

黄土高原生境质量时空演变及其驱动因素

周璐红^{1,3}, 曹瑞超^{2,3}

(1.长安大学 土地工程学院, 陕西 西安 710054; 2.长安大学

地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 3.陕西省土地整治重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: [目的] 分析黄土高原生境质量的时空演变和影响因素,为黄土高原的生态治理和保障区域生态安全提供科学参考。[方法] 运用 InVEST 模型评价了黄土高原生境质量,利用空间自相关分析法分析生境质量时空关联性,采用地理探测器分析了影响生境质量的驱动因子并进行单因子探测及交互探测。[结果] ①2000—2020 年,黄土高原 20.5% 的区域生境质量上升,7.18% 的区域生境质量下降,区域生境质量呈稳定提升的趋势。②2000,2010 和 2020 年黄土高原全局 Moran's *I* 分别为 0.714,0.706 和 0.694,生境质量在空间分布上呈现集聚现象并具有较高的空间正相关性,Moran's *I* 指数值降低说明空间集聚性小幅度下降,空间分布差异性渐趋均衡。③黄土高原生境质量因子影响程度大小顺序为:NDVI>降水>GDP>坡度>高程>人口>气温,研究期内各驱动因子对生境质量的决定力变化幅度不大且影响顺序未发生明显改变,说明各因子对生境质量的影响较稳定。[结论] 应充分考虑黄土高原的实际情况,兼顾生态与经济两方面协同发展的目标,未来黄土高原可根据各生态区块的生境质量状况,制定更加具有针对性的管理措施,增强生态系统服务功能,并以其为基础寻求新型经济增长模式。

关键词: 生境质量; InVEST 模型; 空间自相关; 地理探测器; 黄土高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)06-0343-08

中图分类号: X321

文献参数: 周璐红, 曹瑞超.黄土高原生境质量时空演变及其驱动因素[J].水土保持通报,2022,42(6): 343-350.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2022.06.041; Zhou Luhong, Cao Ruichao. Spatial-temporal evolution of habitat quality and its influencing factors in Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(6):343-350.

Spatial-temporal Evolution of Habitat Quality and Its Influencing Factors in Loess Plateau

Zhou Luhong^{1,3}, Cao Ruichao^{2,3}

(1.School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2.School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054,

China; 3.Shaanxi Key Laboratory of Land Reclamation Engineering, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial evolution and influencing factors of habitat quality in the Loess Plateau were determined in order to provide a scientific reference for ecological management and regional ecological security in the Loess Plateau. [Methods] The InVEST model was used to evaluate habitat quality in the Loess Plateau. The spatio-temporal correlation of habitat quality was analyzed by spatial autocorrelation analysis. The driving factors affecting habitat quality were analyzed by geographical detector, and single factor detection and interactive detection were carried out. [Results] ① From 2000 to 2020, habitat quality for 20.5% of the Loess Plateau increased, 7.18% of the region exhibited decreased habitat quality, and the regional habitat quality showed a steady upward trend. ② The global Moran's *I* values for the Loess Plateau in 2000, 2010, and 2020 were 0.714, 0.706, and 0.694, respectively. The spatial distribution of habitat quality showed agglomeration and had a high positive spatial correlation. The agglomeration decreased

slightly, and the differences in spatial distribution became more balanced. ③ The influence degree of the habitat quality factors of the Loess Plateau followed the order of NDVI > precipitation > slope > GDP > population > elevation > air temperature. During the study period, the determinative force of each driving factor on habitat quality did not change much, and the order of influence did not change significantly, indicating that each factor has a stable effect on habitat quality. [Conclusion] The actual situation of the Loess Plateau should be fully considered, and the goal of coordinated development of ecology and economy should be taken into account. In the future, more targeted management measures for the Loess Plateau should be formulated in accordance with the habitat quality of each ecological block to enhance the ecosystem service function, and a new economic growth model based on habitat quality should be constructed.

Keywords: habitat quality; InVEST model; spatial autocorrelation; geographic detector; Loess Plateau

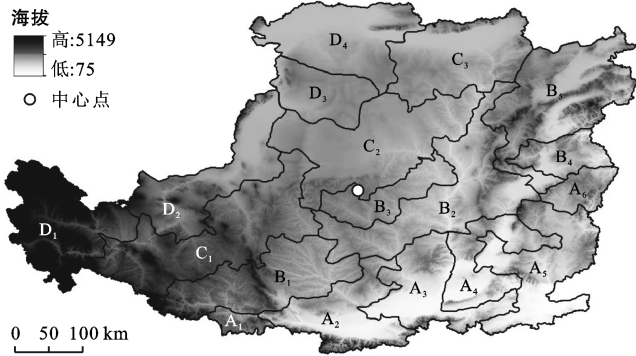
20 世纪 90 年代以来,全球自然生态环境不断变化,人类社会和生态系统的协调发展面临巨大挑战。生境质量是指生态环境在一定的时间和空间内能够提供物种生存繁衍适宜条件的能力^[1]。生境质量包括自然资源和整个生态环境的各种要素,其高低可反映人类生存环境的优劣^[2-5]。随着城市化及农业现代化速度加快,资源配置流动性增强,生境质量因素对区域土地利用类型及其空间分布影响重大。因此,评价和模拟土地利用变化和生境质量变化成为众多国内外生态、地理领域研究的热点^[6-8]。生境质量评价研究主要在研究尺度和方法模型等方面存在不同。研究尺度涉及大中小各种尺度行政单元,陈妍等综合北京市区划范围及地形地貌单元来对研究区域内生境质量变化规律进行了具体分析^[9];王琼等^[10]则将蒲河流域作为其研究对象,在探讨流域内生境质量状况的基础上又进一步分析了其与水质响应的关系。另外还有神农架林区、大别山区、自然保护区等特殊区域尺度,其中,周婷等^[11]运用人类足迹指数和地理加权回归模型等方法研究了神农架林区生境质量与人类活动之间的关系;黄木易等^[12]将皖西大别山作为研究区域分析了其生境质量和景观格局的时空演变特征以及二者的空间相关性;祝萍等^[13]以我国典型的国家级自然保护区为例进行了大尺度范围的生境质量方面的研究;黄贤峰等^[14]探讨了 1990—2017 年我国喀斯特自然保护区内土地利用变化状况对生境质量的影响。评价所使用的评价模型主要包括 InVEST 模型、maxENT 模型、SolVES 模型等。其中,刘振生等^[15]采用了基于生态位原理的 maxENT 模型并发挥了该模型预测功能良好的特点对贺兰山岩羊的生境适宜度进行了评价;王玉等^[16]运用 SolVES 模型对吴淞炮台湾湿地森林公园的美学、生物多样性、文化娱乐等服务功能价值进行了量化和分析。对比研究发现,InVEST 模型的生境质量模块是

较为成熟和具有代表性的评估模型,可快速评估不同威胁源与地类对生物多样性的影响。

黄土高原多季节性集中降水,外加地形破碎,土质松散等因素,致其水土流失、植被退化等问题显著^[17-19]。生态环境脆弱是其最主要的特征,黄土高原在全国生态安全战略和发展稳定大局中具有极为重要的地位。因此,本文将黄土高原作为研究区域,运用 InVEST 模型、空间自相关模型以及地理探测器模型对黄土高原生境质量的时空演变和影响因素进行分析研究,旨在为黄土高原的生态治理和保障区域生态安全提供科学参考。

1 研究区概况

黄土高原位于中国中部偏北部(100°—114°E, 31°—41°N),为中国四大高原之一,包括了山西省、宁夏回族自治区的全域以及青海省、甘肃省、陕西省、河南省、内蒙古自治区的部分辖区,面积 $6.35 \times 10^5 \text{ km}^2$ ^[20]。地势西北高东南低,地貌形态可分为山地、丘陵、梁、塬、峁,主要由山西高原、陕甘晋高原、陇中高原、鄂尔多斯高原和河套平原组成。黄土高原的气候既受经、纬度的影响,又受地形的制约,具有典型的大陆季风气候特征。黄土高原区域年平均温度为 3.6~14.3℃,气温年较差和日较差大,且东部和西部的温度变化较大。黄土高原年平均降水量约在 300~700 mm 之间,但大部分区域在 400~600 mm 之间。黄土高原土壤类型丰富,主要包括黄绵土、褐土、垆土、灌淤土和风沙土等,土层富含碳酸钙、磷、钾、锰等元素。黄土高原野生动物资源丰富,包括 80 多种兽类,190 多种鸟类和 70 多种畜禽。黄土高原地区矿产资源包括能源矿产、金属矿产和非金属矿产共 77 种,其中煤炭资源储量最大。由于黄土高原区域范围较大,因此借鉴现有研究成果对黄土高原进行分区以便于后文对生境质量开展多尺度范围的分析^[21],分区结果如图 1 所示。



注:①南部暖温带半湿润农林生态带:A₁天水山丘宽梁沟谷城市生态区;A₂渭河阶地台塬森林生态区;A₃陕豫残塬山前丘陵沟谷森林生态区;A₄汾河谷阶地森林生态区;A₅太行山豫西森林生态区;A₆晋中森林、森林草原生态区。②中部暖温带半湿润半干旱农林牧生态带;B₁两西黄土丘陵宽塬沟谷森林、森林草原生态区;B₂晋陕黄河山前丘陵梁峁沟谷森林、森林草原生态区;B₃陕狭梁沟谷森林、森林草原生态区;B₄忻州盆地草原、森林草原生态区;B₅大同盆地草原、森林草原生态区。③西北部温带半干旱农牧生态经济带;C₁兰州山丘草原、荒漠草原生态区;C₂长城沿线风沙草原、荒漠草原生态区;C₃土默特川草原、荒漠草原生态区。④北部温带干旱半干旱农牧生态带:D₁海东线浅山丘陵森林、草原生态区;D₂银川河谷平原荒漠草原、绿洲生态区;D₃鄂尔多斯高原荒漠草原、草原生态区;D₄河(后)套平原荒漠草原、绿洲生态区。下同。

图 1 黄土高原范围与分区

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

土地利用数据作为生境质量评价中的基础数据,其来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 30 m,并根据本文研究所需对地类进行了整理合并;此外,用于黄土高原生境质量驱动因素分析的数据包括:①气象数据包括降水数据和气温数据,来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)的“中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集”,空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 3 h,通过数据预处理将原始数据统一为 1 km 的年平均降水及气温数据;②DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),分辨率为 30 m,按掩膜提取研究区,进行多环缓冲区分析、重分类等处理之后的栅格数据作为高程因子数据;③用表面分析中的坡度工具计算坡度之后,再进行重分类的栅格数据作为坡度因子数据。遥感数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30 m;④人口数据和 GDP 数据均来源于中国科学院

资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),并对数据进行坐标投影转换、数据重采样、空间配准以及均值处理后得到多年平均栅格数据。

2.2 研究方法

2.2.1 InVEST 模型生境质量模块 InVEST 生境质量模型通过结合景观类型敏感性和外界威胁强度来计算生境质量,计算公式为:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} (\omega_r / \sum_{r=1}^R \omega_r) r_y i_{ryx} \beta_x S_{jr} \quad (1)$$

式中: D_{xj} 为生境退化指数; R 为胁迫因子; y 为胁迫因子 r 栅格图层的栅格数量; Y_r 为胁迫因子所占的栅格数量; ω_r 为胁迫因子的权重; r_y 为栅格 y 的胁迫因子值; β_x 为栅格 x 的可达性水平; S_{jr} 为生境类型 j 对胁迫因子 r 的敏感性; i_{ryx} 为栅格 y 的胁迫因子值 r_y 对生境栅格 x 的胁迫水平。

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \quad (2)$$

式中: Q_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量; k 为半饱和参数; H_j 为土地利用类型 j 的生境适宜性; z 为归一化常量; D_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 所受的胁迫水平。

参考模型指导手册、现有相同研究区域的研究成果^[22-23]和研究区自身特点来确定威胁因子最大影响距离、权重、线性衰减或指数衰减类型(表 1)以及生境适宜度和不同生境对威胁因子的敏感性(表 2)。

线性衰减: $I_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (3)$

指数衰减: $I_{rxy} = \exp\left(\frac{-2.99d_{xy}}{d_{rmax}}\right) \quad (4)$

式中: d_{xy} 为目标地与威胁源的直线距离; d_{rmax} 为胁迫因子 r 的最大胁迫距离。

表 1 威胁因子及其权重

胁迫因子	最大影响距离/m	权重	衰退类型
耕地	3	0.11	线性衰减
沙漠	10	0.25	线性衰减
戈壁	6	0.14	线性衰减
裸岩	3	0.03	线性衰减
城乡建设用地	12	0.28	指数衰减
其他建设用地	8	0.19	指数衰减

2.2.2 空间自相关 空间自相关是指地理事物的某一属性在不同位置上的相关程度,表示某位置的观测值是否独立于该变量在邻近位置的值,全局 Moran's I 指数可以反映空间邻近区域单元属性值

的相似程度。Moran's I 指数值域为 $[-1, 1]$, 正值为正相关, 负值为负相关, 零值不相关。局部自相关能帮助分析空间属性的异质性特征, 计算每个空间单元与邻近单元的某一属性的相关程度, 借助 LISA 集聚图可以直观地表达局部自相关的分布格局。表达公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij})} \quad (5)$$

$$Z(G_i^*) = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{\sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2}{n-1}}} \quad (6)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j^2 - \bar{x}^2} \quad (7)$$

式中: I 为 Moran's I 指数; $Z(G_i^*)$ 为冷热点指数; n 为研究区的空间网格单元数量; x_i 和 x_j 分别为空间单元 i 和空间单元 j 的观测值; \bar{x} 为空间单元的平均值; w_{ij} 为空间单元 i 和 j 的权重矩阵。

表 2 各生境类型适宜度及对威胁因子敏感性

地类	生境适宜度	耕地	沙漠	戈壁	裸岩	城乡建设用地	其他建设用地
耕地	0.40	0	0.30	0.30	0.2	0.60	0.40
有林地	1.00	0.60	0.45	0.30	0.1	0.70	0.50
灌木林	1.00	0.40	0.35	0.20	0.1	0.60	0.40
疏林地	1.00	0.70	0.65	0.30	0.1	0.90	0.80
其他林地	0.90	0.70	0.60	0.30	0.1	0.85	0.75
高覆盖草地	0.80	0.50	0.85	0.35	0.1	0.55	0.60
中覆盖草地	0.75	0.55	0.80	0.40	0.1	0.60	0.70
低覆盖草地	0.75	0.60	0.75	0.40	0.2	0.65	0.80
河渠	1.00	0.65	0.65	0.35	0.1	0.80	0.30
水库湖泊	0.90	0.70	0.85	0.40	0.1	0.85	0.35
滩涂滩地	0.60	0.70	0.60	0.40	0.2	0.85	0.35
沙漠	0.10	0.10	0	0.10	0.1	0.10	0.10
戈壁	0.10	0.10	0.60	0	0.1	0.10	0.40
裸岩	0.10	0.10	0.50	0.30	0	0.20	0.20
沼泽地	0.80	0.60	0.60	0.35	0.2	0.80	0.60
城乡建设用地	0	0.10	0.10	0.10	0.1	0	0.60
其他建设用地	0	0.10	0.10	0.10	0.1	0.60	0.00

2.2.3 地理探测器 地理探测器是探测空间分异、揭示其背后驱动因子的一种统计学方法^[24], 被应用于多个领域。

本文运用地理探测器对生境质量空间分布特性的驱动因子及因子之间与生境质量的相关性程度进行探讨。计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (8)$$

式中: q 是一个影响因子对生境质量时空变化的解释力; h 是因子的分类或分区数; L 是影响因子的样本数; N_h, N 分别是 h 类和整个区域的单元数; σ_h^2, σ^2 是区 h 和整个区域的方差。 q 取值范围为 $[0, 1]$, q 值越大, 生境质量的空间异质性越强。交互作用探测用来识别因素之间的相互作用关系, 并评估它们的组合效应以观察任何一对因素共同作用是否会增加或降低对生境质量空间分布的解释力(表 3)。

表 3 双因子交互作用结果类型

判断依据	交互作用显示
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

3 结果与分析

3.1 生境质量评价结果

利用 InVEST 模型生境质量模块对黄土高原 2000, 2010 和 2020 年的生境质量进行评价, 生境质量值越接近 1, 说明生境质量越高, 区域生境越完整, 并具有相对应的功能和结构, 对于生物多样性的维持

越有利。

选择自然断点法将评价结果划分为高、较高、中等、较低和低 5 个等级, 生境质量各等级分布情况以及面积比例如图 2—3 及表 4 所示。并对生境质量评价结果以黄土高原地理中心点为起点, 向 8 个方向构建网格带进行取值, 以分析黄土高原生境质量在空间方位上的分布及变化。

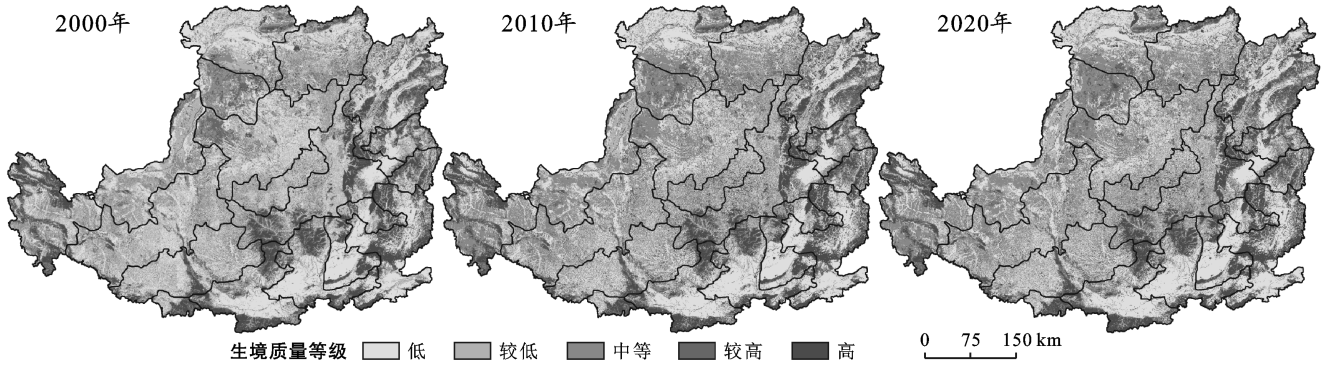


图 2 研究区生境质量评价结果

表 4 各区域各生境质量等级面积比例

区域	各等级面积占区块总面积比例/%														
	2000 年					2010 年					2020 年				
	低	较低	中等	较高	高	低	较低	中等	较高	高	低	较低	中等	较高	高
A	48.38	5.23	9.08	9.02	28.29	48.87	0.64	12.90	8.65	28.94	48.72	0.60	13.02	8.64	29.02
B	41.56	14.49	19.37	4.18	20.40	39.54	0.41	33.16	5.52	21.37	39.71	0.41	33.87	4.72	21.29
C	41.26	23.68	23.63	5.67	5.76	40.98	0.91	47.59	4.33	6.19	41.24	0.84	47.00	4.50	6.42
D	33.47	23.70	25.11	7.60	10.12	33.82	4.27	44.04	7.49	10.41	33.65	4.09	44.05	7.59	10.62
黄土高原	41.21	16.83	19.42	6.43	16.11	40.74	1.46	34.72	6.37	16.71	40.79	1.39	34.80	6.20	16.82

从整个黄土高原尺度看, 生境质量呈现不断向好的态势。其中, 2000—2010 年, 低等级面积减少、中等级面积增加、高等级面积基本保持不变; 2010—2020 年, 低等级面积比例保持稳定、中等级面积减少、

高等级面积增加。两个年份中变化的面积比例为 20% 左右, 说明 2000—2020 年黄土高原区域有近 15% 的面积的生境质量由较低变化为中等, 5% 左右的面积等级从较高提升至高。

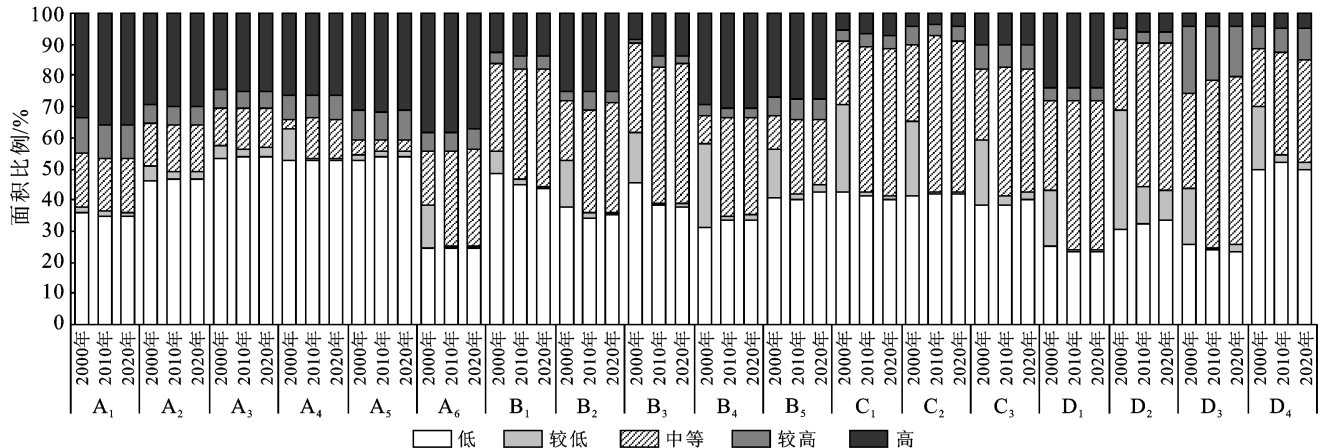


图 3 研究区生态区各生境质量等级面积比例

从各个生态带尺度看,生境质量面积变化主要集中在中等和较低等级,其他等级均呈小幅波动。A、B、C和D生态带中较低等级分别减少了4.63%、14.08%、22.84%和19.61%,中等级分别增加了4.12%、14.5%、23.37%和18.94%,减少面积和增加面积的比例基本持平。

从生态区的尺度看, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 生态区高等级和低等级生境质量面积比例高于其他生态区的,生境质量没有达到最优状态区间; D_3 生态区高等级和低等级生境质量面积比例最低,中等和较低等的比例之和达到 D_3 的80%,说明 D_3 生态区的生境质量已接近最优状态; A_6 生态区生境质量最好,其高等级和中等的面积之和比例大于70%; B_2, B_4, B_5 和 D_1 生态区生境质量的高等级比例虽不是最高,但其低等级面积比例较少,综合质量良好; $B_1, B_3, C_1, C_2, C_3, D_2, D_4$ 生态区中较低和低等级生境质量比例最大,生境质量最低。此外,从时间变化角度看, $A_6, B_2, B_3, B_4, C_1, D_1, D_2$ 和 D_4 的生态环境总体质量提升较明显。

从空间方位的角度看,W—E方向中,东部生境质量较稳定,并未随时间而发生较大的起伏变化,只有小幅度的波动,西部的整体质量优于东部;N—S方向中,整体看南部生境质量高于北部,南部变化较稳定,而北部大部分区域生境质量出现下滑的状况;WS—EN方向中,整个方位的质量都处于中上水平,西南方向比东北方向稳定,但东北部的生境质量提升幅度要大于西南部;ES—WN方向中,东南方位的生境质量变化不大但水平相差较大,而西北方向质量水平平均处于中等水平但出现小幅度的下降。

3.2 生境质量空间关联性

对研究区建立 $10\ 000 \times 10\ 000$ 的网格,以识别其生境质量格局和时空分异性。对所有网格进行求均赋值作为黄土高原生境质量的表征,在GeoDa中分别对2000、2010以及2020年的生境质量分布格局开展空间自相关分析,研究其时空分异性。通过全局自相关分析得出,2000、2010和2020年黄土高原全局Moran's I 指数均大于0,分别为0.714、0.706和0.694,说明黄土高原生境质量具有较高的空间正相关性,在空间分布上呈现出一定程度的集聚现象。而3个年份的Moran's I 指数呈现逐渐下降的趋势,说明研究区域生境质量空间集聚性呈现小幅度下降,空间分布差异性渐趋均衡。其中,2010—2020年的下降幅度大于2000—2010年,同时也说明了黄土高原生境质量空间差异性缩小的速度在不断加快。

LISA 集散图既可以表达黄土高原生境质量是否呈现分布的集聚性特征,同时还可以用于识别生境质量分布的“热点区”以及“冷点区”。由图4可以看出,黄土高原生境质量集聚区主要分布在西北部 and 东南部。两个方位均有“高一高”和“低—低”的类型分布,但西北部主要为“低—低”型区域,东南部主要为“高一高”型区域。2000—2020年,生境质量空间聚集变化情况整体上稳定,但随着时间的推移,西部“低—低”型区域的面积扩大,南部“低—低”型区域面积缩小,“低—低”型区域增加说明该区域的生态保护工作仍需要提高强度,防止生境质量逐步下降。另外,“高一低”型区域和“低—高”型区域极少,主要分散布局在集聚区的周边范围。集聚性不显著区域则以东北—西南走向并向东南方向突出的弯带状斜穿于整个黄土高原。

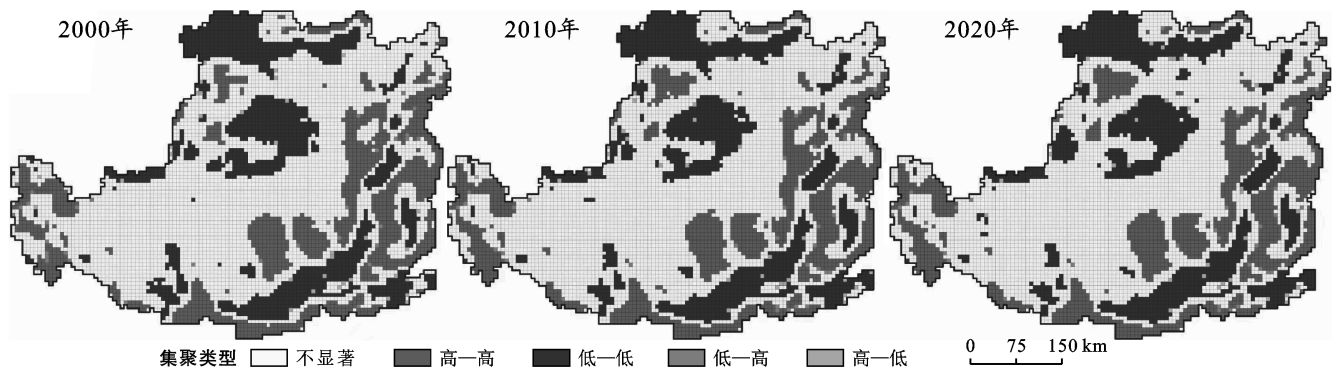


图4 研究区生境质量值LISA集散图

3.3 生境质量空间分异驱动因素分析

结合黄土高原自然生态环境实际情况以及高质量发展要求,在具备栅格数据处理的可操作性的基础上,从人与自然的关系的视角选取了7个黄土高原生

境质量驱动因子,分别是NDVI、气温、降水、GDP、海拔、坡度以及人口。每个驱动因子都分别选取了2000、2005、2010、2015年以及2020年的数据,并求得均值,结果用于驱动因素分析。运用地理探测器对

黄土高原生境质量空间分异特征的影响因子进行单因子探测和交互探测分析,得出各因子之间的交互作用程度。①GDP与高程、坡度具有负相关性;与降水、气温、人口以及NDVI具有正相关性。②高程与降水、气温、NDVI的散点分布相对分散且呈西北—东南走向,显著负相关;高程与坡度的散点分布呈西南—东北走向;高程与人口的相关值为-0.15,与人口相关性不高。③降水与气温、人口、坡度、NDVI呈正相关,与NDVI相关性最强,与人口的相关性最不突出。④气温与人口、NDVI具有正相关性;气温与坡度的相关性很低。⑤人口与GDP高度相关,人口的拟合曲线走势与GDP因子相似,均表现出低值频数大的特点;人口与NDVI及坡度具有正相关性,但相关性程度不高。⑥NDVI的数值频数差异在所有驱动因子中最小,与坡度的相关值为0.28,具有正相关性。⑦黄土高原生境质量驱动因子中,GDP与人口、降水与NDVI的相关程度高,具有高度相关性;高程与其他因子多呈现出负相关。⑧在自然生态环境的改善过程中,应重视森林植被覆盖方面的因素对生境质量的影响力度,不可忽视“牵一发而动全身”的效应。虽然气温因子、降水因子、坡度因子和高程因子的可控性较低,但可以将其作为出发点,散射出更多的思考角度。

由公式(8)计算得到黄土高原生境质量因子影响值,结果详见表5。由表5可知:①黄土高原生境质量因子影响程度大小为:NDVI>降水>坡度>GDP>人口>高程>气温,2000—2020年,各驱动因子对生境质量的决定力变化幅度不大且影响顺序未发生明显改变,说明各因子对生境质量的影响较稳定。②NDVI的 q 值大于其他影响因子的,是生境质量空间分异的主导因子。③降水的 q 值由0.3658增长至0.3664,影响程度增加。④坡度、GDP、人口、高程和气温因子的 q 值在0.23左右,影响程度接近,影响力较低但持续稳定影响区域生境质量。因此黄土高原未来要加大保护自然环境的力度,根据生态分区实施生态措施、恢复生物多样性等提高生境质量水平。

表5 黄土高原生境质量因子影响值

驱动因子	决定力(q 值)		
	2000年	2010年	2020年
NDVI因子	0.5543	0.5663	0.5548
气温因子	0.2172	0.2170	0.2175
降水因子	0.3658	0.3657	0.3664
GDP因子	0.2336	0.2330	0.2337
高程因子	0.2318	0.2315	0.2322
坡度因子	0.2348	0.2339	0.2330
人口因子	0.2326	0.2319	0.2320

4 讨论与结论

4.1 结论

(1)黄土高原生境质量在空间分布上呈现出较强的空间聚集性。中部暖温带半湿润半干旱农林牧生态带的生境质量水平最高,北部温带干旱半干旱农林牧生态带的生境质量水平次之,西北部温带半干旱农林牧经济带以及南部暖温带半湿润农林生态带的生境质量距离最优状态仍有较大差距。

(2)黄土高原生境质量的驱动因子中,NDVI因子起到了主导作用,与其他驱动因子具有较强的相关性,并潜在影响着自然因素因子。人口和GDP与其他因子相关性较强,对这些可控程度高的因子应制定符合区域实际状况的发展策略。

4.2 讨论

(1)生境质量是生态系统服务能力的重要表征之一,运用InVEST模型进行生境质量评价虽然可以提高采用纯数值计算生境质量评价结果的可视性,但InVEST模型中威胁因子的参数设置仍有一定的主观性,影响评价结果,未来运用该模型时可以增加难以量化的人为威胁源,如生态环境污染类等数据来完善区域生境质量评价结果。

(2)由于本文研究内容涉及到地理空间维度,因此一些数据不易获取或以地理空间数据形式呈现,所以本文选取了NDVI、气温、降水、GDP、海拔、坡度以及人口7个驱动因子进行分析以揭示其对生境质量的作用程度以及各因子之间的相关性。后期研究者可以考虑更加全面的驱动因子对区域生境质量的影响。

(3)本文研究为黄土高原,区域面积较大。为确保研究结果的准确性,未来研究者可以在条件允许的情况下,建立小区域的试验观测区,来对研究结果进行验证和分析。

[参考文献]

- [1] 包玉斌,刘康,李婷,等.基于InVEST模型的土地利用变化对生境的影响:以陕西省黄河湿地自然保护区为例[J].干旱区研究,2015,32(3):622-629.
- [2] 严岩,朱捷缘,吴钢,等.生态系统服务需求、供给和消费研究进展[J].生态学报,2017,37(8):2489-2496.
- [3] 傅伯杰,于丹丹,吕楠.中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系[J].生态学报,2017,37(2):341-348.
- [4] Sala O E, Chapin F S. Global biodiversity scenarios for the year 2100 [J]. Science, 2000,287(5459):1770-1774.
- [5] 王大尚,郑华,欧阳志云.生态系统服务供给、消费与人类福祉的关系[J].应用生态学报,2013,24(6):1747-1753.

- [6] 任涵,张静静,朱文博,等.太行山淇河流域土地利用变化对生境的影响[J].地理科学进展,2018,37(12):1693-1704.
- [7] 刘春芳,王川.基于土地利用变化的黄土丘陵区生境质量时空演变特征:以榆中县为例[J].生态学报,2018,38(20):7300-7311.
- [8] 吴楠,陈红枫,冯朝阳,等.基于土地覆被变化的安徽省生境质量时空演变特征[J].长江流域资源与环境,2020,29(5):1119-1127.
- [9] 陈妍,乔飞,江磊.基于 InVEST 模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的影响研究:以北京为例[J].北京大学学报(自然科学版),2016,52(3):553-562.
- [10] 王琼,范志平,李法云,等.蒲河流域河流生境质量综合评价及其与水质响应关系[J].生态学杂志,2015,34(2):516-523.
- [11] 周婷,陈万旭,李江风,等.神农架林区人类活动与生境质量的空间关系[J].生态学报,2021,41(15):6134-6145.
- [12] 黄木易,岳文泽,冯少茹,等.基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析[J].生态学报,2020,40(9):2895-2906.
- [13] 祝萍,黄麟,肖桐,等.中国典型自然保护区生境状况时空变化特征[J].地理学报,2018,73(1):92-103.
- [14] 黄贤峰,杨永菊,武艺,等.1990—2017 年喀斯特自然保护区土地利用变化对生境质量的影响[J].水土保持通报,2018,38(6):345-351.
- [15] 刘振生,高惠,滕丽微,等.基于 maxENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价[J].生态学报,2013,33(22):7243-7249.
- [16] 王玉,傅碧天,吕永鹏,等.基于 SolVES 模型的生态系统服务社会价值评估:以吴淞炮台湾湿地森林公园为例[J].应用生态学报,2016,27(6):1767-1774.
- [17] 李锐,杨文治,李壁成,等.中国黄土高原研究与展望[M].北京:科学出版社,2008.
- [18] Fu Bojie, Meng Qinghua, Qin Y, et al. Effects of land use on soil erosion and nitrogen loss in the hilly area of the Loess Plateau, China [J]. Land Degradation & Development, 2004,15(1):87-96.
- [19] Liu Yu, Fu Bojie, Lue Yihe, et al. Hydrological responses and soil erosion potential of abandoned cropland in the Loess Plateau, China [J]. Geomorphology, 2012,138(1):404-414.
- [20] 汤青,徐勇,刘毅.黄土高原地区土地利用动态变化的空间差异分析[J].干旱区资源与环境,2010,24(8):15-21.
- [21] 张青峰,吴发启.黄土高原生态经济分区的研究[J].中国生态农业学报,2009,17(5):1023-1028.
- [22] 周亮,唐建军,刘兴科,等.黄土高原人口密集区城镇扩张对生境质量的影响:以兰州、西安—咸阳及太原为例[J].应用生态学报,2021,32(1):261-270.
- [23] 杨洁,谢保鹏,张德罡.黄河流域生境质量时空演变及其影响因素[J].中国沙漠,2021,41(4):12-22.
- [24] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.

(上接第 267 页)

- [20] 黄烈佳,杨鹏.长江经济带土地生态安全时空演化特征及影响因素[J].长江流域资源与环境,2019,28(8):1780-1790.
- [21] 于海洋,张飞,曹雷.精河县土地利用/覆被变化及土地生态安全研究[J].水土保持研究,2017,24(6):348-353.
- [22] 任俊.基于熵值法的中部六省创新型省份建设水平评价研究[D].湖南长沙:湖南师范大学,2019.
- [23] 鲁春阳,文枫,袁晓妮,等.基于熵值法的河南省新型城镇化风险识别研究[J].中国农业资源与区划,2018,39(11):142-147.
- [24] Fariasaires R F, Ferreira L. A new approach to avoid rank reversal cases in the TOPSIS method [J]. Computers & Industrial Engineering, 2019,132:84-97.
- [25] 刘婧,汤峰,张贵军,等.基于 TOPSIS 和矩阵组合的县域永久基本农田储备区划定时序研究[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(7):1224-1235.
- [26] 张艳,胡征南,李照华,等.国家中心城市土地利用绩效评价及障碍度因子诊断:以郑州市为例[J].江苏农业科学,2020,48(15):265-272.
- [27] 刘庆,陈利根,舒帮荣,等.长株潭城市群土地生态安全动态评价研究[J].长江流域资源与环境,2010,19(10):1192-1197.
- [28] 卢晓宁,洪佳,王玲玲.洪泽湖湿地区土地生态安全评价[J].西南大学学报:自然科学版,2015,37(3):145-150.
- [29] 李琴.中国生态福利绩效的时空演化及其收敛性:基于自然断点法与空间收敛模型[C].生态经济与健康中国:中国生态经济学学会 2018 年学术年会摘要集,2018.
- [30] 鲁春阳,文枫,杨庆媛,等.基于改进 TOPSIS 法的城市土地利用绩效评价及障碍因子诊断:以重庆市为例[J].资源科学,2011,33(3):535-541.