宁夏南部水源区泾源县生态脆弱性评价及其时空演变规律

马占存[1], 吴海娟[1], 李金燕[1,2], 张 茹[1], 黄晏彪[1]
(1.宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021;
2.旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘 要: [目的]以宁夏南部水源区泾源县为研究区,进行生态脆弱性评价,揭示其时空演变特征,为区域生态环境保护与建设、生态资源合理开发利用提供理论支撑。[方法]以小尺度的乡镇和栅格为研究单元,基于生态暴露度-生态敏感性-生态适应力(VSD)模型,结合水源区典型生态系统选取16个指标因子构建生态脆弱性评价指标体系,运用主客观结合的层次分析-熵权法,将经过标准化和权重赋值后的数据,采用生态脆弱性综合指数对其生态脆弱性进行评价;结合变异系数、全局Moran's *I*指数和LISA聚类图,对水源区泾源县生态脆弱性变化分布规律进行定量分析。[结果]①研究区生态脆弱性呈现"东西部低,中部高"的分布特征,且以轻度脆弱和中度脆弱为主。② 随着时间的推移,生态脆弱性指数呈现降低趋势,变异系数趋于均衡,生态系统稳定性增强。③生态脆弱性呈显著空间正相关性和空间聚集性,且以低低聚集和高高聚集最为明显;④在研究期间各乡镇生态脆弱性指数降低,且以由中度、重度脆弱向轻度脆弱转变为主。[结论]2011—2023年研究区生态脆弱性指数呈降低趋势,空间异质性较强,生态环境质量在逐步改善;生态保护和治理措施对水源区生态脆弱性影响显著。

关键词: 生态脆弱性; VSD模型; 层次分析-熵权法; 时空分异; 宁夏回族自治区泾源县
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0383-12 **中图分类号:** X171.1, X143

文献参数: 马占存, 吴海娟, 李金燕, 等.宁夏南部水源区泾源县生态脆弱性评价及其时空演变规律[J].水土保持通报,2026,46(3):383-394. Ma Zhancun, Wu Haijuan, Li Jinyan, et al. Ecological vulnerability evaluation and spatiotemporal evolution pattern in water source area of Jingyuan County in southern Ningxia Hui Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(3):383-394.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.006 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.006**

Ecological vulnerability evaluation and spatiotemporal evolution pattern in water source area of Jingyuan County in southern Ningxia Hui Autonomous Region

Ma Zhancun[1], Wu Haijuan[1], Li Jinyan[1,2], Zhang Ru[1], Huang Yanbiao[1]
(1.*School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*; 2.*Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*)

Abstract: [Objective] The ecological vulnerability of the water resource area in Jingyuan County, southern Ningxia Hui Autonomous Region, was investigated in order to reveal its spatiotemporal evolution characteristics and provide theoretical support for regional ecological environment protection and construction, as well as the rational development and utilization of ecological resources. [Methods] Small-scale townships and grids were used as research units, and based on the ecological exposure-ecological sensitivity-ecological adaptability (VSD) model, 16 indicator factors were selected in conjunction with the typical ecosystems of the water source area to

收稿日期:2025-09-21 **修回日期:**2025-12-05 **采用日期:**2025-12-12
资助项目:国家自然科学基金项目"基于生态脆弱性特征的宁夏中南部调水工程水源区生态补偿机制研究"(72464027);宁夏大学水利工程一流学科项目(NXYLXK2021A03);宁夏自然科学基金项目"基于水资源承载力的宁夏清水河流域产业结构优化研究"(2026AAC030115)
第一作者:马占存(1999—),男(回族),宁夏回族自治区吴忠市人,硕士研究生,研究方向为水环境及生态脆弱性。Email:mazhancun2023@163.com。
通信作者:李金燕(1976—),女(汉族),宁夏回族自治区银川市人,博士,教授,主要从事旱区水环境与水土资源调控研究。Email:lijinyan001@163.com。

construct an ecological vulnerability evaluation index system. A combination of subjective and objective methods, specifically the analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method, was applied to evaluate ecological vulnerability using an index calculated from standardized and weighted data. Furthermore, the coefficient of variation, global Moran's *I* index, and LISA cluster maps were used to quantitatively analyze the distribution patterns of ecological vulnerability changes in water source area of Jingyuan County. [Results] ① The ecological vulnerability in the study area exhibited a distribution pattern characterized by 'low in the east and west, and high in the center', dominated by mild and moderate vulnerability levels. ② Over time, the ecological vulnerability index showed a decreasing trend, the coefficient of variation tended to become more balanced, and ecosystem stability increased. ③ Ecological vulnerability exhibited significant positive spatial correlation and spatial clustering, with low-low and high-high clusters being the most prominent. ④ During the study period, the ecological vulnerability index of all townships decreased, with the primary transformation being from moderate and high vulnerability to mild vulnerability. [Conclusion] The ecological vulnerability index of the study area has shown a decreasing trend from 2011 to 2023, with strong spatial heterogeneity, indicating a gradual improvement in ecological environment quality. Ecological protection and management measures have significant impacts on the ecological vulnerability of the water source area.

Keywords: ecological vulnerability; VSD model; AHP-entropy weight method; spatiotemporal differentiation; Jingyuan County in Ningxia Hui Autonomous Region

生态脆弱性是生态系统在特定时间和空间尺度下对外界干扰具有的敏感反应和恢复自身状态的能力,是生态系统的固有属性,也是衡量生态环境质量和可持续发展的重要指标之一[1]。近年来,在全球生态环境变化的背景下,人们对生态脆弱性的关注度不断提高,全球和区域尺度的生态脆弱性评价及其空间变化特征研究逐渐成为环境保护和可持续发展领域关注的重点与热点,主要集中于评价方法的多元化和评价尺度的精细化方面[2]。评价方法方面由早期的单一要素评价逐渐向强调生态系统与外界干扰之间的多要素、多维度复合关系的综合性评价演变[3],并构建了一系列评价模型。例如,敏感性-恢复力-压力度(SRP)模型[4]、暴露度-敏感性-适应力(VSD)模型[5]、驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)模型[6]和压力-状态-响应(PSR)模型等[7]。然而暴露度-敏感性-适应力(VSD)模型以生态系统稳定性的内涵为依据构建而成,与学术界公认的IPCC组织关于脆弱性的定义较为一致,且该模型概念内涵界定清晰,对具体指标进行细致分析,逐层推进,具有较好的兼容性与延展潜力,对生态系统脆弱性评估更为全面,因此在流域[8]、自然保护区[9]和生态功能区等[10]领域的生态脆弱性评价中得到充分验证和广泛应用。评价尺度方面开始从基于生态学、地理学等理论进行的大尺度、宏观方面的评价研究,逐渐转向基于小尺度、精细化的生态脆弱性评价研究。Yu Xue[11],Hou Huping[12],Alok等[13]选择以公园、矿区以及牧场等作为研究区域对其展开生态脆弱性评价研究;张金茜[14]、常溢华[15]、赵文艳等[16]从乡镇尺度基于栅格、格网进行评价,通过定量分析的方法,梳理了研究区域内生态脆弱性的动态变化特征,同时对区域生态脆弱性的空间关联规律进行了表征。因此开展多学科交叉融合的多元化、精细化的区域生态环境脆弱性评价,对区域生态环境保护、资源合理利用以及精准预防灾害风险实现可持续发展具有重要意义[17]。

宁夏回族自治区南部水源涵养功能区泾源县属于国家级重点生态功能区,是黄河支流泾河的发源地,其境内水系发达,被誉为黄土高原上的天然水塔——宁夏水塔,是宁夏中南部城乡饮水安全水源工程(简称宁夏中南部调水工程)的供水区,承担着宁夏中南部干旱区域4个县区的人畜饮水安全职责,战略地位十分重要。同时泾源县在宁夏黄河流域生态保护和高质量发展先行区"一带三区"总体布局中,是宁夏境内两个国家级水土流失重点预防区涉及县之一,属于生态最敏感的区域之一。泾源县的生态系统兼具"脆弱性"与"防护性"的双重属性,其水源涵养能力、生态修复成效,直接关系宁夏南部生态安全格局的构建质量,是衡量全区生态保护工作是否"筑牢根基"的重要指标。国家总体发展战略要求泾源县发挥生态系统服务功能,着力打造宁夏黄河流域生态保护和高质量发展先行区的重要生态功能区和水源涵养区。为此,泾源县人民面对气候变化、城市发展、资源开发以及调水工程施工建设等自然和人为因素双重影响下的生态脆弱性问题,围绕"保水质,涵水源,修生态"的目标,在不同阶段开展生态修复工作,防止水源涵养功能退化,改善环境脆弱状

态,保障生态系统的自身稳定性和恢复力。这些工作既是对当地生态脆弱性的主动应对,也是保障调水工程安全运行的关键支撑。

基于此,本文以宁夏南部核心水源区泾源县为研究区,综合考虑自然和人为因素的双重影响,筛选出16个具有代表性的评价因子构建生态脆弱性评价指标体系,在VSD模型和层次分析-熵权法以及遥感、地理信息系统等技术手段的支持下,分析计算水源区泾源县2011—2023年生态脆弱性指数,揭示其多因素作用下的脆弱性空间格局及时空变化趋势。一方面丰富了对水源涵养功能区生态脆弱性评价及其时空变化规律的认识,完善了水源涵养区的"生态脆弱性评价"指标库,另一方面依据评价结果为今后研究区的生态治理方向提供理论支持和科学依据,以便精准有效开展生态修复与治理工作,强化水源涵养功能,确保水源区的优良水质、生态恢复及调水工程的安全长久运行,实现区域生态环境保护与经济建设的可持续发展,满足生态文明建设的需求。

1　研究区概况

水源区泾源县位于宁夏回族自治区南部六盘山东麓腹地,地势西北高、东南低,海拔范围为1 603～2 919 m,现辖六盘山镇、香水镇、泾河源镇3镇和大湾乡、黄花乡、兴盛乡、新民乡4乡,2023年末常住人口为8.45万人。泾源县因泾河发源于此而得名,境内水系发达,河道纵横交错,年平均径流总量为2.40×10^8 m^3,属于温带湿润与半湿润大陆性气候区,年均气温6.9 ℃,年均降水750 mm,多年平均可利用总量为1.25×10^8 m^3,人均水资源量1 620 m^3,水量充沛,水质良好。然而泾源县现状年用水量仅占水资源可利用量的3%左右,水资源量相对周边干旱地区丰沛且富裕,因此开始建设以泾源县作为水源区向境内中南部干旱地区供水的宁夏中南部调水工程。该工程于2012年10月开工建设,2016年10月建成通水,作为常年水源工程,供水贯穿全年,设计年调取水量为3.98×10^7 m^3,春夏季(3—6月)是供水高峰期。研究区属于典型复杂地理环境区和战略地位显著区,科学地对其开展生态脆弱性评价,评估生态保护措施取得的成效显得尤为重要。

2　材料与方法

2.1　数据来源与处理

数据主要涵盖遥感影像数据、数字高程模型(DEM)数据、土地利用/覆被数据、气象数据及社会经济数据5大类。其中,遥感数据获取自地理空间数据云平台,具体包含2011,2015和2019年的Landsat 4-5 TM卫星影像以及2023年的Landsat 8OLI_TIRS卫星影像;DEM数据来源于地理空间数据云;土地利用/覆被数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心;气象数据则主要依托研究区周边的气象站点进行收集与整理;社会经济数据来源于《中国县域统计年鉴》及泾源县统计年鉴。数据预处理过程主要包括辐射校正、几何校正、波段融合、图像镶嵌与裁剪,重分类和重采样等过程。根据LUCC分类标准和水源区实际情况,将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地6类,经实地验证与比对,数据精度满足研究要求。为确保数据处理的可操作性和可视化表达,所有研究数据利用ArcGIS 10.8软件进行投影转换,使用反距离权重法进行空间插值计算;通过将面状评价单元和栅格评价单元相结合,使结果更加真实可靠。

2.2　研究方法

2.2.1　构建评价指标体系

本文在参考诸多相关研究成果的基础上[4-16],遵循评价指标选取的科学性、代表性、可操作性以及时效性原则,着眼于水源区泾源县的生态功能和所面临的生态问题,综合考虑其自然环境和人类活动因素的双重影响,基于暴露度-敏感性-适应力(VSD)模型构建生态脆弱性评价指标体系(表1)。暴露度是指区域生态系统在自然环境变化与人类活动的双重作用下,受到的压力或胁迫程度[17]。水源区泾源县作为国家重点生态功能区及调水工程供水区,气候变化、工程施工和人类活动对生态系统的干扰较大,选取土地利用类型、年均降水量、年均气温、相对湿度、人口密度和GDP密度为暴露度准则的评价指标。敏感性是指区域生态系统对外界胁迫的响应程度,主要受系统本身的自然条件影响[18]。泾源县地处六盘山东麓腹地,属于山地丘陵区,季风气候与山地丘陵立体气候在此叠加,区域性气候特征明显,选取以自然本底要素为主的高程、坡度、地形起伏度、土壤侵蚀度、水网密度和$PM_{2.5}$浓度为敏感性准则的评价指标。适应力指区域生态系统受到外界破坏后的再恢复能力[19],选取对研究区生态环境的恢复,水源涵养功能的提升起到正面影响的生态环境质量指数、植被净初级生产力(NPP)、生物丰富度指数和植被覆盖度作为适应力的指标。研究所选取的各评价指标的正、负向均指与生态脆弱性的关系。如正向指标,则表示该指标越大,脆弱性越强,反之则脆弱性越弱;负向指标,则表示该指标越大,脆弱性越弱,反之则脆弱性越强。

表1 泾源县生态脆弱性评价指标体系

Table 1 Ecological vulnerability evaluation index system of Jingyuan County

目标层	准则层	指标层	指标属性
水源区泾源县生态脆弱性A	暴露度B_1	土地利用类型(C_1)	定性
		年均降水量(C_2)	负向
		年均气温(C_3)	正向
		相对湿度(C_4)	负向
		人口密度(C_5)	正向
		GDP密度(C_6)	正向
	敏感性B_2	高程(C_7)	正向
		坡度(C_8)	正向
		地形起伏度(C_9)	正向
		土壤侵蚀度(C_{10})	正向
		水网密度(C_{11})	正向
		$PM_{2.5}$浓度(C_{12})	正向
	适应力B_3	生态环境质量指数(C_{13})	负向
		植被净初级生产力(NPP)(C_{14})	负向
		生物丰富度指数(C_{15})	负向
		植被覆盖度(C_{16})	负向

2.2.2 评价指标标准化

因评价指标的量纲、值域与其属性存在差异,需对评价指标进行标准化处理,以解决参数不可比问题。对于定量指标和定性指标分别采用极差法和分等级赋值法,使其值标准化为0~1,值越接近1,表示生态环境越脆弱[5]。

正向指标和负向指标采用如下公式进行标准化处理:

$$\text{正向指标:}\quad Z_{ij}=\frac{X_{ij}-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{1}$$

$$\text{负向指标:}\quad Z_{ij}=\frac{X_{\max}-X_{ij}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{2}$$

式中:Z_{ij}为指标标准化值;X_{ij}为第i个指标第j个栅格的原始值;X_{max}为该指标最大栅格值;X_{min}为该指标最小栅格值。

定性指标依据研究区的土地利用实际特征,结合相关研究[5,14],采用表2分等级赋值法进行标准化处理。

表2 生态脆弱性评价指标分等级赋值标准

Table 2 Grading standards for ecological vulnerability evaluation indicators

指标	标准化赋值				
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
土地利用类型	林地、水体	草地	耕地	建设用地	未利用地

2.2.3 评价指标权重赋值

(1)层次分析法(AHP)。层次分析法(AHP)是生态脆弱性评价中计算权重的典型主观方法,对于解决复杂决策问题具有显著优势。原理是将目标数据分解为相互关联的有序层次,利用层次结构模型构建判断矩阵,计算其最大特征值对应的特征向量,以确定权重,并对判断矩阵进行一致性检验以确保满足要求[20]。

(2)熵权法。熵权法是一种客观权重赋值方法,是度量系统无序程度的量,熵值越小则权重越大,熵值越大则权重越小,根据熵权法经典模型[21],计算指标熵值及其权重公式为

$$P_{ij}=\frac{Z_{ij}}{\sum_{j=1}^{m}Z_{ij}} \tag{3}$$

$$e_i=-K\sum_{j=1}^{m}P_{ij}\ln P_{ij} \tag{4}$$

$$K=\ln(m)^{-1} \tag{5}$$

$$w_i=\frac{S_i}{\sum_{i=1}^{n}S_i} \tag{6}$$

式中:P_{ij}为第i个指标第j个栅格的比重;e_i为第i个指标的熵值;K为常数;m为栅格数量;w_i为第i项指标的权重;S_i为第i指标的差异系数。

(3)综合权重法。层次分析法和熵权法各有优缺点,在参考相关文献[20-23]并结合研究区所选指标特性的基础上,以主观赋权和客观赋权相结合的方法优化权重,通过耦合赋权方式构建更科学的综合权重模型,将主观权重与客观权重进行加权求和,继而求得各评价指标的综合权重。计算公式为

$$H_i=q_ie_i+w_i(1-e_i) \tag{7}$$

式中:H_i为最终指标权重值;q_i为AHP法的权重值;w_i为熵权法的权重值。则最终确定各指标的综合权重(表3)。

2.2.4 生态脆弱性指数计算及分类定级

生态环境的脆弱程度用定量的生态脆弱性指数来表征,其数值变化反映研究区生态脆弱性的时空分布规律。参照余坤勇等[22-23]生态环境脆弱性评价方法,利用ArcGIS 10.8软件的栅格计算器功能,将各指标权重和对应标准化值采用线性加权法进行计算,从而得到2011,2015,2019和2023年4期的生态脆弱性指数,并对其进行标准化处理,具体计算模型[24]为

$$\mathrm{EVI}=\sum_{i=1}^{n}H_i\cdot Z_{ij} \tag{8}$$

式中:EVI为生态脆弱性指数,与脆弱度呈正相关,其

值越大生态脆弱程度越高,反之生态环境越稳定。

$$SEVI=\frac{EVI-EVI_{min}}{EVI_{max}-EVI_{min}} \tag{9}$$

式中:SEVI为生态脆弱性指数标准化值,变化范围为0~1; EVI_{max}为所有栅格的生态脆弱性指数的最大值; EVI_{min}为最小值。

生态脆弱性指数经标准化处理后,参照国内外生态脆弱性研究的评价标准[24-25],结合水源区泾源县环境特征和生态脆弱度的表现特征,将标准化后的数值分为5类等级(表4),分别为微度脆弱、轻度脆弱、中度脆弱、重度脆弱和极度脆弱;等级越高,脆弱性指数越大,生态环境越不稳定。

表3　生态脆弱性评价指标权重

Table 3　Weights of ecological vulnerability evaluation indicators

指 标	AHP	综合权重			
		2011年	2015年	2019年	2023年
土地利用类型(C_1)	0.109 1	0.108 4	0.108 5	0.108 4	0.108 5
年均降水量(C_2)	0.039 7	0.039 6	0.039 5	0.039 6	0.039 6
年均气温(C_3)	0.043 5	0.043 3	0.043 4	0.043 3	0.043 4
相对湿度(C_4)	0.043 1	0.043 4	0.043 4	0.043 5	0.043 2
人口密度(C_5)	0.028 7	0.035 9	0.033 7	0.036 1	0.038 1
GDP密度(C_6)	0.056 8	0.061 8	0.064 3	0.057 8	0.057 2
高程(C_7)	0.036 0	0.035 7	0.035 5	0.035 6	0.035 8
坡度(C_8)	0.035 8	0.036 3	0.036 2	0.036 4	0.036 1
地形起伏度(C_9)	0.035 9	0.035 3	0.035 6	0.035 2	0.035 8
土壤侵蚀度(C_{10})	0.114 3	0.116 9	0.117 8	0.120 5	0.117 9
水网密度(C_{11})	0.037 7	0.039 4	0.039 3	0.039 5	0.039 4
$PM_{2.5}$浓度(C_{12})	0.108 8	0.108 8	0.108 2	0.108 1	0.108 3
生态环境质量指数(C_{13})	0.112 2	0.112 1	0.112 2	0.112 3	0.112 1
植被净初级生产力(NPP)(C_{14})	0.038 9	0.038 8	0.038 8	0.038 9	0.038 8
生物丰富度指数(C_{15})	0.058 8	0.059 0	0.058 7	0.059 1	0.058 9
植被覆盖度(C_{16})	0.102 9	0.102 2	0.102 1	0.112 2	0.103 3

表4　生态环境脆弱性分级标准及其生态特征

Table 4　Classification standards and corresponding ecological characteristics of ecological vulnerability

脆弱性等级	等级	脆弱性指数	等级特征
微度脆弱	Ⅰ	0<SEVI<0.2	生态系统结构和功能稳定,抗外界干扰能力和自我恢复能力强,生态脆弱性低
轻度脆弱	Ⅱ	0.2<SEVI<0.4	生态系统结构和功能较为稳定,抗外界干扰能力和自我恢复能力较强,生态脆弱性较低
中度脆弱	Ⅲ	0.4<SEVI<0.6	生态系统结构和功能相对不稳定,抗外界干扰能力和自我恢复能力较弱,生态脆弱性较高
重度脆弱	Ⅳ	0.6<SEVI<0.8	生态系统结构和功能不稳定,抗外界干扰能力和自我恢复能力弱,生态脆弱性高
极度脆弱	Ⅴ	0.8<SEVI<1.0	生态系统结构和功能极不稳定,抗外界干扰能力和自我恢复能力极弱,生态脆弱性极高

为比较不同年份的生态环境脆弱性变化趋势,采用生态脆弱性等级指数(*EVLI*)反映研究区生态脆弱性程度的整体差异,计算公式[25]为:

$$EVLI=\sum_{r=1}^{\mu}E_r\cdot A_r/S \tag{10}$$

式中:EVLI为脆弱性等级指数; E_r为第r类脆弱性的类别,r取值为1,2,3,4,5; A_r为第r类脆弱区的面积; S为区域总面积; μ为脆弱性类别总数。

2.2.5　空间自相关分析

空间自相关分析是研究空间中某一地理要素属性值之间存在的空间统计依赖关系,检验地理位置相近要素之间是否相似或相关的分析方法。

(1) 本研究借助GeoDa软件平台选取具有公共边界或公共顶点的Queen型邻接准则构建空间权重矩阵[26],利用全局莫兰指数(global Moran's I)和局部莫兰指数(local Moran's I)以表征研究区内脆弱性指数的空间关系。计算公式[27]为

$$\text{global Moran's } I=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}wi_j(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \tag{11}$$

$$\text{local Moran's } I=\frac{n(x_i-\bar{x})\sum_{i=1}^{n}w_{ij}(x_j-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}w_{ij}(x_j-\bar{x})^2} \quad (12)$$

式中：n为栅格数量；x_i，x_j分别为第i个格网和第j个格网的生态脆弱性指数；$\bar{x}$为生态脆弱性均值；w_{ij}为空间权重；global Moran's I的取值为[-1,1][15]。

（2）空间聚类分析。在局部Moran's I指数的基础上，通过空间聚类处理生成空间LISA聚类图；并在95%的置信区间条件下，将研究区域的生态脆弱性划分为不同内涵的聚集类型（表5）。

表5 不同的LISA聚集模式的内涵

Table 5 Interpretation of different LISA clustering patterns

集聚类型	含义
不显著	空间集聚特征不显著
高-高聚集	区域生态脆弱性和周边区域都较高
高-低聚集	区域生态脆弱性较高，但周边区域较低
低-高聚集	区域生态脆弱性较低，但周边区域较高
低-低聚集	区域生态脆弱性和周边水平都较低

（3）Moran散点图。是以散点图形式呈现某一区域与其邻近区域之间的空间关系，多用于研究局域空间的不稳定性。Moran散点图的4个象限具体含义如下：第1象限指“高值区域被高值区域包围（热点区）”；第2象限指“低值区域被高值区域包围”；第3象限指“低值区域被低值区域包围（冷点区）”；第4象限（H-L）指“高值区域被低值区域包围”。

2.2.6 变异系数分析

变异系数作为衡量序列观测值离散程度的常用统计量，目前已在地理数据空间差异研究领域得到广泛应用[28]。本研究采用变异系数对水源区泾源县各年份的生态脆弱性空间差异程度进行测度，变异系数值越小，代表该区域内生态脆弱性的空间格局分布越均衡。计算公式为

$$C_v=\frac{1}{\bar{V}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}(V_i-\bar{V})}{m-1}} \quad (13)$$

式中：C_v变异系数；$\bar{V}$为研究区各格网生态脆弱性指数的平均值；V_i为栅格单元的生态脆弱性指数；m为栅格单元数[15]。

3 结果与分析

3.1 水源区生态脆弱性空间变化特征分析

水源区泾源县2011—2023年生态脆弱性评价结果见图1及表6。由评价结果可知研究区生态脆弱性整体呈现出“东西部低，中北部高”的空间分布格局，生态脆弱性指数有所降低。研究区的生态脆弱性整体以轻度和中度脆弱为主，其中有42.09%的区域生态脆弱性等级下降，有9.23%区域生态脆弱性等级上升，有48.68%区域生态脆弱性等级保持不变；等级下降区域主要分布在植被覆盖度高的林地和草地区域，等级上升区域主要分布在人类活动密集的耕地和建设用地区域。整体上呈现低等级脆弱面积增加，高等级脆弱面积减少，生态脆弱性逐步得到改善的趋势。

表6 泾源县生态环境脆弱性整体特征变化

Table 6 Changes in overall ecological vulnerability characteristics in Jingyuan County

时期	年份						
	2011	2011—2015	2015	2015—2019	2019	2019—2023	2023
生态脆弱性等级指数	0.441	0.068	0.509	−0.033	0.476	−0.097	0.379
变异系数	0.278	−0.001	0.277	0.092	0.369	0.022	0.391

3.2 水源区生态脆弱性时间变化特征分析

研究区2011，2015，2019和2023年生态脆弱性指数分别为0.441，0.509，0.476和0.379，呈逐渐降低的趋势，但整体上仍处于中度脆弱。为更加直观地反映研究区生态脆弱性各等级的时间变化特征，运用ArcGIS软件叠加分析和分区统计功能，对各年生态脆弱性结果进行处理，统计2011—2023年各脆弱性等级区域面积和面积比例（表7）及脆弱性等级面积转移变化情况（图2）。

由研究结果可知，2011—2015年水源区泾源县微度脆弱和轻度脆弱区面积比例基本保持不变；中度脆弱区面积比例由54.33%下降至35.37%，面积由606.623 km^{2}下降至394.977 km^2；重度和极度脆弱区面积比例均有所增加，分别由10.54%和0.16%增至27.77%和1.69%，面积分别由117.622 km^2，1.756 km^{2}增至310.126 km^2，18.876 km^2；中度脆弱区面积比例降幅最大，重度脆弱区面积比例增幅最大。这表明2011—2015年生态环境呈现恶化趋势，生态脆弱性指数上升，部分区域脆弱性等级有所提高，原中度和重度脆弱区域环境进一步恶化，并向周边区域扩散。2015—2019年微度脆弱和轻度脆弱面积比例变化不大，生态系统脆弱性格局较为稳定，重度和极度脆弱面积比例略有减少；中度脆弱面积有所增加，面积比例由35.37%增至49.83%，面积由394.977 km^{2}增至

556.491 km²。表明此时期生态环境呈现恢复趋势,生态脆弱性指数略有降低,生态环境质量逐步改善。2019—2023年水源区泾源县微度和轻度脆弱区面积比例明显增加,由1.99%和19.81%分别增至13.27%和41.50%,面积由22.194 km²,221.171 km²分别增至148.209 km²,463.41 km²;中度和重度脆弱区面积比例均有所降低,由49.83%和27.57%分别减少至38.00%和6.84%,面积由556.491 km²,307.875 km²分别减少至424.273 km²,76.386 km²。这表明此时期研究区的生态系统稳定向好,生态脆弱性指数降低,生态环境脆弱性状况明显改善。2011—2023年,水源区泾源县的生态脆弱性呈波动下降趋势,生态环境逐渐改善。这表明在研究期间,泾源县为响应国家提出"山水林田湖草沙生态保护修复"环境治理政策,实施相关生态保护措施;加之泾源县的水源涵养功能和生态系统自我恢复功能的有效发挥,区域生态系统压力得到有效缓解,生态环境状况逐步好转。

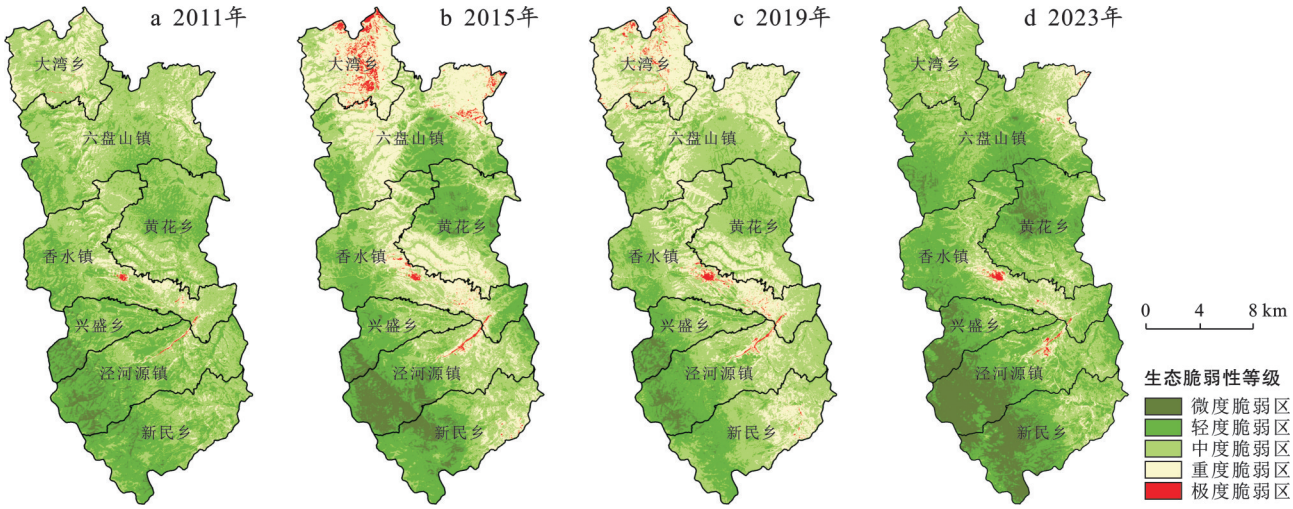


图1　泾源县生态脆弱性评价结果

Fig.1　Ecological vulnerability evaluation results of Jingyuan County

表7　泾源县各年份不同等级生态脆弱性面积

Table 7　Area of ecological vulnerability by grade in Jingyuan County for different years

脆弱性等级	2011年		2015年		2019年		2023年	
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%
微度脆弱	29.297	2.61	69.755	6.25	22.194	1.99	148.209	13.29
轻度脆弱	361.355	32.36	322.959	28.92	221.171	19.81	463.41	41.55
中度脆弱	606.623	54.33	394.977	35.37	556.491	49.82	424.273	38.04
重度脆弱	117.662	10.54	310.126	27.77	307.875	27.56	76.386	6.85
极度脆弱	1.756	0.16	18.876	1.69	8.962	0.80	3.415	0.39
总面积	1 116.693	100.00	1 116.693	100.00	1 116.693	100.00	1 116.693	100.00

3.3　水源区生态脆弱性空间集聚特征分析

利用ArcGIS和Geoda空间数据分析软件,对研究区2011—2023年4个时期的生态脆弱性进行Moran's *I*空间自相关(图3)与LISA空间聚类(图4)分析。由研究结果可知,水源区泾源县2011—2023年生态脆弱性全局Moran's *I*分别为0.578,0.766,0.645和0.689,数值均大于0,表明存在明显的空间正相关性;在95%的置信度下,代表具有空间显著性特征的*Z*值分别为40.42,52.22,43.05和44.56,均大于1.65,*p*值均小于0.05,因此符合显著性检验标准,表明水源区泾源县的生态脆弱性具有明显的空间聚类特征,且该空间集聚特征在研究周期内表现出较强的时序稳定性。通过2011—2023年研究区生态脆弱性Moran's *I*指数和空间LISA聚类分析进一步揭示其空间分布规律,水源区泾源县生态脆弱性的空间聚集类型主要是以低低聚集、高高聚集为主。其中低低聚集区主要分布在研究区的东西部地区,由分散转为聚集,与脆弱性等级较低区域的空间分布相重合,这类区域生态环境较为原始,人类活动干扰较少,生态系统保持相对稳定;高高聚集区主要分布在研究区的中部和北部地区,与脆弱性等级较高区域的空间分布相重合,脆弱性越高聚集性越强,这类区

域人类活动频繁、开发建设强度较大，脆弱区域容易对周围产生辐射影响。水源区泾源县2011—2023年生态脆弱性空间自相关与空间聚类分析结果与生态脆弱性时空变化特征具有高度相似性，揭示了自然条件与适度人类活动的协同作用。

结果表明，生态脆弱性的演变不仅受自然本底约束，更与区域发展模式存在显著的空间耦合关系。通过更具体的脆弱性高低值区域分化，进行更精确的功能区域划分，有助于水源区因地制宜地进行生态保护与治理，实现经济发展和生态保护的有效联动。

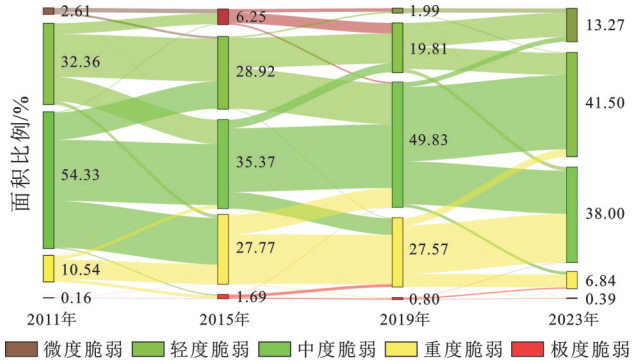


图2 泾源县2011—2023年生态脆弱性等级转移变化

Fig.2 Changes in ecological vulnerability grades in Jingyuan County from 2011 to 2023

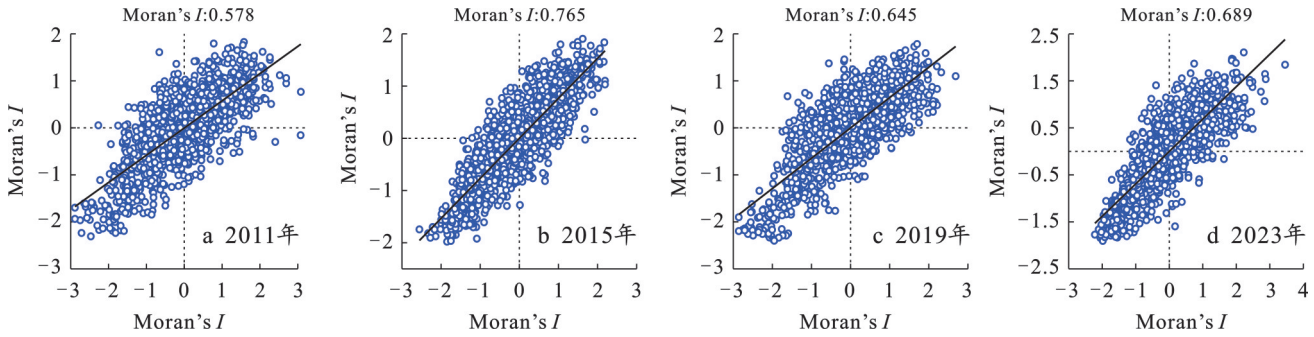


图3 泾源县生态脆弱性指数Moran散点图

Fig.3 Moran scatter plot of ecological vulnerability index in Jingyuan County

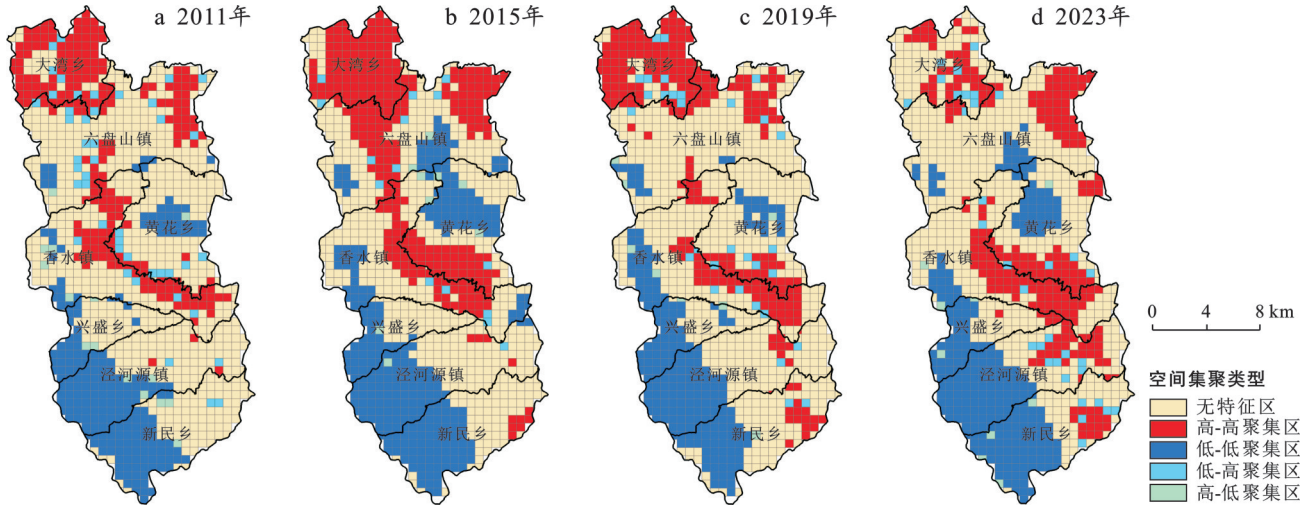


图4 泾源县生态环境脆弱性LISA聚类分析

Fig.4 LISA cluster map of ecological vulnerability in Jingyuan County

3.4 水源区乡镇尺度生态脆弱性特征

为进一步研究2011—2023年水源区泾源县生态脆弱性强度在各乡镇之间的的变化特征，利用ArcGIS软件将研究区的乡镇级行政区划矢量数据与生态脆弱性指数分布数据进行叠置分析，得到生态脆弱性指数在各乡镇的分布情况（图5）和不同脆弱等级区域面积比例变化情况（图6）。

研究结果表明，在研究期间，大湾乡的生态脆弱性指数始终最高，重度脆弱区域面积比例由33.5%降至11.6%，轻度脆弱区面积比例由3.0%增至17.4%，脆弱性状况虽有所改善，但高等级脆弱区比例较大，主要为中度和重度脆弱区。香水镇轻度和中度脆弱面积比例之和为85.1%，79.1%，69.1%，87.4%；六盘山镇轻度和中度脆弱面积比例之和分别为87.7%，58.4%，66.1%，86.5%；黄花乡轻度和中度脆弱面积比例之和分别为92.1%，70.7%，80.0%，

86.2%。3个乡镇轻度和中度脆弱性面积比例之和均大于50%,且生态脆弱性指数处于中值区,主要为轻度和中度脆弱区;脆弱性指数虽都不是很高,但波动范围较大,说明香水镇、六盘山镇和黄花乡的脆弱性较为不稳定,受到人为因素和自然因素的影响,会发生脆弱性等级转变,生态环境抗干扰能力弱。兴盛乡、新民乡和泾河源镇处于生态脆弱性低值区,主要为微度和轻度脆弱区,脆弱性指数较低,波动范围较小,生态环境稳定性高,受人类活动和自然因素影响较小。综合分析水源区泾源县各乡镇生态脆弱性的变化情况,2011—2023年水源区各乡镇的生态脆弱性从以轻度脆弱为主向轻度和微度脆弱转变。大湾乡的生态脆弱性指数始终最高,脆弱性等级属于中度和重度脆弱;香水镇、六盘山镇和黄花乡的生态脆弱性指数相对较低,属于中度脆弱;兴盛乡、新民乡和泾河源镇生的生态脆弱性指数最低,属于轻度脆弱。

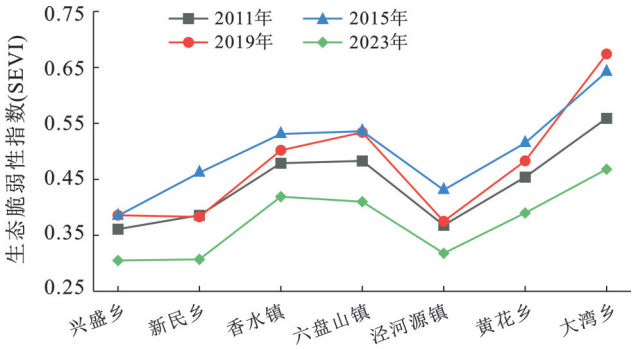


图5　泾源县各乡镇生态环境脆弱性指数变化

Fig.5　Changes in ecological vulnerability index for each township in Jingyuan County

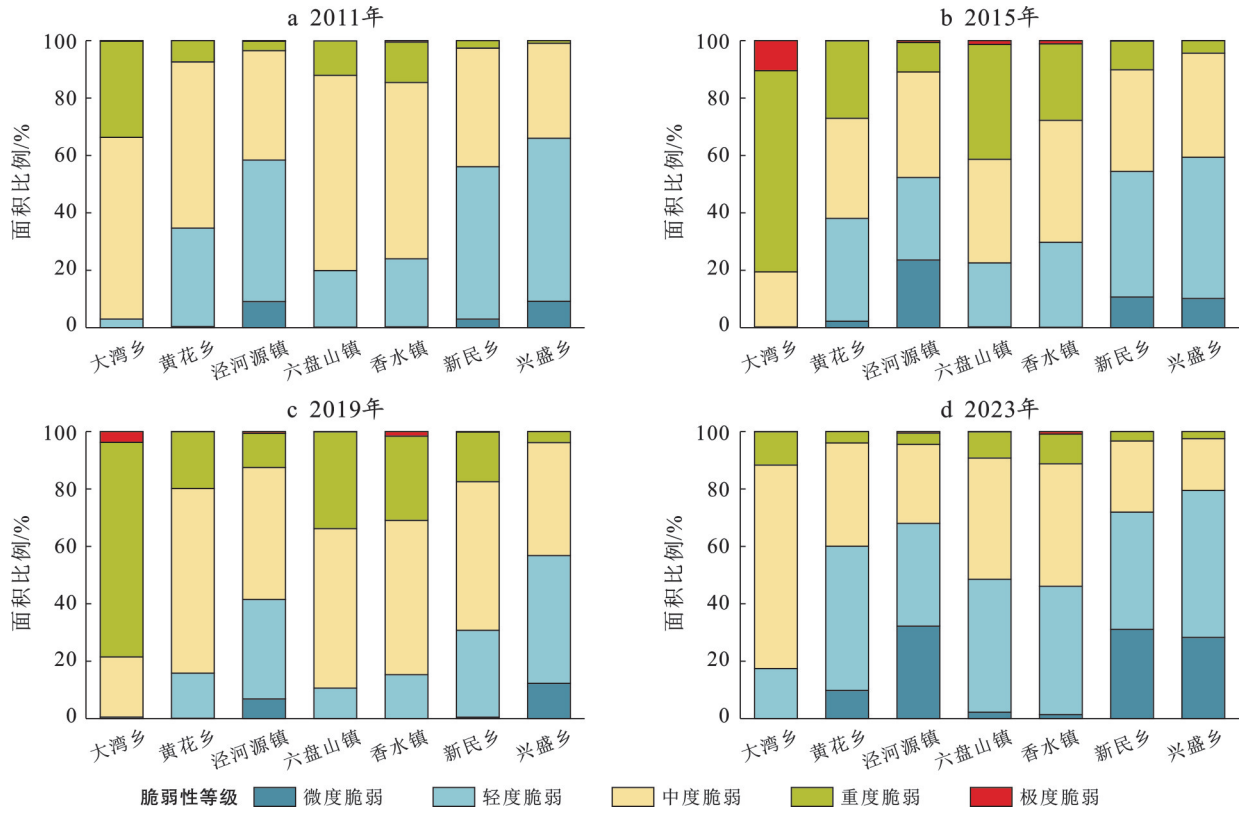


图6　泾源县各乡镇脆弱性等级比例

Fig.6　Proportion of vulnerability classes of each township in Jingyuan County

4　讨　论

从空间上看,水源区泾源县生态脆弱性呈现东部和西部区域生态脆弱性相对较低,北部和中部区域生态脆弱性相对较高的格局,这与LISA空间聚类分布格局高度相似。低低聚集区位于以林地和草地为主的东西部区域,生物多样性丰富、植被覆盖度高、水文条件良好,加之海拔较高,人类活动强度弱,对生态环境的影响小,生态环境质量较高,是重要的生态屏障区[29];高高聚集区位于以耕地、交通建设用地及游客聚集地等为主的中部和北部区域,开发强度大,人类活动密集,植被覆盖度低,侵蚀强度高,水土流失严重,生态系统较不稳定是主要的经济建设区。全局莫兰指数高位稳定(0.578~0.766)揭示了生态脆弱性空间依赖性的本质特征;高高聚集区与低低聚集区的扩张与收缩反映了生态治理和经济发展

的博弈过程。这种空间异质规律表明,水源区生态脆弱性治理需构建以自然和人为因素的综合作用效应的核心保护区、修复治理区和稳定优化区的生态空间调控体系,实施差异化的生态保护与治理措施:东西部应强化生态优势区保护,避免人类干扰活动引发生态脆弱性,中部需聚焦水土保持与水源涵养等一系列重点生态功能建设,推动生态环境质量持续改善,实现生态保护和经济发展的有效平衡。

从时间上看,水源区泾源县2011—2023年整体处于轻度和中度脆弱,且随着时间的推移,生态脆弱性指数呈现波动下降趋势,生态环境质量得到初步改善。2011—2015年脆弱性略有加剧与水源区调水工程的开工建设、管道铺设及资源开发导致的地表生态破坏有关。2015—2023年生态环境持续改善,这一转变的主要原因一方面是泾源县的生态系统本底条件较好,能够有效发挥水源涵养功能和生态系统自我恢复功能;另一方面泾源县为发挥水源区的生态服务功能,保障优质水源,响应国家"绿水青山就是金山银山"的新发展理念,加大生态保护力度,支付水源地污染治理、水土流失治理的大量直接成本和社会经济发展机会成本;大力开展退耕还林还草、六盘山水源地涵养林建设等一系列生态保护措施,并推动生态补偿机制和产业绿色转型升级,满足生态文明建设的需求。研究区生态脆弱性时间尺度的阶段性演变趋势与其生态政策的实施周期高度耦合,表明水源区泾源县生态系统性治理措施的有效性和科学性,也凸显了对生态环境进行实时监测,动态治理的重要性。

本研究以更精细化的乡镇尺度进行量化分析,为研究区脆弱性科学认识、科学评价和精准预防及治理提供科学支撑,既明确了生态保护与修复的目标方向,也为人地耦合系统的脆弱性研究提供了新的视角。未来的生态脆弱性相关领域将越来越注重以乡镇、社区和公园等为研究单元的小尺度、精细化研究[30-31]。然而,生态脆弱性评价目前并未形成统一的评价标准,评价结果是相对的,评价结果受指标选取和评价方法等多种因素的影响,针对水源区指标参数的选取方法仍是深入研究的方向。本研究采用主客观结合的层次分析-熵权法进行权重赋值计算,相较于苏荟琰等[29]的单一方法更具科学性和客观性;从指标权重结果来看,土地利用类型、植被覆盖度、土壤侵蚀强度以及生境质量指数对区域生态脆弱性的影响程度较大,其中土地利用类型与其他评价指标存在一定的相关关系,对研究区生态脆弱性评价至关重要,这与已有学者相关研究的部分研究结论一致[32-33]。这也揭示了土地利用类型和其他多个因素共同作用对生态环境脆弱性的影响,因此未来的研究中将会加大生态环境脆弱性驱动机制和影响因子方面的研究。

5 结 论

(1)水源区泾源县东部和西部区域以林地和草地为主的,生态脆弱性相对较低,生态本底条件较好,生态系统较为稳定,应作为生态屏障区加以保护和预防。北部和中部地区植被覆盖度低,水土流失严重,是人类活动频发区域,生态脆弱性较高,应作为重点修复区推进生态质量持续改善。

(2)2011—2023年研究区生态脆弱性以轻度和中度脆弱为主,随着时间的推移,生态脆弱性指数呈波动下降趋势,生态功能逐渐恢复。验证了研究时段内生态环境保护政策和动态治理措施的有效性。

(3)水源区泾源县生态脆弱性具有显著空间正相关性和空间聚集性,空间异质性较强。空间集聚特征与脆弱性空间格局的相似度较高,可因地制宜实施生态治理和保护措施,实现生态环境可持续发展。

(4)2011—2023年研究区各乡镇生态脆弱性都有所降低。大湾乡的脆弱等级一直最高,环境质量较差,应重点关注,防止向周围侵蚀。香水镇、六盘山镇和黄花乡的生态环境改善效果较为明显,应持续修复。兴盛乡、泾河源镇和新民乡脆弱性一直处于较低水平,自然环境本身较好,生态系统较为稳定,应加以预防和保护。

参考文献(References)

[1] Hammond M, Chen A S, Batica J, et al. A new flood risk assessment framework for evaluating the effectiveness of policies to improve urban flood resilience [J]. Urban Water Journal, 2018,15(5):427-436.

[2] Schlaepfer D R, Bradford J B, Lauenroth W K, et al.Climate change reduces extent of temperate drylands and intensifies drought in deep soils [J]. Nature Communications, 2017,8:14196.

[3] Füssel H M, Klein R J T. Climate change vulnerability assessments: An evolution of conceptual thinking [J]. Climatic Change, 2006,75(3):301-329.

[4] 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 Beibei, Ding Mingjun, Guan Qihui, et al. Gridded assessment of eco-environmental vulnerability in Nanchang City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5460-5472.

[5] 陈臻琦,张靖,张贻龙,等.基于VSD的近20年来浑善达克沙地生态脆弱性变化研究[J].干旱区研究,2021,38(5):1464-1473.
Chen Zhenqi, Zhang Jing, Zhang Yilong, et al. Spatio-temporal patterns variation of ecological vulnerability in Otindag sandy land based on a vulnerability scoping diagram [J]. Arid Zone Research, 2021,38(5):1464-1473.

[6] 夏热帕提·阿不来提,刘高焕,刘庆生,等.基于遥感与GIS技术的黄河宁蒙河段洪泛湿地生态环境脆弱性定量评价[J].遥感技术与应用,2019,34(4):874-885.
Xarapat Ablat, Liu Gaohuan, Liu Qingsheng, et al. Assessment of ecological vulnerability of the riverine wetlands in the upstream reach of the Yellow River based on RS and GIS technology [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019,34(4):874-885.

[7] 薛联青,王晶,魏光辉.基于PSR模型的塔里木河流域生态脆弱性评价[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):13-19.
Xue Lianqing, Wang Jing, Wei Guanghui. Dynamic evaluation of the ecological vulnerability based on PSR modeling for the Tarim River basin in Xinjiang [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(1): 13-19.

[8] 陈宗敏,周冬梅,张军,等.渭河流域甘肃段生态脆弱性时空演变分析[J].热带农业工程,2024,48(1):148-156.
Chen Zongmin, Zhou Dongmei, Zhang Jun, et al. Spatial-temporal evolution of ecological vulnerability in the Gansu section of the Weihe River basin [J]. Tropical Agricultural Engineering, 2024,48(1):148-156.

[9] 周梦云,蔡永立,张瑞峰,等.宁夏贺兰山国家级自然保护区建立前后区域生态脆弱性时空格局变化研究[J].生态科学,2019,38(5):78-85.
Zhou Mengyun, Cai Yongli, Zhang Ruifeng, et al. The tempo-spatial pattern of regional ecological vulnerability before and after the establishment of National Nature Reserve in Helan Mountain of Ningxia [J]. Ecological Science, 2019,38(5):78-85.

[10] 王兆林,张露洋,钟澈懿,等.三峡库区生态空间脆弱性时空演变特征[J].水土保持研究,2023,30(1):348-355.
Wang Zhaolin, Zhang Luyang, Zhong Weiyi, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of ecological space vulnerability in Three Gorges reservoir area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(1):348-355.

[11] Yu Xue, Li Yue, Xi Min, et al. Ecological vulnerability analysis of Beidagang National Park, China [J]. Frontiers of Earth Science, 2019,13(2):385-397.

[12] Hou Huping, Ding Zhongyi, Zhang Shaoliang, et al. Spatial estimate of ecological and environmental damage in an underground coal mining area on the Loess Plateau: Implications for planning restoration interventions [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,287:125061.

[13] Raj A, Sharma L K. Spatial E-PSR modelling for ecological sensitivity assessment for arid rangeland resilience and management [J]. Ecological Modelling, 2023,478:110283.

[14] 张金茜,李红瑛,曹二佳,等.多尺度流域生态脆弱性评价及其空间关联性:以甘肃白龙江流域为例[J].应用生态学报,2018,29(9):2897-2906.
Zhang Jinxi, Li Hongying, Cao Erjia, et al. Assessment of ecological vulnerability in multi-scale and its spatial correlation: A case study of Bailongjiang watershed in Gansu Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(9):2897-2906.

[15] 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 Yihua, Cai Haisheng. 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.

[16] 赵文艳,李飞,张扬.基于SRP模型的地质灾害易发区生态脆弱性评价[J].西北师范大学学报(自然科学版),2024,60(3):74-83,104.
Zhao Wenyan, Li Fei, Zhang Yang. Ecological vulnerability assessment of geological disaster prone area based on SRP model [J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2024,60(3):74-83,104.

[17] 霍童,张序,周云,等.基于暴露-敏感-适应性模型的生态脆弱性时空变化评价及相关分析:以中国大运河苏州段为例[J].生态学报,2022,42(6):2281-2293.
Huo Tong, Zhang Xu, Zhou Yun, et al. Evaluation and correlation analysis of spatio-temporal changes of ecological vulnerability based on VSD model: A case in Suzhou section, Grand Canal of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(6):2281-2293.

[18] 苏悦,刘洪,杨武年,等.高原山地区域生态脆弱性研究:以四川省康定市为例[J].自然资源遥感,2024,36(3):206-215.
Su Yue, Liu Hong, Yang Wunian, et al. Ecological vulnerability of highland mountain areas: A case study of Kangding City, Sichuan Province [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024,36(3):206-215.

[19] 党二莎,胡文佳,陈甘霖,等.基于VSD模型的东山县海岸带区域生态脆弱性评价[J].海洋环境科学,2017,36(2):296-302.
Dang Ersha, Hu Wenjia, Chen Ganlin, et al.Ecological vulnerability assessment of coastal zone in Dongshan County based on VSD model [J]. Marine Environmen-

tal Science, 2017,36(2):296-302.

[20] 王跃,刘家福,周林鹏,等.基于AHP-SPCA熵权模型的松花江流域生态脆弱性时空演变及预测[J].水土保持通报,2023,43(2):212-219.
Wang Yue, Liu Jiafu, Zhou Linpeng, et al. Temporal and spatial evolution and prediction of ecological vulnerability in Songhua River basin based on AHP-SPCA entropy weight model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(2):212-219.

[21] 林墨飞,关雅文,连艺霏.基于SRP模型的塔里木胡杨林公园生态脆弱性研究[J].干旱区地理,2025,48(11):2019-2030.
Lin Mofei, Guan Yawen, Lian Yifei. Ecological vulnerability assessment of Tarim *Populus euphratica* Forest Park based on SRP model [J]. Arid Land Geography, 2025,48(11):2019-2030.

[22] 余坤勇,刘健,黄维友,等.基于GIS技术的闽江流域生态脆弱性分析[J].江西农业大学学报,2009,31(3):568-573.
Yu Kunyong, Liu Jian, Huang Weiyou, et al. A study on the ecological fragility in Minjiang watershed based on GIS technology [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2009,31(3):568-573.

[23] Hou Kang, Li Xuxiang, Zhang Jing. GIS analysis of changes in ecological vulnerability using a SPCA model in the Loess Plateau of northern Shaanxi, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015,12(4):4292-4305.

[24] 徐涵秋.水土流失区生态变化的遥感评估[J].农业工程学报,2013,29(7):91-97.
Xu Hanqiu. Assessment of ecological change in soil loss area using remote sensing technology [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29(7):91-97.

[25] Li Ainong, Wang Angsheng, Liang Shunlin, et al. Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS: A case study in the upper reaches of Minjiang River, China [J]. Ecological Modelling, 2006,192(1-2):175-187.

[26] 徐至真.基于SRP模型的柴达木盆地生态脆弱性时空分异及模拟预测研究[D].青海 西宁:中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所),2023.
Xu Zhizhen. Spatial and temporal differentiation and simulation prediction of ecological vulnerability in the Qaidam basin based on SRP model [D]. Xining, Qinghai: Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, 2023.

[27] Koenig W D. Spatial autocorrelation of ecological phenomena [J]. Trends in Ecology & Evolution, 1999,14(1):22-26.

[28] 鲁大铭,石育中,李文龙,等.西北地区县域脆弱性时空格局演变[J].地理科学进展,2017,36(4):404-415.
Lu Daming, Shi Yuzhong, Li Wenlong, et al. Spatio-temporal change of vulnerability in counties of northwest China [J]. Progress in Geography, 2017, 36(4): 404-415.

[29] 苏荟琰,李金燕,魏怡敏,等.泾源县土壤侵蚀时空变化及其影响因素分析[J].绿色科技,2023,25(10):17-23.
Su Huiyan, Li Jinyan, Wei Yimin, et al. Spatial-temporal changes of soil erosion and its influencing factors in Jingyuan County [J]. Journal of Green Science and Technology, 2023,25(10):17-23.

[30] 郜苏日嘎拉,杜雨春子,佘榕,等.黄河流域中上游生态脆弱性时空演变特征及驱动因素分析[J/OL].[2025-10-02].环境科学,1-20.https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202505220.
Tai Surigala, Du Yuchunzi, She Rong, et al. Spatial-temporal evolution characteristics and driving factors of ecological vulnerability in the middle and upper reaches of the Yellow River basin [J/OL]. [2025-10-02]. Environmental Science, 1-20. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202505220.

[31] 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 Chunzhe, Yu Huan, Xiang Qing, et al. Spatio-temporal differentiation and its driving mechanism of ecological vulnerability in Sichuan Province [J]. Environmental Science, 2024,45(12):6922-6934.

[32] 岳文泽,侯丽,夏皓轩,等.基于生态系统服务供需平衡的宁夏固原生态修复分区与优化策略[J].应用生态学报,2022,33(1):149-158.
Yue Wenze, Hou Li, Xia Haoxuan, et al. Territorially ecological restoration zoning and optimization strategy in Guyuan City of Ningxia, China: Based on the balance of ecosystem service supply and demand [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(1):149-158.

[33] 杨美玲,李同昇,米文宝,等.宁夏限制开发区生态脆弱性评价及分类发展模式[J].水土保持通报,2014,34(4):236-242.
Yang Meiling, Li Tongsheng, Mi Wenbao, et al. Ecological fragile assessment and regional development model in restricted development area of Ningxia Hui Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014,34(4):236-242.