

引用格式: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. [Zhou S E, Zhang M J, Wang S J, et al. Assessment of vulnerability in natural-social system in Hexi, Gansu[J]. *Resources Science*, 2018, 40(2): 452-462.] DOI: 10.18402/resci.2018.02.20

# 甘肃省河西地区自然-社会系统脆弱性评价

周苏娥, 张明军, 王圣杰, 孙美平

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

**摘要:**脆弱性是全球环境变化和区域可持续发展研究中的重点内容与热点问题。本文基于脆弱性评价模型、因子贡献度模型和熵权法,通过构建自然-社会系统脆弱性评价体系,定量分析了甘肃省河西地区各乡镇的自然-社会系统的暴露度、敏感性、适应能力和脆弱性,以及各指标和各要素层对自然-社会系统脆弱性的贡献度。研究表明:①甘肃省河西地区中度、较高度和高度脆弱性区域占河西地区总面积的70.85%,脆弱程度高;②河西地区南部高海拔山区的脆弱性明显高于北部低海拔地区;③从三大内陆河流域来看,疏勒河流域脆弱性的程度最高,黑河流域次之,石羊河流域最低;④河西地区以自然适应能力、社会经济敏感性、自然敏感性和自然暴露度为主要贡献因子的地区分别占河西面积的91.77%、87.23%、67.85%和56.53%,降低河西地区自然适应能力、社会经济敏感性、自然敏感性和自然暴露度是降低脆弱性的关键所在。

**关键词:**脆弱性评价;自然-社会系统;乡镇尺度;主要贡献因子;河西地区

DOI: 10.18402/resci.2018.02.20

## 1 引言

“脆弱性”研究始于生态系统的自然灾害领域<sup>[1]</sup>, Timmerman P 于1981年提出了脆弱性的概念,标志着脆弱性研究在地学领域的兴起<sup>[2]</sup>。20世纪90年代初, Liverman 首次将“脆弱性”这一概念用于全球环境变化研究,逐渐成为全球环境变化和区域可持续发展研究中的重要内容、热点与前沿问题,并形成了一门新兴的学科<sup>[3-8]</sup>。脆弱性又分为自然脆弱性和社会脆弱性<sup>[9]</sup>。自然脆弱性是自然系统在特定尺度下容易受到气候变化(包括气候变率和极端气候事件)导致的负面影响,但自身无力应对气候变化及其产生的各种不利影响的程度<sup>[7,8]</sup>。社会脆弱性的概念形成于自然脆弱性概念的基础之上,是指暴露于自然因素或人为因素扰动下的社会系统,由于自身的敏感性特征和缺乏对不利扰动的应对能力而使系统受到的负面影响或损害的状态<sup>[9]</sup>。自然-社会脆弱性描述了自然-社会系统暴露于扰动

过程或风险环境中,因其自身的敏感特性和缺乏对抗扰动或风险的应对能力而使自然-社会系统受到不利影响或损害的程度,自然-社会系统脆弱性是以该系统的暴露度、敏感性和适应能力为自变量的函数<sup>[9-12]</sup>。自然-社会系统脆弱性评价则是为了评估该系统面对外界环境的压力与胁迫时,用以维持自身平衡所需要的恢复力和自身调节能力,可以帮助探求可行的干预策略<sup>[13,14]</sup>。

脆弱性作为全球环境变化和区域可持续发展研究中的热点与前沿,许多学者对其进行了大量研究,研究内容主要集中在社会脆弱性<sup>[15]</sup>、自然脆弱性和生态脆弱性<sup>[16-18]</sup>等。对于社会脆弱性,周扬等指出特定不利事件或自然灾害影响下的综合(自然和社会)系统脆弱性的动态研究是亟待开发的灾害研究课题<sup>[12]</sup>;就自然脆弱性而言,高江波等基于遥感数据研究得出青藏高原生态脆弱性由东南向西北呈增加趋势,整体脆弱性较大<sup>[19]</sup>;关于生态脆弱性,马骏

收稿日期: 2017-05-16; 修订日期: 2017-12-20

基金项目: 中国清洁发展机制基金赠款项目(2014105); 国家自然科学基金项目(41461003)。

作者简介: 周苏娥, 女, 甘肃静宁人, 硕士生, 研究方向为全球变化与可持续发展。E-mail: geozse@126.com

通讯作者: 张明军, E-mail: mjzhang2004@163.com

2018年2月

等对2001—2010年三峡库区(重庆段)的生态脆弱性进行了综合评估,发现三峡库区整体呈中度脆弱性,以西高东低的态势分布<sup>[20]</sup>。整体来看,这些前期研究主要以某一单一系统为研究对象进行分析。近年来,随着社会经济的高速发展,人与自然的相互作用更加突出。王如松等、余中元等提出社会-经济-自然复合生态系统的概念,并认为三者相互联系且制约,可以视为复合系统进行考虑<sup>[21,22]</sup>。随着脆弱性研究的日益深化,对其研究需从单一要素转向更为全面的跨尺度、多要素的复合系统<sup>[23-25]</sup>。杨新军等通过对榆中县中连川乡多利益主体进行实地调查和情景访谈,尝试将社会与生态环境信息结合起来进行脆弱性研究<sup>[26]</sup>;陈佳等对半干旱地区的社会-生态系统脆弱性进行了分析,并预测了不同发展导向下的脆弱性<sup>[27]</sup>。

河西地区作为产粮大区,在甘肃乃至全国的粮食生产和供应线上占有举足轻重的地位,自2015年3月《推动共建丝绸之路经济带和21世纪海上丝绸之路的愿景与行动》提出以来,河西地区的区位优势更加明显,重要性更是不言而喻<sup>[28,29]</sup>,而近年来由于全球变化的影响,河西地区各系统要素的脆弱性日益显现。如李智飞等研究了河西走廊地区水资源脆弱性,并进行了狭义和广义的对比,结果发现河西地区三大内陆河流域中,水资源的脆弱程度表现为石羊河流域最高,疏勒河流域次之,黑河流域最小<sup>[30]</sup>。雍国正等研究了河西走廊的干旱脆弱性,结果发现,张掖市、酒泉市、金昌市呈中度脆弱性,嘉峪关市较低,武威市较高<sup>[31]</sup>。李洁等对甘肃省的社会-生态脆弱性进行了研究,发现其脆弱性程度显著呈现由南向北递增的趋势,主要驱动因子为社会因素<sup>[32]</sup>。可以发现,前人对于河西地区脆弱性的研究重点集中在单一系统上,而对于河西地区多要素复合系统(如自然-社会系统)的研究较少;研究尺度以县级、市级和流域等较大尺度的研究较多,小尺度数据的研究较少;大部分研究仅呈现了脆弱性的空间分布特征,并没有定量计算出各指标、要素层对脆弱性的贡献度,以及对减缓和降低脆弱性也未提供定量说明。

本文以河西地区为研究区域,以小尺度的乡镇数据对河西地区的自然-社会系统这一复合系统进

行了脆弱性分析,在得到河西地区脆弱性空间分布特征的基础上定量地计算出各指标、要素层对脆弱性的贡献度,从而得到各个乡镇的主要贡献度因子,旨在为该区的冰川和水资源持续利用、绿洲农业的安全生产和生态环境的日益优化,以及社会经济可持续发展提供合理的建议。

## 2 研究区概况、数据来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

河西地区位于甘肃省西北部,东起乌鞘岭,西至甘新省界,南以祁连山与青海省相接,北以北山山系与内蒙古毗邻,介于37°17'N—42°48'N和93°23'E—104°12'E,行政区包括武威、张掖、金昌、嘉峪关和酒泉5个地级市。东西长约1000km,南北宽50~100km,呈西北东南长条状分布,占甘肃省土地总面积的60.40%。地貌类型以绿洲、戈壁、沙漠为主,区内气候属于暖温带大陆性干旱气候,降水稀少,年降水量仅为40~400mm,年蒸发量高达1500~3000mm,是气候变化敏感区,也是生态脆弱区<sup>[31]</sup>。河西地区地势南高北低,南部海拔在3000~3500m的祁连山脉冰川广布,有“天然白色水库”之称,是石羊河、黑河、疏勒河的发源地和径流的形成区,是河西绿洲的重要水源地<sup>[33]</sup>。西部气候出现暖干向暖湿转型的突变,祁连山及其北侧中西段的河西走廊地区是气候转型显著的区域之一<sup>[34]</sup>,近年来,由于全球气候变暖,冰川明显萎缩后退,在短期内冰川的快速消融可以使得以冰川融水为主要补给的河流水量增加,缓解区域旱情,但从长远来看,则会导致后期水资源的严重不足,使得该地区水资源供需不协调,从而影响工农业的发展和人们的生活<sup>[35,36]</sup>。

### 2.2 脆弱性指标体系的构建、数据来源及预处理

#### 2.2.1 评价指标的选择

在科学性、指导性、针对性和可操作性等评价指标遴选原则的指导下<sup>[39]</sup>,以标准层(暴露度、敏感性和适应能力)、要素层(自然暴露度、社会经济暴露度、自然敏感性、社会经济敏感性、自然适应能力和社会经济适应能力)为研究框架,共遴选出19个评价指标(多年平均气温、多年平均降水量、耕地面积占比、各乡镇总GDP、乡镇人口密度、冰川体积、森林覆盖率、荒漠面积占比、社会总抚养比、乡镇居民生活人均日用水量、单位GDP用水量、单位工业

增加值用水量、节水灌溉面积占比、乡镇生态环境用水量、各乡镇农民人均纯收入、第三产业产值比重、粮食产量、九年义务教育在校人数、恩格尔系数)。采用标准层-要素层-指标层逐级递进、细化的方式进行数据组织,构建了河西地区的自然-社会脆弱性评价体系(表1)。其中暴露度分为自然暴露度和社会经济暴露度;敏感性又分为自然敏感性和社会经济敏感性;适应能力分为自然适应能力和社会经济适应能力。指标的选择方面,河西地区地处内陆腹地,气候类型复杂,温差较大,降水分布不均,农业生产条件随之存在地域差异,以多年平均气温、多年平均降水量和耕地面积占比反映自然暴露度<sup>[14,32]</sup>;而河西地区发展落后,经济水平较低,且由于生态格局的差异,人口分布不均,以各乡镇GDP和乡镇人口密度反映社会经济暴露度<sup>[32]</sup>;河西地区三大内陆河流域均发源于祁连山,水资源直接影响农业灌溉和人类生活,而近年来随着气候变暖,冰川快速消融,冰川对河西地区的影响日益增大,森林具有保持水土,涵养水源和防风固沙的作用,在荒漠化程度

较高、土壤肥力较差的河西地区,作用更是不言而喻,因此自然敏感性用冰川体积、森林覆盖率和荒漠化面积占比来表征<sup>[17,27]</sup>;儿童和老人的体质和免疫力较弱,是自然灾害发生时最易受到伤害的群体,而水资源是人类赖以生存的必要条件,是工农业发展的前提,因此以社会总抚养比、乡镇居民生活人均日用水量、单位GDP用水量和单位工业增加值用水量来表征社会经济敏感性<sup>[9,31,37,38]</sup>;河西地区水资源短缺,其作为重要的粮食基地,实现节水灌溉意义重大,而生态环境的优化是人们健康生活的重要保证,因此以节水灌溉面积占比和乡镇生态环境耗水量来表征自然适应能力<sup>[31]</sup>;以各乡镇农民人均纯收入、第三产业产值比重、粮食产量、九年义务教育在校人数和恩格尔系数来表征社会经济适应能力<sup>[32]</sup>。

2.2.2 数据来源及预处理

(1)气温和降水数据。本文使用的气象数据来源于国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/>)。分别计算1961—2015年河西地区及其邻近地区的18个气象站点的多年平均气温和多年平

表1 河西地区自然-社会脆弱性评价体系及各指标权重

Table 1 An assessment index system and the weight of each index of natural-social system vulnerability in Hexi area

标准层	要素层	指标层	指标类型	熵值( <i>H</i> )	效用值( <i>d</i> )	权重( <i>W</i> )
暴露度	自然暴露度	多年平均气温	—	0.913	0.087	0.038
		多年平均降水量	+	0.956	0.044	0.019
		耕地面积占比	+	0.933	0.067	0.030
	社会经济暴露度	各乡镇GDP	+	0.843	0.157	0.069
		乡镇人口密度	—	0.816	0.184	0.081
敏感性	自然敏感性	冰川体积	+	0.704	0.296	0.131
		森林覆盖率	+	0.773	0.227	0.100
		荒漠面积占比	—	0.884	0.116	0.051
	社会经济敏感性	社会总抚养比	—	0.838	0.162	0.071
		乡镇居民生活人均日用水量	+	0.864	0.136	0.060
		单位GDP用水量	—	0.940	0.060	0.026
		单位工业增加值用水量	+	0.856	0.144	0.064
适应能力	自然适应能力	节水灌溉面积占比	+	0.944	0.056	0.025
		乡镇生态环境用水量	+	0.776	0.224	0.099
	社会经济适应能力	各乡镇农民人均纯收入	+	0.965	0.035	0.015
		第三产业产值比重	+	0.980	0.020	0.009
		粮食产量	+	0.856	0.144	0.064
		九年义务教育在校人数	+	0.993	0.007	0.003
		恩格尔系数	+	0.900	0.100	0.044

注: + 表示正向指标,指标值越大,评价结果越好(脆弱程度越低); — 表示负向指标,指标值越大,评价结果越差(脆弱程度越高)。



2018年2月

均降水量,选择与各乡镇较为接近的气象站点的多年平均气温和多年平均降水量来反映各乡镇的气候条件。

(2)冰川数据。本文所使用的冰川数据来源于中国第二次冰川编目数据集(V1.0)<sup>[40]</sup>,该数据集来源于寒区旱区科学数据中心-基金委国家地球系统科学数据共享平台(<http://westdc.westgis.ac.cn>),中国第二次冰川编目数据集收集整理了覆盖西部冰川区的Landsat TM/ETM+遥感影像142幅,ASTER遥感影像563景,时间段为2004—2011年<sup>[41]</sup>,而本文采用河西地区的冰川数据仅为其中的一部分,时间段为2005—2009年。

(3)土地利用类型数据。本文采用的土地利用类型数据来源于中国5年间陆地生态系统空间分布数据集(1990—2010年),该数据来源于全球变化科学研究数据出版系统(<http://www.geodoi.ac.cn/web.cn>)<sup>[42]</sup>,基于2010年陆地生态系统空间分布数据集,获得河西地区各乡镇的土地利用类型。

(4)人口数据。来源于中国人口普查分乡、镇、街道资料(2010年)数据<sup>[43]</sup>,统计得到河西地区各乡镇的人口数据,计算出各乡镇的人口密度;根据分年龄人口数计算出社会总抚养比<sup>[44]</sup>,即:

$$\text{社会总抚养比} = \frac{[(0 \sim 14 \text{岁人口数}) + (65 \text{岁以上人口数})]}{(15 \sim 64 \text{岁劳动年龄人口数})} \quad (1)$$

(5)社会经济数据。来源于2014年《甘肃发展年鉴》<sup>[45]</sup>,根据各乡镇人口和面积对各乡镇数据赋值。

(6)边界数据。本文采用的边界数据来源于甘肃省2012年1:10万基础地理数据集<sup>[46]</sup>,来源于寒区旱区科学数据中心-基金委国家地球系统科学数据共享平台(<http://westdc.westgis.ac.cn>)。

### 2.2.3 数据标准化方法

由于采用的原始数据量纲不同,在进行脆弱性分析之前,本文采用极差标准化对数据进行处理以消除各原始数据的量纲差异。由于脆弱性评价中正向指标和负向指标的作用不同,所以分别采用公式(2)和公式(3)对正向指标和负向指标进行标准化处理。标准化公式如下:

$$S_{ij} = \frac{[X_{ij} - \text{Min}(X_j)]}{[\text{Max}(X_j) - \text{Min}(X_j)]} \quad (2)$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m)$$

$$S_{ij} = \frac{[\text{Max}(X_j) - X_{ij}]}{[\text{Max}(X_j) - \text{Min}(X_j)]} \quad (3)$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m)$$

假设评价对象有 $n$ 个,评价指标有 $m$ 个; $i$ 代表评价对象, $j$ 代表评价指标; $X_{ij}$ 为第 $i$ 个评价对象的第 $j$ 个评价指标的原始值; $S_{ij}$ 为第 $i$ 个评价对象的第 $j$ 个评价指标经过极差标准化处理后的标准化值; $\text{Max}(X_j)$ 和 $\text{Min}(X_j)$ 为 $j$ 指标的最大值和最小值。

## 2.3 评价指标权重确定及评价模型研究方法

### 2.3.1 指标权重的确定——熵权法

脆弱性评价的关键环节是要确定各评价指标的权重,本文选取的指标数据量大且量纲不同,量化较难,因此选择适当的方法确定权重尤为重要。熵权法<sup>[47]</sup>作为一种客观成熟的赋权方法,既能反映所选指标信息的效用价值,又能避免指标间信息重复和人为因素干扰,其熵值( $H_j$ )可以对系统无序程度进行度量,熵权( $W_j$ )能克服指标间的信息重叠,可以科学合理地确定各项指标在整体评价中的重要性,公式如下:

$$H_j = -1/\ln n \sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (4)$$

$$d_j = 1 - H_j \quad (5)$$

$$W_j = d_j / \sum_{j=1}^m d_j \quad (j = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (6)$$

$$f_{ij} = S_{ij} / \sum_{i=1}^n S_{ij} \quad (7)$$

式中 $H_j$ 为第 $j$ 个指标的熵值; $d_j$ 为第 $j$ 个指标的效用值; $C_j$ 为第 $j$ 个指标的权重(熵权); $f_{ij}$ 是基于标准化数据 $S_{ij}$ 的第 $j$ 个评价指标下第 $i$ 个评价对象的指标比重。熵权法计算结果见表1。

### 2.3.2 脆弱性评价模型

根据前人的研究<sup>[9-12]</sup>,脆弱性由暴露度( $EI$ )、敏感性( $SI$ )和适应能力( $AI$ )决定,且暴露度、敏感性越高,脆弱程度越高,适应能力越高,脆弱程度越低。脆弱性指数可用公式(8)计算<sup>[10]</sup>:

$$VI = EI + SI - AI \quad (8)$$

暴露度( $EI$ )、敏感性( $SI$ )和适应能力( $AI$ )的计算公式见公式(9),由第 $j$ 项指标权重值和 $j$ 项指标标准化值的乘积得到第 $j$ 项指标的评价值,通过加权求和可分别计算出各要素层(自然暴露度、社会经济暴露度、自然敏感性、社会经济敏感性、自然适应能力、社会经济适应能力)、标准层的评价指数(暴

露度、敏感性、适应能力)的评价指数,从而求出脆弱性指数。

$$A_i = \sum_{j=1}^m S_{ij} \times W_j \quad (9)$$

式中  $i$  表示评价对象;  $j$  表示评价指标;  $A_i$  表示第  $i$  个评价对象要素层、标准层的评价指数;  $S_{ij}$  表示评价指标的标准化值;  $W_j$  为第  $j$  项指标的权重。

### 2.3.3 因子贡献度模型

近年来,脆弱性研究得到进一步深化,关于脆弱性的研究不仅要明确其空间分布,更要探究导致其脆弱性的原因,即通过求出各评价指标和各要素层对脆弱性的贡献程度,从而为系统的脆弱性减缓提供有效措施,本文采用的因子贡献度公式<sup>[48]</sup>如下:

$$C_j = \frac{F_j \times I_j}{\sum_{j=1}^m F_j \times I_j} \times 100\% \quad (10)$$

$$U_r = \sum C_j \quad (11)$$

$$F_j = W_r \times W_j \quad (12)$$

式中  $C_j$  表示第  $j$  项指标对于脆弱性的贡献度;  $U_r$  表示第  $r$  要素层对于脆弱性的贡献度;  $I_j$  为指标隶属度;  $F_j$  为单项指标对总目标的权重;  $W_r$  为第  $r$  要素层的权重;  $W_j$  为第  $j$  项指标的权重。

## 3 结果及分析

### 3.1 脆弱性分析

本文通过脆弱性评价模型,计算出了暴露度指数、敏感性指数、适应能力指数和脆弱性指数,图1中运用自然间断点分级法(Jenks),参照已有研究经验<sup>[18,49]</sup>,分别将暴露度指数、敏感性指数、适应能力指数和脆弱性指数分为5个级别(低度、较低度、中度、较高度、高度)进行分析。

#### 3.1.1 暴露度分析

暴露度是指系统遭受外界环境的胁迫与压力的程度,由所处位置和外界环境的影响决定。本文把暴露度分为五个级别,分别是低度暴露度(0.030~0.093)、较低度暴露度(0.094~0.104)、中度暴露度

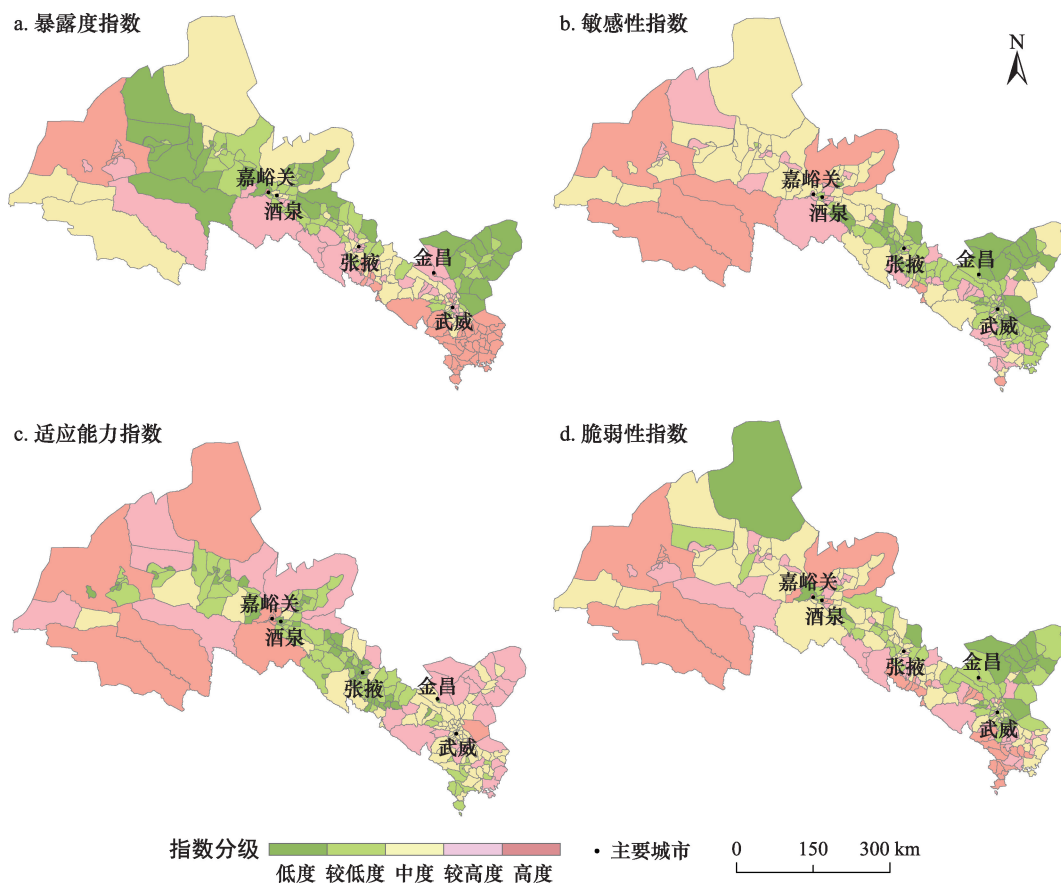


图1 河西地区自然-社会系统脆弱性空间分布

Figure 1 Spatial distribution of the natural - social system vulnerability in Hexi area

2018年2月

(0.105~0.115)、较高度暴露度(0.116~0.132)、高度暴露度(0.133~0.173)。如图1a所示,河西地区的低度和较低度暴露度,分别占河西地区面积的24.27%和9.42%;33.67%的区域呈中度暴露度;较高度暴露度和高度暴露度均占河西地区面积的16.32%。从流域来看,疏勒河流域内,除敦煌市内呈高度暴露度、阿克塞哈萨克族自治县和肃北蒙古族自治县内的部分乡镇呈较高度暴露度和中度暴露度外,其他区域均呈低度和较低度暴露度;黑河流域和石羊河流域的暴露度明显呈现出南高北低的态势,海拔较高的南部山区呈高度和较高度暴露度,海拔较低的北部地区呈较低度和低度暴露度。

### 3.1.2 敏感性分析

敏感性是暴露区域对外界环境的胁迫或压力产生的正负面影响易于感知的程度,系统内部结构决定敏感性的高低,本文把敏感性划分成五个级别,分别是低度敏感性(0.030~0.091)、较低度敏感性(0.092~0.123)、中度敏感性(0.124~0.156)、较高度敏感性(0.157~0.192)、高度敏感性(0.193~0.272),如图1b所示,河西地区多为高度敏感性和较高度敏感性,分别占河西地区面积的33.12%和12.39%,中度敏感性区域占河西地区面积的39.06%;而7.86%和7.57%的河西地区为较低度敏感性和低度敏感性。从流域来看,疏勒河流域整体呈高度、较高度敏感性和中度脆弱性,且呈现南高北低的态势;黑河流域除西部部分乡镇呈现高度和较高度敏感性外,大部分区域呈中度和较低度敏感性;石羊河流域敏感性整体较低,仅祝藏族自治县、永昌县和民勤县部分乡镇呈中度和较高度敏感性。

### 3.1.3 适应能力分析

适应能力是指系统自身在负面影响下的恢复能力和一定范围内的自身调节能力<sup>[50]</sup>,其与政府政策导向、经济发展和人们的观念密切相关,本文将适应能力划分为以下等级:低度适应能力(0.008~0.017)、较低度适应能力(0.018~0.025)、中度适应能力(0.026~0.036)、较高度适应能力(0.037~0.055)、高度适应能力(0.056~0.074)。如图1c所示,河西地区整体适应能力较好,40.49%和30.20%的区域为高度适应能力和较高度适应能力,12.77%的区域为中度适应能力,较低度适应和低度适应能力仅为

13.52%和3.02%。从流域来看,疏勒河流域除敦煌市、瓜州县和玉门市的部分乡镇呈较低度适应能力外,其他区域整体呈较高度和高度适应能力;黑河流域整体呈低度和较低度适应能力;石羊河流域整体呈中度和较高度适应能力。整体来看,河西地区适应能力疏勒河流域最高,石羊河流域次之,黑河流域最低。

### 3.1.4 脆弱性分析

根据公式(8)计算出脆弱性指数,并将其分为以下几个区间:低度脆弱性(0.071~0.148)、较低度脆弱性(0.149~0.191)、中度脆弱性(0.192~0.226)、较高度脆弱性(0.227~0.266)、高度脆弱性(0.267~0.384)。如图1d所示,河西地区脆弱性呈西高东低、南高北低的态势,且中度、较高度和高度脆弱性区域占了河西地区面积的70.85%。其高度脆弱性主要集中在阿克塞哈萨克族自治县、肃北蒙古族自治县、敦煌市、武威市和张掖市辖区内的部分乡镇,占河西地区面积的32.01%左右;较高度脆弱性和中度脆弱性分别占河西地区面积的12.90%和25.94%,较低度和低度脆弱性分别占河西地区面积的11.47%和17.68%。从流域来看,疏勒河流域整体呈高度、较高度和中度脆弱性,由南向北呈递减的态势;黑河流域除南部呈高度和较高度脆弱性、金塔县部分乡镇呈高度和较高度脆弱性外,其他区域整体呈中度、较低度和低度脆弱性;石羊河流域脆弱性呈现南高北低的态势,天祝藏族自治县的大部分乡镇呈高度脆弱性。

### 3.2 因子贡献度分析

根据因子贡献度模型计算出各指标的贡献度,进一步计算出各要素层的贡献度,从而识别主要贡献因子,并提出合理的建议以降低脆弱性程度。各区域的主要贡献因子按照贡献度 $\geq 10\%$ 的原则确定,可以看出自然适应能力、社会经济敏感性、自然敏感性和自然暴露度是河西大部分地区的主要贡献因子,社会经济暴露度在整个河西地区都不是主要贡献因子,社会经济适应能力仅在13.78%的地区为主要贡献度因子。

由图2a可以看出,以自然暴露度为主要贡献因子( $\geq 10\%$ )的地区占河西地区面积的56.53%;由图2b可以看出,河西地区社会经济暴露度贡献度 $< 10\%$ ,



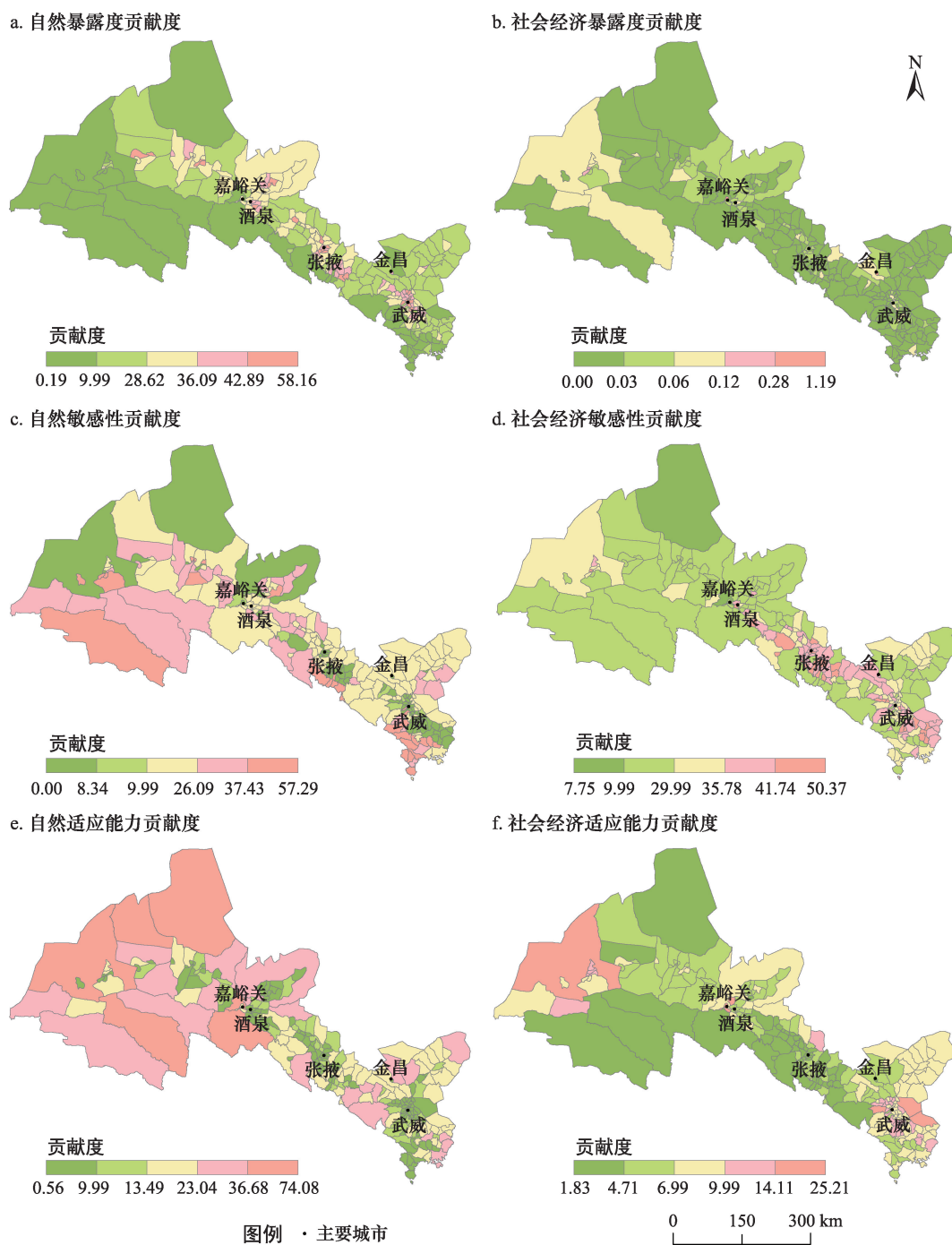


图2 河西地区要素层因子贡献度

Figure 2 Contribution of feature factors in Hexi

不是主要贡献因子,由图2c可以看出,以自然敏感性为主要贡献因子( $\geq 10\%$ )的地区占河西面积的67.85%,由图2d可以看出,以社会经济敏感性为主要贡献因子( $\geq 10\%$ )的地区占河西面积87.23%,由图2e可以看出,以自然适应能力为主要贡献因子( $\geq 10\%$ )的地区较多,占河西面积的91.77%,由图2f可

以看出,以社会经济适应能力为主要贡献因子( $\geq 10\%$ )的地区较少,占河西面积的13.78%。在疏勒河流域,以自然暴露度、自然敏感性、自然适应能力和社会适应能力为主要贡献因子;在黑河流域,自然暴露度、自然敏感性、社会经济敏感性和自然适应能力为主要贡献因子;在石羊河流域,除社会经

2018年2月

济暴露度外,其他要素层均为主要贡献因子。

### 3.3 讨论

河西地区深居大陆内部,降水稀少,蒸发强烈,自然条件十分恶劣,生态环境非常敏感,土地肥力较弱,水资源较少。由图1可以看出,河西地区中度、较高度和高度脆弱性区域占了河西地区面积的70.85%,脆弱程度高。从图2可以看出,降低自然适应能力、自然敏感性、社会经济敏感性和自然暴露度是降低河西地区脆弱性的关键所在。

由于自身所处的地理位置和自然环境的制约,河西地区降水较少,植被覆盖率较低,沙漠化和荒漠化现象严重,土地肥力较差,灌溉技术较为落后,水资源紧张,生态环境较差,所以应加强对生态系统的保护和修复。如在土壤沙化严重的区域加强治沙力度,加强防沙固沙林的种植,降低沙漠化进程;加强对三大内陆河(疏勒河、黑河和石羊河)流域的综合治理;引进新的节水灌溉技术,以减少水资源的浪费;合理利用各水库的调节功能,适当增加引流、引水工程的建设,保证河西地区生活用水、农田灌溉和工业用水的需求;加强对盐碱化土地的治理,提高作物产量;停止在祁连山冰川区域的矿产开采活动,保护祁连山的冰川和当地的水源。

## 4 结论

河西地区作为一带一路战略中的重要部分,其区位优势明显,但近年来受全球变化的影响,河西地区各系统要素的脆弱性日益加剧。本文基于脆弱性评价模型、因子贡献度模型和熵权法,定量分析了河西地区各乡镇的自然-社会系统的暴露度、敏感性、适应能力和脆弱性,以及各指标和要素层对自然-社会系统脆弱性的贡献度。结果如下:

(1)整体来看,河西地区脆弱程度较高且呈西高东低、南高北低的态势,且南部高海拔山区的脆弱性明显高于北部低海拔地区;河西地区中度、较高度和高度脆弱性区域总共占了河西地区面积的70.85%。

(2)分流域来看,河西三大内陆河流域的脆弱性明显表现为疏勒河流域最高,黑河次之,石羊河最低。疏勒河流域脆弱性明显呈现南部山区高,北部低海拔地区低的态势;表现为较高敏感性和高适

应能力;黑河流域中度、较高度和高度脆弱性所占面积较大,整体表现为较高暴露度和低适应能力;石羊河流域脆弱性呈现南高北低的态势,呈高暴露度、较低敏感性和较高适应能力,整体脆弱性程度较低。

(3)通过因子贡献度的计算可以看出,以自然适应能力、社会经济敏感性、自然敏感性和自然暴露度为主要贡献因子的地区分别占河西地区总面积的91.77%、87.23%、67.85%和56.53%,降低河西地区自然适应能力、社会经济敏感性、自然敏感性和自然暴露度是降低河西地区自然-社会系统脆弱性的关键所在。

### 参考文献(References):

- [1] Janssen M A, Schoon M L, Ke W M, *et al.* Scholarly networks on resilience, vulnerability and adaptation within the human dimensions of global environmental change[J]. *Global Environmental Change*, 2006, 6(3):240-252.
- [2] Timmerman P. Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society—a Review of Models and Possible Climatic Applications [D]. Toronto: University of Toronto, 1981.
- [3] Kaspersen, Roger E, Kirstin, *et al.* Understanding global environmental change: The contributions of risk analysis and management [J]. *Journal of Clinical Investigation*, 1990, 121(10): 3981-3990.
- [4] Nd T B, Kaspersen 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.
- [5] Kate R W, Clark W C, Corell R, *et al.* Environment and development: Sustainability science[J]. *Science*, 2001, 292(5517):641-642.
- [6] IPCC. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [7] Pachauri R K, Meyer L A, Team C W. IPCC, 2014: Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [J]. *Journal of Romance Studies*, 2015, 4(2): 85-88.
- [8] Mccarthy J J, Canziani O F, Leary N A, *et al.* Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability[J]. *Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report*, 2007, 19(2): 81-111.
- [9] 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.]
- [10] Liu X Q, Wang Y L, Peng J, *et al.* Assessing vulnerability to drought based on exposure, sensitivity and adaptive capacity: a case study in middle inner Mongolia of China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2013, 23(1): 13–25.
- [11] Birkmann J, Cardona O D, Carreño M L, *et al.* Framing vulnerability, risk and societal responses: The MOVE framework[J]. *Natural Hazards*, 2013, 67(2): 193–211.
- [12] 周扬, 李宁, 吴文祥. 自然灾害社会脆弱性研究进展[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 128–135. [Zhou Y, Li N, Wu W X. Research progress on social vulnerability to natural disasters[J]. *Journal of Catastrophology*, 2014, 29(2): 128–135.]
- [13] 何勇, 武永峰, 刘秋峰. 未来气候变化情景下中国冰冻圈变化影响区域的脆弱性评价[J]. 科学通报, 2013, 58(9): 833–839. [He Y, Wu Y F, Liu Q F. The vulnerability assessment of China's Cryospheric changes impact region under the background of future climate change[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(9): 833–839.]
- [14] 杨建平, 李曼, 杨岁桥. 中国冰川脆弱性现状评价与未来预估[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1077–1087. [Yang J P, Li M, Yang S Q. Vulnerability of the glaciers to climate change in China: current situation and evaluation[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5): 1077–1087.]
- [15] 刘凯, 任建兰, 程钰, 等. 黄河三角洲地区社会脆弱性评价与影响因素[J]. 经济地理, 2016, 36(7): 45–52. [Liu K, Ren J L, Cheng Y, *et al.* Yellow River delta social vulnerability evaluation and influence factor[J]. *Economic Geography*, 2016, 36(7): 45–52.]
- [16] 赵雪雁, 刘春芳, 王学良, 等. 干旱区内陆河流域农户生计对生态退化的脆弱性评价—以石羊河中下游为例[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 4141–4151. [Zhao X Y, Liu C F, Wang X L, *et al.* Assessment of the vulnerability of farmers' livelihoods to ecological degradation in Arid regions of a continental river basin: a case study of the middle–lower reaches of the Shiyang River in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3): 4141–4151.]
- [17] 魏晓旭, 赵军, 魏伟, 等. 中国县域单元生态脆弱性时空变化研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 726–739. [Wei X X, Zhao J, Wei W, *et al.* Spatial and temporal changes of ecological vulnerability per county unit in Circumstantiae[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(2): 726–739.]
- [18] 刘正佳, 于兴修, 李蕾. 基于SRP概念模型的沂蒙山区生态环境脆弱性评价[J]. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2084–2090. [Liu Z J, Yu X X, Li L. Vulnerability assessment of eco–environment in Yimeng mountainous area of Shandong Province based on SRP conceptual model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(8): 2084–2090.]
- [19] 高江波, 侯文娟, 赵东升, 等. 基于遥感数据的西藏高原自然生态系统脆弱性评估[J]. 地理科学, 2016, 36(4): 580–587. [Gao J B, Hou W J, Zhao D S, *et al.* Comprehensive assessment of natural ecosystem vulnerability in Tibetan plateau based on satellite–derived datasets[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(4): 580–587.]
- [20] 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. [Ma J, Li C X, Wei H, *et al.* Dynamic evaluation of ecological vulnerability in the Three Gorges Reservoir Region in Chongqing Municipality, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(21): 7117–7129.]
- [21] 王如松, 欧阳志云. 社会–经济–自然复合生态系统与可持续发展[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 337–345. [Wang R S, Ouyang Z Y. Social–economic–natural complex ecosystem and sustainability[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2012, 27(3): 337–345.]
- [22] 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.]
- [23] 李鹤, 张平宇. 全球变化背景下脆弱性研究进展与应用展望[J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 920–929. [Li H, Zhang P Y. Research progress and prospective applications of vulnerability approach under global change[J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(7): 920–929.]
- [24] 刘春霞, 李月臣, 杨华, 等. 三峡库区重庆段生态与环境敏感性综合评价[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 631–642. [Liu C X, Li Y C, Yang H, *et al.* RS and GIS–based assessment for eco–environmental sensitivity of the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 631–642.]
- [25] 杨新军, 石育中, 王子侨. 道路建设对秦岭山区社会–生态系统的影响—一个社区恢复力的视角[J]. 地理学报, 2015, 70(8): 1313–1326. [Yang X J, Shi Y Z, Wang Z Q. Exploring the impacts of road construction on a local social–ecological system in Qinling mountainous area: a resilience perspective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(8): 1313–1326.]
- [26] 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. [Yang X J, Zhang H, Wang Z Q. Vulnerability assessment of rural social–ecological system based on scenario analysis: a case study of Zhonglianchuan Town in Yuzhong County[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(8): 952–959.]
- [27] 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): 1171–1188. [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): 1171–1188.]
- [28] 国家发展改革委, 外交部, 商务部. 推动共建丝绸之路经济带和21世纪海上丝绸之路的愿景与行动[R]. 北京: 新华社, 2015.

2018年2月

- [National Development and Reform Commission, Ministry of Foreign Affairs, Ministry of Commerce. Promote the Construction of Silk Road Economic Belt and Twenty-First Century Maritime Silk Road Vision and Action[R]. Beijing: Xinhua News Agency, 2015.]
- [29] 李贺娟, 李万明. “一带一路”背景下西北干旱地区水资源与经济生产要素匹配关系研究[J]. 节水灌溉, 2016, (11): 67-70. [Li H J, Li W M. The research on the relationship between water resources and economic production factors in Northwest Arid Area of China in the background of the Belt and Road[J]. *Water Saving Irrigation*, 2016, (11): 67-70.]
- [30] 李智飞, 门宝辉, 张士锋, 等. 河西走廊地区狭义/广义水资源脆弱性对比研究[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 939-947. [Li Z F, Men B H, Zhang S F, *et al.* A comparative study of narrow/general water resources vulnerability in Hexi Corridor region[J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(5): 939-947.]
- [31] 雍国正, 刘普幸, 姚玉龙, 等. 河西绿洲城市干旱脆弱性评价[J]. 土壤, 2014, 46(4): 749-755. [Yong G Z, Liu P X, Yao Y L, *et al.* Evaluation of vulnerability to drought in Hexi Oasis[J]. *Soils*, 2014, 46(4): 749-755.]
- [32] 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. [Li J, Zhao R F, Xie Z L. The comprehensive assessment of vulnerability in social-ecological system of Gansu Province[J]. *Economic Geography*, 2015, 35(12): 168-175.]
- [33] 贾文雄, 张禹舜, 李宗省. 近50年来祁连山及河西走廊地区极端降水的时空变化研究[J]. 地理科学, 2014, 34(8): 1002-1009. [Jia W X, Zhang Y S, Li Z X. Temporal and spatial change of climate extremes in Qilian Mountains and Hexi Corridor during last fifty years[J]. *Geoscience*, 2014, 34(8): 1002-1009.]
- [34] 施雅凤, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 25(2): 152-164. [Shi Y F, Shen Y P, Li D L, *et al.* Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China[J]. *Quaternary Research*, 2003, 25(2): 152-164.]
- [35] Watkins K. Human development report 2006: Beyond scarcity: Power poverty and the global water crisis[J]. *Social Science Electronic Publishing*, 2006, 25(4): 517-521.
- [36] 谢自楚, 王欣, 康尔泗, 等. 中国冰川径流的评估及其未来50a变化趋势预测[J]. 冰川冻土, 2006, 28(4): 457-466. [Xie Z C, Wang X, Kang E S, *et al.* Glacial runoff in China: An evaluation and prediction for the future 50 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(4): 457-466.]
- [37] Zhou Y, Li N, Wu W X, *et al.* Local spatial and temporal factors influencing population and societal vulnerability to natural disasters[J]. *Risk Analysis*, 2014, 34(4): 614-639.
- [38] Zhou Y, Li N, Wu W X, *et al.* Integrated risk assessment of multi-hazards in China[J]. *Natural Hazards*, 2015, 78(1): 257-280.
- [39] 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. [Tian Y P, Xiang Q C, Wang P. Regional coupled human-natural systems vulnerability and its evaluation indexes[J]. *Geographical Research*, 2013, 32(1): 55-63.]
- [40] Guo W Q, Liu S Y, Yao X J, *et al.* The second glacier inventory dataset of China (Version 1.0)[J]. *Cold and Arid Regions Science Data Center at Lanzhou*, 2014, doi:10.3972/glacier.001.2013.db.
- [41] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 3-16. [Liu S Y, Yao X J, Guo W Q, *et al.* The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 3-16.]
- [42] 徐新良, 刘纪远, 张增祥, 等. 中国5年间陆地生态系统空间分布数据集(1990-2010)内容与研发[J]. 全球变化数据学报, 2017, 1(1): 52-59. [Xu X L, Liu J Y, Zhang Z X, *et al.* Spatial distribution data of china's 5 year interval terrestrial ecosystem (1990-2010)[J]. *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2017, 1(1): 52-59.]
- [43] 叶礼奇, 徐涛, 郭栋. 中国人口普查分乡(镇)街道资料(2010)数据[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012. [Ye L Q, Xu T, Guo D. Tabulation on the 2010 Population Census of the People's Republic of China by Township[M]. Beijing: China Statistics Press, 2012.]
- [44] 陈涛, 陈功, 宋新明, 等. 从人口抚养比到社会抚养比的探索分析[J]. 中国人口科学, 2008, (2): 24-32. [Chen T, Chen G, Song X M, *et al.* Examining the shift from population dependency ratio to social dependency ratio[J]. *Chinese Journal of Population Science*, 2008, (2): 24-32.]
- [45] 樊怀玉, 鲜力群. 甘肃发展年鉴2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014. [Fan H Y, Xian L Q. Gansu Province Development Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2014.]
- [46] 吴立宗. 甘肃省2012年1:10万基础地理数据集[R]. 地球系统科学数据共享平台-寒区旱区科学数据中心, 2015. [Wu L Z. The Basic Data Set of 1: 10 Million in Gansu Province in 2012[R]. The Earth System Science Data Sharing Platform-Cold and Arid Regions Scientific Data Center, 2015.]
- [47] 贾艳红, 赵军, 南忠仁, 等. 基于熵权法的草原生态安全评价-以甘肃牧区为例[J]. 生态学杂志, 2006, 25(8): 1003-1008. [Jia Y H, Zhao J, Nan Z R, *et al.* Ecological safety assessment of grassland based on entropy-right method: a case study of Gansu pastoral area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(8): 1003-1008.]
- [48] 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. [Lu C Y, Wen F, Yang Q Y, *et al.* An evaluation of urban land use performance based on the improved TOPSIS method and diagnosis of its obstacle indicators: a case study of Chongqing[J]. *Resource Science*, 2011, 33(3): 535-541.]

- [49] 陈萍, 王兴玲, 陈晓玲. 基于栅格的鄱阳湖生态经济区洪灾脆弱性评价[J]. 地理科学, 2012, 32(8): 958–964. [Chen P, Wang X L, Chen X L. Flood vulnerability assessment of Poyang Lake economical ecological zone at raster level[J]. *Geoscience*, 2012, 32(8): 958–964.]
- [50] 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, 2010, 29(4): 454–462. [Chen P, Chen X L. Summary on research of coupled human–environment system vulnerability under global environmental change[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(4): 454–462.]

## Assessment of vulnerability in natural–social system in Hexi, Gansu

ZHOU Sue, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, SUN Meiping

(Geography and Environment College, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Vulnerability is important content and a hot issue in the study of global environmental change and regional sustainable development. Based on vulnerability assessment modeling, contribution of factors modeling and the entropy-right method, we constructed an evaluation system for vulnerability in a natural-social system. Exposure, sensibility, adaptive capacity and vulnerability of each village and town in Hexi area were analyzed. The contribution of each index and feature factors were also analyzed. We found that medium, higher and high vulnerability areas occupied 70.85% of the whole area in Hexi. The vulnerability degree was high and the vulnerability of southern mountain areas was higher than northern areas at lower altitudes. From the perspective of three continental river basins, the highest level of vulnerability appeared in Shule River Basin, and the vulnerability of the Black River Basin took second place, and that of the Shiyang River Basin was the lowest. Regions considering the adaptive capacity degree of natural system, sensibility degree of the social-economic system, sensibility degree of natural system and exposure degree of natural system as the main contribution factor occupied 91.77%, 87.23%, 67.85% and 56.53% of the whole area in Hexi, so reduced the adaptive capacity degree of the natural system, the sensibility degree of the natural system, the sensibility degree of the social-economic system and the exposure degree of the natural system is the key to reducing vulnerability in Hexi. Only by doing this can we improve our living environment.

**Key words:** vulnerability assessment; natural-social system; scale of villages and towns; main contribution factor; Hexi area