

基于SRP模型的黄河流域中段生态脆弱性评价及驱动因素分析

张艳^{1,2}, 苏兰欣^{1,2}

(1. 长安大学土地工程学院, 西安 710054; 2. 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710054)

摘要: 生态环境脆弱性深刻制约区域经济的可持续发展, 进行生态脆弱性评价是生态治理和修复的重要前提。在多源数据的支撑下, 以典型生态敏感区黄河流域中段为研究区, 针对其生态本底特征选取地形、气象、地表、土壤、植被、生物丰度、人口密度和GDP等13种指标构建SRP模型评价指标体系, 基于全局Moran's I 指数以及LISA聚类图对2000年、2010年和2020年研究区生态脆弱性进行评价, 同时借助地理探测器对其驱动因素进行分析。结果表明: ①黄河流域中段生态环境以重度脆弱性和中度脆弱性为主, 占比超过50%, 空间分布上呈现明显“西北高东南低”的格局, 2000~2020年生态脆弱性综合指数依次为2.84、2.79和2.58, 生态脆弱性等级呈稳中下降的趋势; ②生态脆弱性表现出较为明显的空间聚集特征, 高高聚集区主要分布在人口活动相对剧烈的极度脆弱区和重度脆弱区, 低低聚集区主要集中在生态状况较好的一般脆弱区; ③影响黄河流域中段生态脆弱性的空间分异的主导因素包括植被覆盖度、植被净初级生产力、气温、生物丰度和GDP, 各驱动因子交互作用后的 q 值均表现为不同程度地增大。研究结果可以为黄河流域中段的生态保护与环境治理提供借鉴。

关键词: 生态脆弱性; SRP模型; 地理探测器; 空间自相关; 黄河流域中段

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2025)08-5134-11 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202407129

Ecological Vulnerability Assessment and Driving Factor Analysis in the Middle Section of Yellow River Basin Based on SRP Model

ZHANG Yan^{1,2}, SU Lan-xin^{1,2}

(1. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Land Improvement, Xi'an 710054, China)

Abstract: The sustainable development of regional economy is seriously affected by the ecological environment, and assessing ecological vulnerability is a crucial step for implementing ecological management and rehabilitation. With the support of multi-source data, the middle section of Yellow River Basin, a typical ecologically sensitive area, was selected as the research area, and 13 indicators including terrain, meteorology, surface, soil, vegetation, biological abundance, population density, and GDP were selected to construct an SRP model evaluation index system according to its ecological background characteristics. Based on the global Moran's I index and LISA cluster map, this study analyzes the characteristics of time and spatial evolution of ecological sensitivity in the middle sections of the Yellow River in 2000, 2010, and 2020 and uses geographic detectors to detect the driving factors. The results showed that: ① The ecological environment in the middle section of the Yellow River Basin was dominated by severe vulnerability and moderate vulnerability, accounting for more than 50%, and showed a “northwest high, southeast low” spatial distribution pattern. The comprehensive index of ecological vulnerability from 2000 to 2020 was 2.84, 2.79, and 2.58, which showed a stable and decreasing trend in the level of ecological vulnerability. ② Ecological vulnerability had obvious spatial aggregation characteristics. The high aggregation areas were mainly distributed in the extremely vulnerable areas and the severely vulnerable areas with relatively intense population activities, while the low aggregation areas were mainly concentrated in the general vulnerable areas with good ecological conditions. ③ The key factors influencing the spatial evolution of ecological vulnerability in the middle section of Yellow River Basin included vegetation coverage, net primary productivity of vegetation, air temperature, biological abundance, and GDP, and the q values of each driving factor increased to varying degrees after interaction. The research results provide a reference for the conservancy and management of the ecological environment in the middle section of the Yellow River Basin.

Key words: ecological vulnerability; SRP model; geographical detector; spatial autocorrelation; middle section of Yellow River Basin

生态脆弱性是指遭受外界人为干扰或者自然影响时, 生态系统表现出对外界环境的敏感性和自身内部恢复力的一种属性^[1]。生态脆弱性作为衡量区域可持续发展水平以及评价生态环境现状和发展趋势的一个重要指标, 生态脆弱性评价研究、生态脆弱性驱动力研究等逐渐成为热点^[2-4]。自Clements首次把Ecotone引进到生态学中^[5]之后, 关于生态脆弱性的研究不断深入, 生态脆弱性研究对象越来越多元化, 逐渐开始侧重自然环境和社会经济系统的综合研究, 多种学科交叉应用使得生态脆弱性研究内容更加丰富。当前生态系统脆弱性的研究趋势主要聚焦

于研究区域的多样化^[6-8]、研究尺度的精细化^[9-11]、评价方法的多元化^[11-14]和评价指标体系的多角度构建^[8,15-17]等方面, 研究区域涵盖南方丘陵区^[18,19]、北方农牧交错区^[20]、西北干旱区^[21,22]、西南喀斯特地区^[23]以及青藏高原^[24,26]等生态环境状况相对较差的地区; 研究尺度从以行政区划为评价单元的宏观尺度^[27,28]到以格网和栅格为评价单元的微观尺度^[17,29,30], 研究

收稿日期: 2024-07-12; 修订日期: 2024-09-30

基金项目: 陕西省重大科技项目(2022ZDLSF07-05); 国家自然科学基金项目(42371210)

作者简介: 张艳(1978~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为土地资源管理和生态安全, E-mail: zyzhangyan@chd.edu.cn

尺度逐步精细;评价方法上逐渐向自然经济社会复合的综合化方向发展^[31],并构建了一系列评价模型,如“暴露-敏感-适应”(VSD)模型^[32]、“敏感-恢复-压力”(SRP)模型^[33-37]、“压力-状态-响应”(PSR)模型^[21,38]、“生境-结构-功能”模型^[39]和遥感生态指数^[40]等.生态脆弱性研究范围不断扩大,研究区域、研究层次、研究尺度及研究方法等维度不断扩展,因此,根据研究区域和研究尺度的差异性建立具有针对性的脆弱性评价指标体系极为重要.同时,在评价的基础上进一步明晰区域生态脆弱性的驱动机制对因地制宜进行生态环境的保护与治理具有重大意义.

黄河流域作为我国重要的生态安全屏障,由于其生态本底条件较差和人类的不合理活动,长期面临水土流失、植被覆盖度下降等环境问题,是我国典型的生态敏感区^[41].为改善黄河流域生态环境状况,我国积极推动退耕还林、水土保持和生态保护区建设等一系列生态改善修复的措施,但目前对于黄河流域生态脆弱性的评价研究相对较少,且研究对象、评价指标体系和空间尺度等方面均不同,不能有效反映黄河流域整体生态脆弱性的变化趋势.胡荣明等^[42]以黄河流域典型生态脆弱地区东乡族自治县为研究区,选取归一化植被指数和土地利用等8个指标,采用综合指数法定量分析东乡族自治县2009年和2020年的生态脆弱状况;茹少峰等^[43]以黄河流域73个市为研究对象,对2005~2018年黄河流域上、中、下游生态脆弱性时空演变特征进行分析;杨雯娜等^[44]基于“分区-集成”的评价方法,选取水资源、气候、土壤、植被及人类活动等指标建立体系,对黄河流域生态脆弱性进行评价.对黄河流域这一复杂生态系统针对性地建立科学的评价模型和指标体系,进行生态脆弱性研究具有重要实践价值.

因此,本文以黄河流域中段为研究区,充分考虑指标的客观性和研究区独特的地理环境特征,基于在流域尺度应用已经十分广泛的SRP评价模

型^[30,40,45],选取自然因素和社会经济因素等多方面共13个指标构建黄河流域中段生态脆弱性评价指标体系,探究2000~2020年这21 a间生态脆弱性时空演变特征并借助地理探测器对其驱动因素进行探测,同时对SRP模型在生态脆弱性实践应用中的适用性进行实证验证,以期为政府在黄河流域生态环境方面的政策制定和实施提供科学支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河流域中段以河口镇至河南郑州市的桃花峪为界,位于33°25′~40°47′N,103°51′~113°51′E之间(图1).研究区面积约34.4万km²,占全流域面积的43.3%,涉及陕西、山西、甘肃、河南、内蒙古和宁夏等省域,海拔在1 000~2 000 m之间.黄河流域中段地区年平均气温在8~14℃,降水主要集中在5~9月,年降水量约为520 mm,属于典型的冬冷夏热的大陆性季风性气候.区域内地貌呈现东南低西北高的格局,植被覆盖呈带状分布,在地形和水文的双重作用下,植被类型由西北向东南逐渐由荒漠草原、典型草原、森林草原向森林过渡.黄河中游几乎全部位于黄土高原,是造成黄河洪水和泥沙堆积的主要来源区,水土流失严重.同时,由于其生态本底状况较差和人类不合理活动的影响,黄河流域中段还长期面临生物多样性降低、水土流失和植被覆盖度下降等严重的生态安全问题^[46-48].

1.2 数据来源

本研究所采用数据主要包括2000年、2010年和2020年的地形数据、气象数据、土壤数据、社会经济数据和其他数据等,详见表1.本文以黄河流域中段为研究区,空间范围较大,从数据处理及可视化表达等多方面考虑,选择5 km×5 km的格网单元作为本文研究的基本单元.

表1 数据来源统计
Table 1 Source statistics of data

数据名称	分辨率/m	来源
地形数据(DEM)	30	地理空间数据云网站(http://www.gscloud.cn)
年均温	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
年降水	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
年蒸散量	500	国家航空航天局(http://www.modis.gsfc.nasa.gov)
土地利用类型	30	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
土壤侵蚀数据	1 000	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)
植被净初级生产力	1 000	全球变化科学研究数据出版系统(https://www.geodoi.ac.cn)
NDVI数据	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
生物丰度	30	通过参考《生态环境状况评价技术规范(2015)》计算得到
人口密度	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
人均GDP	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)

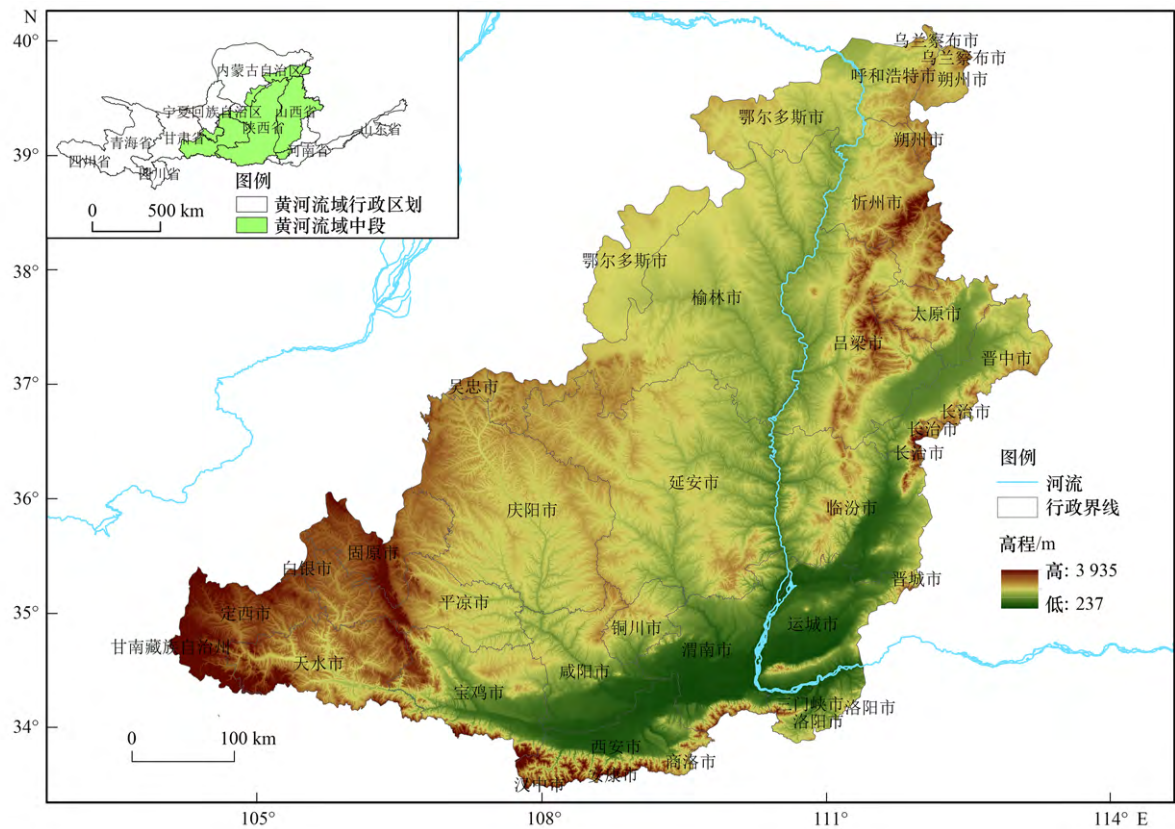


图1 黄河流域中段位置示意
Fig. 1 Location of the middle section of the Yellow River Basin

1.3 研究方法

1.3.1 黄河流域中段生态脆弱性指标体系构建

生态脆弱性定义为当生态系统遭受外界人为干扰或者自然影响时,因其对外界环境的敏感性较强,自身的恢复力较弱,进而对自身产生不利影响的一种固有属性.因此,生态脆弱性研究应该从生态系统自身的敏感性、恢复力及外界的压力这3方面出发构

建评价指标体系.SRP模型(“敏感-恢复-压力”模型)可以实现从三重视角下对自然和人为共同影响下的区域生态脆弱性进行综合测度.黄河流域生态环境问题较为突出,本文基于“敏感-恢复-压力”模型,结合前人研究成果和黄河流域中段生态环境特征,选取13个具有针对性的指标构建评价指标体系,见表2.

表2 黄河流域中段生态脆弱性评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of ecological vulnerability in the middle section of Yellow River Basin

目标层	准则层	要素层	指标层	指标选取依据	指标性质
生态脆弱性评价指标体系	生态敏感度	地形因子	高程(X1)	诱发滑坡、泥石流等地质灾害和水土流失	正向
			坡度(X2)		正向
			地形起伏度(X3)		正向
		气象因子	年降水量(X4)	表征区域水热条件	负向
			年均温(X5)		负向
			年蒸散量(X6)		正向
	生态恢复力	地表因子	土地利用类型(X7)	反映区域土地资源利用与组合方式	正向
		土壤因子	土壤侵蚀(X8)	表征研究区内侵蚀情况	正向
		植被因子	植被净初级生产力(X9)	刻画区域植被生长茂密程度	负向
			植被覆盖度(X10)		负向
	生态压力度	活力	生物丰度(X11)	反映研究区域内生物多样性的丰贫程度	负向
		人类活动	人口密度(X12)	反映人类活动对生态环境的干扰程度	正向
		社会经济	GDP(X13)		正向

1.3.2 指标标准化

原始指标数据由于单位不统一,量纲、自身性质

和值域等方面存在差异,不能直接对其进行横向对比,因此须对其进行标准化处理^[7].根据指标对黄河

流域中段生态脆弱性影响的差异性将 13 个指标分为指标值与生态脆弱性程度成正比的正向指标和指标值与生态脆弱性程度成反比的负向指标(表 2)。

(1)极差法 对正负向指标标准化,其公式如下。
正向指标:

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{ijmin}}{X_{ijmax} - X_{ijmin}} \tag{1}$$

负向指标:

$$Z_{ij} = \frac{X_{ijmax} - X_{ij}}{X_{ijmax} - X_{ijmin}} \tag{2}$$

式中, Z_{ij} 表示研究期各年指标数据*i*的标准化值; X_{ij} 为第*i*个指标第*j*个格网的指标值; X_{ijmax} 为所有格网中指标值的最大值, X_{ijmin} 为所有格网中指标值的最小值。

(2)分级赋值法 土地利用类型是一个定性指标,参考文献[36]对黄河流域土地利用类型的脆弱性通过赋值对土地利用类型进行量化处理(表 3)。

表 3 土地利用类型脆弱性
Table 3 Land use type vulnerability

土地利用类型	水域	林地	草地	耕地	城乡、工矿及居民用地	未利用地
脆弱性赋值	0	2	4	6	8	10

表 4 指标权重
Table 4 Index weight

指标	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13
权重	0.032	0.037	0.044	0.010	0.027	0.012	0.017	0.083	0.001	0.031	0.020	0.355	0.332

1.3.4 空间自相关分析

空间自相关分析是研究某一地理要素属性值在空间上的依赖关系的一种地理方法,通常分为全局空间自相关和局部空间自相关^[36]。本研究基于 GIS 软件和 GeoDa 平台分析 2000~2020 年黄河流域中段生态脆弱性指数空间集聚特征:

全局 Moran’s *I* 指数:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \tag{5}$$

局部 Moran’s *I* 指数:

$$I = \frac{x_i - \bar{x}}{S^2} \sum_j W_{ij} (X_j - \bar{X}) \tag{6}$$

式中,*I*表示 Moran’s *I* 指数; X_i 和 X_j 表示的是第*i*个、第*j*个格网的脆弱性指数均值; $\bar{X}$ 表示脆弱性均值; W_{ij} 表示空间权重矩阵;*S*表示空间权重矩阵各元素之和。集聚模式分别为高高聚集区、高低聚集区、低高聚集区、低低聚集区和不显著。

1.3.5 地理探测器

地理探测器^[49]是一种基于“因子力值”等指标探

1.3.3 生态脆弱性指数

各指标根据熵权法确定权重后(表 4),通过线性加权求和得到黄河流域中段 2000 年、2010 年和 2020 年的 3 期格网尺度的生态脆弱性指数 EVI[式(3)],在 EVI 计算结果的基础上,利用生态脆弱性综合指数(EVSI)进一步研究区域综合生态脆弱性状况:

$$EVI = \sum_{i=1}^n X_{ij} \times W_i \tag{3}$$

$$EVSI = \sum_{i=1}^n P_i \times \frac{S_i}{S} \tag{4}$$

式中,EVI 表示生态脆弱性指数, X_{ij} 表示第*i*个指标的第*j*个格网指标标准化值, W_i 表示第*i*个指标的权重;EVSI 表示生态脆弱性综合指数,*n* 表示等级个数, P_i 表示等级值, S_i 表示*i*等级的面积,*S*表示研究区的总面积。

根据生态脆弱性指数,本研究采用自然断点法将生态脆弱性划分为 5 个级别,即一般脆弱(0.044<EVI≤0.096)、低度脆弱(0.096<EVI≤0.124)、中度脆弱(0.124<EVI≤0.152)和重度脆弱(0.152<EVI≤0.242)和极度脆弱(0.242<EVI≤0.699),从而更加直观地反映生态脆弱性的时空演变特征。

测地理现象的空间分异及其驱动力的一种方法。生态脆弱性受多因素综合驱动,其空间分布具有明显的空间分异性,本研究选取因子探测和交互探测对生态脆弱性空间分异进行驱动力分析(表 5)。

(1)因子探测器 探测单因子*X*对生态脆弱性*Y*的解释力大小,解释程度用*q*值表示,*q*值越大,解释力越强,反之则越弱。表达式为^[49]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \tag{7}$$

式中, $h=1,2,\cdots,L$; *L*为指标因子分类数; N_h 和 *N*分别为层*h*和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层*h*和全区的*Y*值的方差。

(2)交互探测器 用于探测因子交互对区域生

表 5 交互作用类型
Table 5 Interaction types

判据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) \leq \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) \leq \max[q(X_1), q(X_2)]$	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

态脆弱性是否会产生复合叠加效应^[49],其主要类型见表5.

2 结果与分析

2.1 生态脆弱性时空分布及其变化特征

2.1.1 生态脆弱性时间分异特征分析

2000~2020年黄河流域中段生态脆弱性等级以重度脆弱和中度脆弱为主且整体呈下降趋势,如图2所示,一般脆弱区面积增加16 450 km²,占比从15.16%增加至20.85%;低度脆弱区面积增加11 425 km²,占比从22.74%增加至26.70%;中度脆弱区面积增加6 175 km²,占比从24.54%增加到26.68%;重度脆弱区面积减少33 425 km²,占比从37.22%减少到25.68%;极度脆弱区面积占比较少且研究年限内少量减少,减少625 km².从各生态脆弱性等级面积占比来看,2000~2010年,研究区5种生态脆弱区面积占比排名始终为:重度脆弱>中度脆弱>低度脆弱>一般脆弱>极度脆弱,其中,重度脆弱和极度脆弱区域面积下降,转出为中度脆弱、低度脆弱和一般脆弱区,到2020年,低度脆弱区和中度脆弱区面积超过重度脆弱区面积,生态脆弱等级在20 a间呈现明显下降趋势.

研究区2000年、2010年和2020年生态脆弱性综合指数分别为2.84、2.79和2.58,呈现稳中下降的趋势,整体生态状况得到改善.不同等级生态脆弱性时间变化趋势与社会经济发展密切相关,2000~2010年,生态环境脆弱性等级虽然整体上表现为下降,但是这一时期极度脆弱区面积略微增加;2010~2020年,生态环境状况得到明显改善.

2.1.2 生态脆弱性空间分异特征分析

黄河流域中段脆弱性等级中度脆弱性以上面积占比超过50%,整体呈现明显的“西北高东南低”的空间分布格局(图3),生态质量较差的极度脆弱地区集中在陕西省西安市和山西省太原市等人口聚集、人

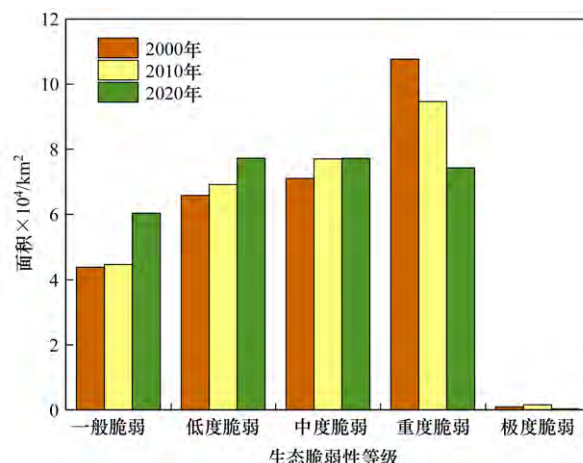


图2 黄河流域中段生态脆弱性各等级面积

Fig. 2 Area of ecological vulnerability grades in the middle section of the Yellow River Basin

类活动剧烈、资源开发程度高的区域;脆弱性等级较高的重度脆弱区和中度脆弱地区广泛分布于陕西省北部、甘肃省、内蒙古自治区和宁夏回族自治区等海拔相对较高区域;脆弱性等级相对较低的一般脆弱区和低度脆弱区主要分布于陕西北部黄龙林区、陕西关中地区、陕西秦岭北麓以及东部的山西吕梁山脉和大岳山脉地区附近,以上地区山脉较多,林草地分布密集,植被覆盖率较高,水系较发达,生态本底条件较好.

为更加直观反映黄河流域中段脆弱性变化在空间上的分布,利用ArcGIS软件对黄河流域中段的脆弱性结果进行处理,得到了黄河流域中段2000~2010年、2010~2020年和2000~2020年的动态监测图(图4).

2000~2010年,黄河流域中段生态脆弱性大体比较稳定,等级略有升高,稳定区的面积占黄河流域中段总面积的70%,脆弱性等级上升区面积大于脆弱性等级下降区面积.其中,脆弱性等级下降区零散分布在陕西北部和甘肃部分区域,脆弱性等级上升区主要分布在东部和南部以陕西省西安和山西省太

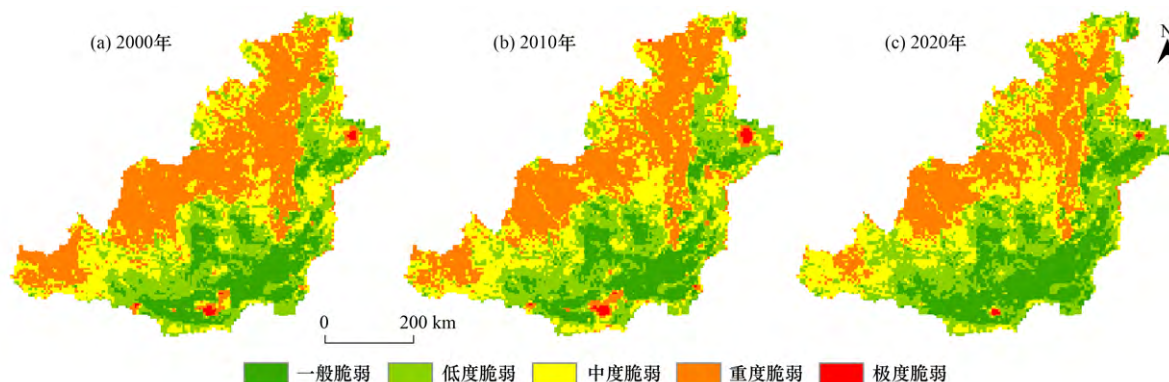


图3 黄河流域中段生态脆弱性分级

Fig. 3 Ecological vulnerability classification of the middle section of the Yellow River Basin

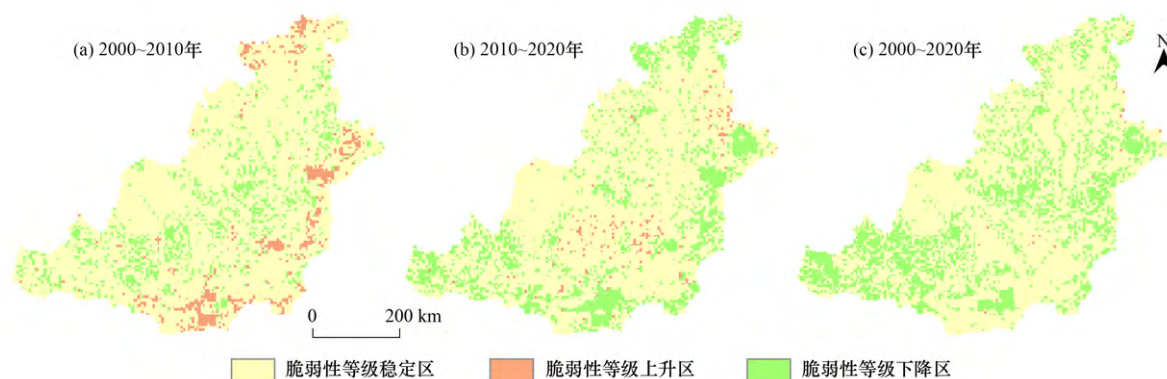


图4 生态脆弱性动态监测

Fig. 4 Dynamic monitoring of ecological vulnerability

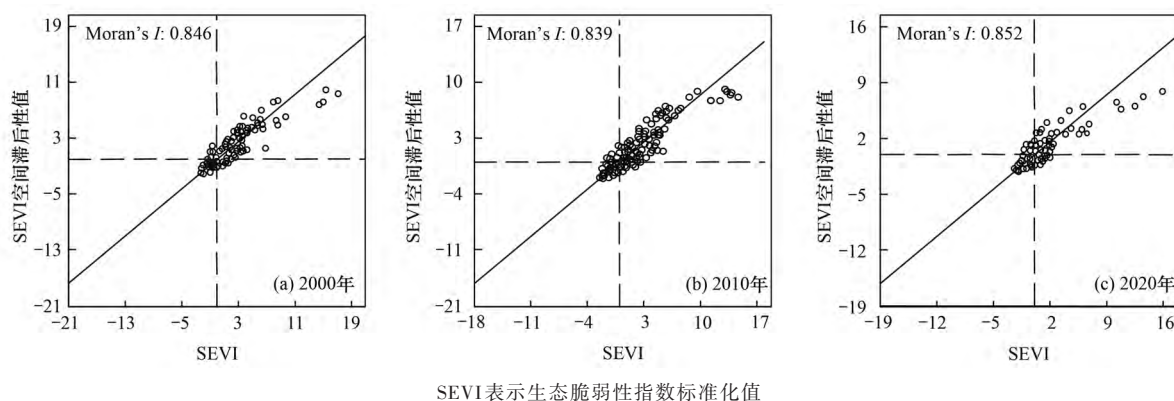
原两个省会城市为核心附近大部分人类活动较为频繁的区域,这主要是由于2000~2010年社会经济正处于快速发展阶段,城镇规模迅速扩张,工业化水平不断提升,但受限于科技水平、人口素质、当地经济发展,人们的环保意识普遍不强,在生态方面的投入较少,并且当时所采用的退耕还林还草等生物措施对生态环境的保护作用具有滞后性使得生态脆弱性等级升高。

2010~2020年研究区内大部分地区生态状况表现为生态脆弱性等级降低,生态环境得到改善,生态脆弱性等级下降区明显高于生态脆弱性等级上升区。上升区零星分布在山西省和陕西省少量区域,下降区沿着研究区的东部和南部分布。这一时期研究区社会经济持续高速发展,但政府开始意识到环境保护的重要性,特别是从2005年起,国家开始了大范围的生态保护和建设,出台并实施一系列的生态保护相关政策与工程,生态系统结构和功能得到改善。近年来,国家在黄河中上游地区实施了一系列重大的水土流失防治工程,如“三北”防护林工程、坡耕地水土流失治理等,并推进小流域治理、退耕还林还草等重大工程,对黄河中部地区的生态环境具有明显的改善效果。

2000~2020年这21 a间区域内生态脆弱性等级整体下降,脆弱性等级降低区广泛分布在黄河流域中段各区域内,区域生态环境明显改善。

2.2 生态脆弱性空间集聚特征分析

2000~2020年黄河流域中段生态脆弱性全局Moran's I 指数分别为0.846、0.839和0.852,生态脆弱性呈现出较为明显的正相关关系(图5)。通过LISA聚类图(图6)进一步分析生态脆弱性在空间上的集聚特征:2000~2020年生态脆弱性主要以高高聚集、低低聚集和不显著为主,其中高高聚集区分布在西安市和太原市等极度脆弱区以及甘肃东部和陕西北部部分重度脆弱区,低低聚集区主要位于研究区南部的一般脆弱区和低度脆弱区。其中,2010年高高聚集区整体呈现收缩趋势,主要集中在陕西北部等地区,而在西安市和太原市等极度脆弱区有所扩张,这可能是由于这一时期城镇化和工业化高速发展,以省会城市为核心,城镇规模不断向外扩张,带动脆弱性高值区周围区域脆弱性升高;2020年高高聚集区整体呈现扩张趋势,主要集中在陕西北部 and 山西部分区域,而在极度脆弱区有所减少。高聚集区容易对其周围地区产生辐射影响,生态脆弱性研究应注重对于高聚集区的生态保护。

图5 2000~2020年生态脆弱性全局Moran's I 指数Fig. 5 Eco-environmental vulnerability global Moran's I index from 2000 to 2020

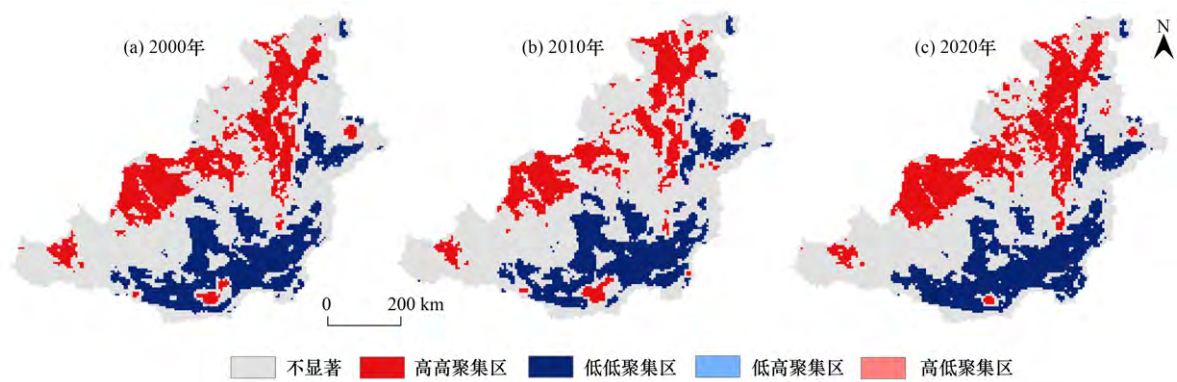


图6 2000~2020年生态脆弱性LISA聚类
Fig. 6 LISA aggregation of eco-environmental vulnerability from 2000 to 2020

2.3 生态脆弱性驱动因素分析

本文以生态脆弱性指数为因变量,选取9个在研究年限内变化较大的生态脆弱性指标作为自变量因子,即: X_1 (GDP)、 X_2 (人口密度)、 X_3 (植被覆盖度)、 X_4 (植被净初级生产力)、 X_5 (土地利用类型)、 X_6 (年均温)、 X_7 (年降水)、 X_8 (生物丰度)和 X_9 (年蒸发量),将其统计至5 km×5 km格网,并将2000年、2010年和2020年各期指标利用自然断点法分级转化为类型量,读入地理探测器软件进行驱动力分析。

因子探测结果可以看出(表6),3期探测的 P 值均为0,说明所选指标对研究区生态脆弱性的解释力都很充分。其中,2000年 q 值排名前5的是植被净初级生产力、植被覆盖度、GDP、生物丰度和人口密度;2010年 q 值排名前5的是植被覆盖度、植被净初级生产力、GDP、年降水和人口密度;2020年 q 值排名前5的是植被净初级生产力、年均温、生物丰度、植被覆盖度和土地利用类型。总体来看,3期探测结果略有差异,但可以发现主导因子基本一致。在自然因素中,植被的影响力较明显,这主要是因为植被覆盖在保持水土、调节大气、维持生态系统稳定性等方面具有重要意义^[50],而且能在一定程度上反映气候变化和人类活动的复合作用,黄河中游地区因其特殊的自然地理位置和气候特点,土质疏松,植被种类稀少,生态环境状况较差,而生态恢复工程等人类活动的实施驱动研究区植被覆盖度的变化进而影响生态环境的脆弱性水平;同时,社会经济因素对黄河流域中段生态脆弱性的解释力也是较为重要的,说明人为因素同样不容忽视。总体而言,黄河流域中段生态脆弱性的影响因素呈现多样化趋势,多种因素共同影响研究区脆弱性的空间演变。

交互探测结果可以看出(图7),3期指标交互探测的结果均表现为双因子增强或非线性增强,即黄河流域中段生态脆弱性驱动因子交互作用的解释力相较于单因子探测的 q 值均表现为增大,说明各指标

表6 生态脆弱性因子探测器结果

Table 6 Ecological vulnerability factor detector results

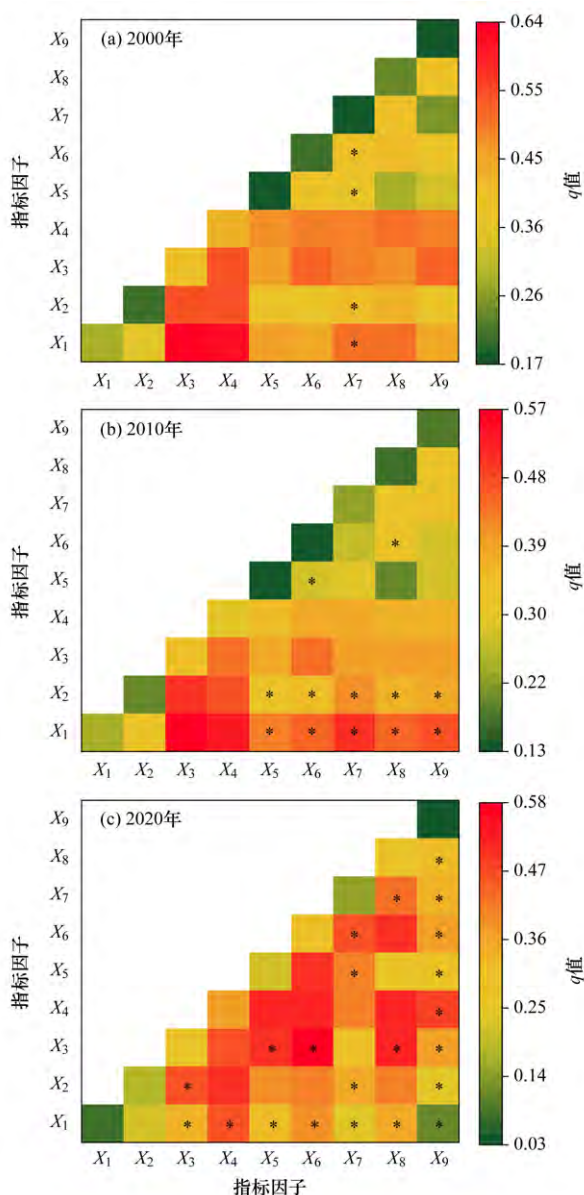
因子	2000年		2010年		2020年	
	q 值	P 值	q 值	P 值	q 值	P 值
X_1	0.286	0	0.235	0	0.075	0
X_2	0.208	0	0.195	0	0.196	0
X_3	0.395	0	0.340	0	0.254	0
X_4	0.422	0	0.302	0	0.376	0
X_5	0.181	0	0.129	0	0.232	0
X_6	0.202	0	0.139	0	0.293	0
X_7	0.179	0	0.221	0	0.156	0
X_8	0.244	0	0.171	0	0.261	0
X_9	0.167	0	0.179	0	0.034	0

对生态脆弱性的影响是协同发生的,而不是单独作用的。2000年,植被覆盖度与GDP的交互作用最强, q 值达0.64;2010年,依旧是植被覆盖度与GDP的交互作用最强, q 值达0.57;2020年,植被覆盖度与年均温交互作用最强, q 值达0.58。总体来看,GDP和人口密度与其他驱动因素的交互作用后解释力明显变大,同时年均温和土地利用类型与其他指标因子间的交互作用增强。此外,2000~2020年交互作用呈现非线性增强的交互组合越来越多,反映出各因素交互作用对研究区生态脆弱性空间分异产生的影响不断增强。各要素因子交互作用后的解释力均表现为增强,自然和社会因素因子交互作用后的解释力均表现为增强,这表明黄河流域中段的生态脆弱性确实是由自然因素和社会因素之间以及各自内部的复杂交互作用共同决定。

3 讨论

3.1 黄河流域中段生态脆弱性时空分异特征

黄河流域中段生态脆弱性格局呈现较为明显的“西北高东南低”,这与张良侠等^[32]基于VSD模型对黄土高原生态脆弱性时空变化的研究结果相同,这主要是由于黄河中游主要流经黄土高原,研究区内



*表示非线性增强交互作用,其他均为双因子增强交互作用

图7 黄河流域中段生态脆弱性交互探测结果

Fig. 7 Results of ecological vulnerability interaction in the middle section of the Yellow River Basin

生物多样性低、植被覆盖率低、水土流失严重^[50,51],生态环境相对比较脆弱。西北部地区海拔相对较高且土地利用类型主要是草地为主,林地覆盖率低,抗外界干扰能力低,脆弱性等级相对较高;东南部地区大部分地区生态本底条件较好,山脉发育,林地较多,水系较发达,生态脆弱性等级较低^[52];此外,以建设用地为主的人口聚集的区域人类对生态环境干扰能力强,生态脆弱性等级高,黄河流域中段生态脆弱性格局是在自然本底条件的基础上复合人类活动的影响形成的。近20 a黄河流域中段生态脆弱性等级以重度脆弱和中度脆弱为主,且等级整体呈现下降趋势,这与茹少峰等^[43]对黄河流域的生态脆弱性研究中对中游地区的评价结果、杨雯娜等^[44]基于分区-集

成对黄河流域生态脆弱性的评价结果和张学渊等^[21]在西北干旱区脆弱性的研究结果基本一致,环保意识的增强和黄河流域中段重大水土流失防治工程的实施促使区域脆弱性等级向相邻低等级转出,黄河流域中部地区的生态环境总体得到改善。

3.2 黄河流域中段生态脆弱性驱动因子

黄河流域中段的生态脆弱性是由于自然因素和社会因素之间以及各自内部的复杂交互作用共同决定,其中主导驱动因素为植被覆盖度、植被净初级生产力、生物丰度、GDP和人口密度,这与张良侠等^[32]对黄土高原生态脆弱性的驱动因素的因子探测结果和杨雯娜等^[44]利用皮尔森系数对黄河流域生态脆弱性成因分析的结果基本一致,但由于指标选取存在的差异或研究方法的不同略有差异,本文研究结果中植被覆盖度等自然要素对于生态脆弱性的解释力低于GDP和人口等社会因素的解释力。一系列生态措施工程的实施通过提高黄河流域中段植被覆盖度、改善区域水土流失进而提高区域生态环境质量^[53],同时人口和GDP等社会经济因素等对黄河流域中段生态脆弱性水平的影响越来越大,各种要素之间的增强交互作用越来越明显,共同影响区域生态脆弱性水平,驱动因子越来越多元。

本研究年限内主要是通过各种生态工程的实施提高植被覆盖度进而明显改善研究区生态环境,但一味依靠提高植被覆盖面积来降低生态环境脆弱性会加剧水资源短缺等问题^[54],因此未来黄河流域中段生态脆弱性治理应该从驱动生态脆弱性等级变化的多角度入手,发掘多元治理方案,植被建设也应从扩大面积向提升质量转变。

自2000年实施一系列退耕还林等生态措施以来,研究区植被覆盖度得到显著提高,对改善区域生态环境有重大意义,但在实施初期生态脆弱性水平没有明显降低,甚至极度脆弱区面积表现为向外扩张,反映出生态修复工程成效存在一定滞后性^[54],因此在生态治理过程中应考虑到生态工程的滞后性特点,同时加强对生态举措的动态监测。

3.3 研究的优势与局限性

当前对于重要生态敏感地区黄河流域生态脆弱性研究较少^[42,44,55-57]且多以整个黄河流域为尺度^[42,44],未考虑一套指标体系在黄河流域复合型生态系统的针对性与适用性,本文选取黄河流域中段针对性选取指标并利用SRP模型及空间自相关分析和地理探测器等方法对其生态脆弱性进行评价,以期能为黄河流域中段生态恢复工程提供更为详细的科学依据。然而,各种生态恢复工程对于生态环境的敏感性和脆弱性的改善都有一定的滞后作用,更长的

研究时段对于生态脆弱性动态变化研究会更加直观和科学,但受限于数据获取等原因,本文研究年限相对较短,且目前生态脆弱性评价尚未形成统一的评价准则,评价指标的选取也有待深入研究.未来生态脆弱性研究可以选取更长研究时段针对黄河流域不同区域针对性地选取指标,同时将当地政策等多元因素纳入评价指标考量,从而建立更为科学的生态脆弱性评价指标体系.

4 结论

(1)2000~2020年黄河流域中段生态脆弱性以重度脆弱和中度脆弱性水平为主,生态脆弱性等级呈稳中下降的趋势,空间分布上呈现“西北高东南低”的脆弱性分布格局.黄河流域中段生态脆弱性空间集聚特征明显,高高聚集区主要分布在人类活动较为剧烈的重度脆弱区和部分中度脆弱区,低低聚集区主要集中在生态状况较好的一般脆弱区,高聚集区容易对周围地区产生辐射影响.

(2)黄河流域中段生态脆弱性的空间分异受多种驱动因素的综合影响且不同年份解释力略有差异,但自然要素中植被覆盖度、植被净初级生产力和社会经济因素中GDP、人口密度为主要驱动因素.

(3)退耕还林还草等生态措施的实施对黄河流域中段生态脆弱性的影响具有滞后性,未来加强生态保护举措的动态监测十分重要.

参考文献:

- [1] 乔青,高吉喜,王维,等.生态脆弱性综合评价方法与应用[J].环境科学研究,2008,21(5):117-123.
Qiao Q, Gao J X, Wang W, et al. Method and application of ecological fragility assessment[J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(5): 117-123.
- [2] 靳毅,蒙古军.生态脆弱性评价与预测研究进展[J].生态学报,2011,30(11):2646-2652.
Jin Y, Meng J J. Assessment and forecast of ecological vulnerability: a review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(11): 2646-2652.
- [3] 田亚平,常昊.中国生态脆弱性研究进展的文献计量分析[J].地理学报,2012,67(11):1515-1525.
Tian Y P, Chang H. Bibliometric analysis of research progress on ecological vulnerability in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(11): 1515-1525.
- [4] 杨飞,马超,方华军.脆弱性研究进展:从理论研究到综合实践[J].生态学报,2019,39(2):441-453.
Yang F, Ma C, Fang H J. Research progress on vulnerability: from theoretical research to comprehensive practice[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 441-453.
- [5] Nelson R, Kokic P, Crimp S, et al. The vulnerability of Australian rural communities to climate variability and change: part II—integrating impacts with adaptive capacity[J]. Environmental Science & Policy, 2010, 13(1): 18-27.
- [6] 马丽莎,郑江华,彭建,等.新疆生态脆弱性特征及其驱动力[J].生态学报,2024,44(20):9053-9066.
Ma L S, Zheng J H, Peng J, et al. Research on the characteristics and driving forces of ecological vulnerability in Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9053-9066.
- [7] 武帅,田冰,顾世杰,等.基于PSRM模型的京津冀地区生态脆弱性时空演变[J].环境科学,2023,44(10):5630-5640.
Wu S, Tian B, Gu S J, et al. Spatial-temporal evolution of ecological vulnerability in Beijing-Tianjin-Hebei Region based on PSRM model[J]. Environmental Science, 2023, 44(10): 5630-5640.
- [8] 杨非凡,何浩.基于“EVI-ESV”伊犁河谷生态环境评估及生态分区构建[J].生态环境学报,2024,33(4):655-664.
Yang F F, He H. Ecological environment assessment and ecological zoning construction in the Ili River Valley based on EVI-ESV[J]. Ecology and Environment Sciences, 2024, 33(4): 655-664.
- [9] 常溢华,蔡海生.基于SRP模型的多尺度生态脆弱性动态评价——以江西省鄱阳县为例[J].江西农业大学学报,2022,44(1):245-260.
Chang Y H, Cai H S. Dynamic assessment of multi-scale eco-environmental vulnerability based on SRP model in Poyang County[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(1): 245-260.
- [10] 危小建,辛思怡,张颖艺,等.不同格网尺度下生态系统服务价值空间分异及其影响因素差异——以大南昌都市圈为例[J].生态学报,2023,43(18):7585-7597.
Wei X J, Xin S Y, Zhang Y Y, et al. Spatial difference of ecological services and its influencing factors under different scales: taking the Nanchang Urban Agglomeration as an example[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(18): 7585-7597.
- [11] 张慧琳,王卫国,王建,等.基于遥感和GIS技术的山西省生态脆弱性演变分析[J].遥感技术与应用,2024,39(2):478-491.
Zhang H L, Wang W G, Wang J, et al. Analysis on evolution of ecological vulnerability of Shanxi Province based on the remote sensing and GIS technique[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2024, 39(2): 478-491.
- [12] 王心,徐方石.基于贝叶斯网络的生态环境脆弱性评估方法研究[J].环境科学与管理,2024,49(5):171-174.
Wang X, Xu F S. Research on ecological environment vulnerability assessment method based on Bayesian networks[J]. Environmental Science and Management, 2024, 49(5): 171-174.
- [13] 王让会,宁虎森,王海东,等.基于EFI方法的流域生态安全特征及其演变规律[J/OL].南京信息工程大学学报,2024:1-13,https://doi.org/10.13878/j.cnki.jnuist.20240115001.
Wang R H, Ning H S, Wang H D, et al. Ecological security characteristics and evolution law of basin based on EFI method[J/OL]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology, 2024: 1-13, https://doi.org/10.13878/j.cnki.jnuist.20240115001.
- [14] 朱荣,敖译建,蒋友严.基于CRITIC客观赋权法的天水市生态环境脆弱性评价[J].中国沙漠,2024,44(3):321-331.
Zhu R, Ao Z J, Jiang Y Y. Assessment of ecological environment vulnerability in Tianshui city based on the CRITIC objective weighting method[J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(3): 321-331.
- [15] 李子辉,苏湘媛,田甜,等.基于格局-质量-功能的高寒草甸区生态脆弱性分析——以云南迪庆为例[J].中国环境科学,2024,44(4):2273-2285.
Li Z H, Su X Y, Tian T, et al. Ecological vulnerability analysis of alpine meadow area based on pattern-quality-function ratio: take Diqing in Yunnan as an example[J]. China Environmental Science, 2024, 44(4): 2273-2285.
- [16] 孙玮婕,乔斌,于红妍,等.基于活力-组织力-恢复力的黑河源区高寒湿地景观生态健康评估[J].干旱区研究,2024,41(2):301-313.
Sun W J, Qiao B, Yu H Y, et al. Ecological health assessment of the alpine wetland landscape in the Heihe River source area based on vigor, organization, and resilience[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(2): 301-313.
- [17] 张良侠,周德成,樊江文,等.黄土高原地区生态脆弱性的空间分布格局及其控制因子关系的一致性分析[J].生态学报,2024,44(22):10096-10105.
Zhang L X, Zhou D C, Fan J W, et al. Consistency analysis of the spatial distribution patterns and their drivers of the ecological vulnerability of the loess plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10096-10105.
- [18] 刘丽,张吴平,毕如田,等.黄土丘陵矿区生态脆弱性评价——以晋城市长河流域为例[J].山西农业科学,2018,46(5):810-814,846.
Liu L, Zhang W P, Bi R T, et al. Ecological vulnerability assessment of Loess Hilly Mining Area—a case study on Changhe River Basin in Jincheng City[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(5): 810-814, 846.
- [19] 陆晴,廖佳婧,胡慧敏.基于SRP模型的红壤丘陵区生态脆弱性评价——以江西省赣南地区为例[J].上海国土资源,2023,44(3):100-105,156.
Lu Q, Liao J J, Hu H M. Evaluation of ecological vulnerability in the Gannan region of Jiangxi Province[J]. Shanghai Land & Resources, 2023, 44(3): 100-105, 156.
- [20] 黄越,程静,王鹏.中国北方农牧交错区生态脆弱性时空演变格局与驱动因素——以盐池县为例[J].干旱区地理,2021,44(4):1175-1185.

- Huang Y, Cheng J, Wang P. Spatiotemporal evolution pattern and driving factors of ecological vulnerability in agro-pastoral region in northern China: a case of Yanchi County in Ningxia[J]. *Arid Land Geography*, 2021, **44**(4): 1175-1185.
- [21] 张学渊, 魏伟, 周亮, 等. 西北干旱区生态脆弱性时空演变分析[J]. *生态学报*, 2021, **41**(12): 4707-4719.
- Zhang X Y, Wei W, Zhou L, *et al.* Analysis on spatio-temporal evolution of ecological vulnerability in arid areas of Northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(12): 4707-4719.
- [22] 郭兵, 孔维华, 姜琳. 西北干旱荒漠生态脆弱性动态监测及驱动因子定量分析[J]. *自然资源学报*, 2018, **33**(3): 412-424.
- Guo B, Kong W H, Jiang L, *et al.* Dynamic monitoring of ecological vulnerability in arid desert ecological region of Northwest China and the quantitative analysis of its driving forces[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, **33**(3): 412-424.
- [23] 李洪广, 周旭, 肖杨, 等. 基于SRP模型的西南喀斯特山区生态脆弱性时空变化特征[J]. *生态科学*, 2021, **40**(3): 238-246.
- Li H G, Zhou X, Xiao Y, *et al.* Temporal and spatial changes of ecological vulnerability in southwestern Karst mountains based on SRP model[J]. *Ecological Science*, 2021, **40**(3): 238-246.
- [24] 刘飞, 刘峰贵, 周强, 等. 青藏高原生态风险及区域分异[J]. *自然资源学报*, 2021, **36**(12): 3232-3246.
- Liu F, Liu F G, Zhou Q, *et al.* Ecological risk and regional differentiation in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, **36**(12): 3232-3246.
- [25] 岳笑, 张良侠, 周德成, 等. 基于植被净初级生产力的青藏高原地区生态脆弱性及其控制因子分析[J]. *地理科学*, 2024, **44**(1): 140-148.
- Yue X, Zhang L X, Zhou D C, *et al.* Ecological vulnerability and its driving forces of the Qinghai-Xizang Plateau based on the net primary productivity of vegetation[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2024, **44**(1): 140-148.
- [26] 王晓峰, 郑媛元, 孙泽冲, 等. 青藏高原自然保护区生态脆弱性演化与模拟[J]. *环境科学*, 2025, **46**(3): 1633-1644.
- Wang X F, Zheng Y Y, Sun Z C, *et al.* Evolution and simulation of ecological vulnerability in Qinghai-Xizang Plateau Nature Reserve[J]. *Environmental Science*, 2025, **46**(3): 1633-1644.
- [27] 李佳, 彭泰来, 刘寅学, 等. 基于SRP模型的广东省林地生态脆弱性评价[J]. *中南林业调查规划*, 2024, **43**(1): 33-37.
- Li J, Peng T L, Liu Y X, *et al.* Forest ecological vulnerability assessment of Guangdong Province based on SRP model[J]. *Central South Forest Inventory and Planning*, 2024, **43**(1): 33-37.
- [28] 钱方艳, 兰安军, 范泽孟, 等. 贵州省北盘江流域经济贫困与生态脆弱性的空间耦合关系研究[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2024, **42**(1): 36-44.
- Qian F Y, Lan A J, Fan Z M, *et al.* Spatial coupling relationship between economic poverty and ecological vulnerability in Beipanjiang River Basin, Guizhou Province[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2024, **42**(1): 36-44.
- [29] 王贝贝, 丁明军, 管琪卉, 等. 基于格网的南昌市生态环境脆弱性评价[J]. *生态学报*, 2019, **39**(15): 5460-5472.
- Wang B B, Ding M J, Guan Q H, *et al.* Gridded assessment of eco-environmental vulnerability in Nanchang city[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(15): 5460-5472.
- [30] 王熙, 李建松, 刘权毅, 等. 基于SRP模型的新安江流域生态脆弱性评价[J]. *水生态学杂志*, 2024, **45**(2): 1-9.
- Wang X, Li J S, Liu Q Y, *et al.* Evaluation of ecological vulnerability in Xin'anjiang River Basin based on SRP modelling[J]. *Journal of Hydroecology*, 2024, **45**(2): 1-9.
- [31] Yi F, Lu Q, Li Y H, *et al.* Ecological vulnerability assessment of natural oasis in arid Areas: application to Dunhuang, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, **149**, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110139.
- [32] 张良侠, 樊江文, 张海燕, 等. 黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(9): 4902-4910.
- Zhang L X, Fan J W, Zhang H Y, *et al.* Spatial-temporal variations and their driving forces of the ecological vulnerability in the loess plateau[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4902-4910.
- [33] 徐超璇, 鲁春霞, 黄绍琳. 张家口地区生态脆弱性及其影响因素[J]. *自然资源学报*, 2020, **35**(6): 1288-1300.
- Xu C X, Lu C X, Huang S L. Study on ecological vulnerability and its influencing factors in Zhangjiakou area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, **35**(6): 1288-1300.
- [34] Kan A K, Li G Q, Yang X, *et al.* Ecological vulnerability analysis of Tibetan towns with tourism-based economy: a case study of the Bayi District[J]. *Journal of Mountain Science*, 2018, **15**(5): 1101-1114.
- [35] 赵宗泽, 马倩, 王一, 等. 基于SRP模型的中原城市群生态脆弱性分析与预测[J]. *环境科学*, 2025, **46**(3): 1621-1632.
- Zhao Z Z, Ma Q, Wang Y, *et al.* Analysis and prediction of ecological vulnerability of the central plains urban agglomeration based on the SRP model[J]. *Environmental Science*, 2025, **46**(3): 1621-1632.
- [36] 喻春哲, 于欢, 项清, 等. 四川省生态脆弱性时空分异及其驱动机制[J]. *环境科学*, 2024, **45**(12): 6922-6934.
- Yu C Z, Yu H, Xiang Q, *et al.* Spatio-temporal differentiation and its driving mechanism of ecological vulnerability in Sichuan Province[J]. *Environmental Science*, 2024, **45**(12): 6922-6934.
- [37] 汤良, 胡希军, 罗紫薇, 等. 生态脆弱性与城镇化水平时空耦合及其交互影响因素——以湖南省为例[J]. *生态学报*, 2024, **44**(11): 4662-4677.
- Tang L, Hu X J, Luo Z W, *et al.* Spatiotemporal coupling of ecological vulnerability and urbanization level and their interactive influencing factors: a case study of Hunan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(11): 4662-4677.
- [38] Levrel H, Kerbiriou C, Couvet D, *et al.* OECD pressure - state - response indicators for managing biodiversity: a realistic perspective for a French biosphere reserve[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2009, **18**(7): 1719-1732.
- [39] Pan Z Z, Gao G Y, Fu B J. Spatiotemporal changes and driving forces of ecosystem vulnerability in the Yangtze River Basin, China: Quantification using habitat-structure-function framework[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **835**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155494.
- [40] 郭泽呈, 魏伟, 庞素菲, 等. 基于SPCA和遥感指数的干旱内陆河流域生态脆弱性时空演变及动因分析——以石羊河流域为例[J]. *生态学报*, 2019, **39**(7): 2558-2572.
- Guo Z C, Wei W, Pang S F, *et al.* Spatio-temporal evolution and motivation analysis of ecological vulnerability in Arid Inland River Basin based on SPCA and remote sensing index: a case study on the Shiyang River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(7): 2558-2572.
- [41] 新华社. 习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上发表重要讲话[J]. *中国水土保持*, 2019, (10): 1-2.
- [42] 胡荣明, 米晓梅, 竞霞, 等. 黄河流域东乡族自治县生态脆弱性评价[J]. *人民黄河*, 2023, **45**(11): 100-105.
- Hu R M, Mi X M, Jing X, *et al.* Ecological vulnerability assessment of ethnic areas of Dongxiang Autonomous County in the Yellow River Basin[J]. *Yellow River*, 2023, **45**(11): 100-105.
- [43] 茹少峰, 马茹慧. 黄河流域生态环境脆弱性评价、空间分析及预测[J]. *自然资源学报*, 2022, **37**(7): 1722-1734.
- Ru S F, Ma R H. Evaluation, spatial analysis and prediction of ecological environment vulnerability of Yellow River Basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, **37**(7): 1722-1734.
- [44] 杨雯娜, 周亮, 孙东琪. 基于分区-集成的黄河流域生态脆弱性评价[J]. *自然资源遥感*, 2021, **33**(3): 211-218.
- Yang W N, Zhou L, Sun D Q. Ecological vulnerability assessment of the Yellow River basin based on partition-integration concept[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2021, **33**(3): 211-218.
- [45] 王宗辉. 基于SRP模型的渭河流域生态脆弱性评价分析[J]. *科技资讯*, 2022, **20**(12): 99-104.
- Wang Z H. Ecological vulnerability assessment in Wei River Basin based on SRP model[J]. *Science & Technology Information*, 2022, **20**(12): 99-104.
- [46] 李敏, 张艳. 黄河流域中段植被覆盖时空变化特征及影响因素分析[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2023, **41**(1): 10-20, 40.
- Li M, Zhang Y. Temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of vegetation cover in the middle Yellow River Basin[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2023, **41**(1): 10-20, 40.
- [47] 张艳, 胡征南, 周浩浩, 等. 黄河干流沿线陕西段土地生态安全时空分布特征[J]. *水土保持通报*, 2022, **42**(6): 258-267, 350.
- Zhang Y, Hu Z N, Zhou H H, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics on land ecological security along main stream of Yellow River in Shaanxi Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, **42**(6): 258-267, 350.
- [48] 张艳, 史飞航, 张悦, 等. 黄河中游土壤侵蚀时空变化及驱动因素[J]. *水土保持研究*, 2023, **30**(5): 1-12.
- Zhang Y, Shi F H, Zhang Y, *et al.* Temporal and spatial changes and driving factors of soil erosion in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, **30**(5): 1-12.

- [49] 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.
Wang J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(1): 116-134.
- [50] 朱冰冰, 霍云霏, 周正朝. 黄土高原坡沟系统植被格局对土壤侵蚀影响研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2021, **19**(4): 149-156.
Zhu B B, Huo Y P, Zhou Z C. Research progress in impact of vegetation pattern on soil erosion in the slope-gully system of the Loess Plateau [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, **19**(4): 149-156.
- [51] 孙文义, 邵全琴, 刘纪远. 黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价[J]. 自然资源学报, 2014, **29**(3): 365-376.
Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y. Assessment of soil conservation function of the ecosystem services on the Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2014, **29**(3): 365-376.
- [52] 宁佳, 邵全琴. 黄土高原土地利用及生态系统服务时空变化特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(4): 774-785.
Ning J, Shao Q Q. Temporal and spatial characteristics of land use and ecosystem services in the Loess Plateau [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(4): 774-785.
- [53] 史晓亮, 王馨爽. 黄土高原草地覆盖度时空变化及其对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2018, **25**(4): 189-194.
Shi X L, Wang X S. Spatial and temporal variation of vegetation coverage and its response to climate change in the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, **25**(4): 189-194.
- [54] 任宗萍, 李占斌, 李鹏, 等. 黄土高原植被建设应从扩大面积向提升质量转变[J]. 科技导报, 2018, **36**(14): 12-14.
Ren Z P, Li Z B, Li P, et al. Vegetation construction in Loess Plateau: From area expansion to quality improvement [J]. Science & Technology Review, 2018, **36**(14): 12-14.
- [55] 李念春, 袁辉. 黄河三角洲高效生态经济区生态环境脆弱性评价研究[J]. 山东国土资源, 2015, **31**(10): 57-61.
Li N C, Yuan H. Evaluation and study on ecological vulnerability of efficient ecological economic zone in the Yellow River Delta Area [J]. Shandong Land and Resources, 2015, **31**(10): 57-61.
- [56] 吴春生, 黄翀, 刘高焕, 等. 基于模糊层次分析法的黄河三角洲生态脆弱性评价[J]. 生态学报, 2018, **38**(13): 4584-4595.
Wu C S, Huang C, Liu G H, et al. Assessment of ecological vulnerability in the Yellow River Delta using the Fuzzy Analytic Hierarchy Process [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(13): 4584-4595.
- [57] 张鑫, 杜朝阳, 蔡焕杰. 黄河中游区佳芦河流域生态脆弱性评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, **20**(S1): 155-158.
Zhang X, Du C Y, Cai H J. Assessment of ecological vulnerability in Jialu River Basin in Yellow River Midstream Area [J]. China Population Resources and Environment, 2010, **20**(S1): 155-158.