

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.015; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.015.

黄贤凤, 苏维词, 勾容, 等. FAST 宁静区生态脆弱性时空演变及情景模拟[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 295-305.

Huang Xianfeng, Su Weici, Gou Rong, et al. Spatiotemporal evolution and scenario simulation of ecological vulnerability in the FAST Tranquility Zone[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 295-305.

# FAST 宁静区生态脆弱性时空演变及情景模拟

黄贤凤<sup>1</sup>, 苏维词<sup>1,2</sup>, 勾容<sup>1</sup>, 权小丫<sup>1</sup>

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. 贵州省山地资源研究所, 贵阳 550001)

**摘要:** [目的] 揭示 FAST 宁静区 2000—2020 年的生态脆弱性时空变化特征, 为维护该区域的生态安全提供科学参考。[方法] 基于 FAST 宁静区生态本底特征, 从“敏感性—恢复力—压力度”角度构建生态脆弱性评价体系, 运用 AHP-熵权法和 GIS 技术等对 FAST 宁静区 2000—2020 年生态脆弱性时空演变及未来预设情景进行了量化分析。[结果] (1) 研究区脆弱性以中度脆弱为主, 轻度、中度、重度脆弱区合计占 75% 左右, 微度和极度脆弱区合计只占约 25%。(2) 20 年间研究区生态脆弱性整体下降, 高强度生态脆弱区主要向较低等级转化, 前 10 a 生态脆弱性略有上升, 而后 10 a 生态脆弱性明显降低, 研究区生态环境整体呈改善的趋势。(3) 从 FAST 圈层(核心区、中间区、边远区) 动态变化看, 核心区的生态得到较好的改善, 恶化区面积占比由前 10 a 的 19.57% 降至 7.12%, 而稳定区和低度改善区的面积在上升, 由前 10 a 的 79.88% 增至 92.50%; 中间区和边远区变化趋于稳定, 中间区稳定区和低度改善区面积占比由 68.36% 增至 87.10%, 而边远区稳定区占比由 40.78% 增至 59.50%, 但边远区局部存有恶化风险。(4) 基于生态优先保护和乡村振兴需求两种情景模拟, 2030 年 FAST 宁静区的生态脆弱性整体指数分别下降 5.91% 和 2.22%, 前者生态保护效果较优, 但后者更好地兼顾生态保护和乡村发展需要, 综合考虑建议推荐乡村振兴发展模式。[结论] 研究时段内, FAST 宁静区生态脆弱性整体降低, 核心区生态环境改善明显, 中间区、边远区后 10 a 相比前 10 a 整体生态在缓慢转好。

**关键词:** 生态脆弱性; 时空演变; 情景模拟; FAST 宁静区; 圈层变化

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0295-10

## Spatiotemporal evolution and scenario simulation of ecological vulnerability in the FAST Tranquility Zone

Huang Xianfeng<sup>1</sup>, Su Weici<sup>1,2</sup>, Gou Rong<sup>1</sup>, Quan Xiaoya<sup>1</sup>

(1. College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University,

Chongqing 401331, China; 2. Guizhou Institute of Mountain Resources, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to reveal the spatial and temporal characteristics of ecological vulnerability in the FAST Tranquility Zone from 2000 to 2020, and to provide scientific references for the maintenance of ecological security in this region. [Methods] Based on the ecological baseline characteristics of the FAST Tranquility Zone, an ecological vulnerability assessment system was established from the perspectives of sensitivity-recovery-pressure. The spatiotemporal evolution of ecological vulnerability and future preset scenarios from 2000 to 2020 in the FAST Tranquility Zone were quantitatively analyzed using the AHP-Entropy Weight method and GIS technology. [Results] (1) The vulnerability in the study area was primarily moderate, with mild, moderate, and severe vulnerable areas accounting for approximately 75%, and slightly and extremely vulnerable areas accounting for about 25%. (2) Over the 20-

收稿日期: 2024-06-24

修回日期: 2024-07-08

接受日期: 2024-07-15

资助项目: 国家自然科学基金“FAST 宁静区岩溶峰丛洼地生态系统安全演变及其响应机制”(42161052)

第一作者: 黄贤凤(2000—), 女, 贵州普定人, 在读硕士生, 研究方向为喀斯特地区生态环境变化与区域可持续发展。E-mail: huangxianfeng2022@163.com

通信作者: 苏维词(1965—), 男(苗族), 湖南绥宁人, 硕士, 研究员, 主要从事生态环境与乡村振兴研究。E-mail: suweici@sina.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

year period, the ecological vulnerability of the study area had decreased overall, with high-intensity vulnerable areas mainly transforming to lower severity levels. There was a slight increase in ecological vulnerability in the first decade, followed by a significant decrease in the second decade, indicating an overall improving trend in the ecological environment of the area. (3) With respect to the dynamic changes in the FAST concentric zones (core area, intermediate area, and remote area), the ecology of the core area had been considerably improved, with the proportion of the deteriorated area decreasing from 19.57% in the first decade to 7.12% in the second decade. The areas of stability and slight improvement had increased, from 79.88% in the first decade to 92.50%. The intermediate area and remote area showed a trend towards stabilization, with the proportion of stable and slightly improved areas in the intermediate area increasing from 68.36% to 87.10%, and the proportion of stable areas in the remote area increasing from 40.78% to 59.50%, although there were risks of deterioration in some parts of the remote area. (4) Based on the simulation of ecological priority protection and rural revitalization needs, the overall ecological vulnerability index of the FAST Tranquility Zone was projected to decrease by 5.91% and 2.22%, respectively, by 2030. The former scenario showed better ecological protection effects, while the latter more effectively balanced ecological conservation with rural development needs. Considering both, it was recommended to prioritize the rural revitalization development model. [Conclusion] During the study period, the ecological vulnerability of the FAST Tranquility Zone had decreased overall, with the core area showing significant ecological improvement, and the intermediate and remote areas showing a slow but overall positive ecological transition in the latter decade compared to the first.

**Keywords:** ecological vulnerability; spatial and temporal evolution; scenario simulations; FAST Tranquility Zone; circle change

500 m 口径球面射电望远镜 (five-hundred-meter aperture spherical radio telescope, FAST) 是我国重大深空探测科技设施,也是世界上最大的单口径球面射电望远镜,被誉为“中国天眼”<sup>[1]</sup>。随着 2016 年 FAST 工程的竣工和使用,为确保 FAST 周边稳定宁静的电磁波环境,将 FAST 外 30 km 范围划定为电磁波宁静区并实行不同的政策,分为核心区(0~5 km):禁止开发区,禁止一切生产活动,严禁电磁辐射及需完成移民搬迁;中间区(5~10 km):限制开发区,禁止建设与保护 FAST 环境无关的新建工程,包括严格限制城镇化扩展、高层建筑和工矿活动;边远区(10~30 km):适度开发区,限制对环境扰动大的项目落地,实现环境准入制。该区域是典型的喀斯特地区,本底生态环境脆弱,对外界干扰的抵抗力、稳定性差,生态环境问题经常发生。近年来,FAST 宁静区的中间区和边远区内乡村旅游、乡村振兴建设等项目在持续发展,这两个圈层的人类活动不断扩大,对 FAST 宁静区整体的生态脆弱性及其宁静环境要求产生一定影响。因此,科学客观地评价 FAST 宁静区生态脆弱性时空变化及圈层特征十分必要。

生态脆弱性是在特定时空尺度上,生态系统相对于外界环境的变化而表现出的敏感性和恢复能力,是

生态系统自我调节能力的反映<sup>[2]</sup>。而在全球气候变化和人类活动加剧的背景下,资源环境问题愈加突出,生态系统自身的调节和恢复能力逐渐减弱,原本的平衡系统被破坏,生态环境面临越来越脆弱的风险。目前,诸多学者对生态脆弱性评估展开了大量的研究,主要围绕高寒区<sup>[3]</sup>、典型河流流域<sup>[4]</sup>、干旱区<sup>[5]</sup>、城市等<sup>[6]</sup>研究区域进行生态脆弱评价与分析,评估方式多基于压力-状态-响应<sup>[7]</sup>、VSD 模型<sup>[8]</sup>、自然-人为因素复合指标体系等<sup>[9]</sup>评价模型,采用空间主成分<sup>[10]</sup>、层次分析法<sup>[11]</sup>、熵权法等<sup>[12]</sup>来研究区域的生态脆弱性变化、影响驱动因子等内容。如郭婧等<sup>[3]</sup>利用灰色关联法对青海省海东市 6 个区县的生态脆弱性进行定量分析与评价;郭泽呈等<sup>[13]</sup>以石羊河流域为研究区,对其生态脆弱性时空演变及动因进行分析,发现石羊河流域生态脆弱程度有所降低;张学渊等<sup>[14]</sup>采用空间主成分分析、地理探测器等方法对西北干旱区生态脆弱性时空演变及驱动力进行分析,在此基础上划分了 5 个功能区,为干旱区生态环境保护提供借鉴。学者们的研究成果十分丰富,但针对我国重大科技基础设施工程区域——FAST 宁静区这样对生态安全有特殊要求的喀斯特地区相关研究缺乏,该区域水土流失和石漠化问题较突出、景观

破碎化程度高、社会经济发展滞后、人地矛盾突出,面临加快发展和保护特殊生态的矛盾。随着 FAST 的竣工运行、天文小镇的兴起以及频繁的人类活动,FAST 宁静区生态脆弱性已发生某种程度变化,探讨揭示 FAST 宁静区生态脆弱性演变及趋势,模拟未来不同情境下生态脆弱性变化,对维护和管控 FAST 宁静区生态安全有重要的理论和现实意义。

本文基于生态敏感性-生态恢复力-生态压力度(SRP)模型结合 FAST 宁静区生态和社会实际状况,构建生态脆弱性评价指标体系,基于组合 AHP-熵权法计算权重加权叠加获得生态脆弱性指数,对 2000—2020 年 FAST 宁静区生态脆弱性时空分异特征以及不同圈层的动态演化情况进行分析,并对未来生态保护优化及乡村振兴背景下的两种情景进行模拟,期望为 FAST 宁静区的生态保护与可持续发展提供科学依据。

## 1 研究区概况

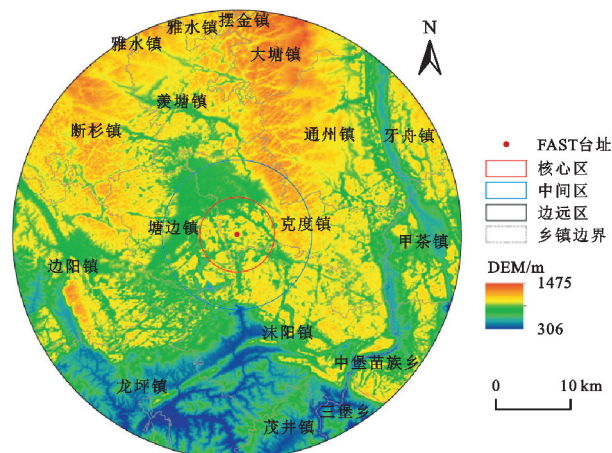
中国天眼 FAST 台址( $25^{\circ}38'48''-25^{\circ}39'36''N$ ,  $106^{\circ}50'55''-106^{\circ}52'02''E$ )位于贵州典型的喀斯特峰丛洼地(平塘县克度镇大窝凼洼地)。为保障 FAST 的安全运行,划定以 FAST 台址为中心的 30 km 范围为保护区域,即为电磁波宁静区,并分为核心区( $0\sim5$  km)、中间区( $5\sim10$  km)和边远区( $10\sim30$  km)。区域总面积约  $2\,827\text{ km}^2$ ,涉及贵州平塘县的克度、塘边、通州等乡镇,罗甸县的沫阳、龙坪、边阳等乡镇,惠水县的羡塘、断杉等乡镇以及广西西北部南丹县中堡苗族乡、天峨县三堡乡两个乡镇(图 1),人口超过 20 万,其中 80% 以上是农村人口,对土地的依赖较大。该区内以喀斯特(峰丘、峰林、峰丛、洼地)山地、丘陵地貌为主,喀斯特区域面积约占区域土地总面积的 80% 以上;位于贵州高原向广西丘陵过渡的斜坡地带,地势北高南低,平均海拔 930 m;在气候上属于亚热带季风湿润气候区,年均气温  $16.6^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量 1 200 mm 以上,雨量充沛。该区域属于贵州省传统的两山(瑶山、麻山)区的核心区域,水土流失和石漠化严重,是典型生态脆弱区,过去属于贵州极度贫困区,2020 年完成脱贫攻坚,但乡村社会发展仍明显滞后。

## 2 数据来源与方法

### 2.1 数据来源

本文所采用的数据主要包括土地利用数据、气象数据、DEM 数据和社会经济数据等。土地利用数据

来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),分辨率为 30 m;气温、降水数据来源于中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>),选取研究区内及周边气象站点的数据;数字高程数据(DEM)来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30 m;归一化植被指数(NDVI)是基于 Google Earth Engine(GEE)中所收录的 Landsat-T1\_SR 数据集利用最大合成法获得,分辨率为 30 m;土壤数据来源于兰州寒区旱区科学数据中心《基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集》(<http://data.casnw.net/>);人口统计数据等来源于各县统计年鉴乡镇数据及《中国县域统计年鉴(乡镇卷)》。所有数据坐标系统一为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_48N,  $30\text{ m}\times30\text{ m}$  评价单元。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 研究区位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

### 2.2 研究方法

2.2.1 生态脆弱性评价指标体系构建 借鉴已有研究<sup>[15-17]</sup>,基于 SRP 模型,结合 FAST 宁静区生态环境的实际特点,遵循指标选取的可行性、科学性、综合性等原则,考虑数据的可获取性,构建 FAST 宁静区生态脆弱性评价指标体系(表 1)。其中敏感性是指生态系统对内部和外界干扰的敏感程度<sup>[18]</sup>,受区域自身生态系统的影响,一般敏感性较高的区域,生态环境易受破坏的概率越大,此类区域往往越脆弱。生态敏感性指标选取海拔、坡度、土壤侵蚀、石漠化敏感性等 8 个因子。生态恢复力是指生态系统在受到外界干扰或破坏时的自我恢复能力,与生态系统自身的内部结构有关<sup>[19]</sup>,选取景观恢复力、植被覆盖度、生态环境质量 3 个指标来表征,其中遥感生态指数(RSEI)可定量表征土地利用引起的生态环境质量变化<sup>[20]</sup>,该指数可以基于 GEE 遥感平台调用海量多源遥感影像数



据和方法计算得到<sup>[21]</sup>。生态压力主要是指人类活动界干扰越大,生态脆弱性就越高。对各类指标数据采用和社会经济压力等外界干扰对生态系统的作用,受外界干扰越大,生态脆弱性就越高。对各类指标数据采用极差标准化处理,具体参照文献[22]。

表 1 FAST 宁静区生态脆弱性 SRP 模型评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of SRP model for ecological vulnerability in the FAST Tranquility Zone							
维度	准则层	指标层	指标说明与计算	性质	$W_{1j}$	$W_{2j}$	$W_j$
敏感性	地形地貌	海拔		+	0.0219	0.0396	0.0308
		坡度	DEM 提取	+	0.0993	0.1158	0.1122
		地形起伏度		+	0.0382	0.0615	0.0507
	地表	土壤侵蚀强度	RUSLE 模型 <sup>[23]</sup>	+	0.1658	0.1766	0.1790
		景观破碎度	利用土地利用数据基于 Fragstats4.2 软件计算	+	0.0458	0.0475	0.0488
		石漠化敏感性	$S=\sqrt[3]{D\times P\times C}$ <sup>[24]</sup>	+	0.1507	0.1296	0.1462
	气象	平均气温	克里金插值	-	0.0703	0.0885	0.0825
		平均降水量	克里金插值	-	0.0352	0.0734	0.0532
	恢复力	植被覆盖度	像元二分模型 <sup>[25]</sup>	-	0.0703	0.1189	0.0957
		景观恢复力指数	利用土地利用数据基于 Fragstats4.2 软件提取景观格局指数来构建 <sup>[26]</sup>	-	0.0552	0.0078	0.0217
		生态环境质量	RSEI	-	0.0276	0.0642	0.0440
压力度	社会	人口密度	人口数量/土地面积	+	0.0904	0.0351	0.0590
		土地垦殖率	耕地面积/土地面积	+	0.0574	0.0192	0.0348
		人均耕地面积	耕地面积/人口数量	+	0.0720	0.0218	0.0415

2.2.2 生态脆弱性综合评价模型

(1) AHP-熵权法计算指标组合权重。采用层次分析法(AHP)结合 yaahp 10.7 软件计算各指标的主观权重  $W_{1j}$  并经一致性检验。结合现有文献<sup>[27]</sup>,利用熵权法计算各指标的客观权重  $W_{2j}$ ,再根据最小相对信息熵<sup>[28]</sup>求出组合权重  $W_j$ 。

$$W_j=\frac{\sqrt{W_{1j}\times W_{2j}}}{\sum_{j=1}^n\sqrt{W_{1j}\times W_{2j}}}$$

(1)

式中: $W_j$ 为第  $j$  个指标的组合权重值; $W_{1j}$ 为通过 AHP 计算的第  $j$  个指标的权重值; $W_{2j}$ 为通过熵权法计算的第  $j$  个指标的权重值。

(2) FAST 宁静区生态脆弱性评估及分级。采用因子加权叠加模型,将标准化后的各指标值与组合权重进行加权叠加,计算出不同时期 FAST 宁静区生态环境脆弱性指数  $EVI$ <sup>[28]</sup>:

$$EVI=\sum_{j=1}^nW_jZ_j$$

(2)

式中: $EVI$ 为脆弱性指数,值越大脆弱程度越高; $Z_j$ 为评价指标  $j$  的标准化值; $W_j$ 为公式计算的组合权重。为了便于对不同时段 FAST 宁静区生态脆弱性进行比较,对 2000 年、2010 年、2020 年 3 个时期的生态脆弱性结果进行了标准化处理<sup>[29]</sup>。

为了更直观地呈现研究区的生态环境脆弱性状况,结合 FAST 宁静区的自然地理特征,采用自然断点法(Natural Breaks)进行分类,分别取不同年份同

等级上下限阈值的均值作为最终的分类标准<sup>[9]</sup>,将 2000—2020 年  $EVI$  分为微度脆弱( $0<I\leqslant 0.309$ )、轻度脆弱( $0.309<II\leqslant 0.408$ )、中度脆弱( $0.408<III\leqslant 0.497$ )、重度脆弱( $0.497<IV\leqslant 0.596$ )、极度脆弱( $0.596<V\leqslant 1$ ) 5 个等级。为了分析各年份生态环境脆弱性整体变化情况,采用生态环境脆弱性整体指数进行计算<sup>[10]</sup>,公式如下:

$$I_{EVB}=\sum_{i=1}^mP_i\times\frac{A_i}{S_j}$$

(3)

式中: $I_{EVB}$ 为生态脆弱性整体指数; $P_i$ 为脆弱性分级标准值; $A_i$ 为等级  $i$  的面积( $\text{km}^2$ ); $S_j$ 为总面积( $\text{km}^2$ ); $m$ 为脆弱等级数。

2.2.3 情景模拟 基于生态保护优先和乡村振兴需求两种背景进行情景预设,利用 ArcGIS 10.4 软件实现土地利用数据提取及重分类,再根据前文将 14 个指标中变化的指标数据重新计算处理,并按组合权重将标准化后的各指标值加权叠加得到新的生态脆弱性分布图。

3 结果与分析

3.1 2000—2020 年 FAST 宁静区生态脆弱性时空变化特征

经计算得到 FAST 宁静区 2000 年、2010 年、2020 年 3 期生态脆弱性等级分布图(图 2),并统计得到各脆弱性等级面积占比(表 2 和图 3)。由图 2—3、表 2 可

知:(1) 研究区以中度脆弱为主,轻度、中度和重度脆弱区面积总占比达 75.71%,微度和极度脆弱区占比较小。(2) 研究区脆弱性有下降趋势,2000—2020 年研究区脆弱性整体指数由 2.98 降至 2.92,说明 20 a 间 FAST 宁静区整体生态环境状况有所好转;2000 年、2010 年、2020 年研究区极度脆弱区的面积分别为 336.58,325.67,272.13 km<sup>2</sup>,其面积占比逐年减少,表明 2000—2020 年生态环境得到一定保护和改善。(3) 研究区脆弱性变化有一定波动,在 2000 年、2010 年、2020 年,重度脆弱区的面积呈现先增后减的趋势,分别为 647.56,702.34,641.73 km<sup>2</sup>,而轻度脆弱区面积呈现先减后增特点,3 个时段分别为 687.50,659.04,744.12 km<sup>2</sup>,变幅为先减少 4.14%,后增加 12.91%,说明 2010 年是脆弱性比较严重的一年,其主要原因是 2009—2011 年西南喀斯特地区(包括 FAST 所在区域)经历了百年未遇的 3 年连续大旱。(4) 微度脆弱区面积逐年减少,而中度脆弱区由 2000 年的 801.91 km<sup>2</sup>增至 2020 年的 843.02 km<sup>2</sup>,20 a 间增加了 5.13%,主要是由重度脆弱区转入;可见其微度脆弱区存在一定减少趋势,而宁静区地处于喀斯特特殊环境,其生态系统稳定易受干扰,对宁静区生态环境的保护更应予以重视。(5) 从圈层来看,由表 2 可知,中度及以下等级脆弱区在核心区和中间区内的占比逐年增加,极度脆弱和重度脆弱区占比逐年减少,而边远区内中度及以下等级脆弱区占比先减后增,极度脆弱和重度脆弱区先增后减;说明 20 a 间宁静区的生态脆弱性在整体降低,但 20 a 圈层间变幅为核心区>中间区>边远区,主要影响因素是 2016 年 FAST 工程的建成,对核心区生态环境要求极高,出台的相关政策保护措施严格(如核心区禁止各类生产活动,居民要求全部迁出等),核心区生态逐渐转好;而边远区内前 10 a 的变幅为 2.30%,后 10 a 变幅为 3.79%,说明边远区生态在后 10 a 内也逐渐改善。总的来说,20 a 间 FAST 宁静区生态环境脆弱性虽呈“先上升后下降”的波动变化,但生态环境整体上趋于改善恢复的方向发展。

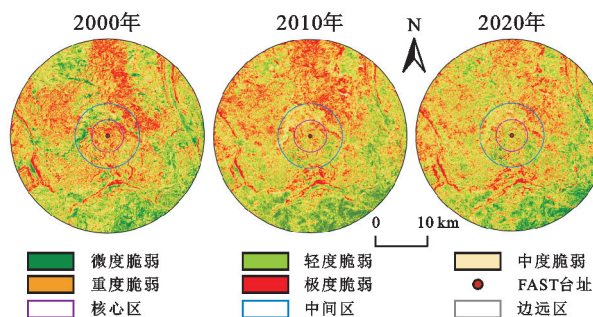


图2 FAST 宁静区脆弱性等级分布

Fig. 2 Distribution map of ecological vulnerability levels in the FAST Tranquility Zone

表2 FAST 宁静区各脆弱性等级面积时间变化

Table 2 Temporal changes in the area of each vulnerability class in the FAST Tranquility Zone

年份	等级	宁静区及各圈层的等级脆弱性面积/km <sup>2</sup>				宁静区 百分比/%
		核心区	中间区	边远区	宁静区	
2000 年	微度	3.44	24.92	320.82	349.17	12.37
	轻度	11.09	47.71	628.70	687.50	24.36
	中度	20.70	67.75	713.45	801.91	28.41
	重度	25.00	61.59	560.97	647.56	22.94
	极度	18.30	33.58	284.70	336.58	11.92
2010 年	微度	3.62	15.56	308.87	328.04	11.62
	轻度	15.36	49.69	593.99	659.04	23.35
	中度	25.53	79.79	702.38	807.71	28.61
	重度	22.91	65.49	613.94	702.34	24.88
	极度	11.11	25.09	289.48	325.67	11.54
2020 年	微度	6.39	19.51	295.48	321.37	11.39
	轻度	20.68	58.68	664.76	744.12	26.37
	中度	25.79	77.37	739.86	843.02	29.87
	重度	18.80	57.00	565.93	641.73	22.74
	极度	6.86	23.06	242.21	272.13	9.64

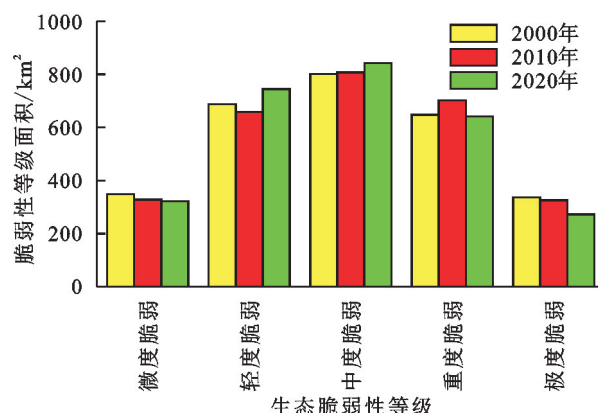


图3 2000—2020 年 FAST 宁静区生态脆弱性等级面积

Fig. 3 Ecological vulnerability class area in the FAST Tranquility Zone from 2000 to 2020

### 3.2 FAST 宁静区脆弱性转化特征

利用 ArcGIS 10.4 中的栅格计算器对 2000 年、2010 年和 2020 年生态脆弱性等级图斑进行叠加运算,得到生态脆弱性等级的转移矩阵并绘制转移图(图 4)。由图 4 可知,2000—2010 年,微度脆弱区升级的区域占比达到 57.81%,主要转换为轻度脆弱区,占微度脆弱区总转出的 51.35%;轻度脆弱区主要向中度脆弱区转化,占总转出的 44.30%,且脆弱性升级的区域占比达到 41.94%;中度脆弱区主要转为轻度脆弱区,占总转出的 44.80%,而转向重度脆弱区的占总转出的 38.29%;重度脆弱区有 58.81%转出为其他脆弱区,主要向中度脆弱区转化,占总转出面积的 56.96%;极度脆弱区主要转入重度脆弱区,占总转出的 78.73%。说明前 10 a 间,部分区域的生态环境存在一定程度改善,但整体的生态环境状况有所恶化。

2010—2020 年,微度脆弱区仅有 30.16% 转出为其他脆弱等级,主要转入轻度脆弱区;轻度脆弱区主要转换为微度脆弱和中度脆弱区,占总转出的 92.27%;转出的中度脆弱区有 61.29% 转化为轻度脆弱区,转出的重度脆弱区有 73.31% 主要向中度脆弱区转入,极度脆弱区有 63.75% 向重度脆弱区转化,说明 2010—2020 年,FAST 宁静区整体生态脆弱性等级降低,生态环境状况持续在改善。2000—2020 年,转出的微

度脆弱区中 54.35% 转化为了轻度脆弱区;中度脆弱区则主要转化为轻度脆弱区,占总转出面积的 48.99%;转出的重度脆弱区中,55.93% 转化为中度脆弱区,22.69% 转化为了轻度脆弱区;极度脆弱区则主要转向为重度脆弱区;表明 2000—2020 年 FAST 宁静区生态环境质量整体呈现改进的趋势,但部分微度脆弱和轻度脆弱区仍面临恶化的趋势,因此仍需要加强 FAST 宁静区生态保护措施的具体实施。

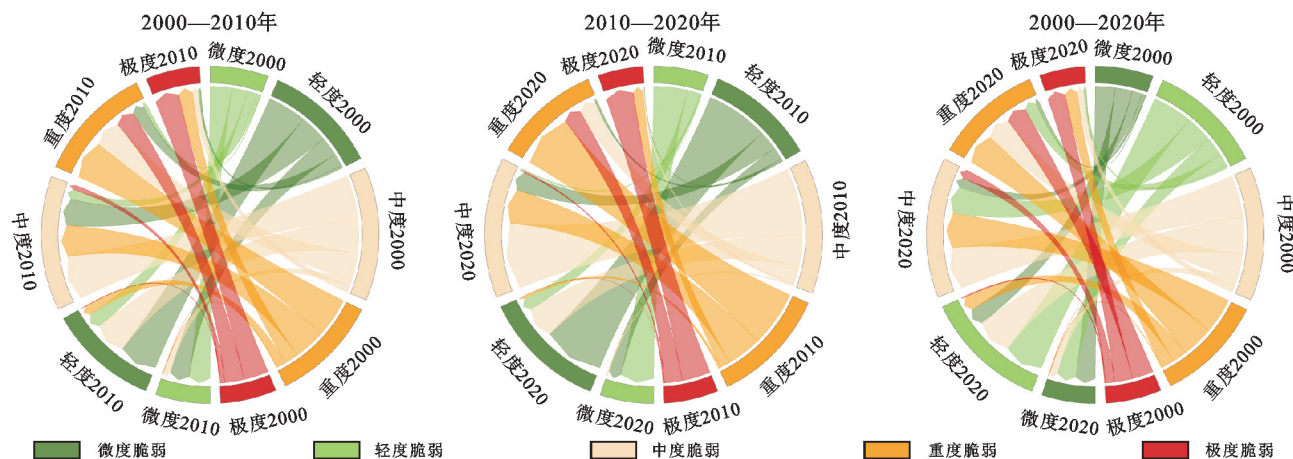


图 4 FAST 宁静区生态脆弱性等级转移图

Fig. 4 Shift map of ecological vulnerability classes in the FAST Tranquility Zone

### 3.3 FAST 宁静区不同圈层生态脆弱性强度时空演变分析

为进一步明确 FAST 宁静区 3 个圈层脆弱性变化在空间上的演替,本文利用 ArcGIS 10.4 软件对 FAST 宁静区的脆弱性结果进行增减分析,得到 FAST 宁静区 2000—2010 年、2010—2020 年、2000—2020 年的动态演变结果(图 5)。(1) 2000—2010 年,核心区生态脆弱性比较好,区域内以稳定区和低度改善区分布为主,占核心区总面积 79.88%,高度改善区与高度恶化区零星分布,低度恶化区远少于低度改善区,而轻度石漠化是低度恶化的主要区域,说明核心区在前 10 a 间生态环境稳定发展。中间区生态环境较好,稳定区和低度改善区占据中间区主要范围,面积占比 68.36%,而恶化区在中间区西北部广泛分布,主要原因是该地区坡度较大,传统农耕活动较强,加剧水土流失。边远区生态脆弱性存在一定上升,稳定区占边远区总面积的 40.78%,低度改善区与低度恶化区分布范围大致相当,但恶化区占比较改善区高 12.22%,而高度恶化区也零星分布在边远区内,恶化区主要影响因素是这些区域石漠化广布、坡度较陡、传统农耕活动较频繁。(2) 2010—2020 年,核心区的生态脆弱性降低,恶化区的面积占比下降,由前 10 a 的 19.57% 下降至 7.12%,而稳定区和低度改善区的面积在上升,由前 10 a 的 79.88% 增至 92.50%,由于 2016 年中国天眼在核心区落

成,对其生态环境要求极高,大力度实施生态移民等保护措施使其生态改善。中间区的生态脆弱性也趋于稳定,主要是稳定区和低度改善区分布面积占比 87.10%,相比于前 10 a 生态也在缓慢转好,西北部的恶化面积相比前 10 a 在减少,因主要位于喀斯特区域,近年来大力实施石漠化治理、传统农耕生产转型(如 2016 年后开始开展天文旅游、2015—2020 年的扶贫攻坚推动山地生态农业+旅游等农业产业新业态发展等),生态环境变化稳定。边远区低度改善区较低度恶化区高 8%,且稳定区占边远区总面积的 59.50%,说明在这 10 a 间其生态环境也在变好,但从分布来看南部部分区域存在恶化的威胁,主要因为南部罗甸县龙坪镇等乡镇近年来城镇化、经济加快发展,集镇周边农业生产活动集中,人为活动对环境的影响加大。(3) 总体来看,FAST 宁静区 2000—2020 年生态环境好转。核心区的恶化区面积占比小,仅占 14.87%,生态处于稳定且改善状态;中间区的稳定区和改善区面积占比都高于恶化区,生态较为稳定,但仍存在生态恶化的威胁,由于紧靠核心区的圈层,应该重视其恶化的风险;边远区虽然稳定区和低度改善区占比高于恶化区,但恶化区的分布也较广,是下一步水土流失(漏失)和石漠化生态治理的重点区域。

### 3.4 生态脆弱性情景预设模拟

(1) 情景 1: 基于生态保护优先情景假定。FAST



宁静区应坚持生态优先保护策略,根据 2020 年土地利用的分布现状,目前 FAST 宁静区坡度大于 15°以上的耕地面积为 253.36 km<sup>2</sup>,占整个研究区 8.98%,预计 2030 年该部分坡耕地全部转化为林地,经重新加权叠加计算得到 2020 年、2030 年生态脆弱性分布对比图(图 6)。由公式(3)计算得到 2030 年 FAST 宁静区生态脆弱性整体指数为 2.76,与 2020 年的 2.92 相比整体下降。结合表 2 和表 3,从时间变化上看,宁静区微度脆弱和轻度脆弱区面积占比相较于 2020 年升高,变幅

分别为 28.32%和 10.03%,尤其西北部和南部等地区变化突出;而中度脆弱以上等级脆弱区面积减少,尤其极度脆弱区减少了 21.84%。从不同圈层看,与 2020 年相比,核心区微度脆弱和轻度脆弱区面积共增加了 11.88%,而重度脆弱和极度脆弱区减少了 8.35%;中间区轻度脆弱区面积增幅为 20.22%,极度脆弱区面积减少 19.67%;边远区中度脆弱以下等级脆弱区面积比例都有所增加,其中微度脆弱区增加了 29.18%,而重度脆弱和极度脆弱下降幅度为 16.67%。

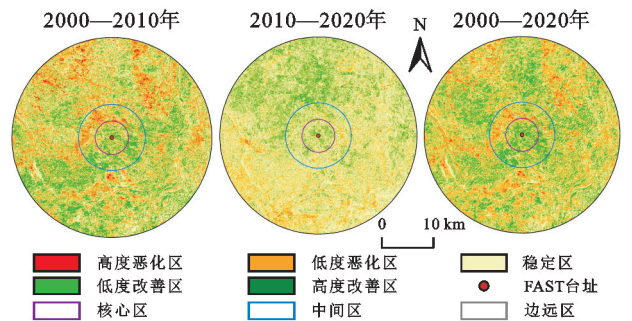


图 5 不同圈层生态脆弱性动态评估

Fig. 5 Dynamic assessment of ecological vulnerability across different zones of the FAST Tranquility Zone

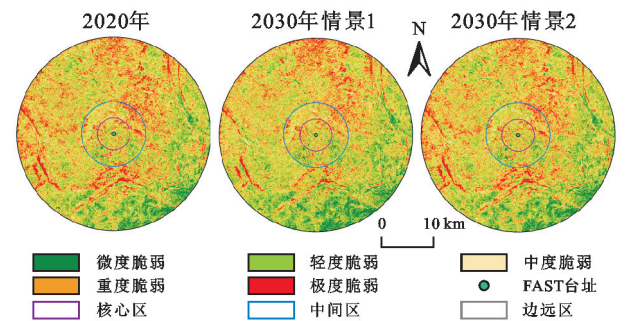


图 6 2020 年、2030 年生态脆弱性分布对比

Fig. 6 Comparative distribution map of ecological vulnerability in 2020 and 2030

表 3 生态保护优先背景下 2030 年 FAST 宁静区生态脆弱性面积

Table 3 Ecological vulnerability area in the FAST Tranquility Zone in 2030 with an emphasis on ecological protection								
等级	核心区		中间区		边远区		宁静区	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
微度	7.22	9.20	23.45	9.95	381.70	15.22	412.39	14.61
轻度	23.07	29.37	64.03	27.18	731.67	29.17	818.77	29.01
中度	24.71	31.47	76.44	32.44	721.35	28.76	822.51	29.14
重度	17.38	22.14	53.16	22.56	485.43	19.35	555.98	19.70
极度	6.14	7.82	18.52	7.86	188.04	7.50	212.70	7.54

(2) 情景 2:基于乡村振兴需求—乡村城镇化快速发展和乡村产业结构升级背景下的情景假定,一方面乡村城镇化会占用部分耕地和低效林草地,一定程度可能加大脆弱性;另一方面乡村产业结构升级会减弱传统农耕对土地尤其是坡耕地的压力,一定程度会减轻脆弱性,促进生态好转。2000—2020 年研究时段内,城乡建设用地明显扩张(主要在耕地、疏林地、中低覆盖草地等区域扩张),面积从 0.79 km<sup>2</sup>增加至 0.94 km<sup>2</sup>再至 19.49 km<sup>2</sup>。2011 年 FAST 工程启动,随着 2016 年建设完成带动宁静区周边乡村城镇化、新农村建设、乡村产业结构升级明显(传统农耕粮油耕种向特色农业如精品果蔬、农旅等转型),2010—2020 年 FAST 宁静区城乡建设用地呈迅速扩张的趋势,其面积共增加 18.55 km<sup>2</sup>,年均扩张速率<sup>[30]</sup>为 10.52%,扩张速度达到 1.85 km<sup>2</sup>/a,扩张强度<sup>[30]</sup>为 0.07%。《黔南州“十四五”新型城镇化发展规划》中

提到 2025 年,全州城镇化持续保持较快增长,城镇化率达到 62%的目标。基于推动城镇化保持快速发展的背景及 2020 年土地利用现状,对 2030 年城乡建设用地年均扩张约 10%,低覆盖草地(2020 年面积为 12.65 km<sup>2</sup>)转换为建设用地,同时山地传统农耕(粮油生产)转化为山地现代生态农业(果蔬、药材、茶叶、农业旅游等)的情景下,进而探讨 FAST 宁静区未来生态脆弱性变化情况。经重新加权叠加计算,得到 2020 年、2030 年生态脆弱性分布对比图(图 6)。由公式(3)计算得到 2030 年 FAST 宁静区生态脆弱性整体指数为 2.87,与 2020 年的 2.92 相比略有改善。结合表 2 和表 4,从面积占比来看,相比于 2020 年微度脆弱和轻度脆弱区增加了 5.99%,重度脆弱和极度脆弱区面积减少 58.61 km<sup>2</sup>,变幅为 6.41%;3 个圈层微度脆弱和轻度脆弱面积占比均增加,而中度以上等级脆弱区占比均下降,且变化比率中间区>边远区>核心区,主要由于低覆盖草地主要分布在中间区,对

其脆弱性变化影响较大。总体来说,基于此情景假定,研究区生态脆弱性整体略有好转,同时又兼顾了乡村振兴需求,建议推荐此种情景下的生态保护与乡村发展模式。

表 4 乡村振兴背景下 2030 年 FAST 宁静区生态脆弱性面积

Table 4 Ecological vulnerability area in the FAST Tranquility Zone in 2030 within the framework of rural revitalization

等级	核心区		中间区		边远区		宁静区	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
微度	7.02	8.94	22.61	9.60	323.34	12.89	352.97	12.50
轻度	21.79	27.75	65.96	28.00	688.60	27.45	776.39	27.51
中度	25.58	32.57	75.56	32.07	736.88	29.38	838.03	29.69
重度	18.12	23.07	51.07	21.68	539.64	21.51	608.81	21.57
极度	6.02	7.67	20.40	8.66	220.02	8.77	246.44	8.73

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) FAST 宁静区生态环境要求特殊,保护工作仍然艰巨,需在现有基础上加强对生态环境的重视。2020 年坡度 15°以上耕地面积占整个研究区 8.98%,所以在保证 FAST 周边生态安全的前提下,15°以上的坡耕地的转变尤为重要,基于此假设模拟也发现,其生态脆弱性整体指数在 2020 年基础上下降 5.91%。说明需改变传统农耕方式,重点发展生态友好型、套种、循环农业等生态型高效生产模式,实现保护坡耕地与满足农民粮食需求的协调发展;基于情景 2 假设也发现其生态脆弱性也有所降低,有利于生态保护和经济协调发展,所以未来要落实完成传统农耕(粮油生产)转化为山地现代生态农业(果蔬、药材、茶叶、农业旅游等)。

(2) 通过对 FAST 宁静区 20 a 来生态脆弱性变化分析,其整体生态环境质量呈先增后减趋势,生态保护有一定成效,但 FAST 宁静区过去一直属于贵州贫困程度最深、脱贫难度最大的区域之一,脱贫成果巩固拓展与乡村振兴仍须加快推进。基于此提出以下建议:核心区作为重点保护区,需尽快落实 3~5 km 内 3 500 多名原住居民的移民搬迁与否问题,以便于推进后续长期发展规划或尚未搬迁村寨的美丽乡村建设;核心区内以 FAST 为中心的“天文旅游”知名度、影响力需增强,游客多以省内游客为主、停留时间短,难以促使周边村镇乡村经济突破,淡季和旺季落差大,集体经济易受波动;在解决台址周边村寨经济问题的同时,仍需加强宁静区监测设施的保护及严禁诸如砍伐树木等破坏活动的宣传,提高当地村民的保护意识,避免对 FAST 的安全环境造成不必要的影响;中间区合理规划土地利用资源,继续升级发展天文旅游,推动山地生态农业+天文旅游、“农旅+”(果旅、茶旅等)等新业态发展等,巩固脱贫攻坚拓展;加强对西北

部的石漠化生态治理等工作,严格管制新建设工程项目开展及新村镇的扩建;边远区面积占比大且位于 FAST 最外围,可落实 15°以上坡耕地的退耕转型,降低区域地表破碎化程度,同时加强对边阳镇、龙坪镇、沫阳镇等乡镇的水土流失及石漠化生态治理工作;转型发展山地特色经果林(如白茶、火龙果、蚕桑、蜂糖李等),深入挖掘地方资源优势,多途径引入资金与技术,完善产业内部的基础设施(路网、仓储、水网等)建设,精准推进“一村一品”,促使农民增收。

(3) 由于宁静区范围较小及数据的局限性,缺少采用社会、经济等方面的压力指标如单位面积农药或化肥施用量、农业产值占比、人均纯收入等指标,故而对研究区生态环境脆弱性评价结果有一定影响,有待在后期的研究中完善和深入。

4.2 结论

(1) 从 FAST 宁静区生态脆弱性演变特征来看,生态脆弱性整体以中度脆弱为主,2000—2020 年,高强度生态脆弱区主要向较低等级转化,前 10 a 年生态脆弱性略有上升,而后 10 a 生态脆弱性明显降低,整体上生态环境呈改善趋势。

(2) 从不同圈层生态脆弱性差异看,核心区在 20 a 间的生态恶化区占比很小且生态环境改善明显,中间区、边远区后 10 a 相比前 10 a 整体生态在缓慢转好,但中间区和边远区的局部区域(传统坡耕地农耕区)存在恶化上升的风险。

(3) 基于生态优先和乡村振兴需求两种情景模拟,两种情景下生态脆弱性都有所降低,但前者生态保护效果更优,而后者兼顾了生态保护和乡村发展需求,建议推荐后者发展模式。

参考文献 (References):

[1] 辛亮,苏维词.基于景观格局的 FAST 宁静区生态风险时空演变分析[J].中国环境科学,2023,43(10):5475-5487.  
Xin L, Su W C. Spatial and temporal evolution of eco-



- logical risk in FAST Radio Quiet Zone based on landscape pattern[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(10):5475-5487.
- [2] 郭兵,孔维华,姜琳.西北干旱荒漠生态区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. 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.
- [3] 郭婧,魏珍,任君,等.基于熵权灰色关联法的高寒贫困山区生态脆弱性分析:以青海省海东市为例[J].*水土保持通报*,2019,39(3):191-199.
- Guo J, Wei Z, Ren J, et al. Analysis on ecological vulnerability in high-cold and poverty-stricken mountainous areas based on entropy and gray correlation methods: a case study in Haidong City, Qinghai Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(3):191-199.
- [4] 张军民,荣城,董国松.2000—2020 年漓江流域景观生态脆弱性时空分异[J].*水土保持研究*,2022,29(5):283-292.
- Zhang J M, Rong C, Dong G S. Spatiotemporal differentiation of landscape ecological vulnerability in Lijiang River Basin from 2000 to 2020[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5):283-292.
- [5] Cai X R, Li Z Q, Liang Y Q. Tempo-spatial changes of ecological vulnerability in the arid area based on ordered weighted average model [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 133:108398.
- [6] 王鹏,赵微,柯新利.基于 SRP 模型的潜江市生态脆弱性评价及时空演变[J].*水土保持研究*,2021,28(5):347-354.
- Wang P, Zhao W, Ke X L. Evaluation and spatiotemporal evolution of ecological vulnerability of Qianjiang based on SRP model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(5):347-354.
- [7] 王志杰,苏媛.南水北调中线汉中市水源地生态脆弱性评价与特征分析[J].*生态学报*,2018,38(2):432-442.
- Wang Z J, Su Y. Analysis of Eco-environmental vulnerability characteristics of Hanzhong City, near the water source midway along the route of the south-to-north water transfer project, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2):432-442.
- [8] 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 T, Zhang X, Zhou Y, 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.
- [9] 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.
- [10] 王茜,赵筱青,普军伟,等.滇东南喀斯特区域生态脆弱性的时空演变及其影响因素[J].*应用生态学报*,2021, 32(6):2180-2190.
- Wang Q, Zhao X Q, Pu J W, et al. Spatial-temporal variations and influencing factors of eco-environment vulnerability in the karst region of Southeast Yunnan, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(6):2180-2190.
- [11] Hu X J, Ma C M, Huang P, et al. Ecological vulnerability assessment based on AHP-PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial autocorrelation for ecological protection: a case of Weifang City, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125:107464.
- [12] Xia M, Jia K, Zhao W W, et al. Spatio-temporal changes of ecological vulnerability across the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 123:107274.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Guo B, Zang W Q, Luo W. Spatial-temporal shifts of ecological vulnerability of Karst mountain ecosystem—impacts of global change and anthropogenic interference [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 741:140256.
- [16] 金丽娟,许泉立.基于 SRP 模型的四川省生态脆弱性评价[J].*生态科学*,2022,41(2):156-165.
- Jin L J, Xu Q L. Ecological vulnerability assessment of Sichuan Province based on SRP model[J]. *Ecological Science*, 2022, 41(2):156-165.
- [17] 王茜,赵筱青,普军伟,等.喀斯特山区土地利用变化对生态脆弱性的影响[J].*山地学报*,2022,40(2):289-302.
- Wang Q, Zhao X Q, Pu J W, et al. Impact of land use

- changes in karst mountain area on ecological vulnerability[J]. *Mountain Research*, 2022,40(2):289-302.
- [18] 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.
- [19] 张霞,周忠发,朱昌丽,等.喀斯特山区生态脆弱性与经济贫困的耦合关系:以贵州省荔波县为例[J].*水土保持通报*,2020,40(5):227-233.  
Zhang X, Zhou Z F, Zhu C L, et al. Coupling relation between ecological vulnerability and economic poverty in karst mountain area: a case study at Libo County of Guizhou Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020,40(5):227-233.
- [20] 崔国屹,张艳,晁阳,等.秦岭地区近 40 年土地利用变化及其生态环境效应[J].*水土保持研究*,2023,30(1):319-326.  
Cui G Y, Zhang Y, Chao Y, et al. Land use change and eco-environmental effects in Qinling Mountains in recent 40 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(1):319-326.
- [21] 王永祥,徐园园,杨佳嘉,等.基于 Landsat 的重庆市生态环境质量动态监测及其时空格局演变分析[J].*生态学报*,2023,43(15):6278-6292.  
Wang Y X, Xu Y Y, Yang J J, et al. Dynamic monitoring and spatio-temporal pattern evolution analysis of eco-environmental quality in Chongqing based on remote sensing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(15):6278-6292.
- [22] 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.
- [23] 陈峰,李红波.基于 GIS 和 RUSLE 的滇南山区土壤侵蚀时空演变:以云南省元阳县为例[J].*应用生态学报*, 2021,32(2):629-637.  
Chen F, Li H B. Spatial-temporal variations of soil erosion in southern Yunnan mountainous area using GIS and RUSLE: a case study in Yuanyang County, Yunnan Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021,32(2):629-637.
- [24] 陈康富,吴隽宇.粤港澳大湾区城市群生态保护优先区识别研究[J].*生态学报*,2023,43(10):3855-3868.  
Chen K F, Wu J Y. Identification of ecological conservation priority areas in urban agglomeration of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(10):3855-3868.
- [25] 武爽,冯险峰,孔玲玲,等.气候变化及人为干扰对西藏地区草地退化的影响研究[J].*地理研究*,2021,40(5):1265-1279.  
Wu S, Feng X F, Kong L L, et al. Effects of climate variation and human activities on grassland degradation in Tibet [J]. *Geographical Research*, 2021, 40 (5): 1265-1279.
- [26] 孙桂丽,陆海燕,郑佳翔,等.新疆生态脆弱性时空演变及驱动力分析[J].*干旱区研究*,2022,39(1):258-269.  
Sun G L, Lu H Y, Zheng J X, et al. Spatio-temporal variation of ecological vulnerability in Xinjiang and driving force analysis[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(1):258-269.
- [27] He D, Hou K, Li X X, et al. A reliable ecological vulnerability approach based on the construction of optimal evaluation systems and evolutionary tracking models[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023,419:138246.
- [28] 周玲美,王世航,权玲.基于遥感和地理信息系统的内蒙古呼日查干淖尔地区生态脆弱性评价[J].*生态与农村环境学报*,2021,37(4):484-491.  
Zhou L M, Wang S H, Quan L. Ecological vulnerability assessment in Huri Chagannoor of Inner Mongolia based on RS and GIS technology[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021,37(4):484-491.
- [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] 肖欢,员学锋,杨悦,等.西安市建设用地扩张与生境质量变化及其耦合协调关系研究[J].*干旱区资源与环境*,2023,37(10):56-64.  
Xiao H, Yuan X F, Yang Y, et al. Relationships between construction land expansion and habitat quality change and coupling coordination in Xi'an[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023,37(10): 56-64.