引文格式：赵晶辉,侯小波,杨梅焕,等. 利用MCR模型和生态安全评价构建区域生态安全格局[J]. 地理空间信息, 2026, 24(3): 87-91. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2026.03.018

利用MCR模型和生态安全评价构建区域生态安全格局

赵晶辉[1]，侯小波[1*]，杨梅焕[2]，常金生[1]，汪爱兴[1]，邢晓露[1]
（1. 北京洛斯达科技发展有限公司，北京 100044；2. 西安科技大学 测绘科学与技术学院，陕西 西安 710054）

摘　要：为助力碳中和碳达峰与生态文明建设整体布局，提升生态环境质量，以甘泉县为例，通过GIS分析与动态度模型研究了2010年、2020年土地利用结构演变情况；再结合景观生态安全评价模型与空间自相关模型评价了甘泉县生态安全水平；最后构建2020年阻力面指标体系，借助最小累积阻力模型构建生态安全格局。研究表明，10年间耕地和草地面积呈减少趋势，林地和建设用地面积呈增加趋势；甘泉县高生态安全区域主要分布在西部和西南部，增加了5 147 hm^2，较高生态安全区域占比达到25%，较低、低生态安全区域面积明显减少，生态安全空间分布主要为高—高、低—低集聚类型；构建生态源地面积44 166 hm^2、生态廊道21条、节点42个，形成点线面连通的生态系统，可为区域可持续发展和生态文明建设提供参考。

关键词：生态网络；景观生态安全评价；空间自相关模型；最小累积阻力模型；黄土丘陵沟壑区
中图分类号：TU982　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）03-0087-05

Construction of Regional Ecological Security Pattern Using MCR Model and Ecological Security Evaluation

ZHAO Jinghui[1], HOU Xiaobo[1], YANG Meihuan[2], CHANG Jinsheng[1], WANG Aixing[1], XING Xiaolu[1]
(1.Beijing North-Star Technology Development Co., Ltd., Beijing 100044, China;
2. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: To assist in achieving carbon neutrality and peak carbon emissions, as well as the overall layout of ecological civilization construction, and to improve the quality of ecological environment, taking Ganquan County, Yan'an City, Shaanxi Province for example, we analyzed the evolution of land-use structure in 2010 and 2020 using GIS analysis and dynamic degree model, and evaluated the ecological security level of Ganquan County by combining landscape ecological security evaluation model and spatial autocorrelation model. Then, we constructed the resistance surface index system in 2020, and used the minimum cumulative resistance model to construct an ecological security pattern. Research shows that over the past decade, cultivated land and grassland have shown a downward trend, while forest and construction land have shown an increasing trend. The high ecological security areas in Ganquan County have mainly been distributed in the western and southwestern regions, with an increase of 5 147 ha. The proportion of higher ecological security areas has reached 25%, while the areas of lower and low security ecological security areas have decreased significantly, and the spatial distribution of ecological security is mainly concentrated in high-high and low-low clusters. We constructed an ecosystem with a source area of 44 166 ha, 21 ecological corridors, and 42 nodes, forming a point line surface connected ecosystem, which could provide reference for regional sustainable development and ecological civilization construction.

Key words: ecological network, landscape ecological security evolution, spatial autocorrelation model, minimum cumulative resistance model, hilly-gullied loess region

真正的绿色低碳高质量发展之路，要紧抓生态文明建设与区域协调发展，而经济的快速发展加快了自然资源的开发利用，加深了生态环境矛盾，进而导致生物多样性减少、生态空间破碎化等问题[1]，给生态系统恢复和可持续发展带来了巨大挑战[2]。因此，构建生态安全格局，合理开发自然资源，保证生态系统服务完整性，稳定推进社会经济发展，才能真正地将自然资源服务于碳达峰碳中和，落实碳达峰碳中和目标。现阶段法律法规的实施，不能完全满足环境保护的需要，因此生态安全格局研究成为国内外争相讨论的热点[3-5]。随着城镇化发展与城市内部土地演变[6]，目前的研究区域集中在土地类型变化快或典型流域地区[7]，对西北地区的研究较少，尤其是对黄土丘陵沟壑区的研究更为薄弱。已有研究未将静态研究的构建

项目来源：国家自然科学基金资助项目（41501571）。
第一作者简介：赵晶辉（1987—），硕士，高级工程师，研究方向为环境生态工程，E-mail：zjh123_42024@163.com。
通信作者：侯小波（1986—），硕士，高级工程师，研究方向为地理空间信息技术，E-mail：3036682484@qq.com。

方法与动态的景观生态安全水平相结合，多采用主成分分析法确定阻力因子权重[8]，影响了阻力面精度，因此本文利用层次分析法计算权重，采用景观生态安全评价模型和空间自相关模型构建生态安全格局，通过更加客观的计算方式深入分析景观之间的联系，为区域提供更准确有效的保护战略和坚实的理论指导。以陕北甘泉县为例，着重考虑黄土高原丘陵沟壑特征，基于景观格局指数构建景观生态安全评价模型和空间自相关模型，分析研究区生态安全水平和空间相关性，并构建阻力面指标体系，借助最小累积阻力模型（MCR）构建生态安全格局，为区域自然资源开发和环境保护提供参考依据。

1 研究区概况与数据来源

本文选取甘泉县作为研究区，地理范围为36°60′~36°37′N、108°45′~109°33′E。研究区属黄土高原丘陵沟壑地带，丘陵密布，沟壑纵横，地貌多变；地势西北高、东南低，分布有子午岭和劳山山脉。

本文采用的数据包括研究区2010年、2020年土地利用数据（甘泉县国土部门）、数字高程模型数据（地理空间数据云）、归一化植被指数（地理空间数据云）、生态红线数据（甘泉县国土部门）以及社会经济统计数据（统计局官网）。

2 研究方法

1）土地利用动态度可直接反映地类动态变化情况，计算公式为：

$$M=\frac{N_b-N_a}{N_a}\times\frac{1}{T}\times 100\% \tag{1}$$

式中，N_a、N_b 为研究范围内期初与期末的土地面积；T 为时间年限[9-10]。

2）景观生态安全评价模型。模型构建前需根据研究区的实际情况划分评价单元，借助ArcGIS10.2软件的构建渔网工具，通过1 km×1 km的网格划分为2 425个评价单元。景观生态安全评价模型可形象表达生态安全水平的空间分布，根据已有研究与研究区情况，本文采用景观的损失度、脆弱度、干扰度构建模型，其中损失度反映生态损耗，由干扰度和脆弱度的乘积表示。干扰度的计算公式为：

$$O_i=aA_i+bB_i+cC_i \tag{2}$$

$$A_i=\frac{n_i}{M_i} \tag{3}$$

$$B_i=\sqrt{n_i/M}\times\left(M/2M_i\right) \tag{4}$$

$$C_i=\frac{2\ln\left(P_i/4\right)}{\ln M_i} \tag{5}$$

式中，A_i、B_i、C_i 分别为景观破碎度指数、分离度指数、分维度指数；a、b、c 为对应的权重系数，基于甘泉县实际和前人研究，本文中 a =0.6、b =0.3、c =0.1；n_i 为景观类型 i 的斑块数量；M_i 为景观类型 i 的面积；M 为所有景观类型的总面积；P_i 为景观类型 i 的周长[11]。

景观脆弱度的确定参考已有研究并结合研究区实际，为各地类赋予权重，建设用地、林地、草地、耕地、水域、其他用地依次为1~6，归一化处理后得到各地类脆弱度指数[12]。

景观生态安全评价模型通过各景观生态风险指数得出综合风险指数，再取综合风险的倒数作为生态安全指数，计算公式为：

$$\mathrm{ERI}_k=\sum_{i=1}^{n}\frac{M_{ki}}{M_k}\times V_i \tag{6}$$

式中，ERI_k 为风险单元 k 的景观风险指数；M_{ki} 为风险单元 k 内景观类型 i 的面积；M_k 为风险单元 k 总面积[13]；V_i 为景观损失度。

3）空间自相关模型。空间相关性分析可揭示景观要素间相互作用和空间组织联系，本文通过全局空间自相关和局部自相关模型来分析生态安全指数在空间上的集聚程度[14-15]。全局空间自相关采用莫兰指数表示，取值范围为(-1,1)，大于0为正相关，小于0为负相关，等于0为随机分布，计算公式为：

$$\text{Moran's I}=\frac{n\sum_i\sum_j \boldsymbol{W}_{ij}\left(x_i-\bar{x}\right)\left(x_j-\bar{x}\right)}{\sum_i\sum_j \boldsymbol{W}_{ij}\sum_i\left(x_i-\bar{x}\right)^2} \tag{7}$$

式中，x_i、x_j 为区域 i、j 的属性值；n 为区域数量；$\bar{x}$ 为平均值；$\boldsymbol{W}_{ij}$ 为权重矩阵。

局部空间自相关采用局部莫兰指数来检验，取值范围为(-1,1)，数值高低与空间单元和邻近单元相关性成正比，等于0则为不相关，计算公式为：

$$\mathrm{LISA}_i=\frac{(x_i-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}x_i^2/(n-1)-\bar{x}^2}\times\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{W}_{ij}^2(x_i-\bar{x}) \tag{8}$$

4）MCR模型通过分析物种从生态源地到另一目标过程中克服的空间阻力，计算得到累积耗费阻力最小的路径，即生物迁徙与扩展的最佳路径[16-18]，计算公式为：

$$MCR = f\min\sum_{j=n}^{i=m}(D_{ij}\times R_i) \quad (9)$$

式中，f 为最小累积阻力和生态过程的正相关关系；D_{ij} 为物质从单元 i 运动到单元 j 时通过 i 单元的扩散距离；R_i 为景观单元 i 的阻力值。

3　研究结果与分析

3.1　土地利用景观分析

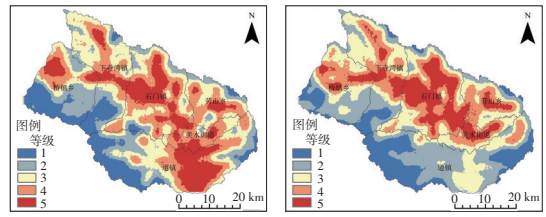
通过GIS分析处理得到6种地类面积（表1），其中其他用地包括裸土地、空闲地和设施农用地，可以看出，林地、水域、其他用地和建设用地面积呈增加趋势，而草地和耕地面积则呈减少趋势，2020年甘泉县的优势地类为林地，建设用地增幅速度较快，但占比较低，仅为1.98%。各地类变化与城镇发展、国家政策息息相关，研究区特殊的地理位置与地形导致其他用地的开发利用，但建设用地增加较缓慢。借助动态度模型计算得到林地、草地、耕地、水域、其他用地和建设用地的土地利用动态度分别为0.18、−3.61、−1.06、1.13、27.59、6.02，其中草地和耕地的动态度为负值，说明10年间草地的减少率较大，开发荒草地可优化研究区土地利用结构，提升研究区效益；其余地类的动态度均为正值，其中其他用地和建设用地的动态度较高，说明研究区特殊的地理位置促进了对裸土地的利用，同时人们日益增加的生产生活需求促进了建设用地的增加。

表1　2010年、2020年土地利用面积统计表

地类	2010年		2020年	
	面积/hm²	比例/%	面积/hm²	比例/%
林地	192 294	84.62	195 784	86.15
草地	8 345	3.67	5 334	2.35
耕地	22 913	10.08	20 489	9.02
水域	842	0.37	937	0.41
其他用地	58	0.03	218	0.10
建设用地	2 804	1.23	4 493	1.98

3.2　景观生态安全评价

本文借助ArcGIS平台和Fragstats4.2软件，采用景观生态安全评价模型，通过克里金插值法将分辨率统一为30 m，得到研究区生态安全水平分布；再利用自然间断法将生态安全水平分为1~5个等级，依次为高（0.001 624 441~0.022 057 980）、较高（0.022 057 980~0.041 356 322）、中等（0.041 356 322~0.058 951 869）、较低（0.058 951 869~0.075 979 818）和低（0.075 979 818~0.146 362 007）生态安全水平（图1）。2010—2020年研究区高和较高生态安全区域面积分别增加5 147、10 766 hm²，其中较高生态安全水平占比接近25%，二者主要分布在海拔较高的西部与西南部，以林、草地为主，生态质量良好；中等生态安全区域分布均匀，面积由55 206 hm²增至59 216 hm²；较低与低生态安全区域面积明显减少，占比不到20%，较低安全区域围绕低安全区域分布，主要集中在人类干预较多的建设地带，但即使开发强度增大，安全水平仍朝良好趋势发展，说明人类活动在保护环境的机制下有序进行。



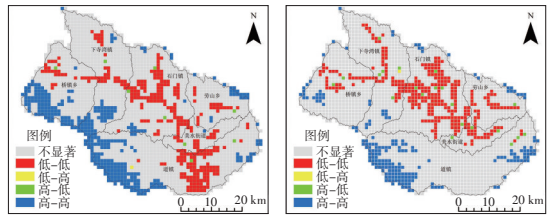
a 2010年　　b 2020年

图1　2010—2020年生态安全水平分布

审图号：GS(2019)3266

利用空间自相关模型分析生态安全的空间相关性，得到2010年和2020年的Moran's I分别为0.606 2、0.553 5，z 得分分别为41.632 1、38.023 9，P 值均为0.000 0，说明研究区生态安全空间集聚程度显著，具有很强的空间正相关性。

采用局部自相关模型分析计算得到LISA集聚图（图2），可以看出，2010—2020年生态安全空间分布以高—高、低—低集聚为主，高—低、低—高类型的占比很少；高—高聚集类型分布由西南部逐渐转移到南部，低—低聚集类型则分布在中部和北部。上述结果体现了区域生态安全水平的提高，甘泉县10年间生态安全水平的变化离不开政府政策扶持和人们付诸行动的共同努力。



a 2010年　　b 2020年

图2　2010—2020年景观生态安全LISA集聚图

审图号：GS(2019)3266

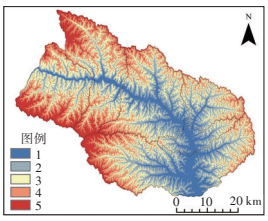
3.3　构建生态安全格局

本文将自然资源局收集的自然保护区作为一类生态源地，将景观高生态安全区域作为二类生态源

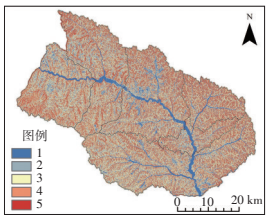
地，二者相交区域则为最终生态源地。构建生态廊道的前提是选取阻力因子和构建阻力面。本文选取高程、坡度、地类、植被覆盖度、距水域距离、距道路距离和距居民点距离作为阻力因子，通过层次分析法确定因子权重，阻力面指标体系见表2。借助GIS的欧氏距离和重分类功能得到单因子阻力分布图（图3）；再叠加7个阻力因子得到综合阻力面（图4）；最后通过最小累积阻力模型得到研究区的最小累积阻力面（图5）。

表2 阻力等级划分

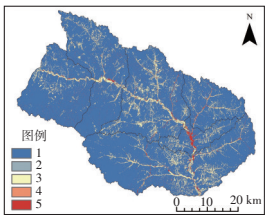
评价因子	阻力值					权重
	等级1	等级2	等级3	等级4	等级5	
高程/m	<1 115 <1 110	1 115~1 211 1 110~1 210	1 211~1 297 1 210~1 290	1 297~1 393 1 290~1 390	>1 393 >1 390	0.11
坡度/(°)	<11.18 <11.20	11.18~19.63 11.20~19.50	19.63~26.98 19.50~27.00	26.98~34.76 27.00~34.80	>34.76 >34.80	0.10
地类	林地、水域	草地	耕地	其他用地	建设用地	0.32
植被覆盖度	>0.37 >0.40	0.25~0.37 0.25~0.40	0.16~0.25 0.15~0.25	0.07~0.16 0.05~0.15	<0.07 <0.05	0.19
距河流距离/km	<0.50	0.50~1.00	1.00~1.50	1.50~2.00	>2.00	0.12
距道路距离/km	>2.00	1.50~2.00	1.00~1.50	0.50~1.00	<0.50	0.09
距村镇距离/km	>1.00	0.80~1.00	0.50~0.80	0.20~0.50	<0.20	0.08



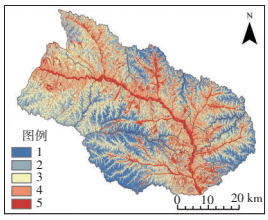
a 高程



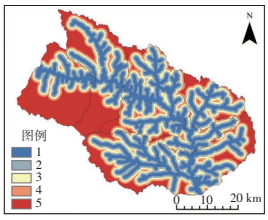
b 坡度



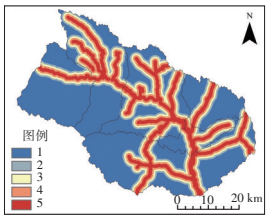
c 地类



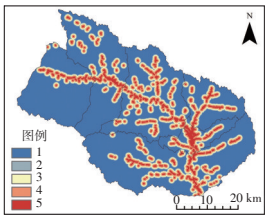
d 植被覆盖度



e 距水域距离



f 距道路距离



g 距居民点距离

图3 单因子生态阻力面分级图

审图号：GS(2019)3266

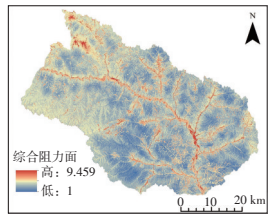


图4 综合生态阻力面

审图号：GS(2019)3266

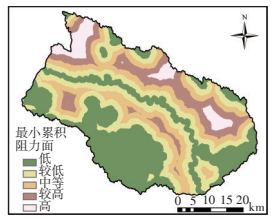


图5 最小累积阻力面

审图号：GS(2019)3266

由图5可知，研究区阻力值主要以生态源地为中心向周围扩散，最小累积阻力低的区域说明物种的生态过程阻力较小，生态环境良好，林草地与水域丰富。在最小累积阻力面的基础上，利用空间分析成本距离功能生成最优路径作为研究区的生态廊道；并将水文分析应用于节点确认过程，先提取表面的山脊线，再将廊道与山脊线的交点作为生态节点（图6）。

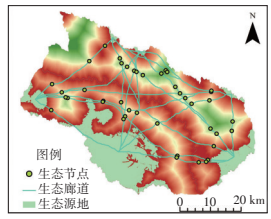


图6 研究区安全网络

审图号：GS(2019)3266

研究区生态安全格局是由源地斑块、廊道和节点共同构成的，为自然资源交流提供了更优的路径，对助力生态文明建设具有重要意义。本文的生态源地斑块面积为44 166 hm^2，主要分布在西南部与东南部，该区域生态质量好、海拔高、人为干预较少，部分区域还为生态保护区，是重要的源地斑块；生态廊道为21条，节点为42个，分布较分散，未覆盖整个研究区，南北生态连通性较差，阻碍了生态要素与生物转换，影响了自然资源流通，进而影响研究区生态功能。鉴于此，应在未覆盖地区多投入人力物力提升生态环境质量，在构建安全格局的基础上，保障优化措施。

4　结　论

本文以土地利用数据为基础，利用景观指数法、空间自相关模型和MCR模型构建了甘泉县生态安全格局，得出如下结论：

1）研究区优势地类为林地，10年间景观类型发生较大变化，草地和耕地呈减少趋势；其余地类呈增加趋势，其中林地增加明显（3 490 hm^2）；研究区动态度差异较大，其他用地和建设用地的动态度较高，草地的减少率较大，动态度为–3.61%。

2）高和较高生态安全区域主要分布在研究区西部和西南部，10年间分别增加5 147、10 766 hm^2，中等生态安全区域分布较均匀，较低和低生态安全区域占比较低；同时研究区生态安全空间集聚程度显著，具有明显的空间正相关性。局部自相关分析表明研究区生态安全空间分布以高—高、低—低集聚类型为主。

3）以生态安全水平和自然保护区为基础提取研究区生态源地，面积约为44 166 hm^2；利用层次分析法和MCR模型构建最小累积阻力面，利用空间分析和水文分析生成生态廊道21条、节点42个。甘泉县生态安全格局中间密集，南北生态连通性较差，应在安全格局的基础上保障优化措施。

然而，研究区地处黄土丘陵沟壑区，在选取阻力因子时未考虑侵蚀度、气候因子等，且未能细化生态安全评价水平分析，在后续研究中有待进一步完善。

参考文献

[1] 钱逸凡,刘道平,楼毅,等. 我国湿地生态状况评价研究进展[J]. 生态学报,2019,39(9):3372-3382

[2] 赖小霞,温家洪. 南昌市土地利用变化及其驱动因素分析[J]. 地理空间信息,2022,20(10):54-60

[3] 刘滨谊,王鹏. 绿地生态网络规划的发展历程与中国研究前沿[J]. 中国园林,2010,26(3):1-5

[4] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报,1999,19(1):10-17

[5] 崔嵩,杜显磊,贾朝阳,等. 黑龙江省生态系统服务价值估算及其生态安全格局构建[J]. 环境科学,2024,45 (11):6489-6500

[6] 李旭芳,翁飞帆,陈榕榕,等. 基于MSPA与MCR模型的生态网络构建:以新乡市为例[J]. 河南科技学院学报(自然科学版),2022,50(1):45-54

[7] 崔杨林,高祥,董斌,等. 县域景观生态风险评价[J]. 浙江农林大学学报,2021,38(3):541-551

[8] 李延顺,廖超明,段炼,等. 滨海地区生态网络构建及其评估:以广西北海市为例[J]. 南宁师范大学学报(自然科学版),2020,37(3):90-98

[9] 王秀兰,包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展,1999,18(1):83-89

[10] 孙姣姣,王琦,郑洁,等. 大英县2002—2017年土地利用分类动态分析[J]. 地理空间信息,2022,20(1):56-60

[11] 许凤娇. 基于土地利用变化的江苏沿海地区生态风险格局[D]. 曲阜:曲阜师范大学,2018

[12] Singh K,Kumar V. Hazard Assessment of Landslide Disaster Using Information Value Method and Analytical Hierarchy Process in Highly Tectonic ChambaRegion in Bosom of Himalaya[J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(4):808-824

[13] 丁雪姣,沈强,聂超甲,等. 省域尺度下不同时序景观指数集与粒度效应分析[J]. 中国农业资源与区划,2019,40(3):111-120

[14] Li Q, Guo F, Guan Y. A GIS-based Evaluation of Environmental Sensitivity for an Urban Expressway in Shenzhen, China[J]. Engineering,2018,4(2):230-234

[15] 张玉娟,曲建光,叶猛猛. 松花江流域哈尔滨段景观生态风险评价[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(3):361-367

[16] 黄木易,岳文泽,冯少茹,等. 基于MCR模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化[J]. 自然资源学报,2019,34(4):771-784

[17] 赵菊花,王玉杰,杨永崇,等. 基于遥感生态指数和MCR模型的沙漠丘陵区生态网络构建[J]. 西安理工大学学报,2023,39(4):464-475

[18] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating Habitat Isolation in Landscape Planning[J]. Landscape and Urban Planning,1992,23(1):1-16