

基于SRP模型的黄河流域甘肃段生态脆弱性评价

李晓丹¹, 杨骏轶², 王全喜¹, 张昕怡¹

(1. 甘肃农业大学管理学院, 兰州 730070; 2. 武汉理工大学安全科学与应急管理学院, 武汉 430070)

摘要: [目的] 评估黄河流域甘肃段生态脆弱性时空演变特征, 分析其生态敏感性、恢复力与压力度的动态变化, 为区域生态保护与修复提供科学依据。[方法] 聚焦黄河流域甘肃段, 采用SRP模型构建生态评价指标体系, 运用熵值法来确定各项指标的权重, 对该研究区域的生态脆弱性进行综合评价。[结果] 1) 2000年、2010年、2020年黄河流域甘肃段的生态脆弱性均呈现“南高北低”的格局, 从面积上来看, 以中度脆弱为主, 在3期数据中分别占总面积的32.03%、45.33%、55.97%。2) 通过分析研究区生态脆弱性转移矩阵可知, 随着时间的推移, 黄河流域甘肃段中度脆弱区域面积上升23.94%, 而微度脆弱与轻度脆弱分别减少19.44%和4.30%, 总体生态脆弱性呈缓慢上升趋势。3) 通过对研究区各州市的生态脆弱性分析可知, 白银市的生态脆弱性较低, 甘南藏族自治州的生态脆弱性较高, 其中, 白银市、庆阳市生态脆弱性从微度脆弱转为轻度脆弱, 平凉市从轻度脆弱转为中度脆弱。[结论] 黄河流域甘肃段生态脆弱性以中度脆弱为主, 但局部区域有所改善, 需加强水土流失治理与植被恢复, 推进差异化生态修复策略, 以提升区域生态系统稳定性与可持续性。

关键词: 生态脆弱性; SRP模型; 熵值法; 黄河流域甘肃段

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)03-0266-12

Ecological Vulnerability Assessment of Gansu Section of the Yellow River Basin Based on SRP Model

LI Xiaodan¹, YANG Junyi², WANG Quanxi¹, ZHANG Xinyi¹

(1. School of Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. School of Safety Science and Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: [Objective] This study aims to evaluate the spatiotemporal evolution of ecological vulnerability in the Gansu section of the Yellow River basin, and to analyze the dynamic changes in ecological sensitivity, resilience, and pressure, so as to provide a scientific basis for regional ecological protection and restoration. [Methods] This study focuses on the Gansu section of the Yellow River basin and employs the SRP model to construct an ecological evaluation index system. The Entropy Evaluation Method is used to determine the weight of each indicator, and a comprehensive evaluation of the ecological vulnerability of the study area is conducted. [Results] 1) In 2000, 2010, and 2020, the ecological vulnerability of the Gansu section of the Yellow River basin showed a pattern of "high in the south and low in the north", and the area was mainly moderately vulnerable, accounting for 32.03%, 45.33%, and 55.97% of the total area in the three periods. 2) Over time, by analyzing the ecological vulnerability transfer matrix in the study area, it can be seen that, the area of moderately vulnerable areas in the Gansu section of the Yellow River basin increased by 23.94%, while the slightly vulnerable and mild vulnerable areas decreased by 19.44% and 4.3%, respectively. 3) Through the analysis of the ecological vulnerability of cities and prefectures in the study area, it can be seen that the ecological vulnerability of Baiyin area is low, and the ecological

收稿日期: 2026-01-31

修回日期: 2026-03-24

录用日期: 2026-03-30

网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-05-06

资助项目: 2024年甘肃省高校教师创新基金项目(2024B-071); 甘肃省自然科学基金项目(24JRRA641); 甘肃省科技计划项目(24YFFA050)

第一作者: 李晓丹(1983—), 女, 博士, 讲师, 主要从事土地生态评价与水土保持防治研究。E-mail: lixd@gsau.edu.cn

通信作者: 李晓丹(1983—), 女, 博士, 讲师, 主要从事土地生态评价与水土保持防治研究。E-mail: lixd@gsau.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

vulnerability of Gannan area is high, among which the ecological vulnerability of Baiyin and Qingyang area has changed from slight vulnerability to mild vulnerability, and Pingliang area has changed from slight vulnerability to moderate vulnerability. [Conclusion] Ecological vulnerability in the Gansu section of the Yellow River basin is dominated by moderate vulnerability, with a continuously increasing proportion. Although certain local areas have improved, the region as a whole remains under pressure of ecological degradation, with pronounced spatial heterogeneity. Ecological vulnerability in the Gansu reach of the Yellow River basin is primarily of moderate intensity, albeit with localized areas exhibiting improvement. It is necessary to strengthen soil erosion control and vegetation restoration, and to implement differentiated ecological restoration strategies to enhance ecosystem stability and sustainability.

Keywords: ecological vulnerability; SRP model; entropy weight method; Gansu section of the Yellow River basin

Received: 2026-01-31

Revised: 2026-03-24

Accepted: 2026-03-30

Online(www.cnki.net): 2026-05-06

生态脆弱性是指生态系统在特定时空尺度下对外界干扰所表现出的敏感反应能力与自我恢复能力,是自然属性与人类活动共同作用的结果^[1]。工业革命以来,全球人口增长与资源消耗持续加剧,生态系统面临的压力日益严峻,生态脆弱区不断扩展,已成为区域可持续发展的突出瓶颈。中国将生态文明建设纳入国家发展总体布局,明确提出“绿水青山就是金山银山”的科学论断^[2],并实施一系列重大战略,致力于实现人与自然和谐共生的现代化。在此背景下,科学识别与评估生态系统脆弱性,成为实施生态保护修复、优化国土空间格局、推进绿色发展的重要前提。开展生态脆弱性评价,有助于揭示生态系统退化的内在机制与空间分异规律,为差异化、精细化的生态管理提供科学依据,对促进区域生态安全与可持续发展具有重要意义^[3]。

生态脆弱性研究旨在揭示生态系统对外部干扰的敏感性、恢复力及其整体稳定性,是协调生态保护与区域发展的重要科学依据。国外研究起步较早,理论体系较为成熟。20世纪80年代以来,随着IGBP(国际地圈-生物圈计划)和IPCC(政府间气候变化专门委员会)的成立,脆弱性评估逐渐从单一生态要素向“自然-社会”复合系统拓展^[4]。90年代后,“生态脆弱带”“人地耦合系统脆弱性”等概念逐步受到重视^[5]。早期研究集中于概念界定与理论构建,TIMMERMAN^[6]将脆弱性定义为系统遭受不利影响的程度,强调其对外部扰动的响应结果。进入21世纪,脆弱性理论被广泛应用于自然与社会系统的综合研究^[7]。IPCC^[8]进一步提出脆弱性评估应包含敏感性、暴露度、适应能力等多维要素,为量化评价提供了理论框架。MEJDOUBI等^[9]研究指出,生态脆弱性体现为生态系统的敏感性与不稳定性,并强调气候变化与人类活动的复合影响。方法上,遥感、GIS空间分析与统计模型得到广泛应用,结合社会-生态耦合

视角,系统揭示脆弱性的空间格局与驱动机制。

国内生态脆弱性研究虽起步较晚,但发展迅速,在评价模型构建与区域实证方面成果显著。赵珂等^[10]提出,生态脆弱性是生态系统受干扰后偏离原状且难以恢复的特性;李鹤等^[11]进一步指出,脆弱性与干扰、暴露、适应性、敏感性、恢复力等概念密切相关。近年来,随着“3S”技术与多源数据融合的发展,国内学者逐步发展了SRP(敏感性-恢复力-压力)、VSD(暴露度-敏感性-适应力)、PSR(压力-状态-响应)等多种评价模型。其中,SRP模型因能系统反映生态系统稳定性的内涵^[12],全面体现生态环境脆弱性的综合特质,在流域及区域尺度得到广泛应用。寸得欣等^[13]基于SRP框架评价云南落漏河流域生态脆弱性,识别出土地利用与土壤厚度为主要驱动因子;邵苏日嘎拉等^[14]借助SRP模型分析黄河流域中上游脆弱性时空演变发现,其呈“西北高、东南低”格局,且生态修复工程效果显著。该模型在汉江流域^[15]、金沙江流域^[16]等地的应用也表明,其能有效整合自然与人为因素,揭示脆弱性的空间异质性及演变机制。在黄河流域相关研究中,张艳等^[17]基于SRP模型评价黄河流域中段生态脆弱性发现,植被覆盖度、净初级生产力等人文与自然因子共同驱动脆弱性空间分异;陈宗敏等^[18]则采用VSD模型分析渭河流域甘肃段指出,脆弱性呈东南向西北递增趋势,且2005—2020年整体脆弱性逐步下降。这些研究为黄河流域甘肃段的生态脆弱性评价提供方法借鉴与区域对照。

黄河流域甘肃段作为黄河上游重要的水源涵养区,其生态系统对外界扰动表现出高度敏感性与脆弱性。然而,当前对该区域生态脆弱性的时空演变特征及其驱动机制的系统认识仍显不足,尤其是在多源数据支持下长时间序列的定量评价较为缺乏。因此,科学识别黄河流域甘肃段生态脆弱性的关键驱动因子,

揭示其时空演化规律,成为区域生态保护与修复亟待解决的核心科学问题。本研究以 SRP 模型为框架,构建适用于黄河流域甘肃段的生态脆弱性评价指标体系,结合多源遥感与社会经济数据,系统评估 2000—2020 年该区域生态脆弱性的时空演变特征,以期为区域差异化生态修复提供科学依据。研究旨在为区域差异化生态修复策略的制定提供科学依据,推动黄河流域生态保护和高质量发展战略的落地实施。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河流域甘肃段(33°30′~37°30′N, 102°30′~108°40′E)地处中温带(图 1),占流域总面积的 19%,是黄河上游重要的水源涵养区和生态保护区,涉及甘肃省境内的 2 个自治州、6 个市及武威南部,总面积约为 14.3 万 km²[19]。该区地势呈南高北低,地貌类型复杂,涵盖高原、山地、丘陵及河谷等多种形态。区内水系发育充分,黄河干流及其重要支流洮河、湟水、渭河、泾河、北洛河等均流经本区,形成较为密集的水网,水资源空间分布不均。气候属温带半湿润半干旱季风气候区,太阳辐射较强,气候干燥,昼夜温差大[20]。年平均降水量 110~800 mm,呈现由南向北递减的明显空间梯度。作为黄河上游重要水源补给区,植被覆盖、土壤保持与水文调节功能对维系全流域水安全具有决定性作用,兼具高生态价值与显著脆弱性。截至 2024 年底,区域内常住人口约为 1 937 万,城镇化率平均值为 53%。区域生产总值(GDP)总量达 9 622.84 亿元。然而,快速发展的同时,区域内生态系统保护压力增大,上下游资源分配不均,生态服务供需失衡等问题凸显。开展生态脆弱性评价、揭示人地系统耦合机制,不仅有助于优化区域资源配置,对推动黄河流域生态保护和高质量发展具有重要的科学与实践意义。

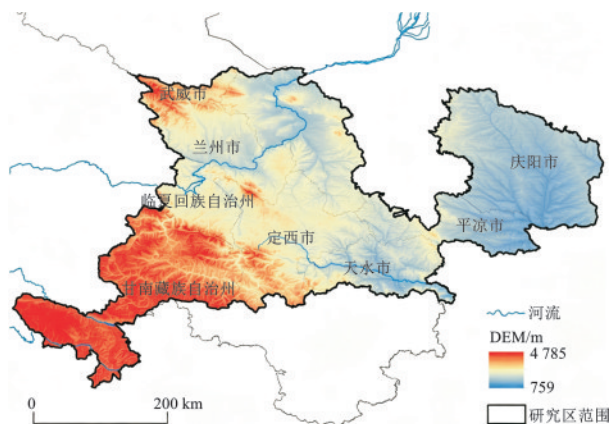


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the research area

1.2 数据来源

本研究基于 2000 年、2010 年和 2020 年 3 期多源数据进行分析,多源数据包括基础地理数据、气象数据、植被数据、土地利用数据和社会经济统计数据。所有数据均经过统一投影转换(Albers 等面积圆锥投影)、重采样至 30 m 分辨率,并裁剪至研究区范围。基于 SRP 模型框架,分别对生态敏感性、恢复力和压力度相关指标进行提取与栅格化处理,确保数据在空间和时间上的一致性。基础数据包括基础地理数据(DEM 数字高程模型等)、土地数据(土地利用数据、土壤类型等)、气象数据(年平均降水量、气温及相对湿度等)、植被数据(植被归一化指数、植被净初级生产力等)和人口经济统计数据(市域人口数量、人均 GDP 等)。数据分别通过地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)、USGS(美国地质勘探局)、武汉大学 CLCD 土地利用数据集(<https://zenodo.org/record/8176941>)、High-resolution gridded datasets(uea.ac.uk)和甘肃省统计局等平台获取。

2 材料与方法

本研究以黄河流域甘肃段为研究区域,选取白银、兰州、天水、庆阳、平凉、定西、甘南藏族自治州、临夏回族自治州及武威南部地区作为研究对象,对其生态脆弱性进行系统评估。基于 SRP 模型框架,从生态敏感性、生态恢复力与生态压力度 3 个维度构建指标体系,共遴选 15 项关键指标变量。采用熵值法确定各指标权重,进而对 2000 年、2010 年及 2020 年 3 个时间节点的生态脆弱性进行定量评价与分析。研究旨在客观揭示黄河流域甘肃段的生态环境状况及其过去 20 a 的动态演变趋势,以期为流域生态保护与可持续发展提供科学依据。

2.1 评价指标体系构建

本研究依据 SRP 模型,结合黄河流域甘肃段高海拔、地形复杂、水土流失严重等区域特征,黄河流域甘肃段生态胁迫多样性和高敏感度等生态环境特点,遵循指标选取的科学性、系统性和可行性原则,在生态系统的“压力-敏感性-恢复力”(SRP)框架下,考虑数据的易获取与可获取性[21],结合自然地理环境与地质灾害诱发机理,遵循科学性、综合性、独立性的原则[22]选取高程、坡度、坡向、地形起伏度、年平均气温、年平均降水量、年平均相对湿度、土壤侵蚀强度、水网密度、土地利用类型、景观多样性、NPP(植被净初级生产力)、NDVI(植物归一化指数)、人口密度、人均 GDP 等 15 项评价指标(表 1),构建出黄河流域甘肃段生态脆弱性的评价指标体系。运用熵值法确定权重,利用综合指数法将各指标标准化值与各指标权重的

乘积之和作为生态脆弱性评价指数对黄河流域甘肃段生态脆弱性进行评价。

表 1 生态脆弱性评价指标
Table 1 Ecological vulnerability assessment indicators

准则层	指标类别	具体指标	权重
生态 敏感性	地形因子	高程	0.120 7
		坡度	0.073 5
		坡向	0.060 4
		地形起伏度	0.097 4
	气象因子	年平均气温	0.012 2
		年平均降水量	0.038 4
		年平均相对湿度	0.037 5
	土地因子	土地利用类型	0.019 1
		景观多样性	0.075 7
		土壤侵蚀强度	0.126 2
生态 恢复力	植被因子	NPP(植被净初级生产力)	0.160 3
		NDVI(植被归一化指数)	0.070 2
生态 压力度	水文因子	水网密度	0.010 5
	社会因子	人均 GDP	0.048 7
		人口密度	0.049 2

2.2 研究方法

2.2.1 SRP 模型 “SRP 模型”作为一种综合评价模型,常用于对某一地区的生态脆弱性状况进行评价。在某个特定区域及时段内,系统内部具有不稳定的框架结构,对于外界干扰会表现出敏感性,同时会因缺乏应对能力而往不利于自身发展的方向演变,从而呈现出恢复力^[23]。SRP 模型通过生态敏感性、恢复力与压力度 3 个维度系统刻画生态系统对外部扰动的响应机制。敏感性反映生态系统对自然与人为干扰的响应程度,恢复力体现生态系统自我修复能力,压力度则表征人类活动对生态系统的扰动强度。三者共同构成生态脆弱性评估的核心框架。其指标的选取可根据区域的实际特征确定,其基本运行方法为:基于研究区实际环境特征,对 3 个准则层下的模型指标进行本地化,通过对不同指标进行权重赋值,对不同指标基于权重值进行空间叠加,得到区域生态脆弱性指数,并依据分类方法进行脆弱性分级^[24]。

2.2.2 熵值法 熵值法是一种基于信息熵理论的客观赋权方法,适用于多指标综合评价体系,用来判断某个指标的离散程度的数学方法。离散程度越大,该指标对综合评价的影响越大^[25]。为确保评价结果的准确性,必须保证指标权重合理恰当,但主观赋权法依赖于主观判断,缺乏客观性。通过信息熵原理确定权重,可以客观准确地分析评价单元^[26]。本文通过熵值法确定 SRP 模型选取的各项指标并进行标准化处理,建立生态脆弱性评价模型,计算各指标信

息熵值,确定黄河流域甘肃段的生态脆弱性指标的权重,最终得出各指标评价分值。

本研究采用熵值法确定 SRP 模型中各指标的权重,具体步骤为:

1)构建原始指标矩阵 设共有 m 个评价单元(栅格或行政区)、 n 个评价指标,构建原始数据矩阵。

$$X=\left\{X_{ij}\right\}_{m \times n} \quad\left(0 \leqslant i \leqslant m, 0 \leqslant j \leqslant n\right) \quad(1)$$

式中: X_{ij} 为第 i 个单元在第 j 个指标上的原始值。

2)数据标准化处理 由于所选 15 个指标性质不同,为消除因数据多源性导致的量纲与数量级不统一问题,本文利用极差标准化方法分别对正、负向指标进行无量纲处理^[27],标准化处理公式为:

$$X_{ij}^{*}=\frac{X_{ij}-X_j}{S_j} \quad(2)$$

式中: X_{ij}^{*} 为标准化后的指标值; X_j 为第 j 个指标的平均值; S_j 为第 j 个指标标准差。

3)坐标平移(非负化处理)

为避免后续计算中对数无定义,对标准化后的数据进行平移。

$$X_{ij}^{**}=A+X_{ij}^{*} \quad(3)$$

式中: X_{ij}^{**} 为平移后的标准值; A 为平移幅度,通常取较小正值。

4)计算指标比重,确定第 i 个单元在第 j 项指标上的比重为:

$$Y_{ij}=\frac{X_{ij}^{**}}{\sum_{i=1}^n X_{ij}^{**}} \quad(4)$$

5)计算信息熵值

第 j 个指标的信息熵 e_j 定义为:

$$e_j=-k \sum_{i=1}^n Y_{ij} \ln Y_{ij} \quad(5)$$

其中 $k=1 / \ln m$, 确保 $0 \leqslant e_j \leqslant 1$ 。

6)计算信息熵冗余度

$$d_j=1-e_j \quad(6)$$

冗余度 d_j 越大,说明该指标对评价结果的贡献越大。

7)确定指标权重,即计算出黄河流域甘肃段生态脆弱性评价体系中各指标的权重,结果见表 1,第 j 个指标的权重(W_j)为:

$$W_j=\frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad(7)$$

8)计算综合评价分值,第 i 个单元的综合评价值得(S_i)为:

$$S_i=\sum_{j=1}^n W_j X_{ij}^{**} \quad(8)$$

通过以上步骤,分别计算生态敏感性指数、生态恢复力指数和生态压力指数^[28],并依据3个目标层的计算数据得出黄河流域甘肃段生态脆弱性指数。

2.2.3 生态脆弱性转移矩阵模型 土地生态脆弱性等级转化矩阵可以直观地呈现出各个脆弱性等级在某一时期内变化的具体数量和比例关系,对于比较各个时期脆弱性等级之间的转移具有积极意义^[29]。本文基于 ArcGIS 10.8 平台,对栅格数据进行重分类后,采用栅格计算器模块计算 2000—2020 年黄河流域甘肃段各个生态脆弱性分区的面积变化,再利用 Excel 进行分析,其分析公式为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:S为生态脆弱性等级的面积;i、j分别为转移初期和末期的土地生态脆弱性等级;n为土地生态脆弱性等级数。

2.3 权重确定与检验

本研究采用熵值法对 SRP 模型中的各项指标进行客观赋权,以消除主观判断可能引入的偏差,提升评价结果的科学性与可重复性^[30]。熵值法以信息熵理论为依据,通过测算各指标数据的离散程度表征其信息含量,指标离散程度越高,信息熵越低,对综合评价结果的

贡献程度越高^[26]。该方法适用于多指标、多源数据的综合评价体系,已在生态脆弱性研究中得到广泛应用。权重的确定严格遵循熵值法的计算步骤,最终得到各指标的客观权重(表1)。为验证权重体系合理性,本研究开展权重分布一致性分析与敏感性检验,将计算所得权重与黄河流域同尺度生态脆弱性评价成果比对,结果显示地形因子、土壤侵蚀强度等核心指标权重排序契合度较高^[14,17],与区域生态本底特征相符;其次,通过对关键指标权重进行±10%的扰动,重新计算生态脆弱性指数,结果显示其空间格局与等级结构保持稳定,表明权重体系具有较好的鲁棒性^[31]。综上,本研究基于熵值法客观确定的权重符合信息熵原理,并通过交叉验证与敏感性测试,确保后续评价结果的可靠性。

2.4 生态脆弱性分级

为更直观地度量分类生态脆弱性指数(EVI),对计算结果EVI进行标准化处理^[32],计算公式为:

$$S = \frac{EVI - EVI_{\min}}{EVI_{\max} - EVI_{\min}} \quad (10)$$

式中:S为黄河流域甘肃段的生态脆弱性指数标准化值,其值为0~1;EVI_{max}为该地区生态脆弱性指数的最大值;EVI_{min}为该地区生态脆弱性指数的最小值。依据现有的生态脆弱性评价研究的分级指标,并依据黄河流域甘肃段的现状,因地制宜,将黄河流域甘肃段生态脆弱性划分为5个等级(表2)。

表 2 生态脆弱性分级标准
Table 2 Ecological vulnerability grading standards

脆弱等级	等级	归一化指数值	特征
微度脆弱	I	$S < 0.095\ 4$	通常是指生态系统受到较小程度的影响,可以在较短时间内自然恢复的状态这种情况下,生态系统的结构和功能受到轻微损害,但可以通过自我调节和外界适当干预来恢复稳定
轻度脆弱	II	$0.095\ 4 < S < 0.166\ 8$	生态轻度脆弱性是指生态系统处于相对较为敏感的状态,受到一定程度的自然和人为因素干扰,但仍然能保持相对稳定的生态功能
中度脆弱	III	$0.166\ 8 < S < 0.329\ 3$	生态中度脆弱性是指生态系统受到较大程度的自然或人为因素干扰,导致生态系统结构和功能受到明显损伤,恢复能力相对较弱
重度脆弱	IV	$0.329\ 3 < S < 0.630\ 6$	生态重度脆弱性是指生态系统受到极大程度的自然或人为因素干扰,导致生态系统结构严重破损、功能丧失,其恢复能力非常有限或者几乎丧失
极度脆弱	V	$S > 0.630\ 6$	生态极度脆弱性是指生态系统在受到非常强烈的自然或人为因素干扰后,出现严重甚至灾难性的生态退化,生态系统结构和功能几乎完全崩溃

3 结果与分析

3.1 生态敏感性、恢复力、压力度分析

3.1.1 生态敏感性分析 生态敏感性子系统基于地形因子、气象因子与土地因子遴选出的10个关键指标构建。由图2可知,黄河流域甘肃段生态敏感性空间分异显著,整体呈“东北低、西南高”的格局。高敏感区集中分布于甘南藏族自治州、临夏回族自治州、定西市及与兰州市交界地带,该区域普遍海拔较高、地形地貌

复杂,土地生态环境极为敏感;中敏感区主要位于研究区中南部,涵盖兰州市、天水市及平凉市西部地区;低敏感区则受纬度和气候条件影响,集中于研究区东部与北部,包括白银市、庆阳市及平凉市东部区域。

由图2可知,2000—2010年,研究区生态敏感性总体呈小幅上升态势;2010—2020年,则转为明显下降趋势。表明与前一阶段相比,2010—2020年研究区生态敏感性整体降低,区域生态状况呈现改善趋向。

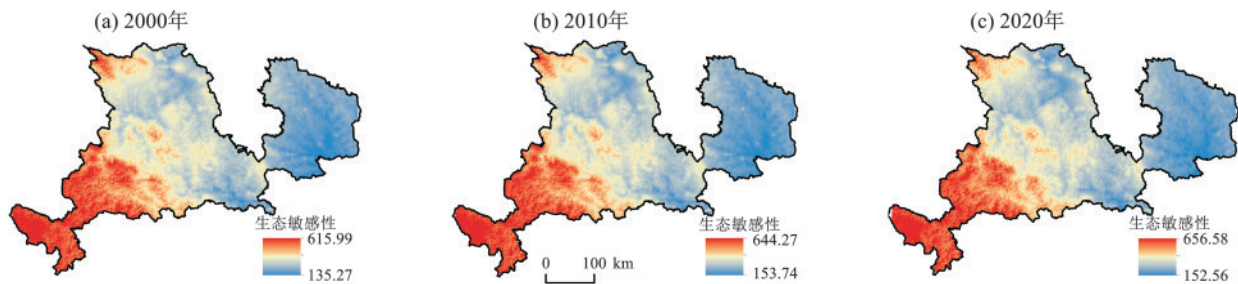


图 2 黄河流域甘肃段生态敏感性

Fig.2 Comparison of ecological sensitivity in the Gansu section of the Yellow River basin

3.1.2 生态恢复力分析 生态恢复力子系统基于植被净初级生产力(NPP)、归一化植被指数(NDVI)及水网密度 3 个关键指标构建。图 3 为研究区生态恢复力的空间分布特征。其中,水网密度基于 DEM 提取的河流网络计算,反映区域水文调节能力,是衡量生态系统恢复力的重要指标。2000—2020 年,研究

区生态恢复力整体呈波动上升趋势,黄河流域甘肃段生态恢复力较高的区域呈零星散布格局,主要集中于刘家峡水库周边、兰州地区及黄河、渭河与其主要支流沿岸地带。通过对比 2000 年、2010 年与 2020 年 3 期数据发现,2000—2010 年,研究区生态恢复力总体呈现持续缓慢上升的趋势。

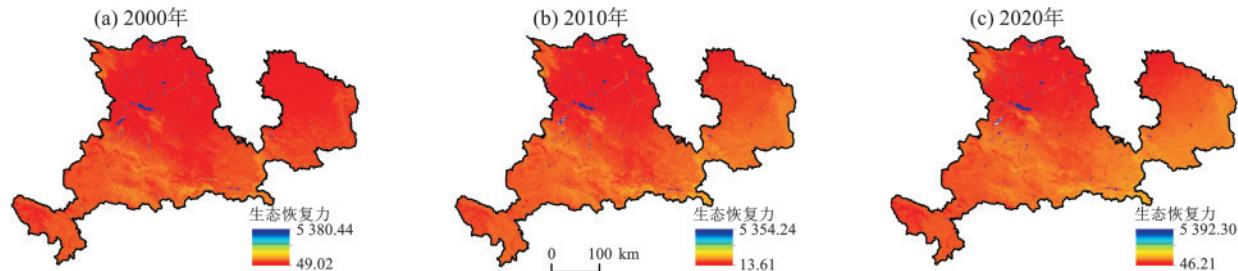


图 3 黄河流域甘肃段生态恢复力

Fig.3 Comparison of ecological restoration capacity in the Gansu section of the Yellow River basin

3.1.3 生态压力度分析 生态压力度子系统选取人口密度与人均 GDP 2 项表征人类活动强度的关键指标构成,其状态主要受人为因素驱动。由图 4 可知,生态压力度高值区集中分布于人口基数大、社会经济活动强度高的地区,如兰州市、白银市及庆阳市等地;低值区则主要位于定西市、临夏回族自治州等经济发展相对滞后的

区域。基于 2000 年、2010 年及 2020 年 3 期数据的对比分析表明,随着区域经济快速发展与居民生活水平显著提升,人均 GDP 持续增长,同时研究区生态压力度在 2000—2020 年亦呈快速上升趋势。因此,如何协调人民生活水平提高与生态环境保护之间的关系,已成为当前黄河流域甘肃段可持续发展面临的核心议题。

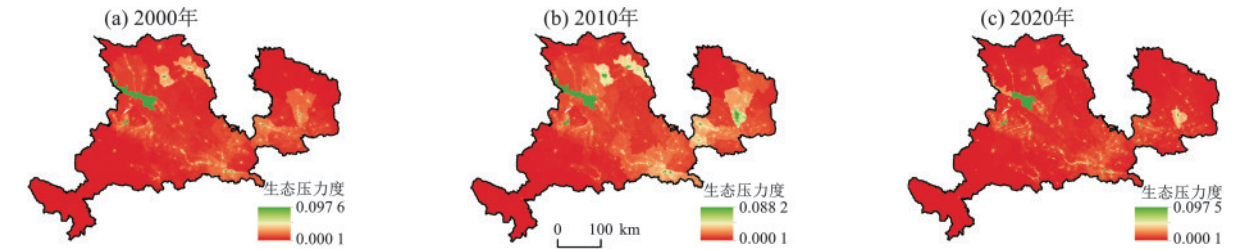


图 4 黄河流域甘肃段生态压力度

Fig.4 Comparison of ecological pressure levels in the Gansu section of the Yellow River basin

3.2 生态脆弱性分析

本研究基于熵值法与综合指数法,综合计算得到黄河流域甘肃段 2000 年、2010 年及 2020 年 3 期生态脆弱性指数,并生成相应土地生态脆弱性空间分布(图 5)。通过统计各等级像元数量并乘以单个像元面积,汇总得到 2000—2020 年研究区不同等级生态脆弱性面积变化(表 3)。2000 年,生态脆弱性等级

面积占比由高至低依次为微度脆弱、中度脆弱、轻度脆弱、重度脆弱与极度脆弱。至 2010 年及 2020 年,该结构发生显著变化,中度脆弱面积占比升至最高,其次为轻度脆弱,之后依次为微度脆弱、重度脆弱,极度脆弱占比始终保持最低。整体上,研究区内中度脆弱区域分布范围广、面积大,在各时期均占据主导地位。

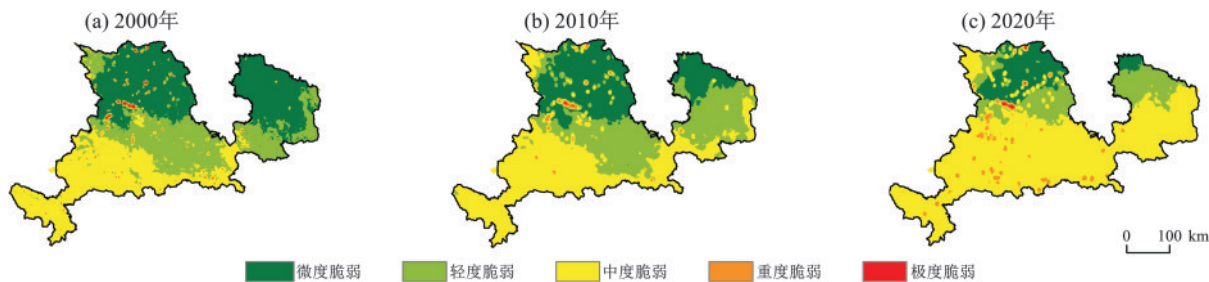


图 5 黄河流域甘肃段生态脆弱性评价

Fig.5 Ecological vulnerability assessment of Gansu section in the Yellow River basin

表 3 2000—2020 年黄河流域甘肃段各等级生态脆弱面积

Table 3 Statistical status of ecologically vulnerable areas at different levels in the Gansu section of the Yellow River basin from 2000 to 2020

等级	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%
微度脆弱	51 871.197 6	36.25	30 751.191 0	21.49	24 076.985 4	16.83
轻度脆弱	43 823.214 0	30.63	46 395.929 7	32.43	37 685.193 3	26.34
中度脆弱	45 805.680 9	32.02	64 858.553 1	45.33	80 081.058 6	55.97
重度脆弱	873.163 8	0.61	999.816 3	0.70	1 147.893 3	0.80
极度脆弱	701.508 6	0.49	69.274 8	0.05	83.634 3	0.06

3.3 黄河流域甘肃段各市州生态脆弱性分析

为进一步揭示生态脆弱性的行政单元差异,本研究基于生态脆弱性评估结果,对黄河流域甘肃段 2000—2020 年生态脆弱性的空间格局、市州差异及时序变化进行分析(图 6)。从整体空间格局看,黄河流域甘肃段生态脆弱性以中度脆弱和轻度脆弱为主,空间分布呈显著“南高北低”特征。研究时段内,微度和轻度脆弱区平均面积分别为 35 566.46、42 634.78 km²,主要分布于白银市、兰州北部、临夏回族自治州北部及庆阳等地,其面积总体呈缓慢下降趋势;中度脆弱区平均面积为 63 581.76 km²,集中于研究区南

部,涵盖甘南藏族自治州、临夏回族自治州南部、定西市、天水市及平凉市等地,其面积呈持续上升趋势;重度和极度脆弱区平均面积分别为 1 006.96、284.81 km²,零星散布于兰州市区、白银、临夏、甘南、定西等地,且面积占比都极小。

从市州尺度(表 4)来看,白银市生态脆弱性指数最低,2000 年、2010 年、2020 年分别为 0.091 3、0.095 1、0.117 5,处于微度至轻度脆弱水平,生态环境状况相对较好;甘南藏族自治州生态脆弱性指数最高,同期分别为 0.273 2、0.242 9、0.249 0,属中度脆弱等级,生态环境状况在各市州中最为严峻。

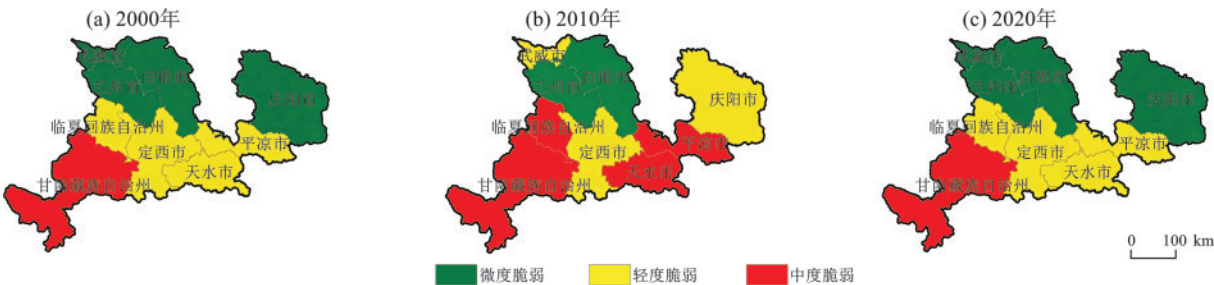


图 6 黄河流域甘肃段各市州生态脆弱性指数

Fig.6 Ecological vulnerability index of various cities and prefectures in the Gansu section of the Yellow River basin

从时序变化来看,2000—2010 年,临夏、平凉、庆阳、天水、武威等地的生态脆弱性指数逐步上升,其中平凉市与庆阳市增幅较大,分别增加 0.048 6 和 0.067 2;兰州、白银两地指数波动较小;甘南、定西则呈下降趋势。2010—2020 年,白银、定西、兰州、临夏、平凉、庆阳、天水等地生态脆弱性指数显著上升,平凉市增幅最大,数值达到 0.086 3;甘南地区指数基

本保持稳定;武威南部则略有下降。
综上所述,虽然黄河流域甘肃段内多数市州的生态脆弱性保持稳定,甘南藏族自治州的脆弱性指数更是呈现显著下降态势,但区域整体生态脆弱性指数仍呈上升趋势,生态环境质量持续缓慢退化。基于研究时段内该区域生态脆弱性逐渐增强的状况,可以明确认识到推进生态修复工作的紧迫性与

重要意义。为提升区域生态环境质量,保障居民生
产生活条件,促进可持续发展,黄河流域甘肃段需进
一步系统推进生态修复与保护措施,强化生态韧性
建设。

表 4 黄河流域甘肃段各市州生态脆弱指数变化趋势
Table 4 Trends of ecological vulnerability index changes in various cities and prefectures in the Gansu section of the Yellow River basin

甘肃各市州	2000 年		2010 年		2020 年	
	指数	变化趋势	指数	变化趋势	指数	变化趋势
白银	0.091 3	微度脆弱	0.095 1	微度脆弱	0.117 5	轻度脆弱
定西	0.202 5	中度脆弱	0.174 2	中度脆弱	0.216 9	中度脆弱
甘南	0.273 2	中度脆弱	0.242 9	中度脆弱	0.249 0	中度脆弱
兰州	0.097 7	轻度脆弱	0.111 2	轻度脆弱	0.130 0	轻度脆弱
临夏	0.173 8	中度脆弱	0.197 5	中度脆弱	0.223 5	中度脆弱
平凉	0.140 8	中度脆弱	0.189 4	中度脆弱	0.275 1	中度脆弱
庆阳	0.077 4	轻度脆弱	0.144 6	轻度脆弱	0.151 0	轻度脆弱
天水	0.189 4	中度脆弱	0.201 0	中度脆弱	0.239 7	中度脆弱
武威(南)	0.103 0	轻度脆弱	0.144 3	轻度脆弱	0.139 1	轻度脆弱

3.4 生态脆弱性转移矩阵

为系统揭示黄河流域甘肃段生态脆弱性的动态演变特征,采用 ArcGIS 10.8 的栅格计算器模块对 3 期生态脆弱性分级图进行叠加分析,从而计算出黄河流域甘肃段 2000—2010 年、2010—2020 年、2000—2020 年的黄河流域甘肃段生态脆弱性等级变化(图 7 和图 8)和生态脆弱性转移矩阵(表 5)。2000—2020 年,黄河流域甘肃段分别有 25 518.497 4、2 429.437 5、38.040 3 km² 的微度脆弱区分别转移为轻度脆弱、中度脆弱及重度脆弱;有 304.036 2 km² 的轻度脆弱区转好为微度脆弱区,但有 31 773.138 3、146.352 6、2.896 2 km² 的轻度脆弱区转移为中度脆弱、重度脆弱及极度脆弱区;52.082 1、519.240 6 km² 的中度脆弱区转好为微度脆弱区和轻度脆弱区,但仍有 389.526 3、5.791 5 km² 的中度脆弱区转移为重度脆弱和极度脆弱区;有 37.470 6、168.653 7、385.139 7 km² 的重度脆弱区分别转好为微度脆弱、轻度脆弱及中度脆弱区,但仍有 8.704 8 km² 的重度脆弱区转移为极度脆弱区;

有 20.200 5、64.047 6、196.543 8、353.446 2 km² 的极度脆弱区好转为微度脆弱、轻度脆弱、中度脆弱及重度脆弱区。以此类推,可得出 2000—2010 年、2010—2020 年黄河流域甘肃段生态脆弱性转化结果。

通过对生态脆弱性转移面积的分析可知,2000—2010 年,黄河流域甘肃段生态脆弱性等级保持不变的面积占 70.13%,脆弱性升高的面积占 27.93%,等级降低的面积仅占 1.95%。表明该 10 a 间近 3 成区域的生态脆弱性有所加剧,生态系统整体虽保持相对稳定,但已呈现逐步失衡的态势。2010—2020 年,等级保持不变的比例上升至 77.14%,等级提升的面积下降至 19.31%,等级降低的面积则增至 3.56%,表现出近 8 成的区域生态脆弱性状态趋于稳定,尽管仍有部分区域脆弱性升高,但与前一时期相比,整体生态环境已呈现显著改善。总体而言,2000—2020 年黄河流域甘肃段的生态保护工作已初步显现成效,然而生态脆弱性总体仍呈上升趋势,表明该区域生态建设与恢复任务依然艰巨。

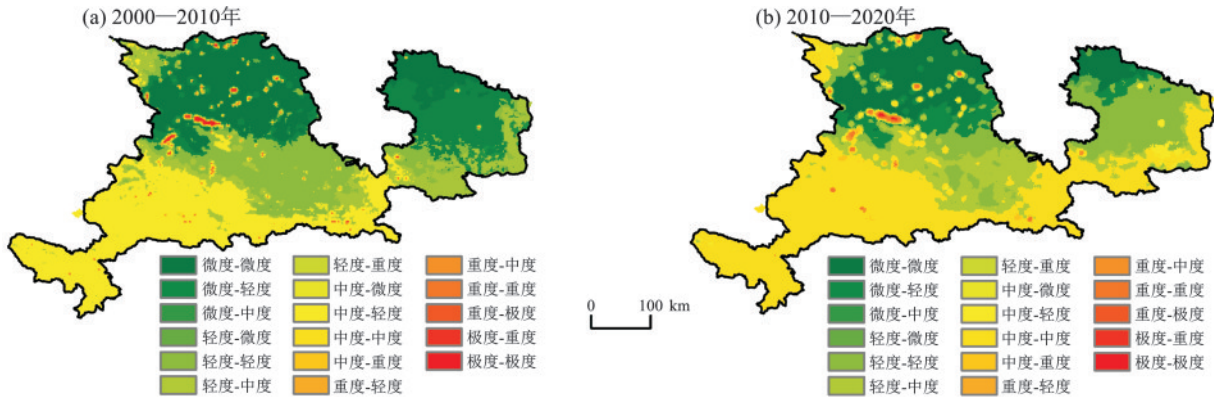


图 7 生态脆弱性等级面积转化
Fig.7 Area transformation map of ecological vulnerability level
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

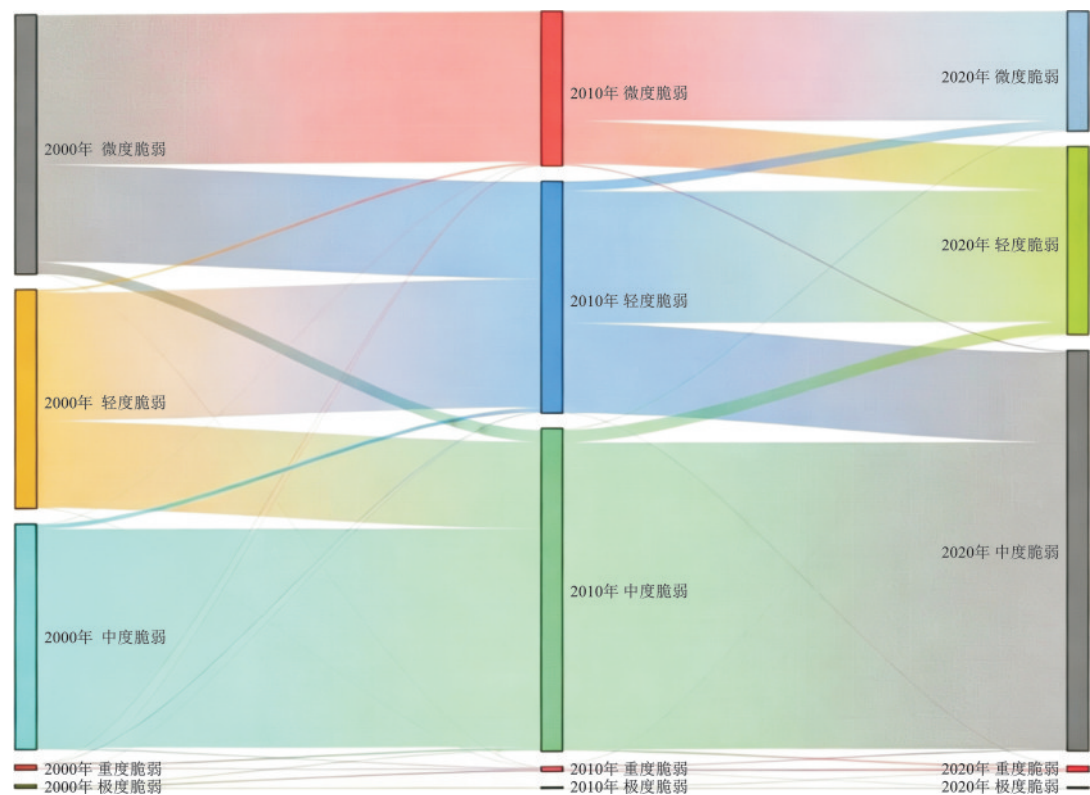


图 8 黄河流域甘肃段生态脆弱性转移矩阵桑基图

Fig. 8 Sankey diagram of ecological vulnerability transfer matrix in Gansu section of the Yellow River basin

表 5 2000—2020 年黄河流域甘肃段生态脆弱性转移矩阵

Table 5 Ecological vulnerability transfer matrix for Gansu section of the Yellow River basin from 2000 to 2020 km ²						
年份	脆弱性程度	微度脆弱	轻度脆弱	中度脆弱	重度脆弱	极度脆弱
2000—2010	微度脆弱	29 848.136 4	19 431.633 6	2 377.257 3	23.263 2	0
	轻度脆弱	570.685 5	25 633.180 8	17 345.658 6	102.256 2	0
	中度脆弱	66.757 5	910.776 6	43 552.940 4	279.535 5	0
	重度脆弱	43.542 9	136.426 5	405.390 6	239.630 4	0
	极度脆弱	14.495 4	75.684 6	179.339 4	356.287 5	70.066 8
2010—2020	微度脆弱	21 747.688 2	8 593.221 6	377.915 4	0	0
	轻度脆弱	1 964.038 5	26 338.108 5	17 954.813 7	17.533 8	0
	中度脆弱	163.098 0	2 558.399 4	61 042.590 0	491.755 5	0
	重度脆弱	0	23.202 0	330.489 0	606.878 1	40.332 6
	极度脆弱	0	0	0	25.980 3	43.299 0
2000—2020	微度脆弱	23 709.883 5	25 518.497 4	2 429.437 5	38.040 3	0
	轻度脆弱	304.036 2	11 300.871 6	31 773.138 3	146.352 6	2.896 2
	中度脆弱	52.082 1	519.240 6	44 405.987 4	389.526 3	5.791 5
	重度脆弱	37.470 6	168.653 7	385.139 7	224.925 3	8.704 8
	极度脆弱	20.200 5	64.047 6	196.543 8	353.446 2	67.165 2

4 讨论

本研究基于 SRP 模型对黄河流域甘肃段 2000—2020 年生态脆弱性进行评价,结果显示区域生态脆弱性呈“南高北低”的空间格局,且以中度脆弱为主,面积占比从 2000 年的 32.03% 上升至 2020 年的 55.97%,表明整体生态环境状况趋于缓慢恶化。该空间格局与黄河流域中上游生态脆弱性“西北偏高、

东南偏低”的分异规律整体相符,同时凸显出黄河流域甘肃段作为上游核心水源涵养区的生态特殊性。南部甘南、临夏等高海拔山区生态敏感性较高,叠加人类活动干扰,导致脆弱性持续偏高;北部白银、庆阳等地尽管生态压力度较大,但地形与气候条件相对缓和,脆弱性水平较低^[33]。

从指标权重与空间格局看,本研究识别出生态

敏感性对脆弱性空间分异起主导作用,黄河流域甘肃段生态脆弱性呈南高北低格局,且以中度脆弱为主,面积占比持续上升。与黄河流域中上游已有研究^[14,17]成果对比可见,甘肃段生态脆弱性空间结构更复杂,南部高海拔区域敏感性特征显著,土壤侵蚀与地形相关指标权重占比高,说明水土流失是塑造区域脆弱性空间差异的核心驱动因素。该结论与黄河流域中段相关研究^[8,14]认知相符,同时本研究发现,黄河流域甘肃段生态恢复力维度中,水网密度指标贡献突出,体现出水源涵养功能对区域生态修复与提升的支撑作用。此外,生态压力度虽呈上升趋势,但其对脆弱性的贡献仍低于敏感性,说明自然本底条件仍是当前脆弱性分异的基础驱动力。因此,在类似黄河流域上游的生态敏感区,生态保护应更注重自然恢复与地形-土壤协同治理。与同类型生态脆弱性评价研究相比,本研究采用熵值法进行权重赋值,方法流程直观且可操作性强,在指标体系本地化构建与区域特征适配方面具备良好适用性。然而,相较于AHP-熵权法博弈融合等组合赋权法、主成分分析等客观赋权法,单一引用熵值法可能引入主观偏差,影响权重分配的精确度^[25]。此外,本研究在指标体系中未纳入旅游开发、政策响应等人文因子,存在一定局限。未来可结合地理探测器等方法,深入解析多因子交互作用机制,提升模型的解释力与预测能力。

在实践意义上,本研究的评价结果可为黄河流域甘肃段差异化生态管理提供依据。针对中度脆弱区持续扩张的趋势,建议在甘南、定西等南部高敏感区实施以自然恢复为主、人工辅助为辅的生态修复工程,重点提升植被覆盖与土壤保持功能^[34];在北部兰州、白银等生态压力集中区域,应严格管控城镇建设用地扩张规模,优化区域产业空间布局,加快推进产业结构绿色低碳转型。此外可借鉴“上中下游协同治理”思路,将甘肃段置于全流域尺度统筹规划,强化跨区域生态补偿与协同保护机制^[35]。

本研究仅采用熵值法进行权重确定,后续可将熵值法与变异系数法等方法结合构建组合赋权模型,进一步提升评价结果的客观公正性;其二,指标体系中社会经济指标较少,未能全面涵盖旅游开发、政策响应等人文驱动因素,后续可引入旅游强度、生态投资等指标以增强模型解释力^[36];其三,研究时段截至2020年,未能反映如黄河上游生态保护与高质量发展规划等近期重大生态工程的实施效果,需进一步开展动态跟踪评估。未来研究可融合多源遥感影像与地理时空大数据,结合机器学习算法实现生态脆弱性动态模拟与风险预警,深入揭示自然要素

与人文活动耦合作用机制,为流域精细化生态治理与决策提供更有力的支撑。

5 结论

1)黄河流域甘肃段生态环境脆弱性空间异质性显著,整体生态质量较为脆弱,并以中度脆弱等级为主。在2000年、2010年、2020年3期数据中,中度脆弱区面积占比分别为32.03%、45.33%、55.97%。

2)空间分布上,黄河流域甘肃段生态脆弱性呈“南高北低”的格局。微度与轻度脆弱区主要分布在研究区北部及东北部;中度脆弱区集中于南部与西南部,并呈现向东北方向持续扩张的趋势;重度脆弱区范围较小,3期占比分别为1.07%、0.75%、0.86%,主要集中于工农业较发达、人口密集的区域。因此,应在充分遵循自然本底的基础上,合理规范资源开发利用,调整人类活动方式,推动构建人与自然和谐共生的可持续发展社会-环境系统。

3)时间演变上,2000年、2010年与2020年3期生态脆弱性指数平均值呈缓慢上升趋势,表明研究区生态脆弱性随时间推移逐步增强。微度与轻度脆弱区面积减少,中度脆弱区持续扩张,脆弱性等级整体抬升。

4)市州尺度上,白银、庆阳及武威南部等地区生态脆弱性较低,生态系统相对稳定;而甘南、定西、临夏等地生态脆弱性较高,处于中度脆弱水平,需进一步加强生态环境保护与修复力度。

5)基于生态脆弱性转移矩阵的分析表明,2000—2020年,黄河流域甘肃段超过70%的土地面积脆弱性等级未发生变化;然而,脆弱性等级降低的土地面积远少于等级升高的面积,恶化面积远大于改善面积,区域生态状况总体上保持稳定,但生态脆弱性仍呈逐渐加剧趋势。

参考文献:

- [1] 王让会,樊自立.塔里木河流域生态脆弱性评价研究[J].干旱环境监测,1998,12(4):218-221.
WANG R H, FAN Z L. Study on ecological vulnerability assessment in Tarim river basin[J]. Arid Environmental Monitoring, 1998, 12(4): 218-221.
- [2] 芮茜艺,朱沁园,苏秋克,等.县域生态文明建设与碳排放的空间交互及耦合协调度研究[J].环境科学与管理,2025,50(12):169-174.
RUI H Y, ZHU Q Y, SU Q K, et al. Analysis on spatial interaction and coupling coordination degree between county ecological civilization construction and carbon emission [J]. Environmental Science and Management, 2025, 50(12): 169-174.
- [3] 李云帆,李彩霞,贾翔,等.乌梁素海流域生态脆弱性时空变化及其成因分析[J].地球信息科学学报,2023,25(10):2039-2054.

- LI Y F, LI C X, JIA X, et al. Spatiotemporal changes and causes of ecological vulnerability in Ulansuhai basin [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2023, 25(10): 2039-2054.
- [4] 高凤. 大沽河流域(胶州段)生态脆弱性空间分异及修复策略研究[D]. 山东 青岛: 青岛理工大学, 2021.
- GAO F. Research on spatial differentiation of ecological vulnerability and restoration strategy in Dagu River basin (Jiaozhou section) [D]. Qingdao, Shandong: Qingdao University of Technology, 2021.
- [5] 徐君, 李贵芳, 王育红. 生态脆弱性国内外研究综述与展望[J]. *华东经济管理*, 2016, 30(4): 149-162.
- XU J, LI G F, WANG Y H. Review and prospect of research on ecological vulnerability in China and abroad[J]. *East China Economic Management*, 2016, 30(4): 149-162.
- [6] TIMMERMAN P. Vulnerability, resilience and the collapse of society: A review of models and possible climatic applications [R]. Toronto: Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 1981.
- [7] 贾晶晶. 基于 SRP 模型的石羊河流域生态脆弱性评价[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
- JIA J J. Evaluation of ecological vulnerability in Shiyang River basin based on SRP model [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2020.
- [8] IPCC. Special report on emissions scenarios (SRES) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [9] MEJDOUBI M, DJENNAOUI M, KYNDT X. Link between COVID-19-related in-hospital mortality in continental France administrative areas and weather: An ecological study[J]. *BMJ Open*, 2021, 11(3): e043269.
- [10] 赵珂, 饶懿, 王丽丽, 等. 西南地区生态脆弱性评价研究: 以云南、贵州为例[J]. *地质灾害与环境保护*, 2004, 15(2): 38-42.
- ZHAO K, RAO Y, WANG L L, et al. Evaluation of ecological fragility in southwest of China [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2004, 15(2): 38-42.
- [11] 李鹤, 张平宇. 全球变化背景下脆弱性研究进展与应用展望[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(7): 920-929.
- LI H, ZHANG P Y. Research progress and prospective applications of vulnerability approach under global change [J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(7): 920-929.
- [12] 柳新伟, 周厚诚, 李萍, 等. 生态系统稳定性定义剖析[J]. *生态学报*, 2004, 24(11): 2635-2640.
- LIU X W, ZHOU H C, LI P, et al. A conceptual analysis of ecosystem stability[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2635-2640.
- [13] 寸得欣, 刘振南, 黄安, 等. 典型干热河谷区生态脆弱性评价: 以云南落洞河流域为例[J]. *中国地质*, 2026, 53(2): 653-667.
- CUN D X, LIU Z N, HUANG A, et al. Assessment of ecological vulnerability in typical hot-dry valley regions: A case study of the Luodou River basin in Yunnan [J]. *Geology in China*, 2026, 53(2): 653-667.
- [14] 邵苏日嘎拉, 杜雨春子, 余榕, 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]. *环境科学*, 1-20[2026-03-30]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202505220>.
- TAI S R G L, DU Y C Z, SHE R, 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]. *Environmental Science*, 1-20[2026-03-30]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202505220>.
- [15] 奥勇, 丁志豪, 赵永华, 等. 汉江流域生态脆弱性与生态韧性的时空演变及生态分区构建[J]. *环境科学*, 2026, 47(6): 4017-4028.
- AO Y, DING Z H, ZHAO Y H, et al. Spatial and temporal evolution of ecological vulnerability and ecological resilience and construction of ecological zones in Hanjiang River basin[J]. *Environmental Science*, 2026, 47(6): 4017-4028.
- [16] 朱李英, 史雯雨, 王巧霞, 等. 基于 SRP 模型的金沙江流域生态脆弱性评价及驱动力分析[J]. *四川水利*, 2025, 46(1): 15-19.
- ZHU L Y, SHI W Y, WANG Q X, et al. Ecological vulnerability assessment and driving force analysis of Jinsha River basin based on SRP model [J]. *Sichuan Water Resources*, 2025, 46(1): 15-19.
- [17] 张艳, 苏兰欣. 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[J]. *环境科学*, 2025, 46(8): 5134-5144.
- ZHANG Y, SU L X. Ecological vulnerability assessment and driving factor analysis in the middle section of Yellow River basin based on SRP model[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(8): 5134-5144.
- [18] 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 Z M, ZHOU D M, ZHANG J, 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.
- [19] 宋永永, 薛东前, 夏四友, 等. 近 40 a 黄河流域国土空间格局变化特征与形成机理[J]. *地理研究*, 2021, 40(5): 1445-1463.
- SONG Y Y, XUE D Q, XIA S Y, et al. Change characteristics and formation mechanism of the territorial spatial pattern in the Yellow River basin from 1980 to 2018, China [J]. *Geographical Research*, 2021, 40(5): 1445-1463.
- [20] 王昱, 王旭, 冯起, 等. 黄河甘肃段底栖动物群落结构及水质评价[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(4): 146-156.
- WANG Y, WANG X, FENG Q, et al. Macrobenthos community structure and water quality evaluation in Gansu section of Yellow River basin [J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(4): 146-156.
- [21] 邹桃红, 常雅轩, 陈鹏, 等. 基于 AHP-PCA 熵权组合模型的吉林省生态环境脆弱性动态评价[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(9): 1511-1524.

- ZOU T H, CHANG Y X, CHEN P, et al. Evaluation of eco-environmental vulnerability in Jilin Province based on an AHP-PCA entropy weight model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(9): 1511-1524.
- [22] 张春悦, 白永平, 杨雪荻, 等. 典型高山峡谷区生态脆弱性评价及响应策略: 以甘肃省舟曲县为例[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2022, 58(5): 623-630.
- ZHANG C Y, BAI Y P, YANG X D, et al. Ecological vulnerability assessment and response strategy in typical alpine and canyon areas: A case study of Zhouqu County, Gansu Province[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2022, 58(5): 623-630.
- [23] 贾晶晶, 赵军, 王建邦, 等. 基于SRP模型的石羊河流域生态脆弱性评价[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(1): 34-41.
- JIA J J, ZHAO J, WANG J B, et al. Ecological vulnerability assessment of Shiyang River basin based on SRP model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(1): 34-41.
- [24] 支泽民, 刘峰贵, 陈琼, 等. 青海省生态脆弱度分级1-km栅格数据集(2015)的研发与内容[J]. 全球变化数据学报(中英文), 2022, 6(3): 409-415.
- ZHI Z M, LIU F G, CHEN Q, et al. Development of ecological vulnerability classification 1-km raster dataset in Qinghai Province of China(2015)[J]. Journal of Global Change Data and Discovery, 2022, 6(3): 409-415.
- [25] 代雅建, 崔健, 孙秀波, 等. 基于SRP模型和组合赋权法的浑河流域生态地质脆弱性评价[J/OL]. 地质与资源, 1-10[2026-03-30]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1458.P.20251112.1749.002>.
- DAI Y J, CUI J, SUN X B, et al. Eco-geological vulnerability assessment of Hunhe River basin based on SRP model and combination verghting methos[J/OL]. Geology and Resources, 1-10[2026-03-30]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1458.P.20251112.1749.002>.
- [26] 刘鹏举. 基于熵权法的生态脆弱性评价: 以济南市为例[J]. 环境影响评价, 2021, 43(2): 70-73.
- LIU P J. Ecological vulnerability assessment based on entropy weight method: Taking Jinan City as an example[J]. Environmental Impact Assessment, 2021, 43(2): 70-73.
- [27] 巩杰, 赵彩霞, 谢余初, 等. 基于景观格局的甘肃白龙江流域生态风险评价与管理[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 2041-2048.
- GONG J, ZHAO C X, XIE Y C, et al. Ecological risk assessment and its management of Bailongjiang watershed, southern Gansu based on landscape pattern[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(7): 2041-2048.
- [28] 李晨, 蔡荣锋, 韩珂馨. 基于SRP模型的云南省生态脆弱性评价及驱动力分析[J]. 价值工程, 2023, 42(3): 110-112.
- LI C, CAI R F, HAN K X. Ecological vulnerability assessment and driving forces analysis of Yunnan Province based on SRP model[J]. Value Engineering, 2023, 42(3): 110-112.
- [29] 张琳琳, 黄勤, 赵华甫, 等. 黑龙江省松嫩平原土地生态脆弱性时空特征分析[J]. 土壤通报, 2023, 54(3): 505-515.
- ZHANG L L, HUANG Q, ZHAO H F, et al. Temporal and spatial characteristics of land ecological vulnerability in Songnen Plain, Heilongjiang Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(3): 505-515.
- [30] 杜华栋, 孙浩, 毕银丽, 等. 基于GIS和熵值法的半干旱矿区生态敏感性评价[J]. 中国煤炭, 2025, 51(2): 199-208.
- DU H D, SUN H, BI Y L, et al. Ecological sensitivity assessment of semi-arid mining areas based on GIS and entropy method[J]. China Coal, 2025, 51(2): 199-208.
- [31] 崔斌凯. 基于熵值法和层次分析法的平凉市生态敏感性与恢复力分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- CUI B K. Analysis of ecological sensitivity and resilience in Pingliang City based on the entropy method and AHP method[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
- [32] 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 and Technology Information, 2022, 20(12): 99-104.
- [33] 李占兴, 王艳慧. 汾河流域生态系统脆弱性评估及变化分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(8): 45-49.
- LI Z X, WANG Y H. Ecosystem vulnerability assessment and change analysis in Fen River basin[J]. Geospatial Information, 2024, 22(8): 45-49.
- [34] 王晨. 基于OWA-SRP模型的流域生态脆弱性评价及多情景模拟[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
- WANG C. Ecological vulnerability assessment and multi-scenario simulation of watershed based on OWA-SRP model[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024.
- [35] 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.
- [36] 赵东鹏. 基于SRP模型的清江流域生态脆弱性评价及修复分区研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2024.
- ZHAO D P. Ecological vulnerability assessment and restoration zoning of the Qingjiang River basin based on SRP model[D]. Wuhan: Hubei University, 2024.