析。形态空间格局分析法(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)是一种基于数学形态学原理,对二值化景观进行像元级空间结构识别和分类的图像处理方法[18]。本文采用Guidos Toolbox 2.8软件,将土地利用二值栅格数据转换为核心区、边缘区、环岛等7类功能各异且互不重叠的景观类型。生态源地是物种扩散与能量交换的起点,通常由生境质量高、面积大的自然或半自然景观构成。参考相关研究[19-20],将具有较高生态系统服务价值和生物栖息地潜力的水域、林地、高中覆盖度草地设置为前景,其他土地利用类型设为背景。采用八邻域分析法,边缘宽度设置为3个像元,以准确识别核心区与边缘结构。

(2)景观连通性。景观连通性是指景观促进或阻碍生态流在空间上运动的能力[21]。本文选取可能连通性指数(Probability of Connectivity, PC)、整体连通性指数(Integral Index of Connectivity, IIC)、斑块重要性指数(delta Probability of Connectivity, dPC)进行景观连通性评价。公式如下:

$$\mathrm{PC}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}P_{ij}^{*}a_i a_j}{A_L^2} \tag{2}$$

$$\mathrm{dPC}=\frac{\mathrm{PC}-\mathrm{PC}_{\mathrm{remove}}}{\mathrm{PC}}\times 100\% \tag{3}$$

$$\mathrm{IIC}=\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{a_i a_j}{1+nl_{ij}}\right)/A_L^2 \tag{4}$$

$$\mathrm{DI}=0.5\mathrm{dPC}+0.5\mathrm{IIC} \tag{5}$$

式中:PC为斑块可能连通性指数;p_{ij}^{*}为斑块i和j间路径的最大连通概率;a_i, a_j分别为斑块i, j的面积,$i\neq j$;A_L为前景数据总面积;n为斑块总数;PC值越接近1,景观连通性越好。dPC为移除斑块i后景观连通性的下降比例,值越大,表明该斑块对维持景观连通性越重要;$\mathrm{PC}_{\mathrm{remove}}$为移除斑块$i$后的PC值。IIC为整体连通性指数;$nl_{ij}$为斑块$i$和$j$间的连接数;IIC值域为[0,1],值越大表示整体连通性越佳。为综合评判斑块重要性,构建综合连通指数DI,以DI>1为阈值提取核心生态源地,该阈值确保所选源地在维持景观结构与功能连通性方面均具有较高的重要性。

(3)最小累积阻力模型。最小累积阻力模型(Minimum Cumulative Resistance model, MCR)用于模拟物种从生态源地向周边扩散时所克服的累积阻力,从而识别潜在生态廊道[22]。计算公式如下:

$$V_{\mathrm{MCR}}=f_{\min}\sum_{i=1,j=1}^{i=m,j=n}(D_{ij}R_i) \tag{6}$$

式中:V_{MCR}为最小累积阻力值;$f_{\min}$为最小累积阻力的非线性函数;D_{ij}为从生态源地j到空间单元i的距离;R_i为土地单元i对生态过程的阻力系数。

为评估西吉县生态物质流动的空间阻力,本文依据文献[23],构建包含自然地理与社会经济要素的综合阻力因子体系。选取7类因子分别为DEM、坡度、归一化植被指数、土地利用类型、MSPA景观类型、距道路距离及距主要政府驻地距离。其中,草地依据覆盖度分为高、中、低三级;水域涵盖河渠、湖泊与水库坑塘;林地则包括灌木地、有林地与其他林地。

为构建符合西吉县生态特征的阻力面体系,本文采用AHP层次分析法确定各阻力因子的权重[16],通过参考文献与实际相结合[24],系统量化不同因子在维持和发展生态网络中的相对重要性(表1)。

表1 阻力评价体系
Table 1 Resistance evaluation system

阻力因子	指标值	阻力系数	权重	阻力因子	指标值	阻力系数	权重
高程	(0,1800]	10	0.13	土地利用	建设用地	110	0.17
	(1800,2000]	30			旱地、裸地	70	
	(2000,2200]	50			草地	50	
	(2200,2400]	70			水体	30	
	(2400,2600)	90			林地	10	
坡度/(°)	(0,11]	10	0.14	MSPA景观类型	核心区	10	0.23
	(11,22]	30			桥接区	20	
	(22,33]	50			环岛	30	
	(33,44]	70			支线	40	
	(44,55)	90			孤岛	50	
归一化植被指数	(0,0.2]	90	0.06		边缘区	70	
	(0.2,0.4]	70			孔隙	90	
	(0.4,0.6]	50			背景	100	
	(0.6,0.8]	30					
	(0.8,1]	10					
距道路的距离/km	(0,30]	90	0.11	距政府的距离/km	(0,7.2]	90	0.16
	(30,43]	70			(7.2,14]	70	
	(43,56]	50			(14,22]	50	
	(56,70]	30			(22,29]	30	
	(70,84)	10			(29,37]	10	

(4) Linkage Mapper。基于电路理论,将景观阻力面类比为电路电阻,通过计算“随机游走者”(模拟物种)在源地间迁移的最小成本路径与“电流密度”来识别廊道与关键节点[25]。该方法能有效模拟物种在异质景观中迁移的随机性与路径选择,为生态网络构建提供了理论依据。

1.3.3 生态网络韧性评估 为评估生态网络拓扑结构在干扰下的稳定性,引入复杂网络分析中的中心性指标。本文选取点度中心性、中介度中心性、紧密度中心性进行评价[26]。公式如下:

$$P_i=\sum_{i\neq h\in N} f_{ih} \tag{7}$$

$$C_i=\sum_{i\in N}\frac{K_i}{K} \tag{8}$$

$$j_i=\frac{n-1}{\sum_{h\neq i} d_{ih}} \tag{9}$$

式中:P_i为点度中心性;h为生态网络中与节点i相邻的任意节点;N为生态网络中包含的所有节点的集合;f_{ih}为节点i与h之间连接边的数量;C_i为中介度中心性;K为节点中最短路径的总数;K_i为经过节点i的最短路径数;j_i为紧密度中心性;d_{ih}为节点i到任意节点h的最短距离。为消除量纲影响,对3个中心性指标进行归一化处理,取其等权均值作为节点i的综合中心性,用于后续的韧性评估与节点重要性排序。

2 结果与分析

2.1 PLUS的模拟分析

基于西吉县2020年土地利用现状及14项驱动因子生成的6类用地发展概率图,在PLUS模型的CARS模块中展开模拟。将模拟结果与2020年实际数据对比,Kappa系数为0.92,总体精度0.89,Fom系数0.016,表明模型模拟精度较高。基于以上参数,模拟得到2030年西吉县自然发展情景下的土地利用分布格局(图2)。2030年西吉县各地类面积均发生不同程度转化,其中,耕地、林地、草地和水域面积分别增加0.77 km^2、0.98 km^2、0.93 km^2和5.23 km^2;建设用地基本保持稳定,未利用地减少7.91 km^2。

2.2 2030年生态网络构建

2.2.1 生态源地识别 2030年模拟土地利用数据识别结果表明,核心区面积占比最高,占10.17%,主要以林草地为主,空间分异显著,主要集中分布于西吉县东北部附近及西部区域;边缘区作为核心区与外围的过渡带,边缘效应明显,体现了乡村发展对生态景观的显著影响;桥接区环绕核心区分布,其环岛与支线对廊道连接起辅助作用;孤岛区占比较低,可作为生物迁徙过程中的临时栖息地(图3)。

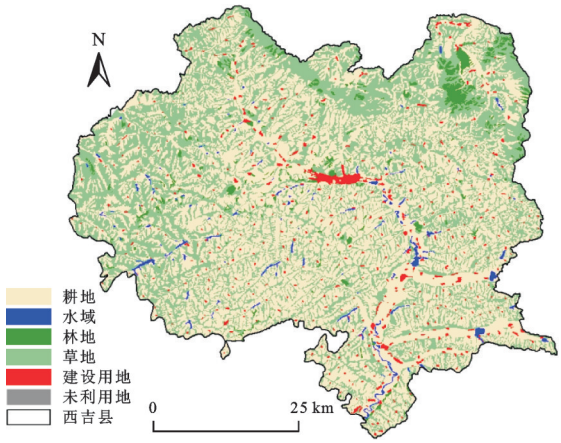


图 2　2030 年西吉县土地利用类型模拟分布图
Fig. 2　Simulated distribution map of land use types in Xiji County in 2030

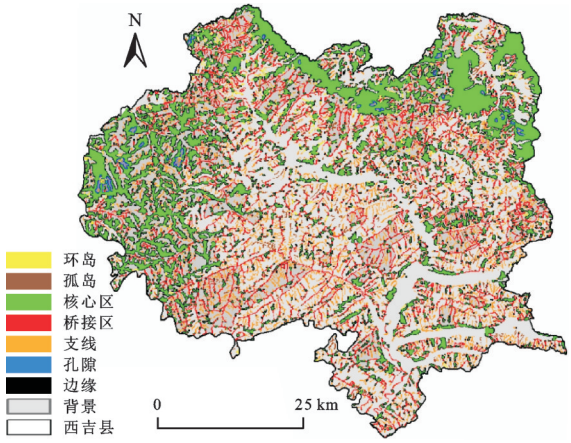


图 3　西吉县 2030 年(模拟)MSPA 景观类型图
Fig. 3　Simulated MSPA landscape types map of Xiji County for 2030

核心区是物种栖息与迁移的关键区域,承担着生态“源”的功能。为提升生态网络的连续性与完整性、缓解景观破碎化,本文从核心区中筛选出 DI 大于 1 的 53 个生态斑块,将其确定为生态源地(图 4)。生态源地以生态功能完整的林地、水域、草地为主,空间分布不均衡且呈集聚形态,其主要分布在地形崎岖的黄土丘陵山区,远离居民点与道路,受人为干扰较小,但与外界物质、信息交流频繁,生态系统服务水平较高。相比之下,西吉县核心发展区地势平坦、人口密集,人类活动干扰强烈,生态基底脆弱,生态资源稀少且分布分散,因此生态源地较少。

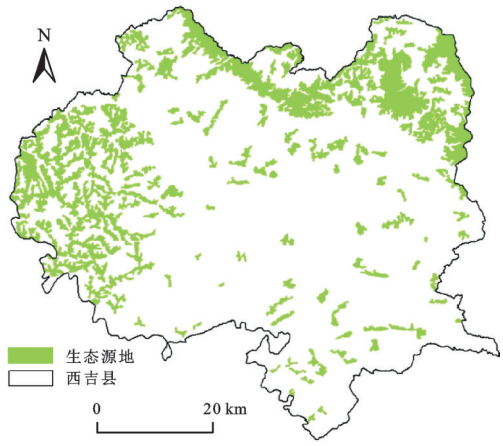


图 4　西吉县 2030 年生态源地分布图
Fig. 4　Distribution map of ecological sources in Xiji County in 2030

2.2.2　生态廊道构建　生态廊道对维持物种迁移、能量流动及生态系统稳定性具有关键作用。本文基于最小阻力面与生态源地,利用 Linkage Mapper 中的 Build Network and Map Linkages 模块,将成本加权距离阈值设为 20 000 m,共识别出西吉县生态廊道 138 条(图 5)。空间上,中部平缓河谷区域生态源地稀少、廊道稀疏,反映出该区域生态阻力大、连通性低、源地间距较远,廊道易在物种迁移过程中受干扰而中断;南部区域生态源地分布密集,廊道数量较多,但源地面积较小,反映出该区域生态源地薄弱,需进一步加强。

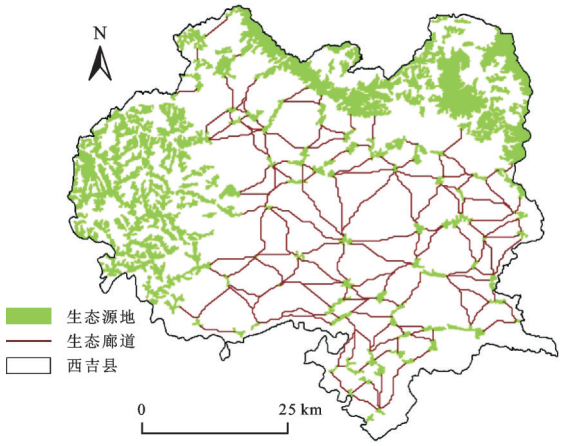


图 5　西吉县 2030 年生态廊道分布图
Fig. 5　Distribution map of ecological corridors in Xiji County in 2030

2.3　生态网络优化与韧性评估

2.3.1　基于生态节点提取的网络优化　通过构建识别生态夹点和障碍点,可优化生态网络结构,提升其连接性与生态功能。生态夹点为电流高值区,是物种迁移的关键通道。生态夹点高度集中于生态廊道的狭窄处或交汇点,尤其密集分布于中部平缓河谷地带的关键廊道上,属于维持区域连通性的最脆弱节点,本文共识别 30 个(图 6A)。生态障碍点是阻碍物种迁移和交流的区域,其识别与修复有助于提升网络流通性与生态安全。本文共识别生态障碍点 54 个(图 6B),其主要在中部核心发展区高度聚集,反映出该区域生态阻力大、连通性低。建议后续优先修复位于关键廊道上且阻力值较低的障碍点,能以较低成本有效提升网络整体连通性。

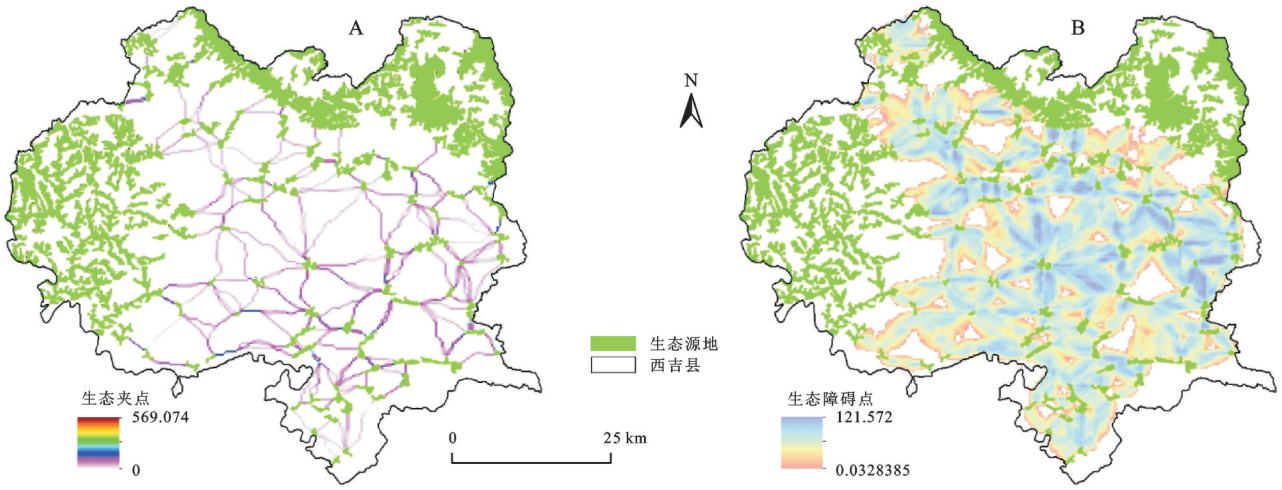


图 6 西吉县 2030 年生态夹点及生态障碍点空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution map of ecological nodes and obstacle points in Xiji County in 2030

2.3.2 优化前后网络韧性对比分析 移除节点是衡量生态网络韧性的重要方式。对比优化前后，西吉县2030年生态网络总体韧性有所提升（图7）。优化后，蓄意攻击与随机攻击情景下网络韧性下降趋势明显减缓，且在相同移除率下，随机攻击情景的网络韧性优于蓄意攻击。优化前后均存在一个明显转折点，优化前，当移除节点数大于42个时，蓄意攻击下的韧性反而高于随机攻击；优化后，移除节点数大于96个，则蓄意攻击下的韧性高于随机攻击。这表明根据节点移除数量选择相应的管理策略，可提升网络稳定性。

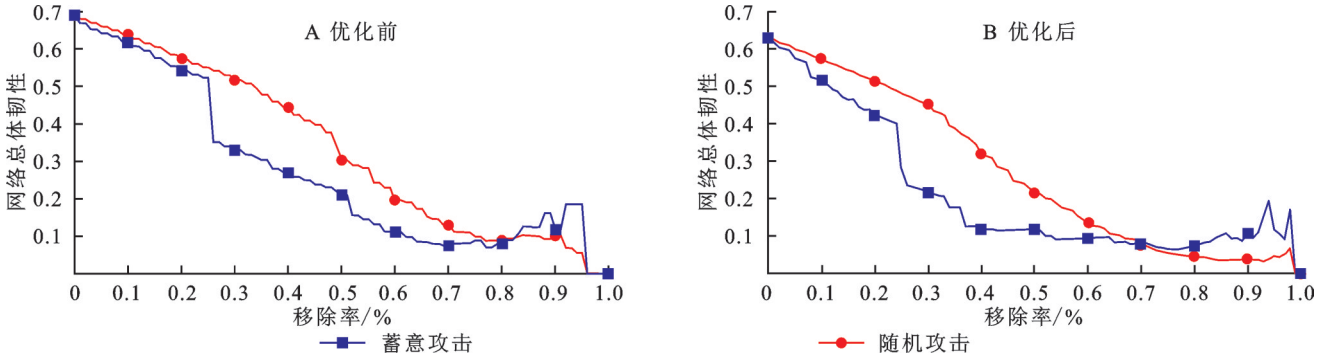


图 7 优化前后西吉县 2030 年生态网络韧性分析

Fig. 7 Comparative resilience analysis of ecological network in Xiji County in 2030 before and after optimization

为了量化评估生态网络整体韧性，本文将蓄意攻击和随机攻击下的韧性值等权求和进行分析。其中，优化前初始韧性值为0.69，优化后略降至0.63，说明原有网络连通性较强，单纯增加节点未必能进一步提升网络连通效率，但节点增多有助于增强抗干扰能力。

在相同移除率条件下，优化前韧性值略高于优化后；但优化后网络节点基数更大，网络表现出更强韧性（表2）。对比移除同等绝对节点数量的破坏情景，其中，移除10个节点时，韧性值从0.28提升至0.59，增加0.31；移除20个节点时，从0.14提升至0.50，增加0.36；移除27个节点时，从0.26提升至0.46，增加0.20。此外，优化前网络在移除率约96%时完全崩溃，而优化后网络需达到100%才丧失功能，表明优化显著增强了网络的流通性与抗风险能力。综上所述，优化后的生态网络在相同移除率下韧性衰减更平缓，结构更具弹性，应对随机或蓄意攻击的能力整体提升。

表 2 西吉县 2030 年生态网络优化前后数据分析

Table 2 Data analysis of ecological network in Xiji County in 2030 before and after optimization

位置	移除率										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
移除前节点数量	0	5.30	10.60	15.90	21.20	26.50	31.80	37.10	42.40	47.70	53
移除后节点数量	0	13.70	27.40	41.10	54.80	68.50	82.20	95.90	109.60	123.30	137
优化前韧性值	0.69	0.63	0.56	0.42	0.36	0.26	0.15	0.10	0.08	0.11	0
优化后韧性值	0.63	0.55	0.46	0.34	0.22	0.17	0.13	0.08	0.06	0.08	0

3　讨　论

模拟结果表明,至2030年,西吉县土地利用格局将发生显著转变,表现为耕地、林地、草地、水域的扩张,建设用地基本保持稳定,未利用地收缩。这一变化趋势与黄土丘陵区普遍面临的农业发展压力、城镇化扩张及生态退化的区域背景相符[27-28]。在此背景下,2030年西吉县生态网络呈现出“南北密集、中部稀疏”的空间格局。其中,南部和北部地处六盘山余脉与黄土梁峁区,地形起伏大、人类干扰较弱,有利于林草等自然植被保存,形成核心生态源地;而中部的葫芦河川道区因地势平坦、水土条件优越,是人口集聚与农业垦殖的核心区域,高强度的人类活动导致自然生境破碎化、生态连通性显著降低,生态源地稀少、廊道连通性薄弱。生态源地作为区域内核心栖息地及生态网络的关键节点,对物种生存与繁衍具有重要支撑作用。其数量多少、空间上的分布直接关系到西吉县生态环境建设与生物多样性保护的成效。后续可通过增设生态源地与生态节点,提升斑块内部的生物多样性,改善生境质量,并增强生态网络中各要素的结构连接功能。而在生态网络中承担关键连接作用的小型斑块亦不容忽视。这些斑块在景观格局中常处于结构性节点位置,能够为物种迁移提供临时栖息地,保障生态过程的连续性。与大型绿地相比,小型斑块在城镇化和基础设施建设过程中易被侵占,其生态功能常未得到足够重视。因此,有必要加强对关键节点斑块的保护与生态修复,并提升对小型绿地的生态功能的认识。生态廊道作为连接生态网络的核心要素,在构建完整生态格局中具有不可替代的作用。后续规划中应依据廊道空间分布特征,规避其与交通基础设施的冲突,构建适宜物种流通、有助于维持生态网络稳定的廊道体系。

通过识别生态夹点与障碍点对网络进行优化后,其韧性显著提升,说明强化关键节点与廊道,能够有效增强网络稳定性,与干旱区生态网络研究结果相比[29-30],西吉县生态网络在结构脆弱性方面具有相似性。因此,依据节点重要性的差异,结合《西吉县空间规划2016—2035年》,应优先对识别出的生态夹点和低阻力生态障碍点进行修复,通过建设生态踏脚石、构建植被缓冲带等方式,有效降低生态流通阻力,提升网络韧性,为进一步制定差异化的空间管控和保护措施。最后,本文仍存在一定的局限性,研究仅聚焦于“自然发展”情景。未来可增设生态保护、粮食安全、城镇扩张等多种政策情景,模拟比较不同发展导向下生态网络的演变路径与韧性差异,为决策提供更多方案。

4　结　论

本文集成PLUS模型、MSPA方法、MCR模型、电路理论及复杂网络分析方法,构建了西吉县2030年自然发展情景下的生态网络,并对其进行了空间优化与韧性评估。主要结论如下:

(1) 基于PLUS模型对西吉县2030年土地利用进行了高精度模拟,总体精度0.89,Kappa系数0.92,自然发展情景下,耕地、林地、草地和水域呈扩张趋势,水域扩张面积最大,建设用地基本保持稳定,未利用地面积减少。

(2) 2030年,西吉县重要生态源地有53个,丘陵山地区源地以林草地为主要类型,河谷川道区源地以水域为主;生态廊道138条,形成“南北密、中部疏”的空间不均衡格局,中部葫芦河川道区受人类活动强烈干扰,生态源地稀少、廊道稀疏且连通性差,网络结构脆弱。

(3) 优化关键生态节点可有效提升生态网络的整体韧性与稳定性。基于电路理论共识别出生态夹点30个和生态障碍点54个,主要分布于中部关键廊道等脆弱部位。优化后,生态网络在蓄意攻击与随机攻击下的韧性均显著增强,同等节点移除率下功能维持能力更好,网络完全崩溃的临界点明显升高。

参考文献(References):

[1] Lu Y C, Huang D, Tong Z M, et al. A conceptual framework for constructing and evaluating directed ecological networks: Evidence from Wuhan Metropolitan Area, China [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2024,106:107464.

[2] Wang H H, Zhou L L, Su K C, et al. Resilience evolution and optimization strategies of ecological networks in the Three Gorges Reservoir Area: a scenario-based simulation approach[J]. Ecological Informatics, 2025,90:103285.

[3] 韩莹,唐承财,虞虎.东北虎豹国家公园生态韧性时空格局及网络构建[J].地理学报,2025,80(11):3088-3106.
Han Y, Tang C C, Yu H. Spatio-temporal pattern and network construction for ecological resilience in Northeast China Tiger and Leopard National Park [J]. Acta Geographica Sinica, 2025,80(11):3088-3106.

[4] 刘园园,马彩虹,马丽娅.黄河流域典型绿洲城市扩张模拟及其生态韧性响应研究[J].干旱区地理,2025,48(3):506-516.
Liu Y Y, Ma C H, Ma L Y. Simulation of urban expansion and its response to ecological resilience of typical oases in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2025,48(3):506-516.

[5] 刘春芳,倪博文,连虎刚,等.干旱内陆河流域生态网络

韧性演化及其提升策略:以石羊河流域为例[J].自然资源学报,2024,39(9):2087-2101.
Liu C F, Ni B W, Lian H G, et al. Evolution of resilience in the ecological network across arid inland river basins and its improvement strategies: a case study of Shiyang River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2024,39(9):2087-2101.

[6] 贾朝阳,付强,崔嵩.黑龙江省西部半干旱区生态安全格局构建与优化[J].环境科学,2025,46(8):5180-5195.
Jia Z Y, Fu Q, Cui S. Construction and optimization of ecological security pattern in semi-arid region of western Heilongjiang Province[J]. Environmental Science, 2025, 46(8):5180-5195.

[7] 刘园园,马彩虹,滑雨琪,等.基于$MSPA_P$-MCR_F的干旱区层级生态网络构建与优化:以宁夏中卫市为例[J].自然资源遥感,2024,36(1):67-76.
Liu Y Y, Ma C H, Hua Y Q, et al. $MSPA_P$-MCR_F-based construction and optimization of a hierarchical ecological network for arid regions: a case study of Zhongwei City, Ningxia [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024,36(1):67-76.

[8] 杜箫宇,吕飞南,王春雨,等.基于MSPA-Conefor-MCR的县域尺度生态网络构建:以延庆区为例[J].应用生态学报,2023,34(4):1073-1082.
Du X Y, Lyu F N, Wang C Y, et al. Construction of ecological network based on MSPA-Conefor-MCR at the county scale: a case study in Yanqing District, Beijing, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(4):1073-1082.

[9] Zhang K X, Pan J H. Evaluation of ecological network resilience using OWA and attack scenario simulation in the Gansu section of the Yellow River Basin, NW China [J]. Environmental Research Communications, 2024, 6 (8):085016.

[10] 李远航,张云.基于景观连通性的云南省临沧市荒野网络构建[J].应用生态学报,2025,36(4):1233-1243.
Li Y H, Zhang Y. Wilderness network construction in Lincang City of Yunnan Province, Southwest China based on landscape connectivity[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025,36(4):1233-1243.

[11] 林佳怡,董寅,戴嘉腾,等.景观连通性与环境公平性视域下城市冷岛网络构建及优化:以福州市中心城区为例[J].生态学报,2025,45(11):5582-5594.
Lin J Y, Dong Y, Dai J T, et al. Construction and optimization of urban cold island network from the perspective of landscape connectivity and environmental equity: a case study of the central city of Fuzhou City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(11):5582-5594.

[12] 黄秋淞,何浩.耦合生态系统服务和景观连通性的环塔里木盆地绿洲区生态安全格局研究[J].干旱区地理,2024,47(10):1745-1754.
Huang Q S, He H. Ecological security pattern of the oasis area around the Tarim Basin based on coupled ecosystem services and landscape connectivity [J]. Arid Land Geography, 2024,47(10):1745-1754.

[13] 王娜,李满春,陈振杰,等.生态网络约束下的长沙市景观格局模拟[J].水土保持研究,2022,29(3):269-275,283.
Wang N, Li M C, Chen Z J, et al. Landscape pattern simulation under the constraint of ecological network in Changsha City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(3):269-275,283.

[14] 李娜,李聪慧,马彩虹,等.黄土丘陵区土地利用变化情景模拟及生态系统服务响应权衡/协同分析[J].环境科学,2026,47(3):1870-1882.
Li N, Li C H, Ma C H, et al. Scenario simulation of land use change and trade-off analysis of ecosystem service response in loess hilly area[J]. Environmental Science, 2026,47(3):1870-1882.

[15] 杨航,马彩虹,滑雨琪,等.宁夏草地绿度时空变化图谱及驱动因素分析[J].水土保持研究,2024,31(2):228-239.
Yang H, Ma C H, Hua Y Q, et al. Spatiotemporal variation atlas of grassland greenness in Ningxia and its driving factors[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(2):228-239.

[16] 刘园园.黄土丘陵区生态网络空间韧性时空变化模拟[D].银川:宁夏大学,2025.
Liu Y Y. Simulation of spatial resilience of ecological network in loess hilly region[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2025.

[17] 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.

[18] 许澳康,吉天琪,石晶.甘肃黑河流域生态网络构建与优化[J].中国沙漠,2025,45(2):61-70.
Xu A K, Ji T Q, Shi J. Construction and optimization of ecological network of the Heihe River Basin(Gansu section)[J]. Journal of Desert Research, 2025,45(2):61-70.

[19] 杨欣,肖豪立,黄宸,等.长江中游城市群土地生态系统“社会:生态”网络构建与协同治理研究[J].自然资源学报,2024,39(9):2155-2170.
Yang X, Xiao H L, Huang C, et al. Research on the construction and collaborative governance of the “socio-ecological” network of a land ecosystem in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Natural Resources, 2024,39(9):2155-2170.

[20] 张成,陈文波,黄芳芳.鄱阳湖草洲景观连通性对植物多样性的影响[J].地理学报,2024,79(1):259-278.
Zhang C, Chen W B, Huang F F. Effects of grassland connectivity on plant diversity in Poyang Lake[J]. Acta Geographica Sinica, 2024,79(1):259-278.

[21] 李倩瑜,唐立娜,邱全毅,等.基于形态学空间格局分析和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建:以厦门市为例[J].生态学报,2024,44(6):2284-2294.
Li Q Y, Tang L N, Qiu Q Y, et al. Construction of urban ecological security pattern based on MSPA and MCR Model: a case study of Xiamen[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(6):2284-2294.

[22] 秦子博,玄锦,黄柳菁,等.基于MSPA和MCR模型的海岛型城市生态网络构建:以福建省平潭岛为例[J].水土保持研究,2023,30(2):303-311.
Qin Z B, Xuan J, Huang L J, et al. Ecological network construction of sea-island city based on MSPA and MCR model: a case study of Pingtan Island in Fujian Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(2):303-311.

[23] 王玮妍,苏维词,董文卓,等.基于MSPA-InVEST模型的重庆市生态安全格局时空演变与生态韧性评估[J/OL].环境科学,https://link.cnki.net/urlid/11.1895.X.20251128.1042.039.
Wang W Y, Su W C, Dong W Z, et al. Spatio-temporal evolution of ecological security pattern and assessment of ecological resilience in Chongqing based on the MSPA-InVEST model [J/OL]. Environmental Science, https://link.cnki.net/urlid/11.1895.X.20251128.1042.039.

[24] 曲明,周蕴薇,曹福存,等.基于景观安全格局的黄海区域农村居民点空间布局优化:以辽宁大连普兰店区为例[J].水土保持研究,2021,28(1):228-233,241.
Qu M, Zhou Y W, Cao F C, et al. Layout optimization of rural residential land in the Yellow Sea based on theory of landscape security pattern: a case study on Pulandian district in Dalian City of Liaoning Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(1):228-233,241.

[25] Li J X, Nie W B, Zhang M X, et al. Assessment and optimization of urban ecological network resilience based on disturbance scenario simulations: a case study of Nanjing city[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 438:140812.

[26] 谢爱萍,陈玉玲.陇中黄土丘陵区县域村落居住适宜性评价及优化发展布局:以甘谷县为例[J].水土保持研究,2026,33(2):386-395.
Xie A P, Chen Y L. Livability evaluation and development layout optimization for county-level villages in Loess Hilly Region of central Gansu Province: a case study of Gangu County[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026,33(2):386-395.

[27] 杜军,赵胜朝,邱士可,等.2000—2015年豫西黄土丘陵区土地利用变化及景观生态风险评价[J].水土保持研究,2021,28(1):279-284,291.
Du J, Zhao S C, Qiu S K, et al. Land use change and landscape ecological risk assessment in Loess Hilly Region of western Henan Province from 2000 to 2015 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(1):279-284,291.

[28] 王玲,米文宝,王鑫,等.限制开发生态区土地利用变化驱动力分析:以宁夏西吉县为例[J].干旱区资源与环境,2019,33(1):51-57.
Wang L, Mi W B, Wang X, et al. Driving forces of land-use changes in exploration limited ecological zones: Xiji county, Ningxia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019,33(1):51-57.

[29] 李根,丁金梅,施琳娜,等.绿洲城市生态网络的时空演变与多情景模拟分析:以银川市为例[J].环境科学,2026,47(2):987-998.
Li G, Ding J M, Shi L N, et al. Spatio-temporal evolution and multi-scenario simulation analysis of ecological networks in oasis cities: a case of Yinchuan City[J]. Environmental Science, 2026,47(2):987-998.

[30] 周媛,黎贝,李朋瑶,等.基于“生态-气候适应性-游憩”多功能耦合的复合绿地生态网络格局优化[J].生态学报,2024,44(13):5854-5866.
Zhou Y, Li B, Li P Y, et al. Optimization of complex green space ecological network pattern based on the multi-functional coupling of ecology-climate adaption-recreation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(13): 5854-5866.