

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

燕玲玲, 高秉丽, 徐彩仙, 李焱, 巩杰

(兰州大学 资源环境学院/西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘 要:脆弱性评估已成为全球环境变化与可持续发展研究的热点和重要议题。以定西市安定区为例,构建社会生态系统脆弱性评估体系,分析了 1995—2015 年安定区社会生态系统的脆弱性、暴露度、敏感性及适应力时空变化,利用因子贡献度模型对脆弱性影响因素进行了分析,并据此提出了适应对策和建议。结果表明:1995—2015 年安定区社会生态系统暴露度、敏感性和脆弱性水平呈先降后升趋势,暴露度由西南向东北递减,适应力与暴露度空间变化一致,脆弱性与适应力空间变化相反,敏感性无明显空间变化规律。研究区社会生态系统脆弱性主要受暴露度和适应力的作用,其中有效灌溉面积(26.77%)、林地占比(10.23%)、人均粮食产量(9.11%)、化肥施用量(8.27%)的贡献度最高,同时受单位面积载畜量、经济增速、高中及以上人口占比等影响较大。因地制宜、科学规划,发展高效旱作生态农业,有效降低社会生态系统暴露度。同时,强化生态建设、植树种草、适度发展畜牧业,是提高社会生态系统适应能力和促进区域可持续发展的必然途径。

关键词:社会生态系统; 脆弱性; 时空变化; 影响因子; 安定区; 黄土丘陵区

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0373-08

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

YAN Lingling, GAO Bingli, XU Caixian, LI Yan, GONG Jie

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of

Education, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Vulnerability assessment has become a hotspot in global environmental change and sustainable development research. Taking Anding District as an example, we built a vulnerability assessment system of social-ecological system analyzed the spatiotemporal changes of the exposure, sensitivity, adaptability and vulnerability from 1995 to 2015, and put forward some countermeasures and suggestions based on the analysis of the main factors which impact on vulnerability. The results show that: during the period 1995—2015, the levels of exposure, sensitivity and vulnerability of the social-ecological system in Anding decreased first and then increased; the exposure degree decreased from southwest to northeast; the spatial distribution of adaptability was consistent with that of exposure, while the spatial variation of vulnerability was opposite to that of adaptability; there was no obvious spatial change of sensitivity. The main influencing factors of social-ecological system vulnerability in the study area were exposure and adaptation. The effective irrigation area (26.77%), forest ratio (10.23%), per capita food production (9.11%), and fertilizer application rate (8.27%) are the main factors which impact the vulnerability of Anding. The livestock carrying capacity per

收稿日期:2019-11-20

修回日期:2019-12-30

资助项目:国家重点研发计划项目“黄土宽梁缓坡丘陵区生态格局优化与特色粮草产业技术及示范”(2016YFC0501701-01)

第一作者:燕玲玲(1995—),女,甘肃成县人,硕士研究生,研究方向为土地利用与生态评价。E-mail:llyan18@lzu.edu.cn

通信作者:巩杰(1975—),男,甘肃宁县人,博士,主要从事景观生态学、环境遥感与生态评价、土地变化科学等研究。E-mail:jgong@lzu.edu.cn

unit area, economic growth rate, and proportion of population educated in high school and above greatly influenced the vulnerability of Anding. Scientific master plan and adaptable measures to the local conditions should be carried out to develop high-efficiency dry farming and ecological agriculture, and to reduce the exposure of social-ecological system. At the same time, strengthening ecological construction, planting trees and grass, and developing stock farming appropriately are the useful ways to improve the adaptability of social-ecological system for regional sustainable development of loess hilly areas.

Keywords: social-ecological system; vulnerability assessment; spatial and temporal variability; influencing factors; Anding District; loess hilly areas.

20 世纪 50 年代以来,不合理的人类活动导致全球性环境问题日益突出,并逐渐威胁到人类社会的可持续发展^[1]。面对这种不利趋势,目前人类还无法实现根源性的改变,只能通过调整自身行为和社会结构来适应当前和未来的潜在变化。在此背景下,脆弱性研究逐渐引起生态学、灾害学和地理等学科的关注,并逐渐成为当前可持续研究的主要分析工具之一^[2]。脆弱性研究源于自然灾害学,强调系统暴露于变化中,因缺乏适应能力而对变化造成的损害敏感的一种状态^[3],目前在自然灾害、气候变化、生态环境等领域应用广泛^[4-7]。伴随社会经济的发展,土地利用及覆盖变化带来的生态环境影响和压力剧增,自然系统与社会经济系统也在不断相互渗透和影响,单一的自然生态系统脆弱性研究已无法满足社会发展需求,脆弱性研究逐渐由自然生态系统扩大到社会经济系统,脆弱性呈现综合研究与学科交叉的趋势^[8-10]。社会生态系统由社会子系统、生态子系统及两者的交互作用构成,强调人类社会与自然环境之间的整体性和系统性,将社会系统与生态系统进行了有机整合,突出了地理学研究的核心——人地系统^[11]。当前在人地系统耦合框架下,识别和评估社会生态系统脆弱性已逐渐成为了地理学等相关学科的研究热点和统筹区域决策性问题的实践途径^[12],是当下可持续发展研究关注的核心议题之一^[13]。

近年来,社会生态系统脆弱性研究领域已取得了众多成果。Siegel、常丽博等分别定量分析了气候变化背景下的加勒比海区、云南哈尼梯田的社会生态系统脆弱性^[14-15]。Hagenlocher 等发现可通过有效的适应策略来降低脆弱性并促进可持续发展^[16-17]。陈佳、王林峰等分别对榆林市、东北农牧交错带社会生态系统脆弱性的空间分异特征和演化趋势进行了研究^[18-19]。王群、陈娅玲分别以秦岭和大别山为例,以旅游活动为切入点,对其所引发的社会生态系统脆弱性进行了评估^[20-21]。余中元等对多层级湖泊流域社会生态系统的脆弱性进行了综合评估与分析^[22]。基于干旱视角,杨新军等开展了黄土高原社会生态系统

脆弱性研究^[23]。可见,很多学者从不同角度开展了不同区域的社会生态系统脆弱性分析。但已有研究多为流域、市域和县区尺度的社会生态系统脆弱性静态分析,涉及区域动态变化的评估报道较少。此外,涉及不同发展阶段脆弱性时空变化过程,脆弱性组分暴露度、敏感性和适应力变化过程的报道更为鲜见,亟待开展相关研究。

定西市安定区地处陇中黄土丘陵沟壑区,地表破碎,植被覆盖度低,水土流失严重,经济发展缓慢,是国家扶贫工作重点县区,集生态脆弱与经济贫困于一体,社会生态系统高度脆弱。本文基于“暴露度—敏感性—适应力”评估框架和 1995—2015 年研究区自然及社会经济统计数据,揭示安定区社会生态系统脆弱性时空变化及其影响因素,并提出分区管控策略。研究可为陇中黄土丘陵沟壑区生态环境管控提供理论依据,服务于安定区经济—社会—生态全面协调及可持续发展。

1 研究区概况

安定区位于甘肃省定西市北部(35°17′54″—36°02′40″N,104°12′48″—105°01′06″E),面积约 3 638.7 km²(图 1),全区辖 19 个乡镇。研究区南高北低、梁峁起伏,地表破碎化程度高,海拔为 1 555~2 566 m。年均温 6.3℃,年降水约 400 mm,年均蒸发量 1 500 mm 以上,降水时空分布不均,土壤有效补给水分少,常出现季节性干旱。安定区常住人口 43.05 万人(2017 年),其中农业人口高达 78.68%,主导产业为农业和畜牧业,产业结构单一,经济发展程度低,社会生态系统脆弱。水资源短缺和水土流失问题是制约该地区社会生态系统可持续发展的主要因素。

2 方法与数据

2.1 脆弱性评价体系构建

基于政府间气候变化专门委员会(IPCC)“暴露度—敏感性—适应力”框架^[14],构建了脆弱性评价体系。暴露度指系统受环境和社会干扰的程度,干扰的强度、频率、持续时间与距离系统的远近有关^[24]。敏

感性与系统被干扰的临界条件有关,反映的是系统对外部干扰易于感受的性质。适应能力指系统能够处理、适应干扰以及从干扰造成的后果中恢复的能力^[25]。一般,随暴露度和敏感性的提高,区域脆弱性会增强;随适应力的增大脆弱性会减小。

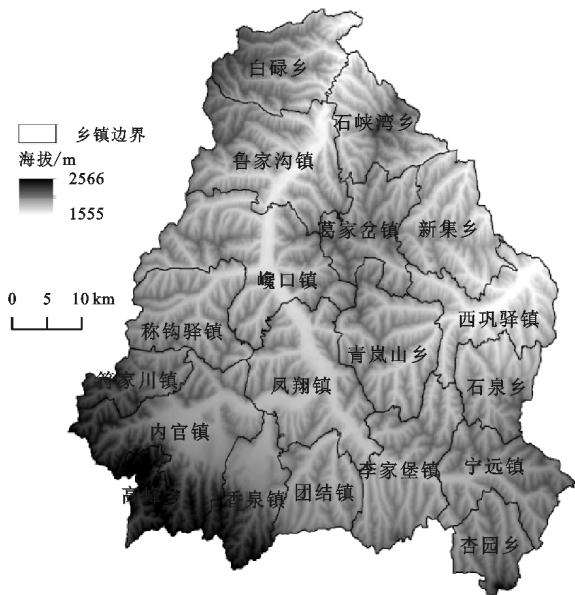


图1 研究区概况

以脆弱性为目标层,以暴露度(ED)、敏感性(SI)和适应力(AI)为准则层构建本文评价体系(表1)。参考前人研究成果及当地实际情况,选取相关指标如下:

(1) 暴露度。安定区以农业和畜牧业为主,生态压力指标选取化肥施用量(t/hm^2)、单位面积载畜量(头/ hm^2);选取乡村劳动力比重(%)与人口密集程度(人/ hm^2)反映社会压力;增长压力指标为人口自然增长率(‰)和经济增长速度(%)。

(2) 敏感性。敏感性主要与区域自然环境、社会发展程度、资源结构等密切相关。自然环境方面选取景观结构指数、归一化植被指数(NDVI);社会发展方面选取平均劳动力负担人口(人)和非农人口比重(%);以水窖数量(口)和人均耕地面积(hm^2)反映资源供给状况。

(3) 适应力。主要受区域资本数量、信息、教育、技术、管理能力等影响。用有效灌溉面积(hm^2)、林地占比(%)指代生态资本;社会资本用文盲人口比重(%)、高中及以上人口比重(%)、水果产量(kg)、人均粮食产量(kg)等表征;金融资本方面选取了人均纯收入(元)和经济密度(元/ hm^2)。

2.2 数据来源与处理

(1) 人口和社会经济数据:人口和各类社会经济统计数据来源于安定区国民经济和社会发展统计资料。

(2) 土地利用数据:基于1995年、2005年和2015年的Landsat TM/OLI系列遥感影像解译获得土地利用数据。遥感影像来源于美国地质调查局

(<http://www.usgs.gov/>)和国际科学数据服务平台(<http://www.cniscas.cn/>)。在ENVI 5.1中分别对3期遥感影像进行辐射校正、几何校正、拼接等预处理,参考《土地利用现状分类标准》(GB/T21010—2017)并结合研究区实际情况,将区内土地利用分为6类:耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地。以Google Earth高分辨率影像为参照,在ArcGIS 10.2下,对遥感影像进行目视解译,利用野外定点采样数据进行结果验证,解译精度均在83%以上,符合本研究要求。最后对解译数据进行拓扑错误检查与修正,得到3期土地利用类型矢量图。

(3) 景观结构指数反映土地覆被类型的结构组成,为逆向指标,其值越大表示区域景观越破碎越不稳定。利用Fragstats 4.2计算得到斑块密度指数(PD)、景观形状指数(LSI)和香农多样性指数(SHDI)等^[26],后综合得到景观结构指数,公式如下:

$$ILS = a \cdot PD + b \cdot LSI + c \cdot SHDI \quad (1)$$

式中:ILS表示景观结构指数; a, b, c 为各自权重,这里取权重相等均为0.33^[27]。

(4) NDVI数据。归一化植被指数(NDVI)可以很好地反映干旱区的植被生长状况。本文所需NDVI数据主要是通过美国地质勘探局(<http://glovis.usgs.gov/>)下载的MOD13Q1数据,1995年的NDVI数据是通过国际科学数据服务平台(<http://www.cniscas.cn/>)下载的Landsat 4—5 TM遥感影像数据,在ENVI 5.1中进行校正、拼接和裁剪等预处理后计算得到。

2.3 数据标准化

原始评价指标间存在量纲和作用方向的差异,为使所有指标作用方向一致,本文运用极差标准化的方式对指标进行了预处理^[28]。当指标值越大对评价越有利时,即指标性质为“+”,运用正向标准化公式(2);当指标值越小对评价越有利时,即指标性质为“-”,运用负向标准化公式(3):

$$Y_{ij} = (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (2)$$

$$Y_{ij} = (X_{j\max} - X_{ij}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (3)$$

式中: $X_{ij}, X_{j\max}, X_{j\min}$ 和 Y_{ij} 分别为第*i*个乡镇第*j*项指标的原始值、最大值、最小值和标准化值;其中: $i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

2.4 指标权重计算

熵值法能够克服主观因素,显著提高指标数据间的对比度和分辨率,具有较强的客观性、较高的精确度和科学性等特点^[29]。因此,本文运用熵值法求取社会生态系统脆弱性评价指标的权重系数(表1)。具体计算过程如下:

(1) 基于标准化值 Y_{ij} ,计算第*j*项指标下第*i*个研究单元指标值的比重 P_{ij} :

$$P_{ij}=Y_{ij}/\sum_{i=1}^mY_{ij}$$

(4)

$$g_j=1-e_j$$

(6)

(2) 第 j 项指标的熵值 e_j :

(4) 第 j 项指标的权重 w_j :

$$e_j=-k\sum_{i=1}^mP_{ij}\ln P_{ij},k=1/\ln m$$

(5)

$$w_j=g_j/\sum_{i=1}^ng_j$$

(7)

(3) 第 j 项指标的差异性系数 g_j :

式中: $i=1,2,3,\cdots,m;j=1,2,3,\cdots,n$ 。

表 1 社会生态系统脆弱性评价指标体系

目标层	准则层	指标层 1	指标层 2	指标 性质	指标权重		
					1995	2005	2015
社会 生态 系统 脆弱性	暴露度(十)	生态压力	化肥施用量(X_1)	+	0.066	0.062	0.095
			单位面积载畜量(X_2)	+	0.032	0.075	0.091
		社会压力	人口密集程度(X_3)	+	0.035	0.027	0.028
			乡村劳动力比重(X_4)	+	0.039	0.031	0.038
			人口自然增长率(X_5)	+	0.026	0.030	0.037
	增长压力	自然环境	经济增长速度((X_6)	+	0.073	0.019	0.040
			景观结构指数(X_7)	+	0.027	0.021	0.018
			归一化植被指数(NDVI)(X_8)	—	0.028	0.026	0.027
		社会发展	平均劳动力负担人口数(X_9)	+	0.021	0.051	0.029
			非农人口比重(X_{10})	—	0.012	0.010	0.029
	资源供给	社会压力	人均耕地面积(X_{11})	—	0.029	0.024	0.020
			水窖数量(X_{12})	—	0.025	0.009	0.037
		生态资本	有效灌溉面积(X_{13})	+	0.211	0.192	0.219
			林地占比(X_{14})	+	0.119	0.086	0.062
			文盲人口比重(X_{15})	—	0.038	0.038	0.031
	适应力(一)	社会资本	高中及以上人口比重(X_{16})	+	0.027	0.060	0.038
			水果产量(X_{17})	+	0.089	0.112	0.069
			人均粮食产量(X_{18})	+	0.030	0.049	0.025
		金融资本	人均纯收入(X_{19})	+	0.038	0.049	0.034
			经济密度(X_{20})	+	0.036	0.029	0.032

2.5 社会生态系统脆弱性评价模型

根据现有研究成果,函数模型法因能较好地概括脆弱性内涵与各构成要素之间的相互作用关系而得到了广泛应用^[24]。因此,将社会脆弱性理解为暴露度、敏感性和适应力的函数,借鉴 IPCC 的脆弱性指数计算方法^[30],构建安定区社会生态系统脆弱性评价模型:

$$VI=(EI+SI)-AI$$

(8)

式中:VI、EI、SI、AI 分别代表脆弱性指数、暴露度指数、敏感性指数和适应力指数,其中 $VI\in(-1,1)$ 。EI、SI、AI 的计算过程如下:

$$EI=\sum_{j=1}^6W_{ej}Y_{eij};SI=\sum_{j=1}^6W_{sj}Y_{sij};AI=\sum_{j=1}^8W_{aj}Y_{aij}$$

(9)

式中:VI、EI、SI、AI 含义同上; W_{ej},W_{sj},W_{aj} 分别为暴露度、敏感性与适应力的指标权重; Y_{eij},Y_{sij},Y_{aij} 分别为暴露度、敏感性和适应力指标的标准化值。为了进行时序要素之间的对比,在 ArcGIS 中结合自然断点与等间距分类法,将研究区脆弱性(VI)、暴露度(EI)、敏感性(SI)、和适应力(AI)分别划分为 5 个等级:低、较低、中等、较高和高。

2.6 因子贡献度模型

脆弱性主要影响因子有效识别是提出针对性的管控措施的前提。因子贡献度模型被广泛应用于影响因素识别研究中^[31-32],本文借此模型对安定区社会生态系统脆弱性的影响因素进行了识别,计算公式如下:

$$O_j=\frac{I_j\cdot W_j}{\sum_{j=1}^{20}W_j\cdot I_j}$$

(10)

式中: O_j 指第 j 指标对于脆弱性贡献度; I_j 为指标偏离度,表示各指标实际值与最优目标之间的差距,通常用 1 与各指标的标准化值 Y_j 之差表示; W_j 为各指标的权重。

3 结果与分析

3.1 脆弱性时空变化分析

将研究期间安定区社会生态系统脆弱性分为以下 5 级:低脆弱性(−0.05~0.10)、较低脆弱性(0.10~0.15)、中等脆弱性(0.15~0.20)、较高脆弱性(0.20~0.25)、高脆弱性(0.25~0.31)(图 2)。研究期间安定区脆弱性先降低后升高。1995 年研究区脆弱性指数

均值为 0.22,除内官营和峽口外,其余 17 个乡镇均处于中等及以上脆弱水平,占安定区总面积的 82.24%;2005 年安定区社会生态系统脆弱性指数平均值下降了近 10%(0.2),高脆弱乡镇减少了一半,面积占比减少近 24%,而中度脆弱及以下乡镇有所增加,面积占比为 52.46%,社会生态系统脆弱性明显改善。2015 年安定区社会生态系统脆弱性再次升高,脆弱性指数平均值增长了 30%(0.23)。中等脆弱及以上乡镇增至 17 个(占安定区面积 83.29%),其中高脆弱区域和较高脆弱区面积分别增加了 17.55%和 11.22%,低脆

弱和较低脆弱区域仅占 16.71%。

从空间分布看,研究期间高脆弱区主要分布在安定区东北部,其中葛家岔、石泉和宁远 3 乡镇一直处于高脆弱水平。而西南部的内官营镇始终保持低脆弱性,主要是由于内官营是安定区的蔬菜种植基地,较强的经济实力和丰富的生态资本增强了风险抵御能力,使其适应力明显高于其他乡镇。凤翔镇、团结镇的脆弱性先降后升,这与安定区整体变化趋势相同,而西北部的峽口镇脆弱性水平不断升高,其余乡镇脆弱性变化不明显。

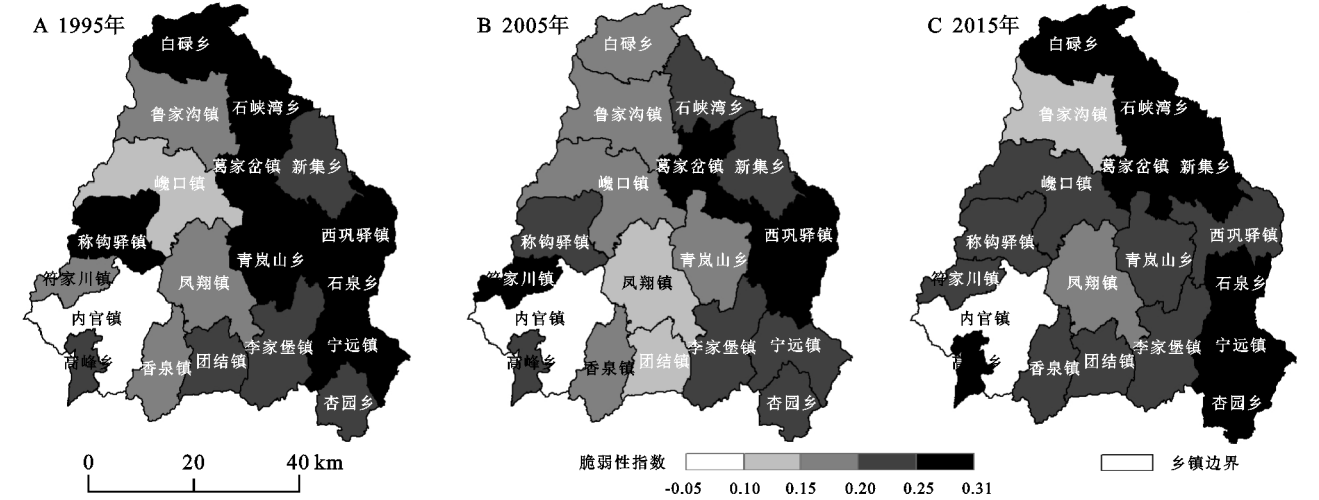


图 2 1995—2015 年安定区社会生态系统脆弱性空间分布特征

3.2 脆弱性要素时空变化分析

3.2.1 暴露度时空变化特征 研究期间安定区暴露度先降后升(图 3),1995 年安定区暴露度指数均值为 0.31,其中一半以上乡镇处于中等暴露及以上水平(占安定区面积的 50.86%),区内整体暴露度较高;2005 年安定区暴露度指数均值降至 0.28,与 1995 年相比,中等暴露度及以上乡镇减少了一半,较低和低暴露度乡镇大幅增加,面积达全区的 68.76%;2015

年安定区暴露度指数均值略有升高(0.29),高暴露度乡镇有所增长,中等暴露度及以上乡镇数量基本不变,其余乡镇处于较低及低暴露度水平。总体上,安定区社会生态系统暴露度空间变化与地形走向一致,自西南向东北递减,高暴露度区域主要集中在海拔较高的西南部,如内官营和香泉。研究期间峽口镇的暴露度不断增高,中心镇凤翔则相反,白碌、鲁家沟、内官营、李家堡、石泉等乡镇保持不变,其余乡镇无明显变化。

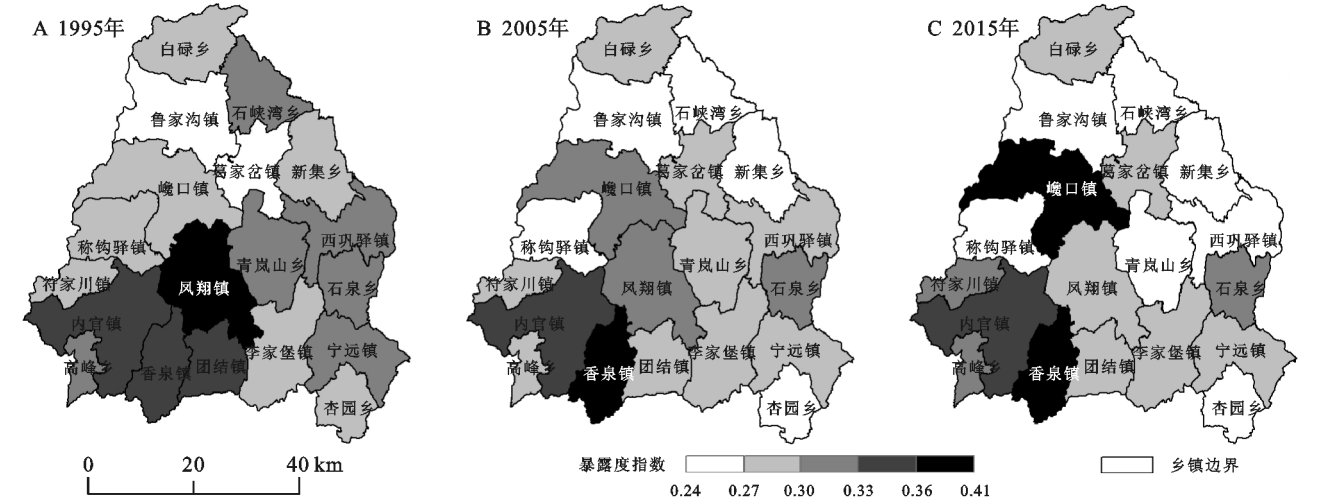


图 3 1995—2015 年安定区社会生态系统暴露度空间分布特征

3.2.2 敏感性时空变化特征 研究期间安定区敏感性先降低后略有升高(图 4),1995 年安定区敏感性指

数均值为 0.28,各乡镇敏感性普遍较高,91.5%的区域处于中等及以上敏感水平;2005 年安定区敏感性指数均值降至 0.27,全区中等及以上敏感乡镇明显减少(13 个)(面积占比降为 66.02%),较低和低敏感性乡镇有所增加(分别占安定区面积的 24.97%和 9%);2015 年安定区敏感性指数均值为 0.28,中等及以上敏感乡镇数量保持不变,但面积占比略有增加

(67.54%),较低及低敏感乡镇维持不变。从空间分布看,安定区高敏感乡镇主要集中在西南部,东南部和北部片区的敏感性较低。研究期间,除凤翔、岷口、秤钩驿、符家川、内官营、高峰、香泉、团结和新集等处于中等敏感水平外(敏感性指数始终大于 0.27),其余乡镇敏感性指数波动起伏较大,变化规律不明显。

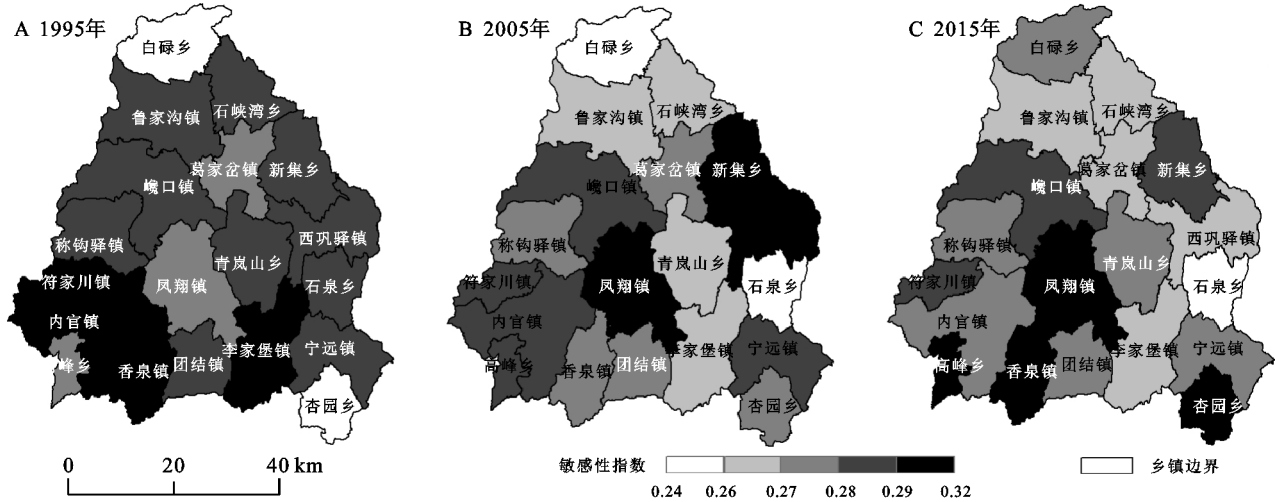


图 4 1995—2015 年安定区社会生态系统敏感性空间分布特征

3.2.3 适应力时空变化特征 研究期间安定区适应力总体呈下降趋势(图 5)。1995 年安定区适应力指数均值为 0.37,其中,西南部内官镇适应力最高,凤翔镇次之,北部白碌、石峡湾和葛家岔的适应力最低,超过 60%的区域适应力水平低下。2005 年安定区适应力指数均值为 0.36,各乡镇适应力空间分布与适应力水平无显著变化;2015 年各乡镇适应力总体呈下降趋势

(0.34),低适应力乡镇增长明显(面积占比为 42.46%),中等适应力及以上区域仅占 37.32%。总体上,安定区适应力空间分布与暴露度相似,东北部(白碌、石峡湾、葛家岔、新集乡、西巩驿等)处于低适应力水平,而高适应力区主要为西南部的内官和凤翔两镇。研究期间除内官营一直保持高适应力水平,石峡湾和葛家岔一直处于低适应力水平外,其余乡镇处波动状态。

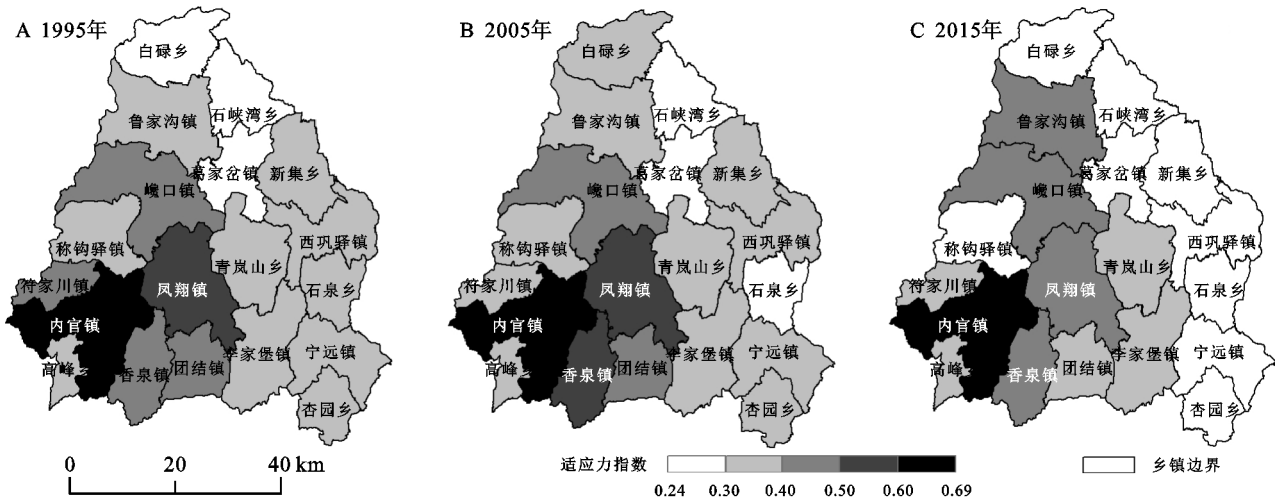


图 5 1995—2015 年安定区社会生态系统适应力空间分布特征

3.3 脆弱性影响因素识别

为辨析安定区社会生态系统脆弱性的主要影响因素,本文运用因子贡献度模型对各指标的贡献度进行了计算,结果见表 2。

由表 2 可知,暴露度的主要影响因子是化肥施用量、

单位面积载畜量及经济增长速度,3 者均为正向指标,对暴露度有促进作用。生态压力指标化肥施用量的贡献度最高(平均贡献度为 8.27%);单位面积载畜量的贡献度不断升高(平均贡献度为 7.46%)。社会压力指标中乡村劳动力比重的贡献度较高;增长压力对暴露度的作用主要体

现在经济增长速度上,贡献度先降低后升高。

敏感性与平均劳动力负担人口、人均耕地面积、归一化 NDVI 指数的关系最为密切。平均劳动力负担人口与敏感性成正相关,贡献度先升高后下降(平均贡献度为 2.7%);资源供给中人均耕地面积对敏感性的影响较大,贡献度缓慢下降,水窖数量的贡献度较低。自然环境要素中归一化 NDVI 指数对安定区敏感性贡献度更高,景观结构指数贡献度低。

适应力中有效灌溉面积、林地占比、人均粮食产

量、高中及以上人口、人均纯收入是主要贡献因子。有效灌溉面积、林地占比是安定区重要的生态资本,在适应力形成中所起作用最大,其中有效灌溉面积的贡献度一直处于首位(26.77%),其次是林地占比(10.23%)。社会资本中人均粮食产量、高中及以上人口比重的贡献度最高,两者的贡献度先升高后降低,文盲人口比重对适应力的作用比较微弱。金融资本中人均纯收入对适应力的贡献度先升高后降低,经济密度的贡献度一直较低。

表 2 1995—2015 年安定区社会生态系统脆弱性指标因子贡献度

目标层	准则层	指标层 1	指标层 2	脆弱性贡献度/%		
				1995	2005	2015
脆弱性	暴露度(十)	生态压力	化肥施用量(X_1)	7.33	6.09	11.40
			单位面积载畜量(X_2)	2.36	8.83	11.19
		社会压力	人口密集程度(X_3)	2.53	1.97	2.18
			乡村劳动力比重(X_4)	3.75	2.56	3.31
			人口自然增长率(X_5)	1.31	2.40	3.04
		增长压力	经济增长速度(X_6)	8.48	1.09	3.52
			景观结构指数(X_7)	1.84	1.21	1.12
		自然环境	归一化 NDVI 指数(X_8)	1.81	1.57	1.79
			平均劳动力负担人口数(X_9)	1.24	4.79	2.08
	适应力(一)	社会发展	非农人口比重(X_{10})	0.35	0.27	2.38
			人均耕地面积(X_{11})	2.52	1.89	1.38
		资源供给	水窖数量(X_{12})	1.50	0.15	3.08
			有效灌溉面积(X_{13})	27.88	23.79	28.63
		生态资本	林地占比(X_{14})	14.34	9.81	6.54
			文盲人口比重(X_{15})	3.00	2.76	2.37
		社会资本	高中及以上人口比重(X_{16})	1.61	6.69	2.79
			水果产量(X_{17})	2.80	4.97	1.61
			人均粮食产量(X_{18})	9.13	12.17	6.05
			人均纯收入(X_{19})	3.39	4.64	2.84
		金融资本	经济密度(X_{20})	2.83	2.36	2.70

综合以上脆弱性构成要素贡献因子可得,安定区脆弱性主要受暴露度和适应力的影响。暴露度中生态压力指标化肥施用量和单位面积载畜量对安定区脆弱性的贡献度最大。适应力中与脆弱性联系最为紧密的是生态资本和社会资本因子,生态资本中的有效灌溉面积、林地占比对社会生态系统脆弱性起抑制作用,贡献度分别达 26.77%,10.23%。其他如:人均粮食产量、高中及以上人口、人均纯收入等也对安定区社会生态系统脆弱性有较大影响。从影响因子贡献度排名来看,敏感性驱动因子最低,对安定区社会生态系统脆弱性所起作用最小。

4 结论与讨论

4.1 讨论

通过对脆弱性影响因素的分析发现,安定区社会

生态系统脆弱性主要受化肥施用量、单位面积载畜量、有效灌溉面积、林地占比、人均粮食产量等的影响,而这些驱动因子大多与人类活动相关,安定区社会生态系统脆弱性降低可从以下层面着手。

(1) 加强生态建设,不断提高适应力水平。面对农地有效灌溉面积不足,空间差异大的问题,各乡镇因地制宜,对于已有灌溉设施和自然条件较好的乡镇,如凤翔、内官营和岷口等,需进一步借助“引洮工程”,不断扩大农田有效灌溉面积,改善农业生产条件,增强社会生态系统的适应力。对于无法直接引水灌溉的乡镇,如白碌、香泉等,应凭借“121 雨水集流工程”^[33],继续实施集雨节灌工程,增强干旱山区农业生产对天然降水的利用,为发展旱作高效农业注入新活力。增加林草面积,提高植被覆盖度,可有效增加生态资本,从而提高社会生态系统适应能力。为确保区内生态适应力水平的

持续提高,要继续实施造林种草工程,鼓励社会资源参与林木培育与管理,提高造林质量。

(2) 科学合理规划,有效降低暴露度水平。当下,研究区单位面积化肥使用量严重超出国际安全标准,应积极采取措施将化肥施用量限定在安全范围,降低化肥过量施用所带来的生态风险。通过推广秸秆还田和施用农家有机肥等措施改良土壤肥力;因地制宜,确定合理的施肥用量和比例,建立合理的施肥制度。畜牧业是安定区主要产业之一,但由于研究区为半干旱荒漠草原带,植被状况较差,过牧超载很可能会引发一些新的生态环境问题。因此,需要合理规划放牧区域,积极实施人工种草,严控畜牧数量,优先保护生态环境。

4.2 结论

(1) 总体上,安定区社会生态系统脆弱性呈先降低后升高的趋势。时间上高暴露度区域面积先减小后增大,高暴露度区域主要集聚在西南部,东北部的乡镇暴露度普遍较低;敏感性指数先降低后略微升高,区内西南部敏感性水平要高于北部和东南;适应力呈缓慢下降趋势,空间分布与暴露度基本相同;区内脆弱性由西南向东北递增,与适应力正好相反。

(2) 通过对脆弱性影响因素的识别,发现安定区社会生态系统主要受暴露度和适应力的影响,主要驱动因子多与人类活动相关。暴露度中生态压力对安定区脆弱性的作用最大;适应力中的生态资本和社会资本因子与脆弱性关系最为密切,其中有效灌溉面积、林地占比对提升安定区社会生态系统应对力,降低脆弱性作用最显著;敏感性驱动因子对脆弱性的贡献最小。最后得出,只有不断加强区域生态建设,提高适应力水平,科学合理规划,有效降低暴露度,才能保持和促进安定区社会生态系统的稳定与持续发展。

参考文献:

[1] 刘学,张志强,郑军卫.关于人类世问题研究的讨论[J].地球科学进展,2014,29(5):640-649.

[2] 陈萍,陈晓玲.全球环境变化下人—环境耦合系统的脆弱性研究综述[J].地理科学进展,2014,29(4):454-462.

[3] 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.

[4] 谢盼,王仰麟,刘焱序,等.基于社会脆弱性的中国高温灾害人群健康风险评价[J].地理学报,2015,70(7): 1041-1051.

[5] 马骏,李昌晓,魏虹,等.三峡库区生态脆弱性评价[J].生态学报,2015,35(21):7117-7129.

[6] 赵东升,吴绍洪.气候变化情景下中国自然生态系统脆弱性研究[J].地理学报,2013,68(5):602-610.

[7] 李博,苏飞,杨智,等.脆弱性视角下辽宁沿海地区人海关系地域系统特征演化及可持续发展模式[J].地域研究与开发,2017,36(4):32-36.

[8] 彭飞,孙才志,刘天宝,等.中国沿海地区海洋生态经济系统脆弱性与协调性时空演变[J].经济地理,2018,38(3):165-174.

[9] 伏捷,孙才志,彭飞.环渤海地区海洋生态经济系统脆弱性与协调性时空演变及动态模拟[J].辽宁师范大学学报:自然科学版,2017,40(3):395-406.

[10] 余中元,李波,张新时.湖泊流域社会生态系统脆弱性分析:以滇池为例[J].经济地理,2014,34(8):143-150.

[11] 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.

[12] 田亚平,向清成,王鹏.区域人地耦合系统脆弱性及其评价指标体系[J].地理研究,2013,32(1):55-63.

[13] 温晓金,杨新军,王子侨.多适应目标下的山地城市社会—生态系统脆弱性评价[J].地理研究,2016,35(2): 299-312.

[14] 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.

[15] Siegel K J, Cabral R B, McHenry J, et al. Sovereign states in the Caribbean have lower social-ecological vulnerability to coral bleaching than overseas territories [J]. Proceedings of the Royal Society B, 2019, 286 (1897):20182365.

[16] Hagenlocher M, Renaud F G, Haas S, et al. Vulnerability and risk of deltaic social-ecological systems exposed to multiple hazards[J]. Science of the Total Environment, 2018,631:71-80.

[17] Gardner J S, Dekens J. Mountain hazards and the resilience of social-ecological systems: lessons learned in India and Canada[J]. Natural Hazards, 2007,41(2):317-336.

[18] 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.

[19] 王林峰,张平宇,李鹤,等.东北西部农牧交错带社会生态系统脆弱性[J].中国科学院大学学报,2018,35(3): 345-352.

[20] 王群,银马华,杨兴柱,等.大别山贫困区旅游地社会—生态系统脆弱性时空演变与影响机理[J].地理学报, 2019,74(8):1663-1679.

- 服务时空格局及其变化特征[J].地理科学,2018,38(9):1508-1515.
- [7] Haunreiter E, Cameron D. Mapping ecosystem services in the Sierra Nevada, CA[J]. The Nature Conservancy, California Program, 2001,12(1):16-32.
- [8] Tallis H, Polasky S. Mapping and valuing ecosystem services as an approach for conservation and natural-resource management[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2009,1162(1):265-283.
- [9] 张媛媛.1980—2015 年三江源区水源涵养生态系统服务功能评估分析[D].北京:首都师范大学,2012.
- [10] 贾芳芳.基于 Invest 模型的赣江流域生态系统服务功能评估[D].北京:中国地质大学,2014.
- [11] 荣月静.基于土地利用变化的南京市碳储量与生物多样性功能模拟[D].南京:南京信息工程大学,2015.
- [12] 黄从红.基于 InVEST 模型的生态系统服务功能研究:以四川宝兴县和北京门头沟区为例[D].北京:北京林业大学,2014.
- [13] 李彪.基于 GIS 和 InVEST 模型的南流江流域生态系统服务评估[D].南宁:广西师范大学,2017.
- [14] 陈姗姗.南水北调水源区水源涵养与土壤保持生态系统服务功能研究:以商洛市为例[D].西安:西北大学,2016.
- [15] 吴哲,陈歆,刘贝贝,等.不同土地利用/覆盖类型下海南岛产水量空间分布模拟[J].水资源保护,2014,30(3):9-13.
- [16] 党虹.基于 Invest 模型的钩秤河流域土壤保持功能研究[J].兰州大学学报:自然科学版,2018,54(5):633-639.
- [17] 何莎莎,朱文博,张静静,等.基于 InVEST 模型的太行山淇河流域土壤保持功能研究[J].河南大学学报:自然科学版,2018,48(5):542-553.
- [18] 赵梦雨.基于景观格局变化的咸阳市生境质量演变研究[D].山西临汾:山西师范大学,2018.
- [19] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [20] 吕乐婷,任甜甜,李赛赛,等.基于 InVEST 模型的大连市产水量时空变化分析[J].水土保持通报,2019,39(4):144-150,157.
- [21] 王川,刘春芳,乌亚汗,等.黄土丘陵区生态系统服务空间格局及权衡与协同关系:以榆中县为例[J].生态学杂志,2019,38(2):521-531.
- [22] 刘晓娜,裴厦,陈龙,等.基于 invest 模型的门头沟区生态系统土壤保持功能研究[J].水土保持研究,2018,25(6):168-176.
- [23] 王耕,韩冬雪.基于 InVEST 模型的大凌河上游汇水区水源涵养功能评估[J].水土保持通报,2018,38(3):206-211.
- [24] 柳冬青,巩杰,张金茜,等.甘肃白龙江流域生态系统土壤保持功能时空变异及其影响因子[J].水土保持研究,2018,25(4):98-103.
- [25] 王蓓,赵军,胡秀芳.基于 InVEST 模型的黑河流域生态系统服务空间格局分析[J].生态学杂志,2016,35(10):2783-2792.
- [26] 薛卓彬.基于 InVEST 模型的延河流域生态系统服务功能评估[D].西安:西北大学,2017.

(上接第 380 页)

- [21] 陈娅玲.陕西秦岭地区旅游社会—生态系统脆弱性评价及适应性管理对策研究[D].西安:西北大学,2013.
- [22] 余中元,李波,张新时.湖泊流域社会生态系统脆弱性时空演变及调控研究:以滇池为例[J].人文地理,2015,30(2):110-116.
- [23] 杨新军,张慧,王子侨.基于情景分析的西北农村社会—生态系统脆弱性研究:以榆中县中连川乡为例[J].地理科学,2015,35(8):952-959.
- [24] 何艳冰,黄晓军,翟令鑫,等.西安快速城市化边缘区社会脆弱性评价与影响因素[J].地理学报,2016,71(8):1315-1328.
- [25] 田亚平,向清成,王鹏.区域人地耦合系统脆弱性及其评价指标体系[J].地理研究,2013,32(1):55-63.
- [26] 邬建国.景观生态学—格局、过程、尺度与等级[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [27] 谢花林.基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析[J].生态学报,2008,28(10):5020-5026.
- [28] 李洁,赵锐锋,谢作轮.甘肃省区域社会—生态系统脆弱性综合评价[J].经济地理,2015,35(12):168-175.
- [29] 职璐爽,薛惠锋.基于熵权法的城市水资源脆弱性研究:以广东省为例[J].水土保持通报,2018,38(5):322-329.
- [30] Barros V, Stocker T F. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation:special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[J]. Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, 2012,18(6):586-599.
- [31] 周苏娥,张明军,王圣杰,等.甘肃省河西地区自然—社会系统脆弱性评价[J].资源科学,2018,40(2):452-462.
- [32] 鲁春阳,文枫,杨庆媛,等.基于改进 TOPSIS 法的城市土地利用绩效评价及障碍因子诊断:以重庆市为例[J].资源科学,2011,33(3):535-541.
- [33] 史鹏宇.雨水集流工程在安定区的利用成效[J].甘肃农业,2006(1):102.