

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.043.

彭丽福, 赵宇鸾, 杨小飘. 北盘江流域社会生态系统脆弱性时空演变与模拟[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 316-325.

Peng Lifu, Zhao Yuluan, Yang Xiaopiao. Spatiotemporal Evolution and Simulation of Social-Ecological System Vulnerability in the Beipanjiang River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 316-325.

# 北盘江流域社会生态系统脆弱性时空演变与模拟

彭丽福<sup>1</sup>, 赵宇鸾<sup>1,2</sup>, 杨小飘<sup>1</sup>

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550025;

2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵阳 550025)

**摘要:** [目的] 评估和模拟北盘江流域社会生态系统脆弱性, 对筑牢珠江上游生态屏障、实现流域可持续发展具有重要意义。[方法] 采用显式空间脆弱性模型, 从暴露度、敏感性、适应能力 3 个维度构建评价指标体系, 评估北盘江流域脆弱性, 并使用有序加权平均算子模拟不同决策风险下的脆弱性情景。[结果] (1) 2000—2020 年, 北盘江流域脆弱性程度明显下降, 高脆弱区面积占比由 13.82% 降到 8.37%, 低脆弱区面积占比由 10.66% 增加到 17.62%。(2) 20 年间北盘江流域社会生态系统脆弱性整体处于中等脆弱水平, 平均占比 32%, 空间变化呈现“西北、东南低, 中部高”的分布格局。(3) 从情景模拟分析上看, 在可持续导向型中应重视风险环境的胁迫, 加强生态环境保护与适应能力建设, 在经济优先型中应强调发展与保护并重, 加强绿色基础设施建设, 缓解系统脆弱性。[结论] 北盘江流域脆弱性程度明显降低, 情景模拟结果可满足不同政策指导下的流域发展需要, 并为北盘江流域国土空间生态修复和区域可持续发展提供理论参考。

**关键词:** 社会生态系统; 脆弱性; 显式空间脆弱性模型; 北盘江流域

中图分类号: X24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0316-10

## Spatiotemporal Evolution and Simulation of Social-Ecological System Vulnerability in the Beipanjiang River Basin

Peng Lifu<sup>1</sup>, Zhao Yuluan<sup>1,2</sup>, Yang Xiaopiao<sup>1</sup>

(1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China; 2. State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** [Objective] The aim of this study is to assess and model the vulnerability of social-ecological systems in the Beipanjiang River Basin, which is of great significance for building an ecological barrier in the upper reaches of the Pearl River and realizing sustainable development in the basin. [Methods] An explicit spatial vulnerability model was used to construct an evaluation index system from three dimensions, namely, exposure, sensitivity, and adaptive capacity, to assess the vulnerability of the Beipanjiang River Basin, and to simulate the vulnerability scenarios under different decision-making risks using an ordered weighted average operator. [Results] (1) From 2000 to 2020, the vulnerability of the Beipanjiang River Basin decreased significantly, with the proportion of highly vulnerable areas decreasing from 13.82% to 8.37%, and the proportion of low vulnerable areas increasing from 10.66% to 17.62%. (2) The overall vulnerability of social-ecological system in the Beipanjiang River Basin in the past 20 years was at a medium level, accounting for 32% on average, and the spatial variation showed the distribution pattern of low level in the northwest and southeast, high level in the middle. (3) From the perspective of scenario simulation analysis,

收稿日期: 2023-07-10

修回日期: 2023-08-22

资助项目: 贵州省自然科学基金重点项目“贵州喀斯特山区社会—生态系统演变与土地利用优化研究”(黔科合基础-ZK[2023]重点 027); 贵州科技创新基地建设项目“国家喀斯特石漠化防治与绿色发展技术创新中心”(黔科合中引地[2023]005)

第一作者: 彭丽福(1998—), 女, 贵州盘州人, 硕士研究生, 主要从事山区社会生态系统方面的研究。E-mail: 923258278@qq.com

通信作者: 赵宇鸾(1985—), 男, 江西丰城人, 博士, 教授, 主要从事土地利用与山区发展研究。E-mail: zhaoyl.09b@ignsnr.ac.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

the attention should be paid to the stress of risk environment, the construction of ecological environment protection and adaptive capacity should be strengthened, and both development and protection in the economic priority model should be emphasized, green infrastructure to ease systemic fragility should be strengthened. [Conclusion] The degree of vulnerability of the Beipanjiang River Basin is significantly reduced, and the results of the scenario simulation can meet the needs of watershed development under the guidance of different policies and provide theoretical references for the ecological restoration of the land space in the Beipanjiang River Basin and the sustainable development of the region.

**Keywords:** social-ecological system; vulnerability; spatially explicit resilience vulnerability; Beipanjiang River Basin

随着全球环境变化以及频繁的人类活动,导致生态环境脆弱、自然资源短缺等问题突出,严重阻碍区域可持续发展,社会生态系统面临巨大挑战<sup>[1-2]</sup>。在此背景下,脆弱性逐渐成为区域可持续发展研究领域的重点和热点内容<sup>[3]</sup>。对于脆弱性概念的解释,不同学者之间存在差异,随着研究的不断深入,普遍认为脆弱性是指复合系统受到多要素影响的程度<sup>[3-6]</sup>。脆弱性最早侧重于自然生态系统方面<sup>[6]</sup>,随着人类社会活动对自然环境的干扰不断增强,脆弱性研究逐渐从单一系统向复合系统转变<sup>[3]</sup>,用系统性的观点看待人类社会与自然环境之间的关系成为主流,仅从单一系统来研究区域脆弱性已不符合实际发展的需要<sup>[7-8]</sup>。目前识别社会生态系统脆弱性成为可持续研究的重点议题之一,社会生态系统具有不可预期、自组织、非线性、多稳态、阈值效应、历史依赖等特征<sup>[8-9]</sup>,是社会系统和生态系统之间的耦合,重点强调人类社会与自然环境之间是相互联系、不可分割的<sup>[1,10]</sup>,研究关注二者的整体性动态评估及彼此的相互作用<sup>[11-13]</sup>,体现了地理学研究核心。因此,从整体性、系统性、多学科角度进行脆弱性研究极具可行性和必要性。

从研究领域来看,脆弱性最开始应用于自然灾害领域<sup>[3]</sup>,20世纪80年代脆弱性研究热点集中在气候变化与生态环境领域<sup>[14]</sup>,进入21世纪后脆弱性研究聚焦于人口、经济、资源等特定领域的脆弱性问题<sup>[6,15-16]</sup>。从研究区域来看,脆弱性主要以干旱、半干旱区<sup>[17-18]</sup>、山区<sup>[19]</sup>、城区<sup>[20]</sup>为主,对喀斯特区域研究较少,且缺乏对社会生态系统的研究,主要从农业旱灾、农户生计<sup>[21]</sup>、乡村旅游<sup>[19]</sup>、经济带发展<sup>[22]</sup>等单一角度出发。从评价类型来看,脆弱性评价大致可分为综合指数法、图层叠置法、脆弱性函数模型评价法、模糊物元评价法以及危险度分析<sup>[3]</sup>。随着系统理论研究的不断发展,脆弱性评价理论及模型逐步从单一化向综合性发展。从理论框架来看,VSD(Vulnerability Scoping Diagram)评价框架将脆弱性分解为暴露度、敏感性和适应能力3个维度<sup>[23]</sup>,具有较强的逻辑

性与规范性,能够解决传统脆弱性指标信息不易被归纳以及数据处理冗杂等问题<sup>[17,22,24]</sup>。从方法应用成果来看,SERV(Spatially explicit resilience vulnerability)模型对于评价指标针对性不强、目标定位不清晰等问题,能够有针对性制定策略措施<sup>[17,25-26]</sup>,OWA(ordered weighted averaged)情景分析能够基于决策者的不确定偏好,模拟不同发展模式下的社会生态系统脆弱性差异,灵活性更强,并逐渐成为情景模拟分析中最常用的手段之一<sup>[27-28]</sup>。

北盘江流域地处滇桂黔石漠化片区,流域内水土流失、石漠化问题严重,经济社会发展仍然欠发达,人地相互作用强烈,社会生态系统脆弱。因此,本文将2000—2020作为关键研究时段,以北盘江流域为例,将VSD理论框架与SERV模型相结合,评估该流域社会生态系统脆弱性的时空演变过程,并利用OWA算法对其进行未来发展情景模拟,以期为喀斯特山区未来社会生态系统可持续发展提供参考。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

北盘江属于珠江流域西江水系的一级支流,处于北纬 $24^{\circ}50'$ — $26^{\circ}49'$ ,东经 $103^{\circ}45'$ — $106^{\circ}20'$ 。年均降雨量900~1300 mm,上游威宁、水城一带为少雨区,下游黔西南州为多雨区。气温西北低,东南高,平均气温 $16^{\circ}\text{C}$ 。流域面积 $26\,557\text{ km}^2$ ,其中,贵州省内流域面积最大,占比约78%,流经毕节市、六盘水市、安顺市和黔西南州。流域地处滇桂黔石漠化片区,可溶岩大量出露。地势西北高,东南低,落差2000 m以上,地势起伏大,上游为喀斯特高原地貌,中游以深切峡谷为主,下游以岩溶谷地、低山、丘陵为主,喀斯特地貌类型多样。北盘江流域人口多,聚居着布依族、苗族、彝族等少数民族。该流域以农业为主,有耕地面积 $5\,474\text{ km}^2$ ,水田面积 $1\,807\text{ km}^2$ ,是旱地集中区域之一。水利条件差,有效灌溉面积 $554\text{ km}^2$ ,多集中在安顺、镇宁、贞丰、盘县一带丘陵区。

在2000—2020年,北盘江流域建设用地面积增加约310 km<sup>2</sup>,城市化快速发展,林地面积有所减少,但整体占比仍较大。总之流域内自然、人文景观丰富,社

会经济发展快速,但水土流失、石漠化等生态问题严重,频繁的人类活动导致人地矛盾突出,是研究流域社会生态系统脆弱性的典型案例(图1)。

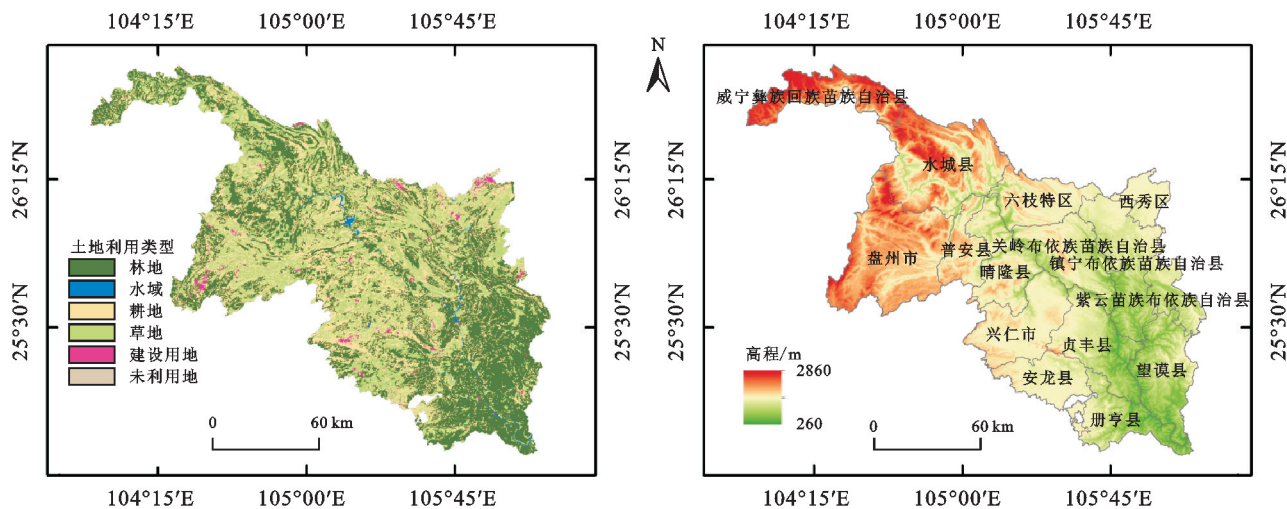


图1 贵州省北盘江流域土地利用类型以及高程分布

Fig. 1 Land use types and elevation distribution in the Beipanjiang River Basin, Guizhou Province

## 1.2 数据来源与处理

采用3期(2000—2020年,每10年1期)土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>),分辨率30 m。数字高程模型数据和Landsat8 OLI和Landsat5 TM数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>),在ArcGIS 10.2中基于高程数据利用坡度分析工具获得坡度数据,对于Landsat8 OLI和Landsat5 TM遥感影像数据,针对处理效果不佳或数据缺失的情况,选取最近年份的影像进行补充,利用ENVI 5.3软件对影像进行相关预处理,进行前期数据准备,在ArcGIS 10.2中利用分析工具,将预处理后的图像进行融合得到不同石漠化等级图,并利用研究区土地利用现状图、水文地质图、地形图、土壤图以及野外收集数据等相关资料进行验证,解译精度达82.5%,符合研究要求。年平均降水量数据来源于国家气象科学数据共享服务平台—中国地面气候资料数据集(<http://data.cma.cn>);人口数据、GDP数据、化肥施用量、医疗资源教育资源,造林面积等社会经济数据来源于2000年、2010年、2020年3个年度《中国县域统计年鉴(县市卷)》和所涉及省、市、县的统计年鉴与国民经济与社会发展公报,将评价指标中的社会经济统计数据插值处理,然后对所有处理后的单项指标进行5级分类的数据标准化处理,建立评价指标体系数据库。所有数据均通过ArcGIS 10.2软件进行插值(反距离权重法)、投影(WGS\_1984\_UTM\_Zone\_48 N)以及空间分辨率(30 m×30 m)一致性转换。

## 1.3 研究方法

1.3.1 社会生态系统脆弱性评价指标体系构建 根据VSD理论框架,将北盘江流域社会生态系统脆弱性分为暴露度、敏感性及适应能力3个层次。暴露度反映系统受外界干扰或危害的程度<sup>[22]</sup>,北盘江流域暴露源主要来自人类活动干扰,可通过人口密度、化肥施用量、建设用地比重等方面来体现;敏感性反映系统抗干扰的能力<sup>[17]</sup>,北盘江流域敏感性主要体现在石漠化、水土流失、人口结构等方面,可通过景观格局、石漠化程度、植被覆盖度、人口结构以及居民生活水平等方面来反映;适应能力反映系统能够适应威胁的能力或者从威胁造成的后果中恢复的能力<sup>[17-18]</sup>,且这种能力可在人为作用下得到提升,因此,可通过社会经济发展水平和生态恢复等方面来表征。综上分析,参考已有研究成果<sup>[17,22,26]</sup>,构建如下指标体系(表1)。

在YAAHP10.5软件中采用层次分析法确定各指标权重,通过1~9标度法构建指标层判断矩阵,并将判断矩阵结果进行一致性检验,得到暴露度、敏感性以及适应能力的一致性比率分别为0.060 6,0.029 3,0.047 4,均小于0.10,说明社会生态系统脆弱性指标权重计算合理。

1.3.2 社会生态系统脆弱性评估——SERV模型 基于VSD理论框架,将SERV模型与空间信息相结合,从3个维度评估北盘江流域脆弱性,反映区域脆弱性时空差异及特征<sup>[4,26]</sup>。其计算公式如下:

$$V=(E+S)-AC \quad (1)$$

式中:V代表脆弱性;E代表暴露度;S代表敏感性;AC代表适应能力。



表 1 北盘江流域社会生态系统脆弱性评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of social-ecological system vulnerability in Beipanjiang River basin

准则层	要素层	指标层	权重	性质层
暴露度	生态环境	化肥施用量	0.2686	+
		年平均降雨量	0.0350	+
		坡度	0.0599	+
	社会经济	人口密度	0.3653	+
		建设用地比重	0.1658	+
		地方特点指标	≥25°耕地比重	0.1056
敏感性	生态环境	景观破碎度	0.0582	+
		植被覆盖率	0.0944	—
		65 岁以上人口比	0.3419	+
	社会经济	0~14 岁人口比	0.2461	+
		女性人口比	0.0204	+
		恩格尔系数	0.0405	+
适应能力	地方特点指标	农林牧渔业增长率	0.0318	—
		石漠化程度	0.1622	+
		有效灌溉面积	0.0869	—
	生态环境	林地占比	0.1945	—
		人均 GDP	0.3725	—
		社会经济	每千人卫生床位数	0.0616
地方特点指标	每千人学校数	0.0414	—	
	造林面积	0.2433	—	

1.3.3 多情景模拟——有序加权平均算子 有序加权平均算子(ordered weighted averaged,OWA)能够模拟不同决策风险对系统脆弱性变化的影响,多情景呈现研究区社会—生态系统脆弱性空间,进行不同决策策略的对比研究<sup>[27-29]</sup>。OWA 算法计算公式如下:

$$OWA_i = \sum_{j=1}^n (\frac{u_j v_j}{\sum_{j=1}^n u_j v_j}) z_{ij} \tag{2}$$

式中: $z_{ij}$  为任意地理空间位置  $i$  处,某一评价指标  $j$  所对应的属性值; $u_j$  为准则权重, $v_j$  为次序权重。其中,准则权重  $u_j$  采用层次分析法;次序权重  $v_j$  采用模糊量化模型<sup>[29]</sup>, $j=1,2,3,\cdots,n$ ,计算公式如下:

$$v_j = (\sum_{k=1}^j w_k)^\alpha - (\sum_{k=1}^{j-1} w_k)^\alpha \tag{3}$$

式中: $\alpha(\alpha>0)$  为决策风险系数,取决于决策者对决策风险的态度。 $w_k$  代表指标重要性程度,其中  $k=1,2,3,\cdots,n$ ,计算公式如下:

$$w_k = \frac{n - r_k + 1}{\sum_{l=1}^k (n - r_l + 1)} \tag{4}$$

式中: $n$  为指标数量; $r_k$  按照指标值大小对指标重要性进行赋值,最大值取 1,次大值取 2,以此类推,最小值取  $n$ 。

2 结果与分析

2.1 北盘江流域社会生态系统暴露度、敏感性与适应能力

根据研究区暴露度、敏感性与适应能力 3 个维度的指标选取情况,采用 ArcGIS 中的栅格计算器进行加权运算。分析结果可知,研究区 2000—2020 年暴露度空间变化整体较稳定,而敏感性的空间变化与暴露度大致相反,适应能力指数整体偏高,空间变化较大(图 2)。时间维度上,北盘江流域暴露度指数整体呈平稳趋势,研究期内暴露度平均指数稳定在 2.71 左右,但高值区范围有所增加。2000—2010 年敏感性低值区范围明显增多,高值区下降,2010—2020 年敏感性指数整体提高,平均指数从 2.86 增加到 3.10,但低值区范围减小。适应能力指数整体偏高,平均指数均在 3.23 以上,2000—2010 年适应能力指数呈下降趋势,2010—2020 年高值区范围增加,低值区范围分布更为分散。

空间维度上,北盘江流域地势西北高,东南低,对比 20 年间暴露度空间变化格局可知,暴露度空间分布与地势地貌走向具有相关性,高值区处于流域上游,地势高,上游的六盘水市是矿产资源型城市,开发强度较高,人口、产业集聚,暴露度高,低值区集中在东南部流域下游,地势较低,以岩溶谷地、低山、丘陵为主,经济发展水平较低、工业基础薄弱、林地占比高,暴露度低。敏感性的空间分布与暴露度相反,整体空间分布呈现西北低东南高变化趋势。适应能力分布相对复杂,空间分布变化较大,2000 年整体上西北低,东南高;2010 年大致以北盘江主干流为界,西侧低,东侧高;2020 年适应能力西北部较高,东南部较低,高值区集中在中部,低值区较为分散。

2.2 北盘江流域社会生态系统脆弱性时空特征分析

2.2.1 脆弱性动态时空演变 北盘江流域 20 年来脆弱性程度有明显下降,高脆弱区面积占比由 13.82%降到 8.37%(图 3,图 4),低脆弱区面积占比由 10.66%增加到 17.62%;较高脆弱区面积呈现先上升后下降的趋势,前 10 a 增幅约 5%,后 10 a 降幅近 3%。中脆弱区在研究期间所占面积都是最大的,分别为  $8.08\times 10^3\text{ km}^2$ ,  $6.07\times 10^3\text{ km}^2$ ,  $6.21\times 10^3\text{ km}^2$ ,但呈现先下降后上升的趋势;低脆弱区和较低脆弱区面积呈现增加趋势,分别增加了  $1.45\times 10^3\text{ km}^2$ ,  $1.05\times 10^3\text{ km}^2$ ,说明北盘江流域社会生态系统脆弱性明显转好。

2000—2010 年中脆弱区向较高脆弱区转移的面积最大,为  $2.33\times 10^3\text{ km}^2$ ,其次为较低脆弱区向中脆弱区转移  $1.46\times 10^3\text{ km}^2$ ;高脆弱区向低脆弱区转移

面积最低;高等级脆弱区向低等级脆弱区共转移  $5.81 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,低等级脆弱区向高等级脆弱区转移  $6.48 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。说明流域社会生态系统脆弱性程度有所增加,但增幅较小。2010—2020 年较高脆弱区向中脆弱区转移面积最多,为  $1.99 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,其次为中脆弱

区向较低脆弱区转移  $1.69 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,低脆弱区向高脆弱区转移面积最低;2010—2020 年,高等级脆弱区向低等级脆弱区共转移  $7.21 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,低等级脆弱区向高等级脆弱区转移  $3.53 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,系统脆弱性得到明显缓解。

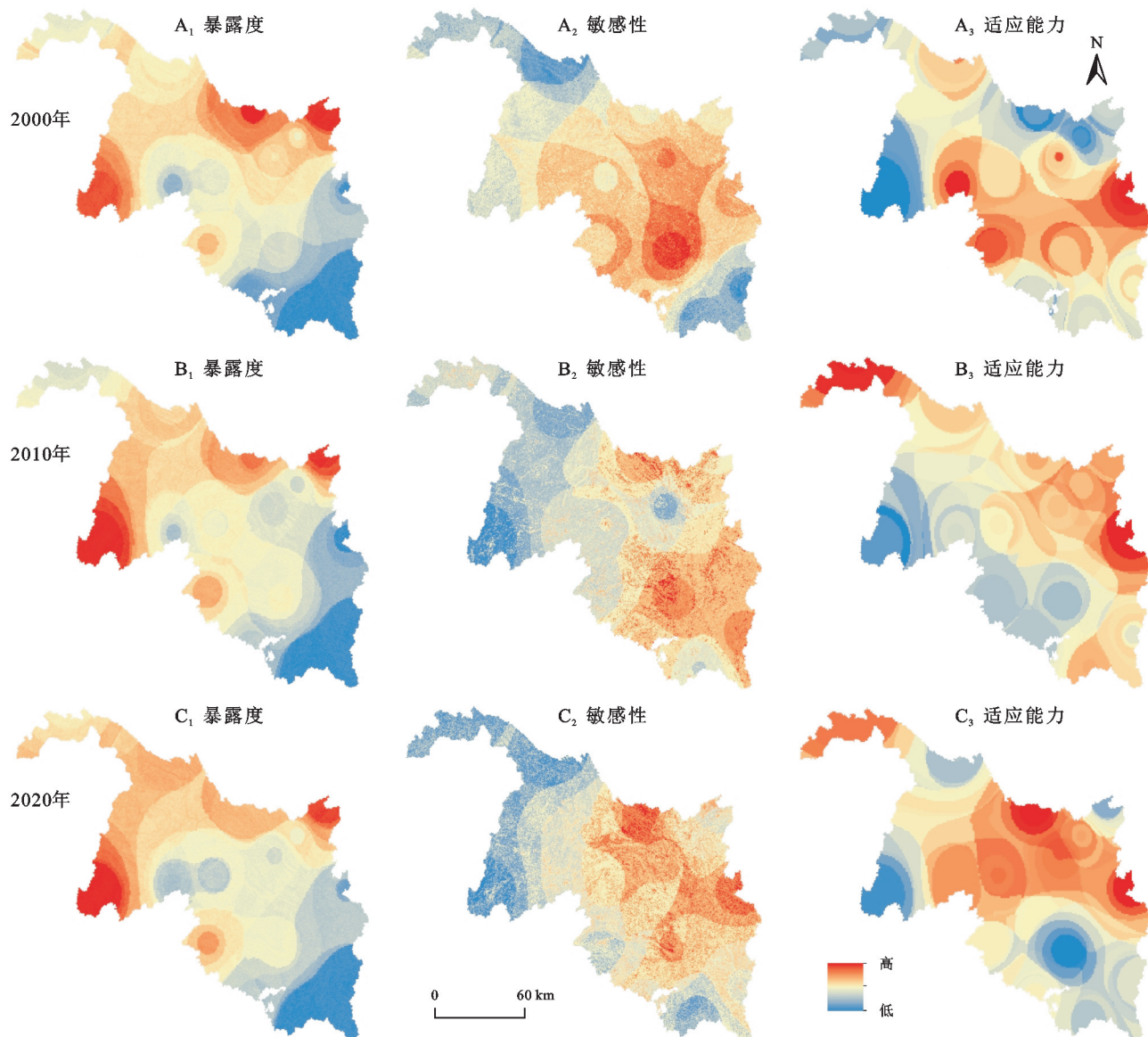


图 2 2000—2020 年北盘江流域暴露度、敏感性和适应能力

Fig. 2 Exposure, sensitivity and adaptive capacity in Beipanjiang River Basin, 2000—2020

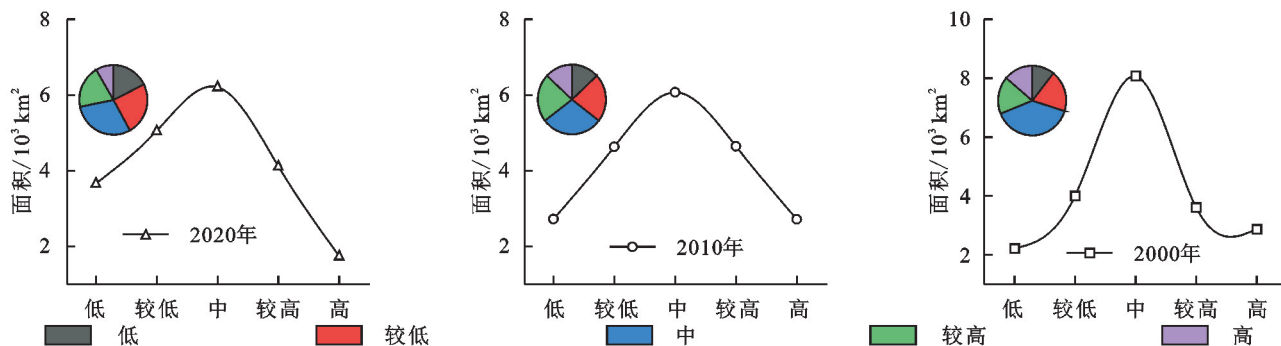


图 3 北盘江流域社会生态系统脆弱性等级面积及占比

Fig. 3 Area and proportion of social-ecological system vulnerability classes in the Beipanjiang River Basin

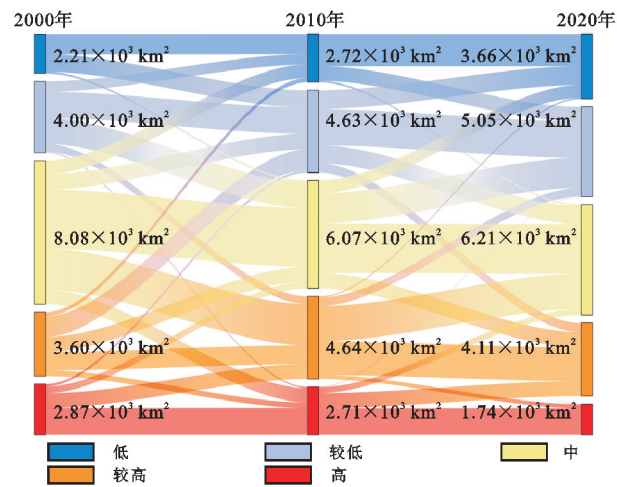


图 4 2000—2020 年北盘江流域社会生态系统脆弱性转移矩阵  
Fig. 4 Transition matrix of social-ecological system vulnerability in Beipanjiang River Basin from 2000 to 2020

2.2.2 脆弱性空间分布 为更直观反映北盘江流域社会生态系统脆弱情况,采用自然断点法将脆弱性等级分为 5 类,分别为低、较低、中、较高和高(图 5)。北盘江流域 20 年间社会生态系统脆弱性整体处于中

等脆弱水平,空间变化上呈现“西北、东南低,中部高”的分布格局,低、较低脆弱区呈现增加的趋势,高脆弱区呈现减少的趋势。

低脆弱区空间分布变化较大,2000—2010 年呈现出由东南部逐渐向北移的变化趋势,2010 年后低脆弱区向中部扩展,主要分布在开发强度不高,适应能力较强,人地关系相对和谐的册亨县、望谟县及威宁县等区域。中脆弱区空间分布逐渐分散,且脆弱性斑块增多,20 年间中脆弱区逐渐由北部、西南部的集中成片分布演变为向中部集中,但更为分散。高脆弱区范围逐渐缩小,呈现出由西部盘州—东部西秀分布格局向西部盘州—东部西秀—南部贞丰演变的特征。对比北盘江流域 2000—2020 年土地利用类型数据可知,高脆弱区与建设用地的空间分布情况具有相似性,盘州市是中国西南地区重要的能源基地,资源利用方式粗放,造成生态环境破坏,进一步加剧社会生态系统脆弱性;西秀区处于市中心,人口、产业集聚,暴露度高,适应能力低,脆弱性高;贞丰县随着城镇化进程的不断加快,2010 年后成为高脆弱区的代表之一。

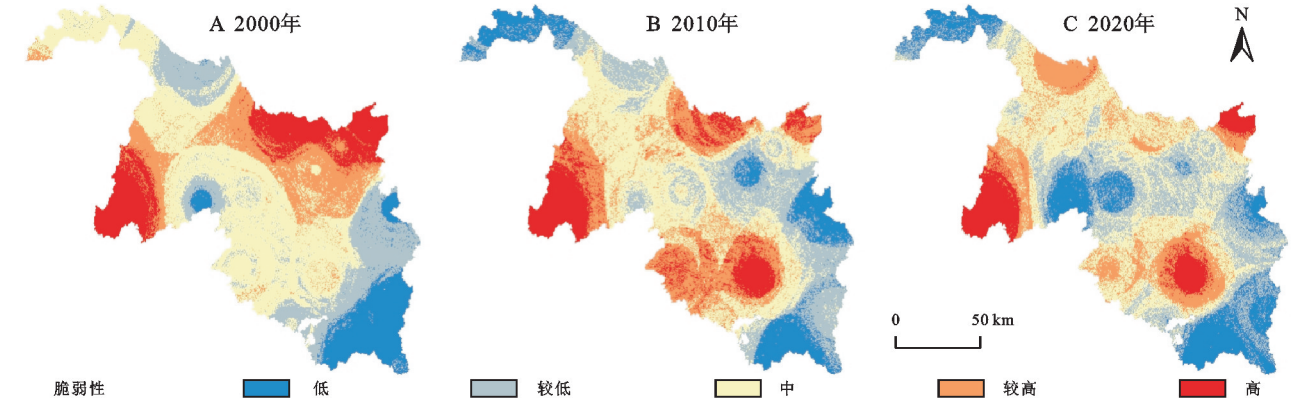


图 5 2000—2020 北盘江流域社会生态系统脆弱性空间分布  
Fig. 5 Spatial distribution of social-ecological system vulnerability in Beipanjiang River Basin from 2000 to 2020

2.3 社会生态系统脆弱性情景模拟

2.3.1 预试验模拟与情景设置 根据相关研究<sup>[17,26]</sup>,本次选取 7 种决策风险系数进行多情景模拟。当决策风险系数  $\alpha=0.001$  时,代表只有一个或至少一个以上指标满足要求,即此时的决策策略的风险最大; $\alpha=1$  时,代表有一半指标能满足要求,评价指标对结果的影响程度大小一致,此时决策策略的风险中等; $\alpha=1000$  时,风险最小,即所有指标均满足要求,但评价结果却不一定理想。根据模拟结果(表 2,图 6),当  $\alpha \in (0.5, 2)$  时,研究区域会出现不同程度的脆弱性,模拟结果更具现实意义。因此,依次选取 0.8, 1, 1.2 作为决策风险系数进行多情景模拟分析。3 个模拟情景设置分别为,情景 1,当  $\alpha=0.8$  时为可持续发展型,此时决策策略风险较大,决策者更重视系统对环境变化下的适应和调整能力;情景 2,当  $\alpha=$

1 时为维持现状型,区域决策策略对风险控制力度维持中等水平,社会经济可以保持正常运转;情景 3,当  $\alpha=1.2$  时为经济优先型,决策策略的风险最小,更多是关注受到风险胁迫的系统自身对脆弱性的影响。

2.3.2 情景模拟结果与分析 从情景模拟空间分布结果可知(图 6),整体上,社会生态系统脆弱性空间分布较为规律,较高区和高脆弱区主要集中分布在经济发展较好的中部东侧,不同等级脆弱性斑块均出现不同程度地向外扩散分布,并一定程度上呈现出随着对经济发展重视程度的增加,情景 1 到情景 3 脆弱性程度呈现逐渐增强的趋势。

情景 1 可持续导向型中,不同等级脆弱性分布都比较集中,具有较为清晰的等级界限,北盘江流域整体处于中—较高脆弱趋势,较高脆弱性区域集中



分布在六枝特区—镇宁矿产、工业密集区,中等脆弱性区域于中部沿较高脆弱区外围分布,低脆弱区基本分布在北盘江流域东南部。该情景中生态环境等暴露度因子次序权重较小,经济发展、生态恢复与治理等适应能力次序权重较大,即决策者强调发展与保护并重,重视风险环境的胁迫,加强生态环境保护与适应能力建设。在情景 2 的维持现状型与情景 3 的经济优先型中,不同等级脆弱性空间分布情况大致

与情景 1 的可持续导向型相似,相对来说前者的脆弱性分布更为破碎与分散,低脆弱区面积有所减少,高、较高脆弱区面积有所增加。但在情景 3 的经济优先型中,不同等级脆弱性斑块更为分散,且彼此之间有所贯通,等级界限模糊,且进一步向外扩张。该情景中人口密度、化肥施用量等暴露度次序权重较大,适应能力的次序权重较小,即决策者忽略了环境对经济发展的影响,对适应能力的重视程度不够,使得流域脆弱性增加。

表 2 指标次序权重计算结果  
Table 2 Result of the ordered weight

决策风险系数		$\alpha=0.001$	$\alpha=0.5$	$\alpha=0.8$	$\alpha=1$	$\alpha=1.2$	$\alpha=2$	$\alpha=1000$
情景		—	—	1	2	3	—	—
OWA 次序权重	I17	0.9977	0.3086	0.1524	0.0500	0.0595	0.0091	0.0000
	I4	0.0007	0.1223	0.1076	0.0500	0.0731	0.0254	0.0000
	I9	0.0004	0.0900	0.0922	0.0500	0.0765	0.0392	0.0000
	I1	0.0003	0.0726	0.0818	0.0500	0.0769	0.0505	0.0000
	I10	0.0002	0.0610	0.0736	0.0500	0.0757	0.0595	0.0000
	I20	0.0002	0.0525	0.0666	0.0500	0.0735	0.0663	0.0000
	I16	0.0001	0.0457	0.0605	0.0500	0.0705	0.0711	0.0000
	I5	0.0001	0.0401	0.0549	0.0500	0.0670	0.0740	0.0000
	I14	0.0001	0.0353	0.0497	0.0500	0.0630	0.0751	0.0000
	I6	0.0001	0.0310	0.0449	0.0500	0.0587	0.0746	0.0000
	I8	0.0001	0.0273	0.0402	0.0500	0.0541	0.0726	0.0000
	I15	0.0001	0.0239	0.0358	0.0500	0.0493	0.0692	0.0000
	I18	0.0000	0.0207	0.0315	0.0500	0.0442	0.0646	0.0000
	I3	0.0000	0.0177	0.0273	0.0500	0.0390	0.0589	0.0000
	I7	0.0000	0.0149	0.0233	0.0500	0.0337	0.0522	0.0000
	I19	0.0000	0.0123	0.0193	0.0500	0.0282	0.0448	0.0000
	I12	0.0000	0.0097	0.0154	0.0500	0.0227	0.0366	0.0000
	I2	0.0000	0.0072	0.0115	0.0500	0.0171	0.0280	0.0000
	I13	0.0000	0.0048	0.0076	0.0500	0.0114	0.0189	0.0085
	I11	0.0000	0.0024	0.0038	0.0500	0.0057	0.0095	0.9915

通过上述模拟结果分析可知,根据不同决策风险系数获得的脆弱性模拟结果存在明显差异。在具体实践过程中,决策的确定并不是以其中一个或几个情景模拟分析得到的结果作为最优解,更多是以不同类型情景模拟之间的脆弱性浮动区间作为参考,针对不同的发展阶段做出相对应的调整,使决策策略与流域发展阶段特征相适应,促进流域可持续发展。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文从社会生态系统视角出发,以北盘江流域为研究对象,将 VSD 理论框架与 SERV 模型相结合,探究社会生态系统脆弱性时空演变,通过 OWA 算法进行情景模拟,为决策者提供政策参考。主要结论如下:

(1) 2000—2020 年北盘江流域脆弱性程度明显

下降,低、较低脆弱区逐渐增加,高脆弱区逐渐减少,高脆弱区面积占比由 13.82% 降到 8.37%,低脆弱区面积占比由 10.66% 增加到 17.62%,流域脆弱性得到明显缓解,并呈现逐渐向好发展的趋势。

(2) 2000—2020 年北盘江流域社会生态系统脆弱性整体处于中等脆弱水平,20 年间平均占比 32%,空间变化呈现“西北、东南低,中部高”的分布格局。高脆弱区集中分布在能源资源丰富、人口密集、产业集聚区域,低脆弱区主要分布在经济发展较缓慢、绿地面积高的区域。

(3) 从情景模拟分析上看,根据不同决策风险系数获得的脆弱性模拟结果存在明显差异。在可持续导向型中,决策者应重视风险环境的胁迫,加强生态环境保护与适应能力建设,在经济优先型中,决策者应强调发展与保护并重,加强绿色基础设施建设,缓

解系统脆弱性。在具体实践过程中,往往是以不同类型情景模拟之间的脆弱性浮动区间作为参考,并针对不同的发展阶段做出相对应的调整,以此促进流域可持续发展。

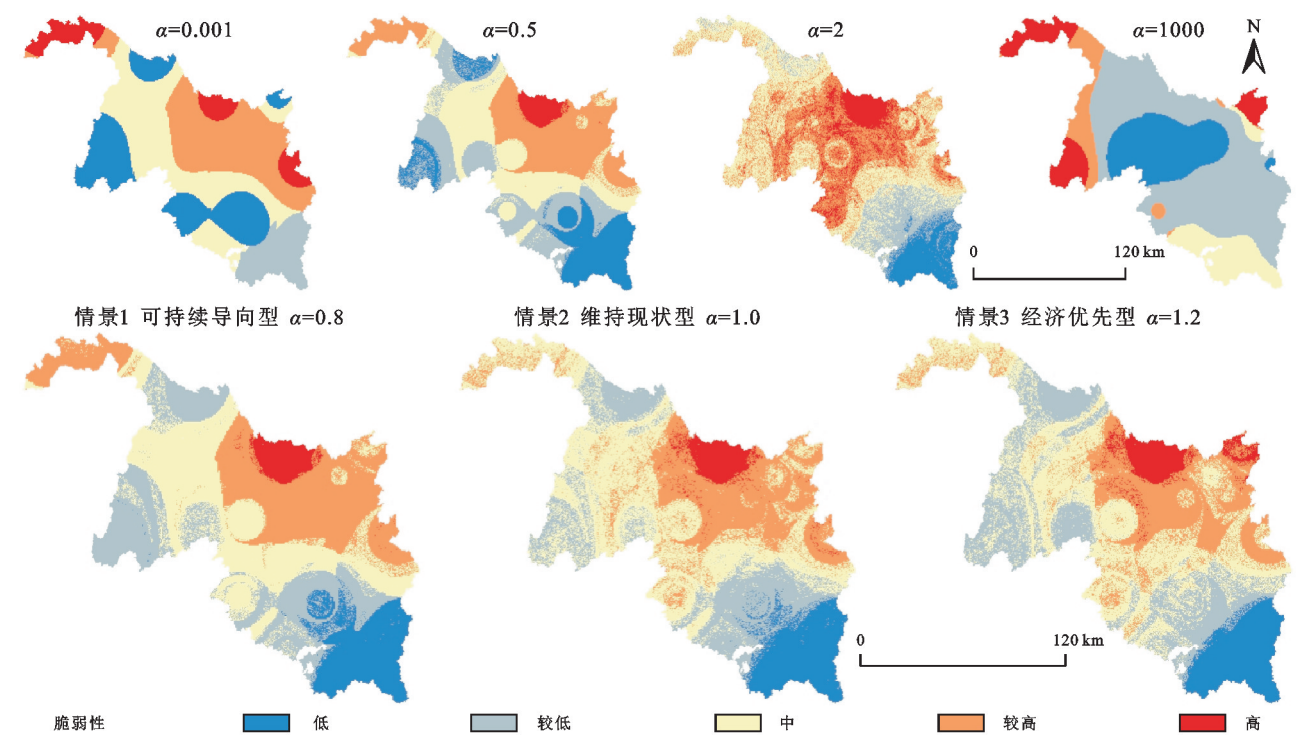


图 6 不同决策风险下社会生态系统脆弱性模拟结果

Fig. 6 Simulation results of social ecosystem vulnerability under different decision risks

3.2 讨论

(1) 针对北盘江流域的治理,国家及各级政府已陆续出台了相关治理政策及措施,流域治理过程中也初具成效,但仍需进一步加强对流域的专项化治理。结合研究结论,得出以下优化策略:① 较高与高脆弱区开发强度大,人口、产业聚集,系统脆弱性程度高。因此,在以自然环境为主的区域应加强生态保护,以人类生产、生活为主的区域应增强绿化连通率,降低煤炭等能源生产对系统的胁迫作用。② 中脆弱区是分布最为广泛的区域,在保护现有生态的基础上,积极引导绿色农业经济发展,维持区域均衡发展。③ 较低和低脆弱区人地关系相对和谐,植被覆盖率高。因此,需将该区域作为生态优先保护区,未来的开发建设应避免对其大规模不合理占用,增强其水土保持能力。

(2) 本文基于 3 种情景模拟情况,即在不同发展模式下决策者对于脆弱性风险取值并非固定的,决策者会根据区域实际发展需要做出判断,以系统脆弱性模拟取值区间作为参考,对研究区发展做出相应的政策调整。OWA 算法具有更强的灵活性,在一定程度上能够使评价结果更具真实性,减少决策者主观认知的影响,并逐渐成为脆弱性情景模拟的有效方法之一。

(3) 本文基于 VSD 理论框架,利用 SERV 模型评价北盘江流域社会生态系统脆弱性,前者理论框架为本研究提供了一个清晰的思路步骤,后者模型评价保证了

研究的可行性与有效性。但 SERV 模型仍存在一些局限性,比如脆弱性评价缺乏暴露度、敏感性与适应能力各自对系统脆弱性的贡献度差异,其次若进行脆弱性影响因素研究,如何分辨脆弱性评价指标与脆弱性影响因素,并对其进行量化研究,有待进一步思考与完善。

参考文献(References):

[1] 宋爽,王帅,傅伯杰,等.社会—生态系统适应性治理研究进展与展望[J].地理学报,2019,74(11):2401-2410.  
Song S, Wang S, Fu B J, et al. Study on adaptive governance of social-ecological system: Progress and prospect[J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(11):2401-2410.

[2] 赵宇鸾,赵佳,李渊,等.贵州花江喀斯特研究进展[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2022,40(5):1-10,132.  
Zhao Y L, Zhao J, Li Y, et al. Research progress of Huajiang Karst gorge, Guizhou Province[J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences, 2022,40(5):1-10,132.

[3] 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.

[4] 余中元,李波,张新时.社会生态系统及脆弱性驱动机制分析[J].生态学报,2014,34(7):1870-1879.  
Yu Z Y, Li B, Zhang X S. Social ecological system and



- vulnerability driving mechanism analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(7):1870-1879.
- [5] 刘小茜,王仰麟,彭建.人地耦合系统脆弱性研究进展[J].*地球科学进展*, 2009, 24(8):917-927.  
Liu X Q, Wang Y L, Peng J. Progress in vulnerability analysis of coupled human-environment system [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(8):917-927.
- [6] 黄晓军,黄馨,崔彩兰,等.社会脆弱性概念、分析框架与评价方法[J].*地理科学进展*, 2014, 33(11):1512-1525.  
Huang X J, Huang X, Cui C L, et al. The concept, analytical framework and assessment method of social vulnerability [J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(11):1512-1525.
- [7] 童磊,郑珂,苏飞.生计脆弱性概念、分析框架与评价方法[J].*地球科学进展*, 2020, 35(2):209-217.  
Tong L, Zheng K, Su F. Concept, analytical framework and assessment method of livelihood vulnerability [J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(2):209-217.
- [8] 王凯歌,郑慧慧,徐艳,等.社会—生态系统结构研究进展与网络化探索[J].*地理科学进展*, 2022, 41(12):2383-2395.  
Wang K G, Zheng H H, Xu Y, et al. Research progress of social-ecological system structure and networking exploration [J]. *Progress in Geography*, 2022, 41(12):2383-2395.
- [9] 龚艳青,谭荣.“社会—生态系统”治理研究的原型分析:概念、方法和展望[J].*地理科学进展*, 2021, 40(8):1430-1438.  
Gong Y Q, Tan R. Archetype analysis in social-ecological system governance research: Concepts, methods and prospect [J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(8):1430-1438.
- [10] Walker B H, Salt D. *Resilience Thinking: Sustaining Ecosystems and People in a Changing World* [M]. Washington D C: Island Press, 2006.
- [11] 王帅,傅伯杰,武旭同,等.黄土高原社会—生态系统变化及其可持续性[J].*资源科学*, 2020, 42(1):96-103.  
Wang S, Fu B J, Wu X T, et al. Dynamics and sustainability of social-ecological systems in the Loess Plateau [J]. *Resources Science*, 2020, 42(1):96-103.
- [12] 马学成,巩杰,柳冬青,等.社会生态系统研究态势:文献计量分析视角[J].*地球科学进展*, 2018, 33(4):435-444.  
Ma X C, Gong J, Liu D Q, et al. Review of social ecological system research: An analysis based on bibliometrics [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(4):435-444.
- [13] 付迎春,郭碧云,王敏,等.社会—生态系统适应性治理视角下绿地空间恢复力的演化:广州旧城区更新案例[J].*自然资源学报*, 2022, 37(8):2118-2136.  
Fu Y C, Guo B Y, Wang M, et al. Spatial resilience evolution of green space from the perspective of social-ecological system adaptive governance: A case study for urban renewal in Guangzhou, China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(8):2118-2136.
- [14] Turner B L, Kasperson R E, Matson P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(14):8074-8079.
- [15] 常丽博,骆耀峰,刘金龙.哈尼族社会—生态系统对气候变化的脆弱性评估:以云南省红河州哈尼族农村社区为例[J].*资源科学*, 2018, 40(9):1787-1799.  
Chang L B, Luo Y F, Liu J L. Hani minority social-ecological system vulnerability assessment to climate change: A case study of Hani minority rural community in Honghe Prefecture, Yunnan Province [J]. *Resources Science*, 2018, 40(9):1787-1799.
- [16] 卫宇曦,刘小鹏,冯康利,等.宁南脱贫地区社会—生态系统脆弱性及其影响因素[J].*水土保持研究*, 2023, 30(4):365-372.  
Wei Y X, Liu X P, Feng K L, et al. Vulnerability of social-ecological system and its influencing factors in the poverty-eradication area in southern Ningxia [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(4):365-372.
- [17] 陈佳,杨新军,尹莎,等.基于 VSD 框架的半干旱地区社会—生态系统脆弱性演化与模拟[J].*地理学报*, 2016, 71(7):1172-1188.  
Chen J, Yang X J, Yin S, et al. The vulnerability evolution and simulation of the social-ecological systems in the semi-arid area based on the VSD framework [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(7):1172-1188.
- [18] 燕玲玲,高秉丽,徐彩仙,等.半干旱黄土丘陵区县域社会生态系统脆弱性时空变化及其影响因素:以定西市安定区为例[J].*水土保持研究*, 2020, 27(5):373-380, 388.  
Yan L L, Gao B L, Xu C X, et al. Spatial and temporal variability of social-ecological system vulnerability and its influencing factors in a Loess Hilly Region: A case study of Anding district of Dingxi [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(5):373-380, 388.
- [19] 贾焘焘,胡静,谢双玉,等.贫困山区旅游地社会:生态系统脆弱性及影响机理[J].*人文地理*, 2021, 36(1):155-164.  
Jia Y Y, Hu J, Xie S Y, et al. Vulnerability and influence mechanisms of social-ecological system in poor mountainous tourism destinations [J]. *Human Geography*, 2021, 36(1):155-164.
- [20] 任红玉,赵宇鸾.贵阳市岩溶山区快速城市化地区生态脆弱性评价[J].*生态科学*, 2020, 39(4):252-258.  
Ren H Y, Zhao Y L. Ecological vulnerability assessment in rapid urbanization areas of Karst mountainous areas: Take Guiyang as a case [J]. *Ecological Science*, 2020, 39(4):252-258.

- [21] 石若晗,陈佳,唐红林,等.石羊河流域农户生计脆弱性测度及致脆机理[J].水土保持研究,2023,30(6):386-395,405.
- Shi R H, Chen J, Tang H L, et al. Assessment of farmers' livelihood vulnerability and its mechanism in Shiyang River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(6):386-395,405.
- [22] Li P X, Fan J. Regional ecological vulnerability assessment of the Guangxi Xijiang River economic belt in southwest China with VSD model [J]. Journal of Resources and Ecology, 2014,5(2):163-170.
- [23] Polsky C, Neff R, Yarnal B. Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram[J]. Global Environmental Change, 2007,17(3/4):472-485.
- [24] 薛冰,许耀天,赵冰玉.地理学视角下 POI 大数据的应用研究及反思[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2022,40(4):1-6,14,128.
- Xue B, Xu Y T, Zhao B Y. Application and reflection of POI big data from the perspective of geography[J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences, 2022,40(4):1-6,14,128.
- [25] Frazier T G, Thompson C M, Dezzani R J. A framework for the development of the SERV model: A Spatially Explicit Resilience-Vulnerability model [J]. Applied Geography, 2014,51:158-172.
- [26] 阎姝伊,李嘉艺,王瑶函,等.浅山区乡镇社会-生态系统脆弱性演化与模拟:以北京平谷为例[J].生态学报,2022,42(17):6912-6921.
- Yan S Y, Li J Y, Wang Y H, et al. The vulnerability evolution and simulation of town's social ecosystem in shallow mountain area: A case study of Pinggu District in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(17): 6912-6921.
- [27] 张渝萌,李晶,曾莉,等.基于 OWA 多属性决策的生态系统服务最优保护区选择研究:以渭河流域(关天段)为例[J].中国农业科学,2019,52(12):2114-2127.
- Zhang Y M, Li J, Zeng L, et al. Optimal protected area selection: Based on multiple attribute decision making method and ecosystem service research: Illustrated by Guanzhong-Tianshui economic region section of the Weihe River Basin [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019,52(12):2114-2127.
- [28] 张洪,王安琦,宋贝扬.基于 OWA 的大理市土地生态安全评价研究[J].地理科学,2017,37(11):1778-1784.
- Zhang H, Wang A Q, Song B Y. Evaluation of land ecological security in Dali city based on OWA [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017,37(11):1778-1784.
- [29] Yager R R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1988,18(1):183-190.

(上接第 315 页)

- [26] 谈旭,王承武.伊犁河谷生态系统服务价值时空演变及其驱动因素[J].应用生态学报,2023,34(10):2747-2756.
- Tan X, Wang C W. Temporal and spatial evolution of ecosystem service value in Ili Valley and its driving factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(10):2747-2756.
- [27] 王颖慧,丁建丽,李晓航,等.伊犁河流域土地利用/覆被变化对生态系统服务价值的影响:基于强度分析模型[J].生态学报,2022,42(8):3106-3118.
- Wang Y H, Ding J L, Li X H, et al. Impact of LUCC on ecosystem services values in the Yili River Basin based on an intensity analysis model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(8):3106-3118.
- [28] 高春莲,胡宝清,黄思敏,等.山江海耦合关键带生态系统服务价值时空变化及其权衡研究[J].水土保持研究,2024,31(2):264-274,286.
- Gao C L, Hu B Q, Huang S M, et al. Spatio-temporal changes and trade-offs of ecosystem service value in mountain-river-sea coupling key zone research [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(2): 264-274,286.
- [29] 解文艳,付永虎,杨殿闯,等.基于土地利用变化的江苏省生态系统服务价值时空演变与模拟预测[J].地域研究与开发,2022,41(5):126-132,158.
- Xie W Y, Fu Y H, Yang D C, et al. Spatio-temporal evolution and simulation forecast of ecosystem service value in Jiangsu Province based on land use changes [J]. Areal Research and Development, 2022,41(5): 126-132,158.
- [30] 王金凤,刘方,白晓永,等.西南地区生态系统服务价值时空演变及模拟预测[J].生态学报,2019,39(19):7057-7066.
- Wang J F, Liu F, Bai X Y, et al. The spatial and temporal evolution and simulation forecast of ecosystem service values in southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(19):7057-7066.