

DOI: 10.20103/j.stxb.202402240388

杨亮洁, 张玲玲, 张芳宁, 杨永春, 罗亚玲. 生态安全格局视角下黄土高原生态网络韧性研究. 生态学报, 2024, 44(22): 10471-10485.

Yang L J, Zhang L L, Zhang F N, Yang Y C, Luo Y L. A study on the resilience of ecological networks in the Loess Plateau from the perspective of ecological security patterns. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10471-10485.

生态安全格局视角下黄土高原生态网络韧性研究

杨亮洁^{1,2,*}, 张玲玲¹, 张芳宁¹, 杨永春^{3,4}, 罗亚玲¹

1 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

2 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室, 兰州 730070

3 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000

4 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000

摘要:生态网络韧性是生态系统面对不确定性扰动的抵抗、恢复及适应能力,是生态系统研究的热点。从生态安全格局视角构建“水资源-水土保持-沙漠化-生态系统质量”生态安全格局评价体系,识别生态源地,应用 MCR 模型提取廊道,分析黄土高原生态安全格局特征;应用引力模型构建生态网络,分析黄土高原生态网络韧性特征和核心节点影响广度和强度;应用网络鲁棒性模型模拟不同情境下黄土高原生态网络韧性变化。结果表明:(1)黄土高原生态源地和廊道空间异质性显著,北部密集南部稀疏,呈东北-西南走向的带状分布,核心源地主要分布在高原北部的内蒙古自治区和榆林市;(2)黄土高原生态网络呈组团模式,网络传输效率较高,网络联系呈现邻近效应和偏好依附效应;网络结构层级性显著,核心节点对网络的控制及辐射带动效应强;(3)蓄意攻击和随机故障情境下,黄土高原生态网络连通鲁棒性和脆弱鲁棒性均显著下降,但网络连通性下降更显著,网络易破碎,生态网络脆弱;蓄意攻击情景下网络韧性下降更显著,核心节点对生态网络控制及辐射带动效应强,影响范围广、强度大。保护核心源地,加强边缘源地间的联系,形成密集的多核心组团式生态网络,提升黄土高原生态环境质量。

关键词:生态网络韧性;MCR 模型;引力模型;鲁棒性模型;黄土高原

A study on the resilience of ecological networks in the Loess Plateau from the perspective of ecological security patterns

YANG Liangjie^{1,2,*}, ZHANG Lingling¹, ZHANG Fangning¹, YANG Yongchun^{3,4}, LUO Yaling¹

1 School of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2 Key Laboratory of Oasis Resources, Environment and Sustainable Development in Gansu Province, Lanzhou 730070, China

3 School of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

4 Key Laboratory of Western Environmental Education of Lanzhou University, Ministry of Education, Lanzhou 730000, China

Abstract: The resilience of ecological networks refers to the ecosystem's capacity to withstand, recover from, and adapt to unpredictable disturbances, which stands at the forefront of contemporary ecosystem research. This paper developed an evaluation framework for the ecological security pattern, focusing on “water resources, soil and water conservation, desertification, and ecosystem quality.” It identified ecological sources, extracts corridors utilizing the MCR model, and scrutinized the characteristics of the ecological security pattern on the Loess Plateau. The gravity model was employed to establish an ecological network, enabling an examination of the resilience traits inherent in the network, along with an analysis of the scope and strength of influence exerted by core nodes. The network robustness model was utilized to simulate the variations in ecological network resilience across diverse scenarios on the Loess Plateau. The findings revealed that: (1)

基金项目:甘肃省科技计划项目-软科学专项(23JRZA402);国家自然科学基金地区项目(42361031,41961030);西北师范大学绿洲科学科研成果突破行动计划项目(NWNU-LZKX-202306)

收稿日期:2024-02-24; 网络出版日期:2024-08-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangljmxx@163.com

there was notable spatial heterogeneity in ecological source areas and corridors across the Loess Plateau. The ecological source areas exhibited dense distribution in the north and sparse distribution in the south, demonstrating a northeastern to southwestern trend. The primary core source areas were predominantly situated in the Inner Mongolia Autonomous Region and Yulin City. (2) The ecological network of the Loess Plateau operated in a clustered mode, characterized by high transmission efficiency and exhibiting a proximity effect and preference dependence effect in network connections. The network structure displayed a clear hierarchy, with core nodes exerting significant control and exerting a driving influence on network dynamics through radiation effects. (3) In the face of deliberate attacks and random failures, both the connectivity robustness and vulnerability robustness of the Loess Plateau ecological network experienced noticeable declines. However, the reduction in network connectivity was more pronounced, rendering the network fragile and indicating fragility in the ecological network as a whole. In the deliberate attack scenario, the ecological network experienced a more pronounced decrease in toughness, emphasizing the influential role of core nodes in controlling and radiating effects across the network, exhibiting a wide-ranging and intense influence. To enhance the ecological environment quality of the Loess Plateau, it is imperative to safeguard the core source areas while bolstering connections among marginal source areas. This strategy fostered the formation of a densely interconnected multi-core ecological network, which is vital for sustaining ecological integrity and resilience across the region.

Key Words: resilience of ecological network; MCR Model; gravity model; robustness model; the Loess Plateau

生态安全描述生态系统的结构和功能完整、健康稳定,在保护生物多样性、人类栖息地和预防自然灾害等方面发挥着重要作用,并为人类生活和社会经济活动提供充足的生态服务的状态^[1]。随着城镇化快速推动城市空间蔓延,大量农用地、生态用地转为建设用地,非自然景观显著增加,导致生态景观破碎、连通性降低、生态服务功能下降等环境问题凸显^[2],黄土高原土质疏松、地表沟壑纵横、土壤侵蚀严重,耕地、居住地和建设用地广布,生态斑块破碎,是典型的生态环境脆弱区,生态环境易受到人类活动的干扰,生态功能减弱,生态环境脆弱性增加,严重影响社会生态系统健康可持续发展和生态安全^[3-4]。黄土高原是国家生态恢复重点区,其生态恢复、经济发展和社会进步直接关系到中国国家可持续发展目标的实现。在此背景下,国家层面提出要推进绿色发展,加大生态系统保护力度,实施生态保护和修复工程,优化生态安全屏障体系,构建生态网络,提高生态系统安全性和韧性,优化生态安全格局^[5]。因此,黄土高原迫切需要识别并保护生态源点,进而建立生态安全格局。生态安全格局是一种多类别、多层次的生态空间配置模式,旨在维持生态系统稳定和生态过程的完整性^[6-7]。生态安全格局是一个由生态源地和走廊组成的相互联系的网络系统,是维持自然生态过程和实现生态安全的有效途径^[8],在提高生态韧性方面发挥着重要作用^[6]。Yuan 等将生态安全格局与韧性结合,探究了资源型城市生态韧性,并提出相应的优化建议^[9];Yang 等采用多尺度格局分析和功能相结合的方法,对麦积区生态安全格局进行评价及优化^[6];Wang 等运用电路理论构建生态安全格局,验证了生态安全格局的建立可以改善生态保护^[10]。

构建连通且稳定的生态网络,使区域内形成连续、完整、系统的生态安全格局,既为实现区域生态安全提供保障^[3,11],又可增进对自然环境与经济社会互动机制的理解^[12]。生态网络是耦合景观结构、生态过程和功能的重要途径^[13]。自 1935 年英国生物学家坦斯利首次指出生态网络以来^[14-15],生态网络逐渐成为生态学、景观学、风景园林学和地理学等领域研究的重点和热点^[2,16]。国际上有关生态网络从最初欧洲的景观轴线、林荫大道和生态城市到美国的绿色网络^[17],再到生态安全格局的提出,无一不体现着生态网络研究的多元化和重要性。目前,生态网络的构建及评价^[18-22]、生态网络的特征及生态修复^[23]、生态网络韧性评价^[24]以及基于生态网络的连接性和稳定性,优化生态安全格局^[25-27],成为生态网络研究的基本范式。

生态网络的研究以“生态源地识别-生态廊道提取-生态网络格局分析”为主流范式^[16],学者们用多种方法进行生态源地识别、阻力面构建和廊道提取。生态源地的识别以土地利用类型和生态保护区叠加识别、空

间形态分析法识别及多元生态指标识别为主;阻力面多是通过指标法和熵权法构建;廊道提取主要利用最小累积阻力模型(Minimum Cumulative Resistance Model, MCR)^[5,28-30]和电路理论^[16,31]等方法。MCR模型能够较好的模拟不同景观下能量流通的阻力,成为提取生态廊道常用的有效方法。

生态网络韧性是评估生态系统韧性的关键指标^[32]。研究显示,生态网络的结构与功能与生态系统的韧性紧密关联,评估生态网络韧性对于理解区域生态系统的整体韧性至关重要^[24]。基于复杂网络理论、破碎度和生态网络鲁棒性模型从蓄意攻击和随机故障下对网络韧性研究较多,其中莫振淳^[26]和于强^[23]尝试将鲁棒性模型系统应用于生态网络韧性研究中,模拟蓄意攻击和随机故障情境下生态网络韧性,进而剖析生态网络韧性变化。然而,当前关于生态网络的研究主要聚焦于生态网络构建及网络空间结构分析^[33-34],关于生态网络韧性的研究相对较少,且多处于初步探索阶段。生态网络的节点数量、生态质量及其连通性是影响生态网络韧性的核心要素,重点保护核心生态节点,可以提高区域生态系统的韧性^[24]。

基于此,本研究从生态安全格局视角构建水资源-水土保持-沙漠化-生态系统质量生态安全格局评价体系,识别黄土高原区生态源地;基于土地利用类型、夜间灯光指数、人口密度和距离交通线和河流的距离构建阻力面,应用MCR模型提取廊道,构建生态安全格局;应用引力模型构建生态网络,应用复杂网络结构模型剖析生态网络拓扑结构特征;应用鲁棒性模型模拟不同情景下黄土高原生态网络韧性变化,分析核心生态源地失效时影响范围和强度,为推动黄土高原区高质量发展提供科学依据。

1 数据来源与处理

1.1 研究区概况

黄土高原位于黄河中上游地区,自东向西横贯半湿润、半干旱气候区,介于 $33^{\circ}43'—41^{\circ}16'N$, $100^{\circ}54'—114^{\circ}33'E$ 之间,面积约64万 km^2 ,地跨河南、青海、宁夏、甘肃、陕西、山西、内蒙古七个省份,是世界上最大的黄土沉积区,水土流失严重、生态环境脆弱(图1)。自1999年的退耕还林、生态文明建设等政策相继提出,黄土高原生态恢复成效显著,林地、草地和耕地面积不断增加,但局部水土流失严重、生态环境仍较脆弱。黄土高原上人口密集的关中、晋中和兰西城市群,随着经济发展,建设用地不断增加,人地矛盾凸显,生态环境恶化和生态斑块破碎化,改善区域生态安全格局迫在眉睫。

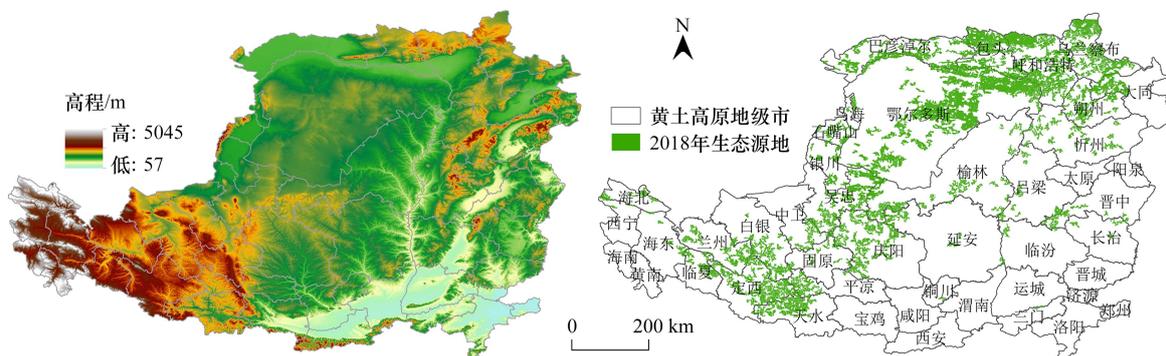


图1 研究区概况

Fig.1 The overview of research area

1.2 数据来源及预处理

2018年Landsat8 OLI影像数据源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/search>),空间分辨率为30m,影像云量均低于5%,通过ENVI5.3软件进行辐射定标、大气校正、分辨率转换为1km之后合成,利用沙漠化指数公式计算得到沙漠化指数。2018年的高程、坡度、土地利用类型及植被归一化指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),空间

分辨率为 1km,坡度数据用空间分辨率为 1km 的 DEM 数据计算。2018 年降水量、蒸散量等气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网中的《中国地面气候资料年、月、日值数据集》(<http://data.cma.cn>),空间分辨率为 1km。生物多样性指数和生态系统弹性指数利用土地利用类型数据应用表 1 中对应的公式计算。土壤数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.crensed.ac.cn/portal/>),通过 ArcGIS 软件进行裁剪计算蒸散发量和土壤深度,然后利用 InVEST 模型计算得出产水量,空间分辨率为 1km。夜间灯光数据来源于 Harvard Dataverse 平台(<https://doi.org/10.7910/DVN/YGIVCD>),空间分辨率为 1km。

2 研究思路与方法

2.1 研究思路

研究内容主要包括黄土高原生态网络的构建,网络拓扑结构及韧性分析。首先,从水资源安全、水土保持安全、沙漠化格局以及生态系统质量四个维度选取生物多样性、沙漠化指数、高程、生物多样性等指标构建生态源地识别指标体系,识别生态源地;基于土地利用类型、夜间灯光指数、人口密度和源地距公路、铁路和河流的距离构建阻力面;采用 MCR 模型提取生态廊道,构建生态安全格局,分析其格局特征;其次,应用引力模型构建生态网络,应用度、度分布、度相关、平均路径长度和聚类系数等复杂网络模型从层级性、匹配性、传输性和集聚性分析生态网络拓扑结构;最后,利用鲁棒性模型模拟随机故障和蓄意攻击下黄土高原生态网络韧性变化及核心生态节点的影响范围(图 2)。

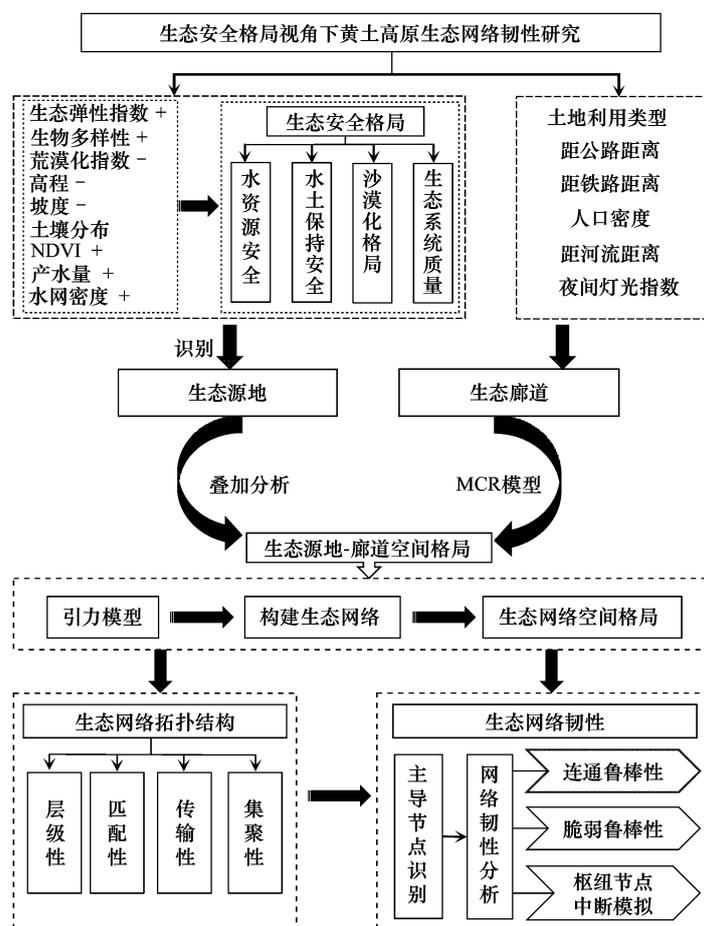


图 2 研究框架图

Fig.2 The research framework

MCR: 最小累积阻力模型

2.2 研究方法

2.2.1 生态网络构建

(1) 生态源地识别

生态源地是具有良好的生态功能,面积较大且空间上具有一定的拓展性和连续性的斑块,能推动生态过程的发展,对维持区域生态系统健康发展具有较大的辐射和带动作用^[1,27]。根据已有研究^[5,13,24,27]和黄土高原独特的生态环境特征,综合考虑指标的重要性和数据可得性,从水资源安全、水土保持安全、沙漠化格局以及生态系统质量四个维度选取 9 个指标构建指标体系(表 1),采用熵权法计算指标层权重,并将各具体指标综合叠加构建生态安全格局。生态源地是各子系统生态服务较重要的地区即各单一景观过程中生态安全水平最高的区域取并集获得的,基于自然段断点法将各单一景观过程的生态安全格局分为高度、较高、中度、较低和低度安全水平 5 个等级,获得安全评价结果,提取生态安全水平高的区域作为黄土高原的生态源地。

(2) 阻力面构建

阻力面表征生态物种和生物在空间移动的阻力大小,影响因素主要表现为人类活动和自然环境两大类。因此,本研究从人类活动和自然因素两方面客观构建阻力面指标体系,采用人口密度、夜间灯光指数、源地距公路、铁路和河流的距离、DEM 数据,表征人类活动和自然条件对生态过程发生时所受阻力的大小。采用熵值法赋权重,最终加权求和到综合阻力面。利用自然断点法将基本阻力面划分为 1—5 级,1 级阻力值最小,5 级阻力值最大。

(3) 最小累积阻力(Minimum Cumulative Resistance, MCR)模型

根据生态源地和综合阻力面,基于 ArcGIS10.4 软件中的 Cost-Distance 模块,采用最小累积阻力模型生成成本最低路径,构建源地-廊道生态安全网络。公式如下^[5]:

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

式中: f 是正函数,用来反映空间中的任意一点的最小阻力和到源地的距离以及景观基面特征的一个正相关关系, D_{ij} 是物种从源地 j 到空间某景观基面 i 空间距离, R_i 是景观 i 对某物种运动的阻力系数。

(4) 改进的引力模型

引力模型用于定量评价一定尺度空间要素之间的相互影响力,应用于评价生态源地间相互作用力的大小,源地间作用力越大生态廊道越重要^[38-39]。本文结合生态系统生物阻力及生态源地-廊道理论改进引力模型,构建生态网络映射网络,用于生态网络拓扑结构和韧性研究。模型如下:

$$G_{ij} = \frac{L_{\max}^2 \ln(S_i) \ln(S_j)}{L_{ij}^2 P_i P_j} \quad (2)$$

式中: G_{ij} 为源地 i 和源地 j 的作用力, L_{\max} 为区域所有廊道的最大累计阻力值, S_i 和 S_j 是源地 i 和源地 j 的面积, L_{ij} 为源地 i 与源地 j 之间廊道的累计阻力值, P_i 、 P_j 分别是源地 i 和源地 j 的阻力值。

2.2.2 生态网络拓扑结构分析

匹配性、层级性、传输性和集聚性是评估生态网络结构特征的重要指标,通过查阅文献,选取度分布、度关联、平均路径长度和聚类系数^[40],从层级性、匹配性、传输性和集聚性对整体网络特征进行分析;采用中心度、中介度、特征向量和紧密度剖析生态网络拓扑结构(表 2)。

2.2.3 生态网络韧性分析

鲁棒性反应网络受到外来干扰时所表现出的特征,连通鲁棒性和脆弱鲁棒性是评价网络韧性的有效途径^[41]。生态网络的攻击方式主要有随机攻击和蓄意攻击,本文基于鲁棒性模型应用 MATLAB 软件模拟生态网络受到攻击后网络韧性的变化。蓄意攻击情景的模拟,首先将生态节点按重要性排序,再利用公式(3)测度核心节点删除时生态网络韧性大小。随机故障情景的模拟无需对节点排序,使用原始数据测度随机删除一定数量的节点时网络韧性的变化。

表 1 生态安全格局源地识别的指标及方法

Table 1 Index and method for identification of ecological security pattern source area

| 准则层 Criterion layer | 指标层 Indicator layer | 作用 Indicator function | 方法 Method | 公式 Formula | 说明 Illustr |
|--|------------------------|--------------------------|------------------------------|--|---|
| 水资源安全 Water resource security | 河网密度 | + | 线密度计算法 ^[5] | | 流域内干支流总长与流域面积的比值 |
| | 产水量 | + | INVEST模型 ^[35] | $Y_{ij} = \left(1 - \frac{AET_{ij}}{P_x}\right) \times P_x$ | Y_{ij} 为栅格单元 x 中土地覆被类型 j 的年产水量, AET_{ij} 单元 x 中土地覆被类型 j 的实际蒸散量, P_x 栅格单元 x 的降水量 |
| 水土保持安全 Soil and water slope conservation safety | 坡度 | - | DEM 提取 坡度 ^[5] | | 坡面的垂直高度和路程的比值 |
| | 土壤类型 | - | 土壤类型 分类 ^[5] | | 参考《中国土壤分类系统》的标准分为 5 种安全水平等级 |
| 沙漠化格局 Desertification psittem | 年降水侵蚀力 | - | 降水侵蚀 指数 ^[5] | $R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{1.5(\log_{10} p_i^2 - \log p_i) - 0.8188}$ | 降水对区域土壤的侵蚀能力; R 为年降水侵蚀力, p_i 是月平均降水量, p 为年均降水量 |
| | 沙漠化程度 | - | 荒漠化 指数 ^[5,36] | $DI = -DDI = \frac{1}{K_i} \times NDVI_s + Albedo_s$ | 沙漠化程度; $NDVI_s$ 、 $Albedo_s$ 分别为标准化后的植被归一化指数和地表反照率 |
| 生态系统质量 Ecosystem quality | 生态系统弹性 | + | 生态系统弹性 指数 ^[37] | $f = \frac{0.5a + 0.9f + 0.6g + 0.8w + 0.2c + 0.3u}{area}$ | 生态环境受到人类干扰时保持其原有状态的能 力;式中 a, f, g, w, c 和 u 分别代表耕地、林地、草 地、水域建设用地和未利用土地面积。 |
| | 生物多样性 | + | 生物丰度 指数 ^[5] | $f = \frac{0.35f + 0.21g + 0.28w + 0.11a + 0.04c + 0.01u}{area}$ | 区域内生物的丰贫程度;式中 a, f, g, w, c 和 u 分 别代表耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利 用土地面积,其权重依据《生态环境状况评价技 术规范》标准。 |
| | 植被 | + | NDVI | | 反映植被覆盖度 |

AET; 实际蒸散量, Actual evapotranspiration; NDVI; 标准化后的植被归一化指数, Normalized difference vegetation Index; Albedo_s; 标准化后的地表反照率, Surface albedo, NDVI; 植被归一化指数 Normalized difference vegetation Index

表 2 生态网络拓扑结构分析指标

Table 2 Topological structure analysis indicators for ecological networks

| 目标 Target | 指标 Index | 方法 Method | 表达式 Expression | 表达式内涵解释 Explanation of expression connotation |
|----------------------------|-------------|--------------|---|---|
| 网络拓扑结构 Network topology | 中心性 | 中心度 | $C_D(i) = \sum_{j=1}^n X_{ij}, C'_D(i) = \frac{C_D(i)}{n-1}$ | $C_D(i)$ 为节点 i 的绝对中心度; X_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的联系 强度; $C'_D(i)$ 为相对中心度。中 心度表示节点对生态网络重要 程度的量化,中心度越大,点的 功能性越强。 |
| | | 中介度 | $C_R(i) = \sum_j \sum_k \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}}, j \neq k \neq i, \text{且 } j < k$ | $C_R(i)$ 表示中介中心度; g_{jk} 代表 节点 j 和节点 k 存在最短路径的 数量。中介度表征节点在生态 网络中的桥梁作用。 |
| | | 特征向量 | $E_i = \lambda^{-1} \sum_{j=1}^n a_{ij} e_j$ | E_i 表示节点 i 的特征向量中心性 值; λ 表示邻接矩阵的特征值。 特征向量是基于网络全局属性 计算节点重要性的指标,当一个 节点与另一个重要节点相连接, 那么它的重要性将会得到提升。 |
| | 紧密度 | 网络密度 | $D = \frac{m}{[n \times (n-1)]}$ | D 表示网络密度; m 表示实际关 系数; n 表示节点数。网络密度 直观地反映生态网络中各节点 之间联系的紧密程度。 |
| | 层级性 | 度分布 | $\ln C_i = \ln K + a \ln C_i^*$ $H_N = C_i / C_{\max}$ | C_i 表示节点 i 的度; C_i^* 表示节点 i 的度的位序; K 是常数项; a 为斜率,且 $a < 0$ 。斜率越大表示 网络的层级性越明显。 |
| | 匹配性 | 皮尔逊相关 系数 | $r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$ | 皮尔逊相关系数解释网络的匹 配性(偏好依附)。 $r \in (-1, 1)$, 表示两个变量之间的线性关系 强度和方向。当 r 为正时,表示 正相关;当 r 为负时,表示负相 关;当 r 接近于 0 时,表示无线性 关系。 |
| | 传输性 | 平均路径长度 | $L = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i,j=1}^n d_{ij}$ | L 表示平均路径长度,表示网络 中任意两个节点之间的距离 d_{ij} 的平均值,反映网络的整体连通 性和信息传播率。 |
| | 集聚性 | 集聚系数 | $C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}$ | C 表示集聚系数; E_i 表示节点 i 的邻居连接数; k_i 表示节点 i 的度; n 代表节点数。集聚系数是 衡量整个网络的群聚程度,集聚 系数越大,群聚程度越高。 |

(1) 连通鲁棒性

连通鲁棒性指当一个节点受到干扰或失效时网络中各种流量保持连通的能力^[41]。通过计算连通鲁棒性揭示生态空间网络在受到外界攻击时内部要素流保持畅通能力的大小。原理如下:

$$R_c = \frac{N - \sum_{i=1}^{255} N_i}{N} \quad (3)$$

式中: R_c 为网络的连通鲁棒性, N 为生态网络中连接边的总数, N_i 为删除 i 个节点后删除的连接边, i 为生态网络中任意节点。

(2) 脆弱鲁棒性

脆弱鲁棒性指生态网络中节点受到自然或人类破坏后生态系统自我调节,恢复自身生物流流通的能力,也称网络传输效率^[2,41]。网络传输效率越高,网络脆弱鲁棒性越高。计算公式如下:

$$E_v = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}} \quad (4)$$

式中: E_v 为脆弱鲁棒性, n 为网络中所有节点数量, G 为网络节点集合, i 和 j 为网络 G 中任意两点, d_{ij} 为节点 i 到节点 j 的最短路径长度。

3 结果分析

3.1 黄土高原生态安全水平

依据上文构建的生态安全格局指标对黄土高原各维度生态安全水平进行测度分析。分析结果显示(图3):

(1) 黄土高原水资源格局与降水量一致呈带状分布,生态安全水平由南向北呈下降趋势。高度生态安全水平区呈分散状分布于水系附近,较高、中度、较低和低度生态安全水平自南向北依次布局。

(2) 水土保持生态安全水平空间异质性显著。高度生态安全水平分布在黄土高原西部和北部地势平坦的内蒙古草原,中度生态安全水平主要分布在黄土高原中部和南部,较低生态安全水平分布在植被稀疏的沙漠地区,低度生态安全水平分布在黄土高原边缘区。

(3) 黄土高原北接腾格里沙漠,气候干燥,土地沙化严重,东部、南部和西部气候较为湿润,水资源较丰富,沙漠化程度低。

(4) 生态系统质量安全水平高的区域呈东北西南走向分布在气候湿润、水源涵养能力强的区域,低水平和较低水平生态安全区主要分布在内蒙古沙漠区。

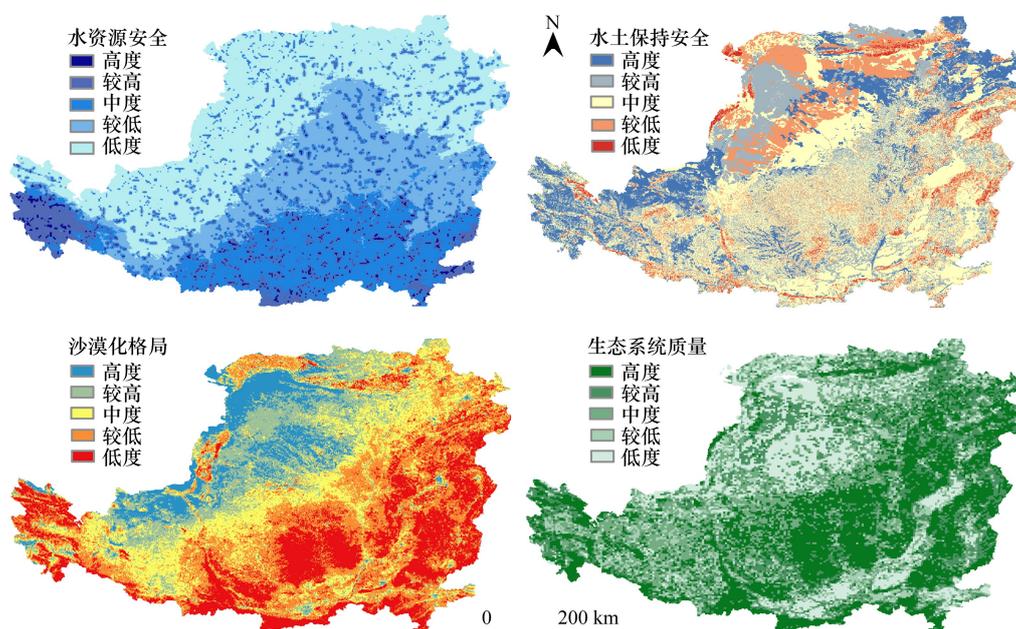


图3 2018年黄土高原生态安全水平

Fig.3 Ecological security level pattern of the Loess Plateau in 2018

3.2 黄土高原生态安全格局

黄土高原区生态源地空间异质性显著,在高原北部区域呈东北-西南走向分布,生态廊道北部密集南部稀

疏(图4)。草地、耕地和林地是构成黄土高原生态斑块的主要景观类型,草地、耕地和林地中的生态源地分别占黄土高原生态源地 47.24%、33.42%和 6.27%。黄土高原生态廊道,主要分布在高原北部和中部区域;生态源地一共 255 个,呈密集状分布在高原北部,该区域生态保护政策强劲,生态环境质量较好。高原东南部气候湿润,适合人类居住,人口密集,经济活动频繁,农业、商业和工业用地面积大,生态源地面积小且分布零散。

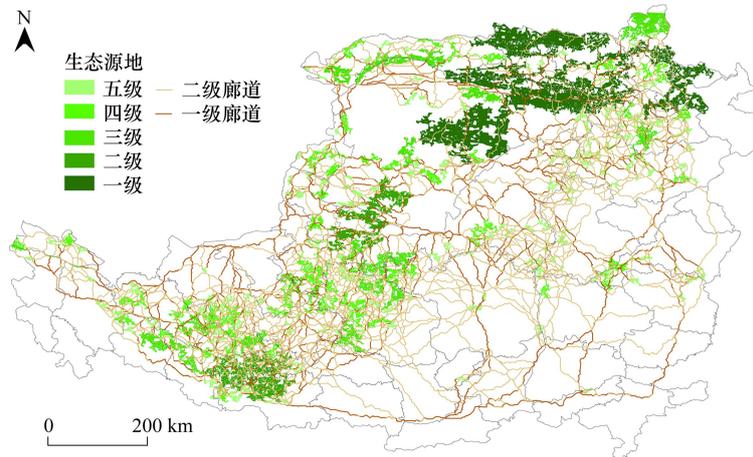


图4 2018年黄土高原生态源地-廊道空间格局

Fig.4 Spatial pattern of ecological source-corridor in the Loess Plateau in 2018

3.3 黄土高原生态网络拓扑结构特征

结合生态系统生物流阻力及生态源地-廊道理论改进引力模型,构建生态网络映射网络,进行生态网络拓扑结构特征分析,其生态节点是将研究区域内的生态源地抽象为拓扑网络中的节点。黄土高原生态网络呈组团格局分布,层级性显著,网络联系呈现邻近效应和偏好依附效应,核心生态节点对网络的控制及辐射带动效应强(图5)。黄土高原生态网络密度为 0.37,网络较稀疏;生态网络平均聚类系数为 0.4,网络聚类效应不显著;核心生态节点主要分布在高原北部的呼伦贝尔草原、乌兰察布草原、鄂尔多斯草原和生态文明示范城市榆林,节点间联系较密集,形成核心节点群组;生态节点 76、68、87、56 和 47 的特征值占整个生态网络的 90%,网络偏好依附现象显著。

3.4 黄土高原生态网络韧性

3.4.1 连通鲁棒性

基于鲁棒性模型应用 MATLAB 软件模拟黄土高原生态网络受到攻击后网络连通韧性的变化,模拟结果如图 6。

黄土高原生态网络在蓄意攻击和随机破坏情况下连通鲁棒性均呈下降趋势,且蓄意攻击情景下网络连通鲁棒性下降更快,生态网络易破碎,韧性显著降低,表明核心生态节点对维持网络韧性具有关键作用(图6)。在蓄意攻击情景下,节点 92、59、163、61、7 和 123 这 6 个核心节点(2.35%)失效时生态网络的 10%遭到破坏,对网络的破坏性大,而随机破坏情景下随机删除 34 个节点(13.33%),才会对 10%的生态网络产生影响。蓄意攻击情景下 61 个生态节点失效,50%的生态网络处于瘫痪,而随机故障情境下需要 165 个节点失效,才会对 50%的生态网络产生影响。蓄意攻击和随机破坏情景下生态网络的连通鲁棒性差异显著,蓄意攻击情境下网络连通性迅速下降,网络破碎度快速增加,大部分生态过程中断,而随机故障情景下网络连通性下降较缓慢。当 98%的节点被删除时,两种攻击情境下网络连通鲁棒性均为 0,生态网络完全断裂破碎,整个网络处于瘫痪状态。

3.4.2 脆弱鲁棒性

蓄意攻击和随机故障情景下,黄土高原生态网络脆弱鲁棒性均波动下降,二者差异较小,蓄意攻击情景下

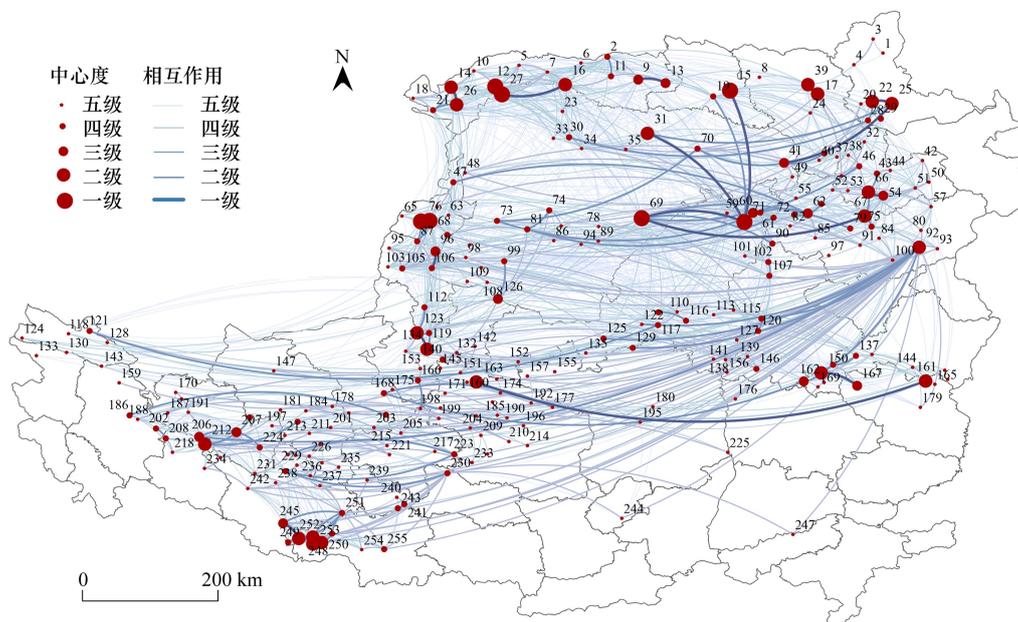


图5 2018年黄土高原生态网络空间格局

Fig.5 Spatial pattern of ecological network in the Loess Plateau in 2018

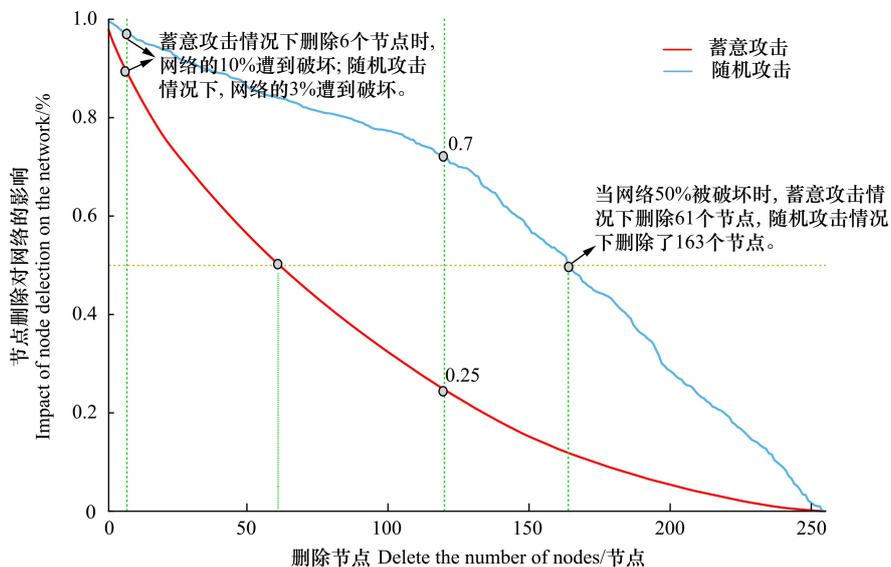


图6 2018年黄土高原生态网络连通鲁棒性模拟结果

Fig.6 The simulation of connectivity robustness of ecological networks on the Loess Plateau in 2018

下降略快。整体上黄土高原生态网络传输效率相较网络连通性高且稳定(图7)。蓄意攻击情景下,删除42个节点时,黄土高原生态网络传输效率为0.8,删除159个节点时,生态网络中有一半的节点属于孤立状态;而随机情景下,97个生态节点删除时,网络传输效率为0.8,176个生态节点删除时,生态网络中的一半节点处于孤立状态,部分生态过程中断。当6个核心节点(92、59、123、69、61和71)受到攻击失效时,生态网络的10%处于瘫痪状态,网络破碎程度显著增大,整个网络的传输效率大幅下降,表明核心节点对网络具有强的控制力,对网络的传输效率影响大。97%的生态节点失效时,网络彻底崩溃,生态环境破坏极度严重。

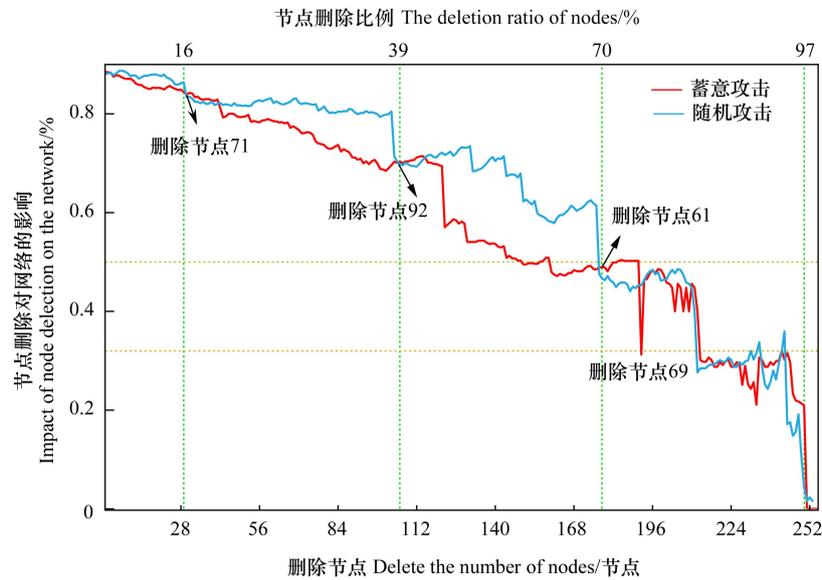


图 7 2018 年黄土高原生态网络脆弱鲁棒性模拟结果

Fig.7 The simulation of fragile robustness of ecological network on the Loess Plateau in 2018

3.5 枢纽节点中断时的影响范围

黄土高原区生态网络中生态节点层级性显著,空间异质性显著,核心节点的区域影响范围大(图 8)。生态网络中生态节点之间联系强度整体符合帕累托定律。核心生态节点 71、76、68、15、69 和 27 的总联系强度最大,占整个生态网络中总联系强度的 50%,对整个生态网络的控制作用显著。生态节点 71 是生态网络中联系强度最大的节点,占总联系强度的 16%,位于黄土高原生态示范区的榆林市,影响范围主要为黄土高原北部;生态节点 76 和 68 分布在北武当生态旅游区,主要影响黄土高原北部太行山以西的山西和宁夏两省区;生态节点 15、69 和 27 位于内蒙古自治区,主要影响黄土高原东北区域。

枢纽节点 92、59、123、69、7 和 19 的连边数最大,辐射影响范围大(图 9)。节点 92 位于山西省太原市,在生态过程中桥接功能显著,节点 92 失效时,生态网络的 4.3%遭到破坏,网络连通性明显下降,23 个地级市受到影响,辐射范围波及黄土高原大部分区域。位于陕西境内的节点 59 和 69 失效时,黄土高原生态网络联系分别减少 3%和 2.5%,主要影响黄土高原中部和北部区域,涉及 11 个地级市。节点 7 和 19 分布在内蒙古自治区,虽然斑块面积较小,但在生物迁徙和生物流量传播中担任“歇脚石”功能,辐射范围较广,影响范围波及宁夏回族自治区、内蒙古自治区以陕西和山西两省的北部区域,对黄土高原生态网络的构建有举足轻重的作用。生态节点 123 位于吴忠市,占生态网络的 2.8%,影响范围波及黄土高原北部和中部 19 个地级市,对黄土高原中北部区域生态安全格局影响大。

枢纽节点对生态过程有序推进具有重要辐射带动作用,枢纽节点被攻击对生态网络稳定运行产生巨大的影响。节点 71、76、68、15、69 和 27 被攻击时 10%的生态网络被破坏;节点 92、59、123、69、7 和 19 失效时,58%的生态网络处于瘫痪,生态网络破碎化(图 10)。黄土高原区生态网络密集,共产生 2034 条生态廊道,当节点 92、59、123、69、7 和 19 删除时 1180 条生态通道断裂,生态网络破碎度明显增加;删除节点 92、59、69、123、7、19、71、76、68、15 和 27 时 1383 条生态通道受损断裂,黄土高原中生态系统有序发展受到威胁,生态网络韧性受到冲击。因此,在生态保护和规划中应加强对枢纽节点的保护,为生态网络稳定发展提供保障。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文着眼于生态网络韧性的理论视角,构建“水资源-水土保持-沙漠化-生态系统质量”四维生态安全格

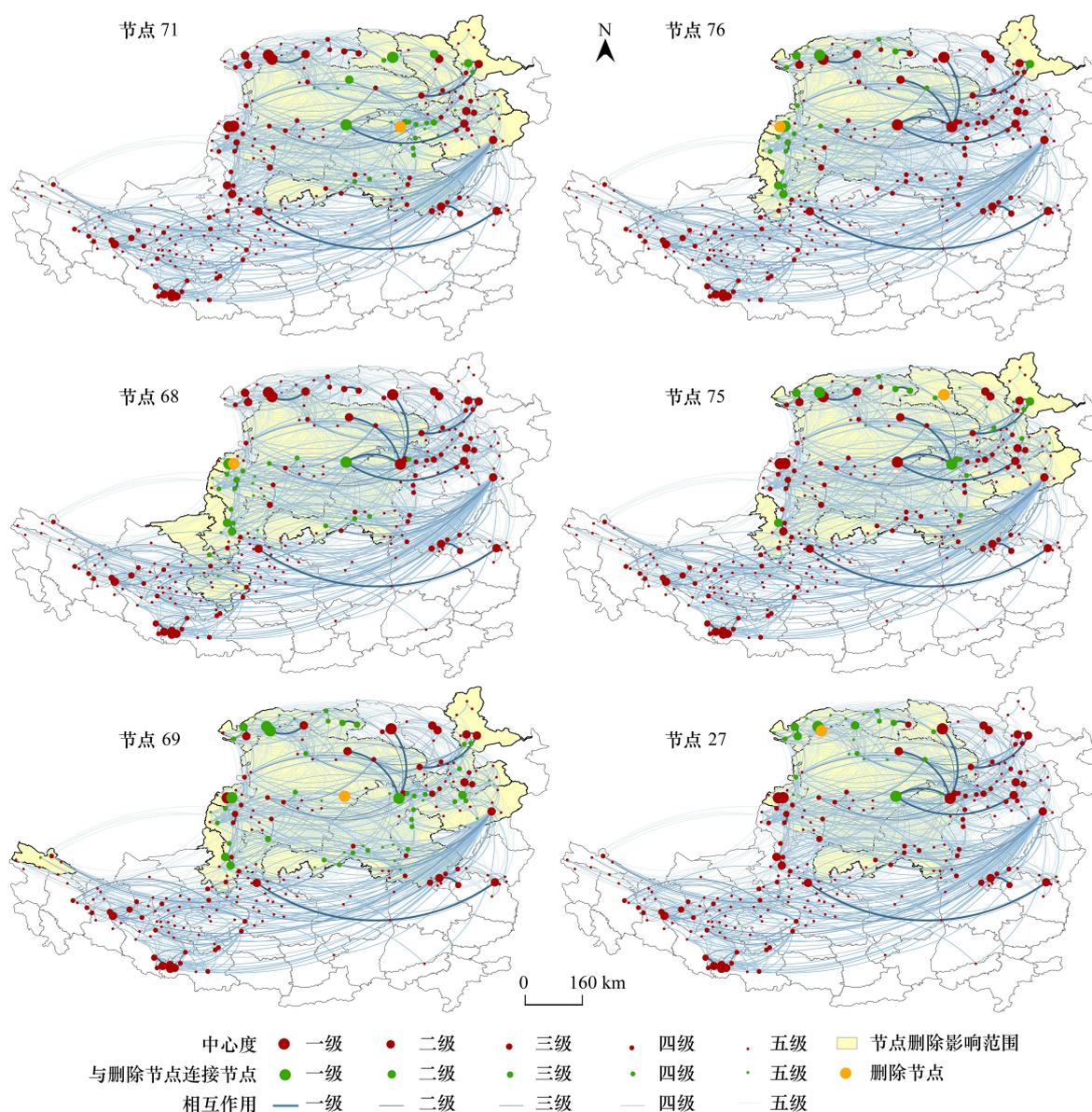


图 8 2018 年黄土高原联系强度大的枢纽生态节点影响范围

Fig.8 The influence ranges of hub ecological nodes with connection strength on the Loess Plateau in 2018

局评价体系,采用 MCR 模型、引力模型和复杂网络分析方法等构建和测度黄土高原生态网络拓扑结构特征,并应用鲁棒性模型模拟蓄意攻击和随机故障情景下生态网络韧性变化,解析枢纽节点失效的区域影响范围。主要结论如下:

(1) 黄土高原区生态安全格局空间异质性显著,北部生态环境较好南部较差。北部生态源地密集且斑块面积较大,呈东北-西南走向的带状分布,南部生态源地稀疏,斑块面积小;生态廊道北部密集南部稀疏。

(2) 黄土高原生态网络呈集聚组团格局,网络传输效率较高,网络联系呈现邻近效应和偏好依附效应;网络结构层级性显著,核心生态节点对网络的控制及辐射带动效应强,核心节点主要分布在黄土高原北部的内蒙古自治区和生态文明示范区榆林市。

(3) 蓄意攻击和随机故障情境下,黄土高原生态网络连通鲁棒性和脆弱鲁棒性均显著下降,但网络连通性下降更显著,网络易破碎,生态网络脆弱;蓄意攻击情景下网络韧性下降更显著,核心节点对生态网络控制及辐射带动效应强,影响范围广、强度大。

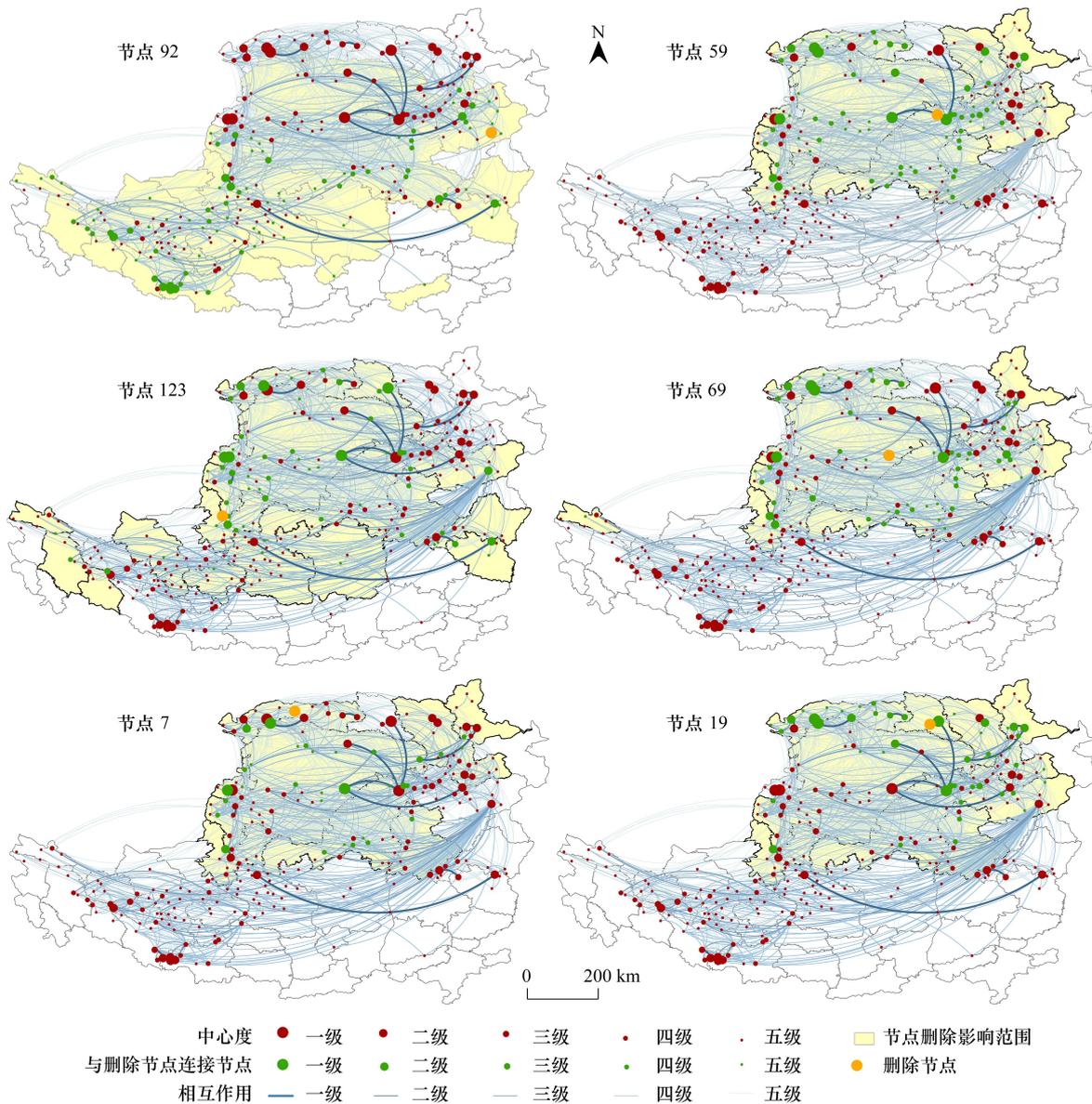


图 9 2018 年黄土高原联系广的枢纽生态节点影响范围

Fig.9 The influence ranges of hub ecological nodes with wide connections on the Loess Plateau in 2018

4.2 讨论

本文考虑黄土高原水土流失严重、干旱沙化严重,生态脆弱等特点,以生态安全格局为切入点,构建“水资源-水土保持-沙漠化-生态系统质量”四维生态安全格局评价体系,识别生态源地;从自然和人类活动等方面选取指标体系,构建阻力面;应用 MCR 模型提取生态廊道,构建源地-廊道生态网络;借鉴引力模型构建生态网络的映射网络,探究生态网络拓扑结构和韧性;应用复杂网络模型模拟动态模拟随机故障和蓄意攻击两种情景下生态网络韧性变化,揭示黄土高原生态环境韧性特征和核心生态节点对生态网络的影响深度和广度;本研究将静态研究和动态模拟结合,应用多种数理模型对黄土高原生态网络空间格局和韧性进行深入全面的剖析,为推进黄土高原生态环境高质量发展提供科学依据。

黄土高原区生态源地及生态网络空间异质性显著,生态脆弱;受到冲击和压力扰动时,生态网络稳定性在随机故障和蓄意攻击情境下均明显下降,生态安全格局有待优化;核心节点对生态网络的控制和辐射效应强,

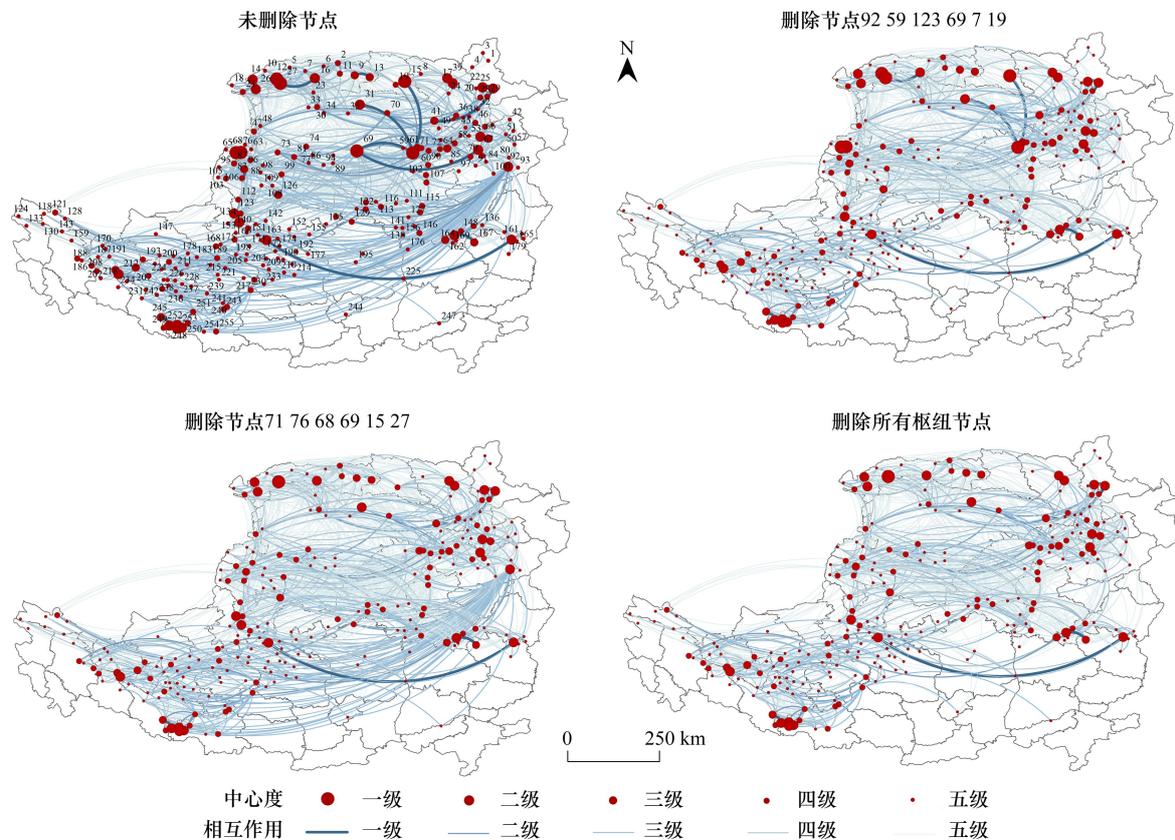


图 10 2018 年枢纽节点失效时黄土高原生态网络结构变化

Fig.10 The network structure changes with the hub nodes failure on the Loess Plateau in 2018

应加强核心生态源地的生态保护和治理。一般而言,区域生态节点聚集程度较高有利于形成组团发展模式,使网络具有应对干扰、抵抗外来灾害的能力^[42]。因此,黄土高原应加强草地、林地和其他绿地等主要生态源地的保护,特别是人口密集、人类活动密集且强度大的南部区域应加强现有生态源地保护的同时,利用“垫脚石”理论,建设一些新的生态源地和生态廊道,改善南部区域生态环境;结合区域的耕地保护红线、生态保护红线以及植被状况等因素,加强对核心节点的保护,加强生态节点间联系,保护和发展核心生态节点的核心控制,加强边缘节点间的联系,形成密集的多核心组团式模式,提高黄土高原生态网络稳定性,是未来黄土高原生态高质量发展的有效路径。

本文虽然对黄土高原生态网络韧性进行了深入研究,但依然存在以下问题需要进一步深化拓展研究:①指标选取偏重于黄土高原生态安全格局相关的指标,对生态空间质量的考虑较少,后续研究需要关注空气质量、碳排放、人类活动强度等维度的研究;②本文研究了单个时间节点的生态安全格局和生态网络韧性,无法观察长时间尺度下黄土高原生态安全格局和生态网络韧性的演变规律,后续研究将进行长时段黄土高原生态安全格局及生态网络韧性的时空演化研究,揭示生态网络演变规律;③生态源地的识别和廊道的提取,已经存在多样化的空间量化指标,例如景观脆弱度指数、景观安全邻接指数等,未来也可将其应用至研究体系中,以期获得更具现实指导性的结论。

参考文献 (References):

- [1] Wei H, Zhu H, Chen J, Jiao H Y, Li P H, Xiong L Y. Construction and optimization of ecological security pattern in the Loess Plateau of China based on the minimum cumulative resistance (MCR) model. *Remote Sensing*, 2022, 14(22): 5906.
- [2] 马晓琳, 郭莎莎, 徐扬, 魏子谦, 高子婷, 于力, 侯建丽. 生态脆弱区生态安全格局构建研究. *生态学报*, 2023, 43(22): 9500-9513.

- [3] 张启舜,李飞雪,王帝文,李满春,陈东.基于生态网络的江苏省生态空间连通性变化研究.生态学报,2021,41(8):3007-3020.
- [4] 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.地理学报,2020,75(11):2459-2474.
- [5] 杨亮洁,王晶,魏伟,杨永春,郭泽呈.干旱内陆河流域生态安全格局的构建及优化——以石羊河流域为例.生态学报,2020,40(17):5915-5927.
- [6] Fu Y J, Shi X Y, He J, Yuan Y, Qu L L. Identification and optimization strategy of county ecological security pattern: a case study in the Loess Plateau, China. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106030.
- [7] Wang Y, Pan J H. Building ecological security patterns based on ecosystem services value reconstruction in an arid inland basin: a case study in Ganzhou District, NW China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 241:118337.
- [8] Peng J, Pan Y J, Liu Y X, Zhao H J, Wang Y L. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. *Habitat International*, 2018, 71: 110-124.
- [9] Yuan Y, Bai Z K, Zhang J N, Xu C C. Increasing urban ecological resilience based on ecological security pattern: a case study in a resource-based city. *Ecological Engineering*, 2022, 175: 106486.
- [10] Wang C X, Yu C Y, Chen T Q, Feng Z, Hu Y C, Wu K N. Can the establishment of ecological security patterns improve ecological protection? An example of Nanchang, China. *The Science of the Total Environment*, 2020, 740: 140051.
- [11] 刘晓阳,魏铭,曾坚,张森.闽三角城市群生态网络分析与构建.资源科学,2021,43(2):357-367.
- [12] 马克明,傅伯杰,黎晓亚,关文彬.区域生态安全格局:概念与理论基础.生态学报,2004,24(4):761-768.
- [13] 李权荃,金晓斌,张晓琳,韩博,李寒冰,周寅康.基于景观生态学原理的生态网络构建方法比较与评价.生态学报,2023,43(4):1461-1473.
- [14] Tansley A G. The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, 1935, 16(3):284-307.
- [15] 程蕾,郝增超,曾维华.基于生态网络分析法的煤化工水网络结构解析.中国环境科学,2017,37(6):2363-2368.
- [16] 张亮,岳文泽,陈阳.基于斑块复合属性特征的城市生态安全格局构建——以杭州市为例.生态学报,2021,41(11):4632-4640.
- [17] 夏楚瑜,董樱樱,陈彬.城市生态韧性时空变化及情景模拟研究——以杭州市为例.生态学报,2022,42(1):116-126.
- [18] Lookingbill T R, Gardner R H, Ferrari J R, Keller C E. Combining a dispersal model with network theory to assess habitat connectivity. *Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America*, 2010, 20(2):427-441.
- [19] 于强.基于复杂网络理论的荒漠绿洲区生态网络研究[D].北京:北京林业大学,2018.
- [20] De Montis A, Barthélemy M, Chessa A, Vespignani A. The structure of interurban traffic: a weighted network analysis. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2007, 34(5):905-924.
- [21] Saura S, Vogt P, Velázquez J, Hernando A, Tejera R. Key structural forest connectors can be identified by combining landscape spatial pattern and network analyses. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(2):150-160.
- [22] 莫振淳.基于鲁棒模型的生态空间网络稳定性研究——以株洲市茶陵县为例[D].株洲:湖南工业大学,2018.
- [23] Wang F, Gao H, Liu J T, Fu T G, Qi F, Gao Y, Zhao L. Study on the characteristics of ecological network and critical areas of ecological restoration in hebei-Tianjin coastal wetlands. *Wetlands*, 2024, 44(2):24.
- [24] Zhao Y X, Zhang M, Zhao D X, Duo L H, Lu C Y. Optimizing the ecological network of resource-based cities to enhance the resilience of regional ecological networks. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(11):17182-17205.
- [25] Jiang H, Peng J, Liu M L, Dong J Q, Ma C H. Integrating patch stability and network connectivity to optimize ecological security pattern. *Landscape Ecology*, 2024, 39(3):54.
- [26] 梁坤宇,金晓斌,张晓琳,宋家鹏,李权荃,应苏辰,祁翌,周寅康.耦合生态系统服务供需的生态安全格局构建——以苏南地区为例.生态学报,2024,44(9):3880-3896.
- [27] 俞孔坚,王思思,李迪华,乔青.北京城市扩张的生态底线——基本生态系统服务及其安全格局.城市规划,2010,34(2):19-24.
- [28] 彭建,李慧蕾,刘焱序,胡熠娜,杨旸.雄安新区生态安全格局识别与优化策略.地理学报,2018,73(4):701-710.
- [29] 胡炳旭,汪东川,王志恒,汪翡翠,刘金雅,孙志超,陈俊合.京津冀城市群生态网络构建与优化.生态学报,2018,38(12):4383-4392.
- [30] 吴钰茹,吴晶晶,毕晓丽,栗云召,肖鲁湘.综合模型法评估黄河三角洲湿地景观连通性.生态学报,2022,42(4):1315-1326.
- [31] 陈艳,马月伟,潘健峰,冯小鹤.顾及石漠化敏感性的山地型城市生态网络构建——以云南省曲靖市为例.生态学报,2023,43(17):7060-7071.
- [32] Wang T, Li H B, Huang Y. The complex ecological network's resilience of the Wuhan metropolitan area. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108101.
- [33] 王云才.上海市城市景观生态网络连接度评价.地理研究,2009,28(2):284-292.
- [34] Fan Y P, Fang C L. Evolution process and obstacle factors of ecological security in Western China, a case study of Qinghai Province. *Ecological Indicators*, 2020, 117:106659.
- [35] 朱春霞,钟绍卓,龙宇,颜丹.黄河流域生态系统服务的时空演变及其驱动力.生态学报,2023,42(10):2502-2513.
- [36] 曾永年,向南平,冯兆东,徐豁. Albedo-NDVI 特征空间及沙漠化遥感监测指数研究.地理科学,2006,26(1):75-81.
- [37] Li Z T, Li M, Xia B C. Spatio-temporal dynamics of ecological security pattern of the Pearl River Delta urban agglomeration based on LUCC simulation. *Ecological Indicators*, 2020, 114:106319.
- [38] 刘秀萍,李新宇,李延明,赵松婷,戴子云,段敏杰.快速城市化地区生态网络构建与优化——以北京市大兴区为例.生态学报,2023,43(20):8321-8331.
- [39] 顾朝林,庞海峰.基于重力模型的中国城市体系空间联系与层域划分.地理研究,2008,27(1):1-12.
- [40] 彭翀,林樱子,顾朝林.长江中游城市群网络结构韧性评估及其优化策略.地理研究,2018,37(6):1193-1207.
- [41] 彭翀,陈思宇,王宝强.中断模拟下城市群网络结构韧性研究——以长江中游城市群客运网络为例.经济地理,2019,39(8):68-76.
- [42] Barabási A L. Network science. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2013, 371(1987): 20120375.