

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0133

WANG Ya, YANG Guojing, ZHOU Lihua. The vulnerability diagnosis of the pastoral area social-ecological system in northern Qilian Mountains: a case study on the Sunan Yugur Autonomous County in Gansu Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2):370-380. [王娅, 杨国靖, 周立华. 祁连山北麓牧区社会-生态系统脆弱性诊断: 以甘肃肃南裕固族自治县为例[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2):370-380.]

祁连山北麓牧区社会-生态系统脆弱性诊断 ——以甘肃肃南裕固族自治县为例

王 娅¹, 杨国靖², 周立华^{3,4}

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院 科技战略咨询研究院, 北京 100190; 4. 中国科学院大学 公共政策与管理学院, 北京 100049)

摘 要: 基于人与自然耦合视角, 辨识社会-生态系统脆弱性是区域可持续发展研究的核心议题和前沿领域。依据社会-生态系统和脆弱性经典范式 VSD 模型 (Vulnerability Scoping Diagram), 利用显式空间脆弱性指数和致脆因子诊断模型分析了 2004—2016 年肃南县社会-生态系统脆弱性的变化趋势及其致脆因子。结果表明: 该县社会-生态系统的暴露度指数介于 0.374~0.725, 整体呈先降, 再升, 后降的趋势。敏感性指数和适应性指数均呈持续波动上涨趋势, 脆弱性指数由 2006 年的 0.327 持续上升至 2014 年的 1.081 后, 又下降至 0.440。该县社会-生态系统脆弱性的潜在风险和致脆因子主要来源于系统的暴露度, 牲畜密度、人均 GDP、植被覆盖度是影响系统暴露度涨落的潜在风险因素, 退牧还草工程及财政支出支持力度是社会-生态系统脆弱性提升的关键致脆因素。未来肃南县应放缓经济发展增速, 提高第三产业 GDP 比重、加大财政支出力度、推进落实草原生态保护政策及其可持续治理长效机制, 以降低社会-生态系统脆弱性的风险。

关键词: 社会-生态系统; 脆弱性; VSD 框架; 致脆因子诊断; 祁连山北麓牧区

中图分类号: K901.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)02-0370-11

0 引言

社会-生态系统 (Social-Ecological System, SES) 是人与自然相耦合的复杂适应性系统, 不仅包括各类相互联系的生物-地质-物理单元, 还涵盖了与其相关的社会主体和制度^[1]。受自身演替及外部干扰的影响, 该系统存在多稳态、阈值效应、自组织、历史依赖性等特征^[2]。SES 研究关注复杂系统时空尺度上的扰沌, 是目前国际上区域可持续发展领域研究的前沿和热点^[3], 被广泛应用于中微观区域社会-生态耦合系统的动态演化、困境分析及可持续性评价。脆弱性作为全球环境变化及可持续发展问题研究的重要视角和分析工具^[4], 是 SES 的关键属性

和研究热点。农村社区、旅游地、湖泊、草原、渔业、山地城市、沙漠化及逆转区 SES 的脆弱性评价及时空演变是国内研究的关注重点^[5]。国际研究则倾向于强调人类对环境变化的适应与响应及 SES 跨尺度和多要素集成的脆弱性整合类研究^[3-4]。与传统的人地关系研究相比, 从 SES 理论出发的脆弱性研究, 整合了风险、扰动、敏感性和适应性等分析视角^[4], 更加注重对系统脆弱性来源、表征、机制等评价指标体系及分析模型的研究, 其研究不足在于评价指标庞杂、已有理论模型不能很好的统筹参差的数据、指标和信息, 忽视对扰动风险估计的不确定性和模糊性的定量辨识^[4]。目前关于典型草原及牧场脆弱性的研究主要侧重于气候变化背景下, 牧业

收稿日期: 2019-10-23; 修订日期: 2020-03-27

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA20020401); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0404); 中国科学院西北生态环境资源研究院青年基金项目 (Y851D71) 资助

作者简介: 王娅, 助理研究员, 主要从事生态经济与区域可持续发展研究. E-mail: wangya2014@lzb.ac.cn

通信作者: 周立华, 研究员, 主要从事生态经济与可持续发展、环境政策与环境管理研究. E-mail: lhzhou@casisd.cn

对旱灾雪灾等的脆弱性^[6]、牧区草原景观生态脆弱性^[7-9]、牧户生计脆弱性^[10-11]三方面。研究方法上,草地生态系统脆弱性多以区域尺度模型化和空间化的定量探讨为主,而社会主体要素(村域、农牧户等)脆弱性的演化及成因分析则多采用问卷调查和文献荟萃^[10-12]。现有研究多侧重于应用导向的单一视角,缺乏 SES 整体性视角下牧区脆弱性动态变化及模拟研究。

祁连山是河西内陆河流的发源地和中国西部重要的生态屏障。长期以来,受气候变暖、超载过牧、开山挖矿、综合治理措施不到位等人为和自然因素的影响,2015年祁连山冰川面积和冰储量较20世纪60年代减少了 $(396.9 \pm 116.9) \text{ km}^2$ 和 25.7 km^3 ,亏损速率由 $4.41\% \cdot (10\text{a})^{-1}$ 加快至 $5.82\% \cdot (10\text{a})^{-1}$ ^[13];部分青海云杉人工林出现深层土壤旱化,水源涵养效能下降等生态问题^[14-17]。特别是祁连山北麓牧区,草畜矛盾问题突出,草地开垦率较高^[17-19],约43.71%的天然草地出现不同程度的沙化型、盐渍化型、病虫害型、毒草型和鼠兔型退化现象^[20]。在国家日益重视生态文明与绿色发展理念的背景下,深入思考和研究祁连山生态保护与治理的关键症结,寻求北麓牧区可持续发展模式是当前亟待解决的科学问题。目前,虽然有关祁连山北麓牧区的研究成果较多,但研究视角多集中于分析气候变化背景下区域自然生态系统的生物物理过程(如冰川冻土、河川径流及植被覆盖度、植被群落时空格局、净初级生产力等的变化,林草地土壤水文特征、生物多样性及水源涵养效能等)^[21-23]和生态政策影响下的畜牧业发展^[24-25]及农牧民适应^[26-27],忽略了市场、制度及文化等人文因素与自然生态要素的内在连通性,缺少人文(社会)-自然(生态系统)耦合视角下的综合性研究。基于此,本研究以祁连山北麓自然-人文高度耦合的甘肃肃南裕固族自治县为案例,借助 VSD (Vulnerability Scoping Diagram) 分析框架,遴选并构建祁连山北麓牧区社会-生态系统脆弱性评价指标体系,进行脆弱性的定量化计算;应用致脆因子诊断模型全面分析 2004—2016 年影响 SES 脆弱性的关键致脆因子,探寻该区域 SES 优化调控对策,为祁连山北麓牧区建立持久有效的 SES 管理体制提供理论依据。

1 研究区概况

祁连山位于亚欧大陆中部,青藏、蒙新、黄土三大高原的交汇地带,横跨甘肃和青海两省 37 个县

市,是维护河西走廊和青藏高原生态安全的重要屏障。肃南裕固族自治县(简称为肃南县)地处祁连山北麓、河西走廊中部($97^{\circ}20' \sim 102^{\circ}13' \text{ E}$, $37^{\circ}28' \sim 39^{\circ}49' \text{ N}$),总面积 $2.39 \times 10^4 \text{ km}^2$,占祁连山北麓面积的 76.40%,是甘肃省高山细毛羊主产区、河西走廊内陆河的发源地和补给区。该县覆盖有低地草甸、温性荒漠草原(前山山麓地带,以旱生植被为主)、温性草原、山地草甸和高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠草原等多种草原类型,拥有天然草地 $170.93 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占土地总面积的 74.73%,其中可利用面积 $142.21 \times 10^4 \text{ hm}^2$,是典型的放牧性生态系统^[28]。作为中国唯一的裕固族自治县,该县由北部的明花乡、中西部的红湾寺镇、马蹄乡、康乐镇、大河乡、祁峰乡、白银乡以及东部的皇城镇三块不连续的地域组成,总人口 3.76×10^4 人,其中农牧业人口占 67.82%,人口密度每平方千米 1.56 人。县域经济发展逐渐向绿色有机、高端精细的现代农牧业和“旅游+”型现代服务业转变。

作为气候带交汇的敏感区,肃南县自然环境与人文因素高度耦合,生态环境脆弱且易受人类活动的扰动,植被、土壤、冰川等陆面系统反应迅速且变化显著,是典型的高寒生态脆弱区。受气候暖干化和粗放经营方式的影响,肃南县草地退化严重,20世纪60年代全县约44.50%的天然草地退化,重度退化面积接近30%,天然草理论载畜量的降幅高达51.50%^[29]。随着以农养牧、异地借牧等现象的出现,畜牧业对资源的利用与影响也相应的由牧区扩展至农区。为恢复生态、保障生态系统的服务功能和屏障作用,1988年肃南县被纳入甘肃祁连山国家级自然保护区,2004年被列为退牧还草工程项目县。在禁牧、划区轮牧、舍饲半舍饲养殖等措施下,2016年该县禁牧区草原植被盖度、高度、产草量分别比2011年提高6.43%、63%、23%。肃南县作为中国北方草地畜牧业发展的缩影,深入探讨该区 SES 的脆弱性、演化趋势及致脆因子,对拓展 SES 的实证内容,推进 SES 适应性管理的理论、方法和模式等方面具有重要的学术价值,也可为祁连山生态保护长效机制创新和我国其他牧区草地畜牧业可持续发展提供案例支撑。

2 研究方法与数据来源

2.1 社会-生态系统脆弱性评价指标体系构建

当前全球用于 SES 研究的分析框架主要有政

策导向性、生态中心主义、脆弱性及综合型四种类型^[30],其中 Turner 等^[31]提出的 TVUL(Vulnerability Framework)框架作为偏向于人类中心主义的脆弱性框架,更多关注于多重生态系统中脆弱性主体的暴露度、敏感性、恢复力及人类活动的行为导向和应对措施,Polisky 等^[32]在其基础上进一步提出适用于区域尺度多要素、多重风险扰动的 VSD(Vulnerability Scoping Diagram)脆弱性整合评估框架,并广泛应用于不同区域脆弱性定量评价的案例研究中。VSD 框架采用“目标层-维度层-要素层-指标层”逐级递进的圈层数据组织构架方式,可有效反映 SES 脆弱

性的内部作用机制,有助于实现脆弱性的定量计算。

因此,基于 VSD 框架以社会-生态系统脆弱性指数为目标层,将脆弱性分解为暴露度、敏感性和适应能力三个维度,以完整地体现牧区 SES 耦合、协调、发展的综合过程,揭示该系统在自然和社会经济等潜在压力和风险的干扰下,暴露单元对受到胁迫的敏感程度、应对胁迫的自适应能力和适应性调控下的恢复潜力。根据 SES 脆弱性的定义,结合北麓牧区的地域特征与专家咨询意见,构建符合肃南县 SES 层级结构与发展特点的脆弱性评价指标体系(表 1)。

表 1 肃南县社会-生态系统脆弱性评价指标体系

Table 1 Vulnerability index system of the social-ecological system in Sunan County

目标层	维度层	要素层	指标层	指标说明与计算	相关性	权重
社会-生态系统 脆弱性指数	暴露度	自然系统	干燥度指数 E1	地区年蒸发量/年降水量	+	0.031
			人均草原面积 E2	地区草原面积/总人口	-	0.207
			植被覆盖度 E3	草地生长盖度,反映生态系统恢复程度	-	0.241
		受灾面积 E4	表征系统经受自然灾害的程度与影响	+	0.053	
		社会经济	牲畜密度 E5	地区牲畜总数与县域国土面积的比值	+	0.238
			人均 GDP E6	表征县域经济发展的水平	+	0.227
			经济增长增速 E7	表征地区经济发展的增长情况和潜力	+	0.003
	草地系统		草地三化面积 S1	反映草地退化、沙化、盐碱化的情况	+	0.239
		草地产草量	每公顷草地鲜草产量,表征草地生产力的恢复情况	*	*	
	敏感性	畜产品市场	羊肉市场价格 S2	表征市场价格波动对草地后生物生产层的影响	+	0.185
			肉类总产量 S3	表征地区畜产品市场的供给能力	+	0.299
		农牧户生计	农林牧渔从业人数 S4	表征农业生产方式及人力投资的变化	+	0.053
	农牧民人均纯收入 S5		表征农村家庭时间尺度上的增收情况	+	0.224	
	适应能力	产业结构调整	第二产业占 GDP 比重 A1	第二产业生产总值占同时期该地区 GDP 的比值	-	0.129
			第三产业占 GDP 比重 A2	第三产业生产总值占同时期该地区 GDP 的比值	+	0.183
		生态保护措施	退牧还草面积 A3	反映政府对草地生态治理的程度	+	0.199
			饲草种植面积 A4	反映饲草不足问题解决的应对能力	+	0.237
				人均地方财政支出 A5	表征地方政府应对风险的经济实力和调整能力	+

注: *表示因草原产草量指标缺少时间尺度上的连续数据,故而在数据分析时删除的指标。

暴露度作为引发生态环境变化的承载体和诱因^[32],涵盖自然系统的气候和植被状况、社会经济活动及牲畜数量。草地作为祁连山北麓牧区生态系统的暴露单元,是环境发生变化的承载体。通常,可利用草地面积越小、单位草地资源的利用强度越强^[33];植被覆盖度降低会导致草地质量下降和饲草不足,使草地系统稳定性下降。王晓毅^[33]、张存厚等^[34]认为干旱会加剧草地生态系统的不确定性和脆弱性,区域年均蒸发量与降水量比例的大小与草地生态系统承受外在风险干扰与胁迫的程度正相关。自然灾害、单位土地面积载畜量及人类经济活动强度均是导致环境变化的根本驱动力,是反

映系统经受外在压力的正向表征。敏感性是暴露单元对外部干扰与胁迫易于感受的性质,它源于生态系统和社会系统在应对外部扰动和内部演替时所表现出来的状态和响应^[31]。祁连山区是西北干旱、半干旱荒漠生态系统中森林、灌丛、草地、河流、湿地镶嵌分布的复合型生态系统,林草重叠,“一地两证”、超载过牧矛盾突出。作为典型的牧区,肃南县 SES 的敏感主体应为草地系统,它关系着当地农牧民的生计问题,其敏感性直观体现在草地生产力与承载力的变化上,畜产品市场价格及供需波动是其易敏感因子,与草地系统敏感性正相关。肃南县拥有丰富的矿产资源和旅游资源,第一产业以牧为

主、农业为辅,为减弱暴露单元风险胁迫,调整产业结构和实施生态保护对增强系统适应能力具有正向作用。但矿产开采、小水电截流发电等产业比重的增加不利于适应性调控下系统恢复潜力的提高。受高寒山地半干旱气候的影响,肃南县天然草地存在季节性的产草量不平衡的特征,加之冷暖季节放牧空间、距离、强度不同,容易出现冷季饲草不足和超载过牧等问题,人工饲草地种植是解决这一问题重要途径。因此,人工饲草地建设水平及地方财政支出能力均是地方政府在应对风险时适应能力的体现。

2.2 社会-生态系统脆弱性的测度方法

2.2.1 评价指标的处理

为消除指标数据的量纲及自身变异程度和数值大小的影响,利用式(1)、(2)进行标准化处理^[35]。

正向指标:

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min\{X_j\}}{\max\{X_j\} - \min\{X_j\}} \quad (1)$$

负向指标:

$$X'_{ij} = \frac{\max\{X_j\} - X_{ij}}{\max\{X_j\} - \min\{X_j\}} \quad (2)$$

式中: X'_{ij} 为标准化后的数据; X_{ij} 为第*i*年*j*项指标的数值; $\min\{x_j\}$ 和 $\max\{x_j\}$ 分别为所有年份中第*j*项指标的最小值和最大值。

2.2.2 指标权重计算

权重是决定SES脆弱性计量结果的重要因素,一般使用专家打分法、熵值法和主成分分析等方法确定。鉴于主成分分析法操作简单、结果客观等优点^[36],本研究利用SPSS 19.0软件进行主成分分析,KMO统计量为0.773,对应概率*P*值为0.000,各变量的共同度均高于50%,提取4个公因子,特征根分别为9.290、3.110、1.497、1.132,方差累计贡献率88.41%。为使公因子更具解释力,实现因子载荷矩阵中系数向0~1分化,对初始因子载荷模型进行方差最大正交旋转,通过公式3和归一化计算得到各指标权重(表1)。

$$W_{PCA} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{M}{\sqrt{N}} \times V \right) / C \quad (3)$$

式中: M 为旋转后各主成分的载荷得分系数; N 为特征根值; V 为各主成分的方差贡献率; C 为特征根值 ≥ 1 的主成分的累计贡献率。由于要按脆弱性的三个维度分别确定各指标权重,故应分别对 W_{PCA} 进行归一化处理,得到相应的 W^*_{PCA} 。

在暴露度维度中,自然系统的暴露度权重略高于社会经济,植被覆盖度指标权重最大(0.241),经济增长增速权重最小(0.003),气候因素中干燥度指数和受灾面积对暴露度的贡献较小。由于祁连山北麓牧区自然生态系统存在多重耦合与本底脆弱的特征,草地生态系统受人类活动的影响远高于气候变化,其影响突出表现在以草地三化面积为表征的植被景观变化上,权重值为0.239。SES的敏感性主要来源于肉类总产量的供给波动,而农林牧渔从业人数对其的影响甚微(0.053)。人均地方财政支出和饲草种植面积作为表征地方政府应对环境与政策变化的能力与措施,是降低肃南县SES暴露单元风险胁迫和敏感性的关键点,在适应能力维度中的贡献度高达48.90%,权重分别为0.252和0.237。

2.2.3 脆弱性定量模型构建

目前,脆弱性的定量计算主要采用函数模型法、主成分分析法、人工神经网络模型法、空间多准则评估及图层叠置法^[37]。为准确计算研究对象的脆弱性程度,学者们提出了如下脆弱性指数的计算模型(表2)。结合肃南县的自然人文特点,依据VSD框架中暴露度-敏感性-适应能力间的因果联系及逻辑关系,在参考陈佳^[4]、姚成胜^[35]、李小维等^[38]的实证研究后,选择Frazier^[39]的显式空间脆弱性指数计算模型(Spatially Explicit Resilience-Vulnerability model, SERV)(式4),进行SES脆弱性的定量测度。

2.3 致脆因子诊断模型

为进一步识别影响肃南县SES脆弱性的主要因素,以便有针对性地调整当地现行发展规划与政策体制,保障SES协调可持续发展。采用障碍度模型^[44],对表1中18个二级因素的因子贡献度、指标偏离度和障碍度进行致脆因子诊断。其中,因子贡献度为单因素对总目标的影响程度,即单因素对总目标的权重;指标偏离度表示单项指标与社会经济发展目标之间的差距,为单项指标标准化值与100%之差;障碍度表示单项指标对社会-生态系统可持续发展的影响值,该指标是系统脆弱性诊断的目的和结果。

$$M_j = (1 - X'_{ij}) \times \frac{R_i \times W_j}{\sum_{j=1}^m [(1 - X'_{ij}) \times (R_i \times W_j)]} \times 100\% \quad (5)$$

式中: M_j 为单项指标的障碍度; $(1 - X'_{ij})$ 表示指标偏离度; $R_i \times W_j$ 表示因子贡献度; R_i 为第*i*项分类指标

表2 脆弱性指数计算公式

Table 2 List of the calculation formula of vulnerability index

指数名称	扰动类型	计算公式	公式说明	文献来源
显式空间脆弱性指数	灾害风险 (社区减灾)	$V = [E + S] - AC$	V 为脆弱性, E 为暴露度, S 为敏感性, AC 为适应能力	[39]
城市社会脆弱性指数	气候变化 (极端高温)	$V = E \left[\frac{S + LoR}{2} \right]$	V 为脆弱性, E 为暴露度, S 为敏感性, LoR 为恢复力 缺失	[40]
县域生态环境脆弱性	农业生产 资源开发 环境污染	$Evi = \frac{(1 - Sta + Sen + 1 - Ada)}{3}$	Evi 为生态环境脆弱性, Sta 为稳定性, Sen 为敏感性, Ada 为适应性	[41]
社区脆弱性指数	气候变化 (综合压力)	$CVI = 1 - \left\{ \left \frac{N_1 Exp - N_2 Ada Cap}{N_1 + N_2} \right \right\} \times \left\{ \frac{1}{Sen} \right\}$	CVI 为社区脆弱性, Exp 、 Sen 、 Ada 、 Cap 分别为暴露度 指数、敏感型指数和适应能力指数; N_1 、 N_2 分别为暴 露度和适应能力指数的主成分数量	[42]
景观格局脆弱度	人类活动(土 地利用变化)	$LVI = LSI \times (1 - LAI)$	LVI 景观格局脆弱度, LSI 为景观敏感度指数, LAI 景 观适应度指数	[43]

的权重; W_j 为第*i*项分类指标中第*j*个单项指标的权重。

2.4 数据来源

社会经济及部分生态指标数据来源于《张掖市统计年鉴》和《肃南县国民经济和社会发展统计公报》(2004—2016年)。草原植被覆盖度、草原三化面积、退牧还草面积来源于张掖市林业与草原局历年统计数据。利用曲线拟合近似估算个别年份缺失的草原覆盖度和三化面积数据。

3 结果与分析

3.1 肃南县社会-生态系统的暴露度评价与分析

肃南县属于高山冰冻圈与干旱区绿洲相耦合的复合生态系统。李永格^[21]、丁永建^[45]等认为肃南是祁连山北麓社会经济影响力最高的县区,生态系统敏感性高而弹性力低^[21],属于易受冰川变化影响的高暴露度地区^[45]。得益于退牧还草工程和降水增加,肃南县自然系统的暴露度显著下降,SES暴露度指数由2004年的0.476下降至2006年的0.374。随着“畜牧富县”、“旅游活县”战略的推进,2007—2013年肃南县加快绿色畜牧业产业化建设和民族文化旅游资源开发,县域草食畜牧饲养量和人均GDP显著提高,社会经济暴露度快速上升^[46]。受气候暖干化影响,冰川消融增强了系统的潜在暴露度及自然灾害的危险性^[47]。故而,SES暴露度指数在此阶段呈快速上涨趋势。但到2014—2016年,草原补贴政策实施使饲草种植面积大幅增加,在草地资源相对人口与经济承载力双重富余的情况下^[48],自然系统的暴露度显著下降。由于经济增长增速放缓,社

会经济暴露度趋于平稳,SES暴露度指数逐年下降至0.445。

3.2 肃南县社会-生态系统的敏感性评价与分析

在全国经济快速发展的背景下,肃南县SES内部要素对旅游产业、生态政策、市场波动的灵敏性和响应度日渐明显,SES敏感性指数由2004年0.269逐年上升至2016年的0.699。伴随旅游产业开发和天然林保护、退牧还草、生态移民等生态政策的实施,当地农牧民的生计模式已从高度依赖自然资源的畜牧生产转变为放牧、圈养舍饲、饲草种植、非农产业兼业、旅游服务、季节性务工等相结合的多元生计方式^[26-27],例如皇城镇中从事个体经营或外出务工的人口已占到50.16%和19.24%^[26]。牧业从业人员的金字塔状年龄分布结构,已出现明显的代际转型趋向^[27]。受国内畜产品市场两轮价格上涨的影响,肃南县羊肉市场价格自2007年后上涨明显,有效刺激了当地畜产品的生产和供给,牛羊肉总产量由2004年的5200吨上升至2016年的9683.15吨,年均增长率5.11%。作为草丛-地境界面上生态系统敏感程度的表征,草地三化面积有所减少,草地系统的敏感程度自2013年后逐渐减弱。

3.3 肃南县社会-生态系统的适应能力评价与分析

作为降低系统脆弱性的驱动因子,2004—2016年肃南县SES适应能力总体呈波动上升趋势。该指数上涨的原因在于社会系统应灾能力的显著增强,其中人均地方财政支出贡献较大,2010年后该指标以年均20.85%的速度上涨。而2004—2010年间肃南县适应能力指数涨落的原因还与退牧还草

工程实施面积的波动相关。2011年国家开始实施草原生态补助奖励政策并鼓励种植优良牧草。2012年起,肃南县饲草种植面积逐年增加,2015和2016年种植面积的增长率高达65.36%和39.72%,有效缓解了牲畜需草量与草原产草量不足的矛盾,SES适应能力显著增强。第三产业作为表征区域生产力发展水平的重要标志,可有效提升SES应对外部灾害和冲击的能力,而第二产业在此方面贡献甚微甚至会影响第三产业对提升系统适应能力的贡献度。适时调整产业结构,转变以矿产资源无序开采为主的工业发展模式,构建立体型牧区绿色生态产业体系,推动生态旅游及其配套服务产业发展是增强肃南社会-生态系统适应能力和可持续发展的关键^[49]。

3.4 肃南县社会-生态系统脆弱性评价及态势

借助VSD框架和脆弱性指数计算模型,对肃南县SES脆弱性进行测度,结果表明:(1)2004—2006

年,随着暴露度指数的下降和适应能力的提高,该县SES脆弱性显著降低,特别是在2006年下降至最低值0.374。这与生态保护工程退牧还草的实施有关。(2)伴随退牧还草工程实施面积的减少、畜产品市场敏感性及县域经济活动影响力的加强,系统的暴露度和敏感性指数稳步提高,SES脆弱性由2007年的0.609上升至2014年的1.081。而系统的适应能力在此阶段却表现出低水平缓慢上升的特点。究其原因,肃南县第三产业增加值虽稳步提升,但受第二产业快速发展的影响,产值比重却逐年下降,减弱了对系统适应能力的贡献度。(3)2015—2016年,SES敏感度逐渐趋于稳定,在适应能力显著提高的背景下(2013年后第三产业快速发展、2014年后饲草种植面积显著增加),自然系统和社会经济的暴露度显著下降,系统脆弱性下降至0.440(图1)。

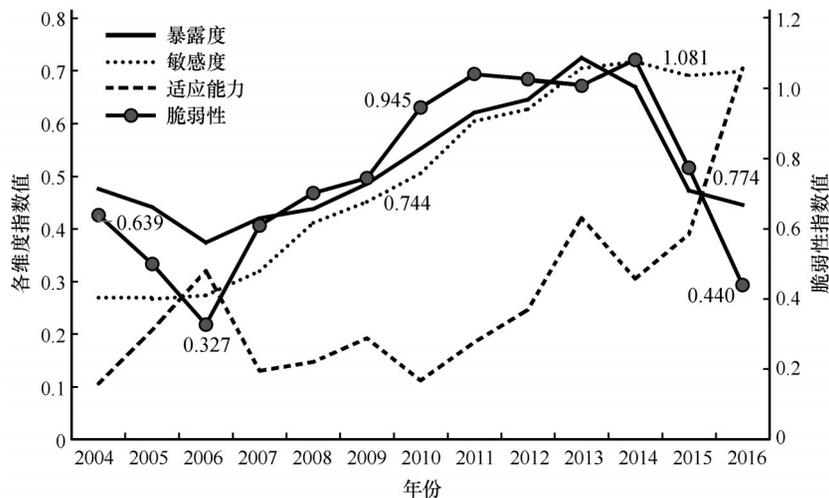


图1 2004—2016年肃南县社会-生态系统脆弱性演变趋势

Fig. 1 Evolution trend of the vulnerability of social-ecological system in Sunan County from 2004 to 2016

3.5 肃南县社会-生态系统的致脆因子诊断

为探究肃南县SES主要的致脆因子,从历年暴露度、敏感性、适应能力的指标障碍度结果中筛选出障碍度 $\geq 8\%$ 且排名前两位的指标(表3)。(1)从暴露度因素的排序可知,牲畜密度E5和人均GDP E6是影响SES暴露度涨落的潜在风险因子;随着降雨量的减少和牲畜数量的大幅度上升,草地的承载压力增大,植被覆盖度E3成为影响2009—2013年这一阶段SES暴露度涨落的潜在风险因素,但其影响力相对较弱;2014—2016年,第二产业产值下降导致经济增长增速放缓,人均草地面积增加是缓解SES风险胁迫的主要限制因素。经济活动作为连接

地区物质流、能量流、信息流和政府、产业、企业、个人等各主体运作发展的载体,应适时放缓其发展增速并调整产业结构,加快推动旅游、文化、科教等生态服务业的发展。(2)从敏感性因素的排序来看,作为祁连山北麓重要的畜牧业生产基地,肃南县生态系统对人类活动的扰动反应敏感且具有正反馈的放大作用,草原三化面积S1始终是SES敏感性的风险来源。2008年之前,肉类总产量S3和羊肉市场价格增长缓慢,成为SES敏感性提升的主要限制性因素,但随着政府对畜产品品质和品牌竞争力培育力度的加大,敏感性贡献逐渐增加。农牧民对生态政策影响的敏感性和适应性主要体现在其从业人数

表3 肃南县社会-生态系统主要障碍因子

Table 3 Main obstacle factors of social-ecological system in Sunan County

年份	项目	暴露性因素排序		敏感性因素排序		适应性因素排序	
		1	2	1	2	1	2
2004	因素	E5	E6	S3	S2	A5	A4
	障碍度	18.74	14.88	18.95	14.77	15.40	9.40
2005	因素	E5	E6	S3	S2	A5	A4
	障碍度	17.46	14.22	18.18	14.71	14.22	9.31
2006	因素	E5	E6	S3	S2	A5	A2
	障碍度	17.25	13.84	17.76	14.54	13.81	8.23
2007	因素	E5	E6	S3	S2	A5	A3
	障碍度	15.54	13.08	15.54	12.54	13.32	8.44
2008	因素	E5	E6	S3	S5	A5	A4
	障碍度	11.97	11.88	10.84	10.83	12.28	9.23
2009	因素	E6	E3	S5	S2	A5	A4
	障碍度	10.72	8.88	10.13	9.75	11.55	9.05
2010	因素	E3	E6	S5	S1	A5	A3
	障碍度	9.44	9.25	9.02	8.72	10.37	9.65
2011	因素	E3	E1	S1		A3	A2
	障碍度	9.63	9.34	8.00		9.95	9.77
2012	因素	E3		S4		A1	A3
	障碍度	9.82		20.59		10.21	9.95
2013	因素	E1	E3	S1	S4	A3	A2
	障碍度	10.17	9.95	11.17	9.95	9.05	8.47
2014	因素	E7	E4	S1	S4	A3	A1
	障碍度	15.01	12.92	12.92	8.09	9.95	9.31
2015	因素	E2	E7	S1	S4	A3	A1
	障碍度	24.96	20.21	14.51	10.29	10.13	8.49
2016	因素	E2	E7	S1		A3	
	障碍度	24.96	18.07	15.37		9.95	

注：表中空白格表示障碍度 < 8% 的指标，因不符筛选标准，故不列出。

和收入的变化上,牧民生计多元化和牧业生产代际转型是影响 SES 敏感性的抑制因素。(3)从适应性因素的排序来看,2010年之前,肃南县饲草种植规模基本维持在 1 546.66~1 946.66 hm²,财政支持力度上涨相对缓慢(年均上涨 1 843.66×10⁴ 元),是制约该县 SES 适应能力提升的主要障碍因素。伴随着牲畜数量持续上涨和草地生态退化的潜在风险,贯彻实施退牧还草政策则成为 SES 增强应对外部干扰与冲击的重要突破口。(4)核算排名前四的致脆因子的出现频次和障碍度:暴露度类指标出现频次 24 次,障碍度总值 3.964;敏感性类和适应性类指标出现频次仅为 16 次和 12 次,障碍度总值分别为 2.245 和 1.226。表明肃南县 SES 脆弱性的潜在风险和障碍因子主要来源于系统的暴露度,牲畜密度、人均 GDP、植被覆盖度是影响系统暴露度涨落

的潜在风险因素,退牧还草工程及财政支出支持力度是 SES 脆弱性提升的关键致脆因素。

4 讨论

肃南县 SES 脆弱性虽在 2014 年后呈递减趋势,但祁连山特殊的地理位置和社会-生态特质决定了其对气候变化、牧业生产、旅游开发等外部扰动的敏感性和脆弱性。未来肃南县应放缓经济发展增速,构建立体型绿色生态产业体系以增强 SES 的适应能力。本文研究表明,第三产业可提升 SES 应对能力,而第二产业非但不能提升 SES 的抗逆性还会削弱第三产业在此方面的贡献度。因此,在当前祁连山生态综合整治和国家公园体制试点建设背景下,应转变第二产业发展高度依赖矿产开采、无序经营的情势,降低依靠无序能源开发产生的产业经

济贡献,加大财政支出力度,推动生态旅游及其配套服务产业发展,转变传统畜牧业数量型发展模式,减少牲畜数量,提升草地畜牧业的需求、品牌、品质竞争力,实现高附加值畜牧业的回归性升级。第二,推进落实草原生态保护政策,重建社会系统管理和生态系统管理的尺度匹配以降低 SES 脆弱性风险。草场退化是牧区 SES 互动和反馈在陆面系统的体现,其实质是社会系统管理和生态系统管理长期形成的尺度匹配被破坏的结果^[50]。加强退牧还草工程落实力度,并将其与社区共管机制结合,形成“部门合作”与“公私合作”双向维度的行动者网络来增强 SES 的管理弹性和尺度匹配度。

SES 是一个多尺度联结的复杂巨系统,存在诸多的不确定性与模糊性,如何克服 SES 脆弱性评价中指标体系庞杂、相关性高,理论模型对数据、信息统筹性、逻辑性不强等问题是当前研究的难点。现有的 SES 脆弱性分析模型关注于对脆弱性产生原因及机理的概念化表述和驱动因素内在联系的表达,缺少适用于定量探究区域尺度多重要素联结、多重风险扰动的整合型评估框架。Polsky 等^[32]提出的 VSD 模型配有规范分析的八步流程,目标层-维度层-要素层-指标层逐级递进、逐项细化的信息识别和数据统筹方式,具有一定的兼容性、延展性和区域适用性,且该方法过程简单,评价结果直观明了,便于脆弱性的定量化计算,可操作性强,能较好地解决当前 SES 脆弱性整合评估中的问题。但该模型难以解决地方性特质和生境分布不均衡、评价指标模糊化及其区域影响的差异化问题,因此,该模型在空间维度脆弱性应用中有待进一步改进。

5 结论

本研究基于 VSD 框架的“暴露度-敏感性-适应性”3 个维度,以祁连山北麓典型牧区肃南县为例,利用 Frazier 等^[39]的显式空间脆弱性指数计算模型和致脆因子诊断模型全面分析了肃南县社会-生态系统的脆弱性及其致脆因子,结论如下:2004—2016 年间,肃南县 SES 的暴露度指数介于 0.374~0.725,整体呈先降-再升-后降的趋势;敏感性指数和适应性指数均波动上涨;脆弱性指数由 2006 年的 0.327 持续上升至 2014 年的 1.081 之后下降至 2016 年的 0.440。肃南县 SES 脆弱性的潜在风险和致脆因子主要来源于系统的暴露度,牲畜密度、人均 GDP、植被覆盖度是影响系统暴露度涨落的潜在风

险因素,退牧还草工程及财政支出支持力度是 SES 脆弱性提升的关键致脆因素。

参考文献(References):

- [1] Marion G, Gesche K, Beate M W, et al. Human-Nature Interactions in the Anthropocene: Potentials of Social - Ecological Systems Analysis[M]. London: Routledge Press, 2012.
- [2] Gunderson L H, Holling C S. Panarchy: understanding transformations in human natural systems[M]. Washington D C: Island Press, 2002.
- [3] Ma Xuecheng, Gong Jie, Liu Dongqing, et al. Review of social ecological system research: An analysis based on bibliometrics[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(4): 435-444. [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.]
- [4] Chen Jia, Yang Xinjun, Yin Sha, 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. [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.]
- [5] Chen Qi, Xu Yuan. Analysis of factors influencing marine fisheries social-ecological systems vulnerability in China based on interpretative structural modeling [J]. Science-Technology and Management, 2019, 21(1): 21-26+32. [陈琦, 徐源. 我国海洋渔业社会-生态系统脆弱性影响因素分析——基于 ISM 模型[J]. 科技与管理, 2019, 21(1): 21-26+32.]
- [6] Wang Shijin, Wei Yanqiang, Fang Miao. Integrated risk assessment of anow disaster in the three rivers source region, Cnina [J]. Acta Prataculture Sinica, 2014, 23(2): 108-116. [王世金, 魏彦强, 方苗. 青海省三江源牧区雪灾综合风险评估[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 108-116.]
- [7] Dou Yonghong. Vulnerability assessment of alpine grassland in the Qinghai Plateau based on AHP method [J]. Qinghai Environment, 2018, 28(3): 145-150. [窦永红. 基于 AHP 的青南高原高寒草地脆弱性评估[J]. 青海环境, 2018, 28(3): 145-150.]
- [8] Guo Bin, Zhou Zhongfa, Su Weici, et al. Evaluation of ecological vulnerability of Karst grassland based on Grid GIS [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(2): 204-207. [郭宾, 周忠发, 苏维词, 等. 基于格网 GIS 的喀斯特山区草地生态脆弱性评价[J]. 水土保持通报, 2014, 34(2): 204-207.]
- [9] Yun Xiangjun, Hou Xiangyang, Liu Guixiang, et al. Research progress of vulnerability assessment on grassland ecosystem under climate change [J]. Agricultural Science & Technology, 2012, 13(10): 2186-2190+2230.
- [10] Ding Wenqiang, Li Ping, Yin Yanping, et al. Vulnerability of herder households under the framework of sustainable livelihoods in the grassland of Northern China [J]. Acta Prataculture Sinica, 2017, 26(8): 1-11. [丁文强, 李平, 尹燕亭, 等. 可持续生计视角下中国北方草原区牧户脆弱性评价研究[J]. 草业学报, 2017, 26(8): 1-11.]
- [11] Li Tingyu, Tan Shuhao. Pastoralists' livelihood vulnerability in the context of institutional transition: an analysis based on the "vulnerability-resilience" framework [J]. China Rural Survey, 2018(3): 19-34. [励汀郁, 谭淑豪. 制度变迁背景下牧户的生计脆弱性——基于“脆弱性-恢复力”分析框架[J]. 中国农村观察, 2018(3): 19-34.]
- [12] Qin Haibo, Ru Xingjun, Li Yingming. The study of sustain-

- able grassland governance in China based on the social-ecosystem framework[J]. The Journal of Gansu Administration Institute, 2018(3): 104-117. [秦海波, 汝醒君, 李颖明. 基于社会-生态系统框架的中国草原可持续治理机制研究[J]. 甘肃行政学院学报, 2018(3): 104-117.]
- [13] Li Xin, Gou Xiaohua, Wang Ninglian, et al. Tightening ecological management facilitates green development in the Qilian Mountains. Chin Sci Bull, 2019, 64(27): 2928-2937. [李新, 勾晓华, 王宁练, 等. 祁连山绿色发展: 从生态治理到生态恢复[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2928-2937.]
- [14] Wang Tao, Gao Feng, Wang Bao, et al. Status and suggestions on ecological protection and restoration of Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(2): 229-234. [王涛, 高峰, 王宝, 等. 祁连山生态保护与修复的现状问题与建议[J]. 冰川冻土, 2017, 39(2): 229-234.]
- [15] He Zhibin, Du Jun, Chen Longfei, et al. Review on montane forest eco-hydrology in arid area[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(10): 1078-1089. [何志斌, 杜军, 陈龙飞, 等. 干旱区山地森林生态水文研究进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(10): 1078-1089.]
- [16] Zhu Xi, He Zhibin, Du Jun, et al. Effects of thinning on the soil moisture of the *Picea crassifolia* plantation in Qilian Mountains[J]. Forest Research, 2015, 28(1): 55-60. [朱喜, 何志斌, 杜军, 等. 间伐对祁连山青海云杉人工林土壤水分的影响[J]. 林业科学研究, 2015, 28(1): 55-60.]
- [17] Jiang Xingguo, Zheng Jie, Xu Dengkui. The protection and restoration of mountains and waters, forest fields and lakes in Qilian Mountains: Problems of ecological environment and sustainable development[J]. The Border Economy and Culture, 2018, 171(3): 31-34. [蒋兴国, 郑杰, 许登奎. 祁连山山水林田湖草保护修复调查研究之二——祁连山生态环境与可持续发展存在的问题[J]. 边疆经济与文化, 2018, 171(3): 31-34.]
- [18] Zhou Wei. Multi-subject cooperative governance of environment protection and restoration: A case of Qilian Mountain[J]. Gansu Social Sciences, 2018(2): 250-255. [周伟. 生态环境保护与修复的多元主体协同治理——以祁连山为例[J]. 甘肃社会科学, 2018(2): 250-255.]
- [19] Wang Guizhen, Ma Sujie, Yang Siwei. The ecological assessment of different range land types based on rainfall use efficiency in Hexi Corridor Area[J]. Journal of Nature Resource, 2017, 32(4): 582-594. [王贵珍, 马素洁, 杨思维, 等. 基于RUE的不同草地类生态评价研究——以河西走廊为例[J]. 自然资源学报, 2017, 32(4): 582-594.]
- [20] Yan Yuee, Wang Jianhong, Shi Jianzhong, et al. Analysis on grassland resources and their deterioration situation on North Slope of Qilian Mountains[J]. Pratacultural Sscience, 2010, 27(7): 24-29. [闫月娥, 王建宏, 石建忠, 等. 祁连山北坡草地资源及退化现状分析[J]. 草业科学, 2010, 27(7): 24-29.]
- [21] Li Yongge, Li Zongxing, Feng Qi, et al. Research on the development of the ecological protection of the Qilian Mountains based on ecological redline[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2343-2352. [李永格, 李宗省, 冯起, 等. 基于生态红线划定的祁连山生态保护性开发研究[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2343-2352.]
- [22] Qiu Lisha, Zhang Lifeng, He Yi, et al. Remote sensing monitoring on vegetation dynamic change in Qilian mountain from 2000 to 2017[J]. Remote Sensing Information, 2019, 34(4): 97-107. [邱丽莎, 张立峰, 何毅, 等. 2000—2017年祁连山植被动态变化遥感监测[J]. 遥感信息, 2019, 34(4): 97-107.]
- [23] Cao Xueping, Wang Jingru, Lu Songsong, et al. Simulation of the potential distribution patterns of *Picea crassifolia* in climate change scenarios based on the maximum entropy (Maxent) mode[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): 5232-5240. [曹雪萍, 王婧如, 鲁松松, 等. 气候变化情景下基于最大熵模型的青海云杉潜在分布格局模拟[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5232-5240.]
- [24] Qi Lin, Song Xiaoyu, Feng Xianghua. Forage-livestock dynamic balance of pasturing area based on rotational grazing theory in northern slope of Qilian Mountains[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(11): 256-264. [覃琳, 宋孝玉, 冯湘华. 基于划区轮牧理论的祁连山北麓牧区动态草畜平衡研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 256-264.]
- [25] Wang Ya, Zhang Wenbo, Dou Xuecheng. Adaptability of diamond model for grassland agriculture competitiveness to cultivate of Sunan County[J]. Pratacultural Science, 2014, 31(3): 531-537. [王娅, 张文波, 窦学诚. 基于钻石模型适用性的肃南县草地畜牧业竞争力培育[J]. 草业科学, 2014, 31(3): 531-537.]
- [26] Huang Chao. Study on the social transformation of Yugur immigrant community from the perspective of moral change: A case study of Liufang village in Yugur Autonomous County[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018. [黄超. 道德变迁视角下的裕固族移民社区的社会转型研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.]
- [27] Gou Yujiao. The changes of animal husbandry and livelihood for herders in Qilian mountain: A case of zhuaxixiulong township in Tianzhu County and Huangcheng township in Sunan County[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014. [苟钰姣. 祁连山区家庭牧场畜牧业和牧民生计的变化研究——以天祝县抓喜秀龙乡和肃南县皇城滩镇为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.]
- [28] An Xuexiang. The study on ecological status of natural grassland in Sunan County, Gansu Province[J]. Gansu Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2017, 47(5): 105-108. [安雪香. 甘肃省肃南县天然草地生态现状调查研究[J]. 甘肃畜牧兽医, 2017, 47(5): 105-108.]
- [29] Gong Xuyin. Application research of feed balance and animal precision management model on sheep production in Sunan County[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2010. [宫旭胤. 草畜平衡和精准管理模型在肃南县绵羊生产中的应用研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010.]
- [30] Binder C R, Hinkel J, Bots P W G, Pahl-Wostl C. Comparison of frameworks for analyzing social-ecological systems[J]. Ecology and Society, 2013, 18(4): 26-26.
- [31] 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, 2003, 100(14): 8074-8079.
- [32] 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.
- [33] Wang Xiaoyi. Grassland drought in the context of institution change: Impacts of pastoral sedenterization, pasture segmentation and market economy[J]. China Agricultural University Journal of Social Sciences Edition, 2013, 30(1): 18-30. [王晓毅. 制度变迁背景下的草原干旱——牧民定居、草原碎片与牧区市场化的影响[J]. 中国农业大学学报(社会科学版),

- 2013, 30(1): 18-30.]
- [34] Zhang Cunhou, Zhang Li, Wu Yingjie, et al. Assessment on the integrated drought disaster risk in Inner Mongolia grassland [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(7): 115-121. [张存厚, 张立, 吴英杰, 等. 内蒙古草原干旱灾害综合风险评估[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(7): 115-121.]
- [35] Yao Chengsheng, Yin Wei, Li Zhengtong. The vulnerability assessment and driving mechanism analysis of China's food security system[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(8): 1720-1734. [姚成胜, 殷伟, 李政通. 中国粮食安全系统脆弱性评价及其驱动机制分析[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(8): 1720-1734.]
- [36] Li Guangdong, Qiu Daochi, Wang Liping, et al. Impacts of difference among livelihood assets on the choice of economic compensation pattern for farmer households farmland protection in Chongqing City [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(4): 504-515. [李广东, 邱道持, 王利平, 等. 生计资产差异对农户耕地保护补偿模式选择的影响——渝西方山丘陵不同地带样点村的实证分析[J]. *地理学报*, 2012, 67(4): 504-515.]
- [37] Wang Ya, Zhou Lihua, Wei Xuan. An evaluation index system of vulnerability of the desertification reversion process based on the socio-ecological systems theory[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 829-840. [王娅, 周立华, 魏轩. 基于社会-生态系统的沙漠化逆转过程脆弱性评价指标体系[J]. *生态学报*, 2018, 38(3): 829-840.]
- [38] Li Xiaowei, Huang Zimei, Chen Jianfeng, et al. Mangrove ecosystem vulnerability preliminary assessment of Tieshangang Bay based on VSD model[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2018, 37(2): 47-54. [李小维, 黄子眉, 陈剑锋, 等. 基于VSD模型的铁山港湾红树林生态系统脆弱性初步评价[J]. *热带海洋学报*, 2018, 37(2): 47-54.]
- [39] 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.
- [40] Depietri Y, Welle T, Renaud F G. Social vulnerability assessment of the Cologne urban area to heat waves: links to ecosystem services[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2013, 6: 98-117.
- [41] Wang Ruiyan, Zhao Grengxing, Zhou Wei, et al. Assessment and dynamic changes of environmental vulnerability at county level: A case study in Kenli County of the Yellow River Delta, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3790-3799. [王瑞燕, 赵庚星, 周伟, 等. 县域生态环境脆弱性评价及其动态分析——以黄河三角洲垦利县为例[J]. *生态学报*, 2009, 29(7): 3790-3799.]
- [42] Rajiv P, Shashidhar Kumar J. Climate vulnerability index-measure of climate change vulnerability to communities: A case of rural Lower Himalaya, India [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2012, 17(5): 487-506.
- [43] Ren Zhiyuan, Zhang Han. Effects of land use change on landscape pattern vulnerability in Yinchuan Basin, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1): 243-249. [任志远, 张晗. 银川盆地土地利用变化对景观格局脆弱性的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 243-249.]
- [44] Guo Yaohui, Liu Qiang, Xiong Ying, et al. Analysis on the development of agricultural circular economy: A case of 21 cities and states in Sichuan Province [J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2018(11): 132-138. [郭耀辉, 刘强, 熊鹰, 等. 农业循环经济发展指数及障碍度分析——以四川省21个市州为例[J]. *农业技术经济*, 2018(11): 132-138.]
- [45] Ding Yongjian, Yang J. ianping. Vulnerability and adaptation of cryosphere changes in China [M]. Beijing: Science Press, 2019. [丁永建, 杨建平. 中国冰冻圈变化的脆弱性与适应研究[M]. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [46] Gao Xiaoyan, Cui Mingyu. On development of tourism in Sunan yugu autonomous county [J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2008(5): 82-86. [高小岩, 崔明玉. 肃南裕固族自治县旅游经济开发研究[J]. *武汉职业技术学院学报*, 2008(5): 82-86.]
- [47] Yang Yuan, Yang Jianping, Li Man, et al. Public perception and selections of adaptation measures against glacier change and its impacts: Taking the Hexi inland river basin as an example [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 70-79. [杨圆, 杨建平, 李曼, 等. 冰川变化及其影响的公众感知与适应措施分析——以甘肃河西内陆河流域为例[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 70-79.]
- [48] Bing Fang, Chen Qiangqiang, Zhang Dedun. Regional differences of relative carrying capacity of resources in Gansu pastoral area [J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(12): 2587-2596. [邴芳, 陈强强, 张德栋. 甘肃草原牧区相对资源承载力区域差异[J]. *草业科学*, 2016, 33(12): 2587-2596.]
- [49] He Youli, Wang Shenglin. The exploring of China's pastureland tertiary industry development [J]. *Pratacultural Science*, 2007, 24(12): 67-71. [贺有利, 王生林. 中国牧区第三产业发展的探讨[J]. *草业科学*, 2007, 24(12): 67-71.]
- [50] Zhang Qian. Dilemma of community-based grassland management: Scale-match of social ecological system man-management [J]. *Journal of Southeast University (Philosophy and Social Science)*, 2015, 17(6): 59-65+147. [张倩. 社区草原管理的困境: 社会生态系统管理的尺度匹配[J]. *东南大学学报(哲学社会科学版)*, 2015, 17(6): 59-65+147.]

The vulnerability diagnosis of the pastoral area social-ecological system in northern Qilian Mountains: a case study on the Sunan Yugur Autonomous County in Gansu Province

WANG Ya¹, YANG Guojing², ZHOU Lihua^{3,4}

(1. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. School of Public Policy and Management, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Identifying the vulnerability of social-ecological system from the perspective of the coupling of human and nature is the core issue and frontier area of regional sustainable development research. Based on the Vulnerability Scoping Diagram (VSD) model which is the classical paradigm in the field of social-ecological system and vulnerability, this paper introduced the function formula of Spatially Explicit Resilience-Vulnerability and the diagnostic model of vulnerability factors to analysis the change trends and embrittlement factor of vulnerability of social-ecological system in Sunan County during 2004 to 2016. The results showed that: the exposure index ranged from 0.374 to 0.725, which shows a fluctuation trend of falling-rising-falling. Both sensitivity index and adaptability index show a trend of continuous fluctuating increase. The vulnerability index continued to rise from 0.327 in 2006 to 1.081 in 2014 and then dropped to 0.440 in 2016. The potential risks and fragility factors of the vulnerability of social-ecological system mainly come from the system's exposure. The index of livestock density, per capita GDP, and vegetation coverage are potential risk factors that affect the fluctuation of system exposure. The support of fiscal expenditure and returning grazing to grass project are the key fragile factor of increasing the vulnerability of socio-ecological systems of this county. Therefore, to reduce the risk the vulnerability of social-ecological system, Sunan County should slow down the economic growth rate, increase the fiscal expenditure and proportion of tertiary industry in GDP, and promote the implementation of grassland ecological protection policies and its long-term sustainable governance mechanisms in the future.

Key words: social-ecological system; vulnerability; VSD framework; diagnostic model of vulnerability factors; pastoral area of northern Qilian Mountains

(责任编辑: 方一平; 编辑: 庞瑜, 周成林)