

# 基于熵权灰色关联法的贵州岩溶山区 人地耦合系统脆弱性分析

贺祥

(凯里学院 旅游学院, 贵州 凯里 556011)

**摘要:**为了厘清岩溶山区人地耦合系统脆弱性特征,在构建岩溶山区人地耦合系统脆弱性评价指标的基础上,运用熵权灰色关联分析法,以贵州省 9 个地州市为基本评价单元,对其人地耦合系统脆弱性进行定量分析与评价。结果表明:(1) 敏感性维度的指标评价等级仅有黔东南州与铜仁地区属于轻度脆弱;暴露度与适应能力维度的指标评价等级仅贵阳市是轻度脆弱,其它地区均是次强度脆弱等级。(2) 各地市人地耦合系统脆弱度综合评价结果为六盘水市、毕节地区、安顺市与黔南州属于强度脆弱级;黔东南州、黔西南州、铜仁地区与遵义市属于次强度脆弱级;贵阳市属轻度脆弱级。依据研究结果可将贵州省人地耦合系统划分为强度脆弱区、次强度脆弱区和轻度脆弱区;将各地市人地耦合系统脆弱度与其人地关系特征的对应分析结果表明,人地耦合系统脆弱度的定量分级分析与定性分析具有较好的一致性。

**关键词:**熵权灰色关联法;贵州省岩溶山区;人地耦合系统;脆弱性评价

中图分类号:X24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)01-0283-07

## Analysis on the Vulnerability of Coupled Human-natural Systems in Karst Mountain Areas of Guizhou Province Based on the Entropy and Gray Correlation Method

HE Xiang

(College of Tourism, Kaili University, Kaili, Guizhou 556011, China)

**Abstract:** In order to clarify the vulnerability characteristics of the coupled human-environment system of karst mountainous, the entropy and grey correlation analysis methods was used to study the 9 prefectures in Guizhou province based on the establishment of vulnerability assessment index of coupled human-environment system in karst mountain areas. And the fragility of the coupled human-natural system was quantitatively analyzed and evaluated. The results show that: (1) only the southeast states of Guizhou province and the Tongren area belong to the slight fragile of sensitivity dimensions evaluation index grade, only Guiyang city is mild vulnerability grade of the evaluation index of the exposure dimension and the adaptation capability dimension, and the others are strength of the vulnerability grade; (2) the vulnerability comprehensive evaluation results of the coupled human-environment system are extreme fragile level of Liupanshui City, Bijie district, Anshun City and the south states of Guizhou province, the southeast states of Guizhou province, the southwest states of Guizhou Province, Tongren district and Zunyi City belong to the secondary extreme fragile level, and Guiyang City is the slightest fragile level. The conclusions are that the coupled human-environment system of Guizhou province can be classified as the extreme fragile area, the secondary extreme fragile area and the mild fragile area based on the results. At last the coupling system vulnerability with the human-environment relationship characteristics of every district of Guizhou Province was analyzed. The results show that the results of qualitative analysis and the quantitative coupled human-environment system of vulnerability classification have the good correspondence.

**Key words:** entropy and gray correlation method; karst mountain areas of Guizhou Province; coupled human-natural systems; assessment of vulnerability

收稿日期:2013-06-19

修回日期:2013-07-07

资助项目:国家十二五科技支撑计划重大课题“喀斯特高原峡谷石漠化综合治理技术与示范”(2011BAC09B01);贵州省教育厅自然科学基金青年项目(黔教科 20090083);凯里学院规划项目(S1116)

作者简介:贺祥(1978—),男,贵州水城人,副教授,硕士,主要从事岩溶生态环境方面的研究。E-mail:hexiang1997403@163.com

人地关系地域系统是地球表层自然要素与人文要素交互关系与作用的生态系统<sup>[1]</sup>。岩溶山区环境是一种具有特殊的物质、能量、结构和功能的人地生态系统<sup>[2]</sup>，它在碳酸盐岩基岩集中连片分布、二元空间水文结构、破碎地表、陡峭地形的环境胁迫下，在高密度人口、贫困与低生产效率的压力下，构成脆弱的人地耦合系统。石漠化现象则是岩溶山区人地相互作用、相互影响并导致生态恶化的结果，是岩溶生态环境脆弱性的集中体现。杨明德<sup>[3]</sup>、苏维词<sup>[4]</sup>、李阳兵等<sup>[5]</sup>分别对岩溶山区生态农业脆弱性及岩溶生态系统脆弱进行了研究，曹欢等<sup>[6]</sup>对岩溶脆弱生态系统健康进行了评价研究，何才华等<sup>[7]</sup>对岩溶山区生态环境脆弱性类型进行了划分，胡宝清等<sup>[8]</sup>应用 GIS 技术对岩溶生态环境脆弱性进行综合评价，李军等<sup>[9]</sup>对岩溶山区的脆弱生态区综合治理模式进行了研究。

随着对生态环境脆弱性研究的深入，人们开始对以人地耦合系统为中心的生态环境脆弱性进行研究并逐渐建立了相关的理论。王建等<sup>[10]</sup>认为人地耦合系统的研究是地球表层系统科学研究的核心之一。李吉均等<sup>[11]</sup>提出要加强三角州人地耦合系统的研究。国外学者 Turner 等<sup>[12]</sup>从可持续发展理论出发，通过能够顾及各利益相关体的方式，来理解和分析人地耦合系统的现状和发展规律。Polsky 等<sup>[13]</sup>创建 VSD 评价模型框架 (Vulnerability Scoping Diagram) 来组织数据、统一概念和构建脆弱性评价指标体系。国内学者田亚平等<sup>[14]</sup>对人地耦合系统脆弱性的研究现状进行了分析、总结，并建立适用于我国南方水土流失敏感区人地耦合系统脆弱性的评价指标体系。刘小茜等<sup>[15]</sup>则基于 VSD 评价模型框架，建立了我国北方农牧交错带在干旱威胁下生态系统的脆弱性评价指标体系。张洁等<sup>[16]</sup>运用层次分析法对渭河流域人地关系地域系统耦合状态进行了分析。因此，目前对区域人地耦合系统脆弱性的定量研究还非常缺乏，其方法与理论还亟待深入研究。

本文基于熵权灰色关联法，以贵州省各地州市为研究对象，通过建立人地耦合系统脆弱性评价指标体系，对其进行定量研究与评价。研究结果不仅有助于完善人地耦合系统脆弱性的相关理论与方法，还有助于深入研究岩溶山区人地系统地域关系，以及为岩溶山区石漠化生态治理措施与模式提供一定的理论支持。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

贵州省处于中国西南的东南部，位于东经 103°36′—

109°35′，北纬 24°37′—29°13′，总面积为 17.61 km<sup>2</sup>，人口 4 189 万，共辖 9 个地州市。属于中亚热带湿润气候，年降雨量约 1 100 mm，水热充足。处于云贵高原的东斜坡上，是长江水系和珠江水系的分水岭，平均海拔约 1 100 m。地形崎岖，山体陡峭，分为高原山地、丘陵和盆地三种基本类型，其中 92.5% 的面积为山地和丘陵。碳酸盐岩广布，是我国西南岩溶强烈发育典型地区。目前，全省岩溶面积 10.91 万 km<sup>2</sup>，约占全省土地总面积的 61.92%，其中发生轻度及以上石漠化面积达 37 597.36 km<sup>2</sup>，占全省国土面积的 21.34%。

### 1.2 研究方法

随灰色系统理论及其应用的发展，灰色关联分析方法逐渐在水资源、生态环境、生态安全、土地质量、区域竞争力评价等方面得到了广泛应用。但部分学者也认为灰色评价法的评价权精度较低<sup>[17]</sup>，而熵值法能很好弥补其弱点。目前，熵权灰色关联法在许多方面得到了广泛应用。

1.2.1 熵值法确定权重系数 在信息论中，熵值反映了信息的无序化程度，可以用来度量信息量的大小，某项指标携带的信息越多，表示该指标对决策的作用越大<sup>[18]</sup>。自从数学家 Shanon 将熵引入信息论后，信息熵成为一种可靠的权重确定方法，被广泛应用于方案优选、权重确定等方面，熵值法的计算步骤如下<sup>[19]</sup>：

(1) 构建  $m$  个方案  $n$  个评价指标的判断矩阵： $R=(x_{ij})_{m \times n}$  ( $i=1, 2 \dots m; j=1, 2 \dots n$ )。

(2) 数据的无量纲处理，消除原始数据的量纲，转换为可比较的数据序列，对于“正向型”和“负向型”指标的无量纲化处理公式：

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (\text{正向型}) \quad (1)$$

$$y_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (\text{负向型}) \quad (2)$$

(3) 根据熵的定义，确定  $m$  个评价事物  $n$  个评价指标的熵为：

$$e_i = \frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (3)$$

$$f_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{j=1}^n y_{ij}} \quad (4)$$

式中： $y_{ij}$ ——指标数据的无量纲标准化处理值； $e_i$ ——第  $i$  个指标的熵； $f_{ij}$ ——第  $j$  个评价对象第  $i$  个评价指标标准值的比重，如果  $f_{ij} = 0$ ，则定义  $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ ，那么第  $i$  项指标的熵权即可以定义为：

$$\omega_i = \frac{b_i}{\sum_i b_i} \quad (5)$$

式中: $w_i$ ——第  $i$  项指标的权重; $b_i$ ——指标  $x_i$  的差异系数, $b_i=1-e_i$ 。

1.2.2 灰色关联分析法 根据邓聚龙<sup>[20]</sup>提出的灰色关联公理及计算公式,参考郭秀云等<sup>[21]</sup>提出的方法,运用灰色关联法对岩溶山区人地耦合系统脆弱性进行分析与评价。灰色关联分析法的具体步骤如下:

(1) 确定参考序列和比较序列。设实测样本序列数即参考序列有  $m$  个,包含  $n$  个评价指标,则有第  $i$  实测样本序列: $X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\} (i=1, 2, \dots, m)$ ; 设分级标准作为比较序列,共分  $s$  级,因此有第  $j$  级标准的比较序列: $Y_j = \{y_j(1), y_j(2), \dots, y_j(n)\} (j=1, 2, \dots, s)$ 。

(2) 对系统中各因素的量纲进行无量纲化处理,方法如公式(1)–(2)。

(3) 求关联系数和关联度。① 确定数列的最优向量,由于进行无量纲化处理时已将所有指标调整为正向指标,故最优向量为: $G = (g_1, g_2, \dots, g_m) = (y_{11} \vee y_{12} \vee \dots \vee y_{1m}, y_{21} \vee y_{22} \vee \dots \vee y_{2m}, \dots, y_{n1} \vee y_{n2} \vee \dots \vee y_{nm})$ ,其中  $\vee$  为最大运算符, $G$  为最优向量, $g_i$  为第  $n$  项指标的最优向量, $y_{ij}$  为标准化后的指标数据。

② 计算关联系数:

$$\xi(Y_j, G) = \frac{\min_i \min_j |y_{ij} - g_i| + \rho \max_i \max_j |y_{ij} - g_i|}{|y_{ij} - g_i| + \rho \max_i \max_j |y_{ij} - g_i|} \quad (6)$$

式中: $\min_i \min_j |y_{ij} - g_i|$ ,  $\rho \max_i \max_j |y_{ij} - g_i|$ ——极差最小值和极差最大值; $\rho$ ——分辨率,一般取值为 0.5。

③ 计算加权关联度:

$$R_{ij} = \sum_{i=1}^n w_i \times \xi_{ij} \quad (7)$$

式中: $R_{ij}$ ——关联度; $w_i$ ——第  $i$  项指标的权重; $\xi_{ij}$ ——关联系数。

## 2 评价指标体系选择与构建

参考 Polsky<sup>[13]</sup>、田亚平<sup>[14]</sup>、刘小茜<sup>[15]</sup>等提出的人地耦合系统脆弱性评价框架与指标体系,依据人地耦合系统脆弱性的内涵,遵循科学性、主导因素、针对性、应用性、可操作性等原则,结合贵州岩溶山区独特的生态环境特征与面临的严重石漠化生态问题,以及贫困落后现实,选择与构建贵州省岩溶山区人地耦合系统脆弱性的评价指标体系(表 1)。

表 1 贵州省岩溶山区人地耦合系统脆弱性评价指标

指标层次		地市									
维度层	指标层	参数层及其指标性质	贵阳市	六盘水市	遵义市	安顺市	铜仁地区	毕节地区	黔西南州	黔东南州	黔南州
敏感性	气候	* 多年均降雨量/mm( $X_1$ )	1095.7	1315.8	1077	1275	1228.6	1023.3	1273.3	1235.8	1235.3
		* 多年平均无霜期/d( $X_2$ )	270	250	285	245	220	240	300	240	280
	地貌	山地面积比重/%( $X_3$ )	40.1	66.7	61.9	46.8	64.1	57.8	62.8	72.8	60.4
		>25°土地面积比重/%( $X_4$ )	5.77	13.83	14.71	19.99	20.71	10.54	36.23	31.29	26.88
	植被	* 森林覆盖率/%( $X_5$ )	42.3	38	48.6	39	49.8	41.5	46	63	53.76
	水文	* 多年平均径流量/mm( $X_6$ )	561.9	542.9	560.4	670.9	697.8	500.5	677.2	633.1	620.5
	土壤	石漠化面积比重/%( $X_7$ )	23.36	32.94	15.19	32.04	18.18	26.10	29.94	5.88	29.46
暴露度	水资源质量	劣Ⅴ类水质的比重/%( $X_8$ )	25.10	8.20	18.30	4.20	44.30	2.30	5.90	34.50	17.20
	人类活动强度	* 单位面积固定资产投资/(万元·km <sup>-2</sup> )( $X_9$ )	1763.28	443.89	222.78	178.66	166.64	234.92	179.23	115.55	152.72
		常住人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )( $X_{10}$ )	546.43	287.47	198.30	246.03	171.08	242.80	166.63	114.05	122.55
	人口	乡村从业人员比重/%( $X_{11}$ )	26.97	49.09	65.64	62.92	72.94	68.97	65.55	69.39	67.07
		* 人均生产总值/元( $X_{12}$ )	31712.39	21522.00	18335.05	12472.14	11621.95	11294.97	13385.75	11047.48	13765.12
	经济水平	单位生产总值能耗(t标准煤/万元)( $X_{13}$ )	1.42	2.83	1.34	2.13	1.64	1.88	1.71	1.92	1.77
		农村贫困率/%( $X_{14}$ )	16.80	38.30	21.85	30.79	38.75	35.54	36.23	42.11	36.00
适应力	政府财力	* 人均年财政收入(元/人)( $X_{15}$ )	4291.49	2468.22	1383.49	1157.47	919.22	1236.26	1622.82	1303.67	1216.41
	社会保障	* 千人医护人员数(人/千人)( $X_{16}$ )	7.61	2.90	2.66	2.18	1.81	1.49	2.25	2.46	2.40
	教育水平	* 当地高校人数占人口比重/%( $X_{17}$ )	6.31	0.27	0.80	0.62	0.45	0.25	0.41	0.75	0.65
	社会行动效率	* 互联网上网比重( $X_{18}$ )	0.81	0.44	0.43	0.40	0.33	0.30	0.41	0.43	0.39
* 公路网密度/(km·km <sup>-2</sup> )( $X_{19}$ )		1.15	1.20	0.78	1.00	1.19	0.93	0.49	1.59	0.59	

注:\* 表示效益指标或正向指标,其他表示成本指标或负向指标。

(1) 敏感性指标,主要考虑导致岩溶山区洪涝、干旱及农业灾害的自然因素,诱发水土流失的敏感性因子等。具体从气候、地貌、植被、土壤和水文等自然环境要素方面,选择多年平均降雨量、无霜期天数、山

地面积比重、>25°土地面积比重、森林覆盖率、多年平均径流量、石漠化面积比重 7 项自然生态指标,其中石漠化面积经过遥感影像解译与野外校正获取,坡度数据从《贵州省地表自然形态信息数据量测研

究》<sup>[22]</sup>中获得,多年平均降雨量与无霜期天数来自贵州省 2012 水资源公报及各地农业局气候资料,其它资料从《2012 年贵州省统计年鉴》中获得。

(2) 暴露度指标,主要考虑岩溶山区人地生态环境系统遭受灾害或危险的程度,以及岩溶山区在自然灾害事件胁迫下的潜在损失大小。选择水资源质量劣 V 类水质比重、单位面积固定资产投资额、常住人口密度、乡村从业人员比重、人均生产总值、单位生产总值能耗、农村贫困率 7 项指标。其中水资源质量劣 V 类水质比重数据来源于贵州省 2012 年水资源公报,其他指标均从《2012 年贵州省统计年鉴》中直接获取。

(3) 适应能力指标,以岩溶山区人地耦合系统对自然灾害事件的响应与应对、恢复能力为主。选择人均年财政收入、千人医护人口数、当地高校人数占人口比重、信息化指数、道路通达指数 5 项指标。其中信息化指数以互联网上网比率代表,道路通达性由公路网密度获得,所有指标数据均从《2012 年贵州省统计年鉴》中获取。

## 3 结果与分析

### 3.1 指标权重系数计算与分析

3.1.1 指标权重系数与指数的计算 利用公式(1)和公式(2)对选取指标的原始数据进行无量纲化处理得到

表 3 贵州省各地市人地耦合系统脆弱性各维度评价指标指数值

评价指标	贵阳市	六盘水市	遵义市	安顺市	铜仁地区	毕节地区	黔西南州	黔东南州	黔南州
敏感性	0.4731	0.2816	0.4731	0.4221	0.6229	0.2104	0.5057	0.6167	0.4926
暴露度	0.9653	0.3109	0.2738	0.1706	0.0847	0.1362	0.1354	0.0400	0.1140
适应能力	0.9631	0.2338	0.1581	0.1279	0.0896	0.0547	0.1059	0.2111	0.1041

3.1.2 结果分析 对表 3 进行分析可知:贵阳市人地耦合系统脆弱性评价各维度指标的指数值中,敏感性指数(0.473 1)较低且与全省平均值相差不大,表明其区域内人地系统易受外部干扰,稳定性较弱;暴露度指数(0.965 3)与适应能力指数(0.963 1)都非常高,表明其人地耦合系统遭受灾害或危害的潜在程度低,具有较强的对灾害的响应、应对与恢复能力。这与贵阳市作为贵州省的经济、政治中心,全省首位度城市,其经济发展水平,医疗、教育、通信、交通等条件远好于全省其它地区的社会经济现状相吻合。

贵州省其它各地市人地耦合系统脆弱性的状况:(1) 敏感性指数值低,但远大于暴露度指数与适应能力指数;(2) 敏感性指数值低,表明这些的地形、坡度、石漠化面积、降雨量、地表径流量、植被覆盖率等自然因素决定了其人地系统易于受外界干扰,人地耦合系统结构稳定较差;(3) 暴露度指数值很低(除贵阳市外平均值为 0.158 2 外),表明其人地耦合系统

指标的标准化数据。采用熵值赋权法,利用公式(3)~(5)计算得出各维度层及指标参数的权重  $W_i$ (表 2)。

表 2 贵州省岩溶山区人地耦合系统脆弱性评价指标权重

敏感性 ( $W=0.2734$ )		暴露度 ( $W=0.3918$ )		适应能力 ( $W=0.3348$ )	
参数	权重( $w_i$ )	参数	权重( $w_i$ )	参数	权重( $w_i$ )
$X_1$	0.0978	$X_8$	0.0595	$X_{15}$	0.1960
$X_2$	0.1055	$X_9$	0.2953	$X_{16}$	0.1895
$X_3$	0.1191	$X_{10}$	0.1397	$X_{17}$	0.3818
$X_4$	0.0982	$X_{11}$	0.1513	$X_{18}$	0.1413
$X_5$	0.1624	$X_{12}$	0.1999	$X_{19}$	0.0913
$X_6$	0.2320	$X_{13}$	0.0465		
$X_7$	0.1851	$X_{14}$	0.1076		

将贵州省岩溶山区人地耦合系统脆弱性的各评价指标权重值,与无量纲化的标准值相乘,通过加权求和得到贵州省 2011 年各地市人地耦合系统敏感性、暴露度和适应能力各维度指标的指数(表 3)。经标准化处理之后的数据均为效益型指标(或正向指标),因其各评价指标值越大,其正向效益越好,反之亦然。因此,敏感性指数值越小,其自然生态环境越差,环境维持其生态稳定的能力越弱;暴露度指数越低,其人地系统遭受灾害或危险的潜在程度越大;适应能力指数值越大,人地系统对自然环境突变与灾害的适应能力强,社会对人地系统的管理与调控能力越高,从而其人地耦合系统脆弱度也就越低。

遭受灾害或危险的潜在程度很高,在自然灾害事件胁迫下的潜在损失很大。(4) 适应能力维度指数值也非常低(除贵阳市外平均值为 0.135 6 外),与这些地区经济发展水平低,交通落后,教育设施落后,水平低,人口文化素质整体较低,医疗卫生条件差,通信基础设施薄弱等现实相吻合,从而社会对人地系统的管理与调控能力低,导致这些地区人地耦合系统脆弱性强。

### 3.2 关联系数和关联度计算与分析

3.2.1 关联系数和关联度计算 灰色关联度( $R_{ij}$ )表示被评价指标与最优指标两者互相接近的程度,其值越大表示两者越接近,表明人地耦合系统脆弱度越低,人地系统耦合状态越好,反之亦然。因此,可以根据关联度的大小对被评价对象进行优劣排序或分类。对贵州岩溶山区人地耦合系统脆弱性关联度的计算与评价,采用两级评价过程。第一级是分别对贵州省各地市人地耦合系统脆弱性各维度层的指标进行计

算与评价,第二级是对贵州省各地市人地耦合系统脆弱性的综合关联度进行计算与评价。经标准化处理之后的数据均为效益型指标(或正向指标),分析并确

定了岩溶山区人地耦合系统脆弱度的各评价指标数列的最优向量值( $g_i$ )均为 1。把最优向量值和标准化后的数据代入公式(6),得到关联系数(表 4)。

表 4 贵州省各地市人地耦合系统脆弱性评价指标的灰色关联系数

维度层	参数层	贵阳市	六盘水市	遵义市	安顺市	铜仁地区	毕节地区	黔西南州	黔东南州	黔南州
敏感性	$X_1$	0.3992	1.0000	0.3798	0.7819	0.6265	0.3333	0.7748	0.6464	0.6450
	$X_2$	0.5714	0.4444	0.7273	0.4211	0.3333	0.4000	1.0000	0.4000	0.6667
	$X_3$	1.0000	0.3807	0.4276	0.4286	0.7093	0.4052	0.4187	0.3333	0.4461
	$X_4$	1.0000	0.6539	0.6301	0.5171	0.5048	0.7615	0.3333	0.3737	0.4191
	$X_5$	0.3765	0.3333	0.4647	0.3425	0.4864	0.3676	0.4237	1.0000	0.5750
	$X_6$	0.4206	0.3891	0.4179	0.7857	1.0000	0.3333	0.8273	0.6039	0.5607
	$X_7$	0.4363	0.3333	0.5924	0.3409	0.5238	0.4009	0.3599	1.0000	0.3646
	$X_8$	0.4795	0.7807	0.5676	0.9170	0.3333	1.0000	0.8537	0.3947	0.5850
暴露度	$X_9$	1.0000	0.3844	0.3485	0.3421	0.3404	0.3502	0.3421	0.3333	0.3384
	$X_{10}$	1.0000	0.4550	0.3831	0.4185	0.3655	0.4159	0.3627	0.3333	0.3378
	$X_{11}$	1.0000	0.5096	0.3728	0.3900	0.3333	0.3537	0.3733	0.3514	0.3643
	$X_{12}$	1.0000	0.5035	0.4358	0.3494	0.3396	0.3360	0.3605	0.3333	0.3654
	$X_{13}$	0.9079	0.3333	1.0041	0.4841	0.7150	0.5818	0.6687	0.5605	0.6314
	$X_{14}$	1.0000	0.3705	0.7148	0.4749	0.3657	0.4031	0.3944	0.3333	0.3973
	$X_{15}$	1.0000	0.4805	0.3670	0.3498	0.3333	0.3556	0.3872	0.3608	0.3541
适应能力	$X_{16}$	1.0000	0.3940	0.3821	0.3605	0.3452	0.3333	0.3634	0.3727	0.3700
	$X_{17}$	1.0000	0.3341	0.3548	0.3475	0.3408	0.3333	0.3393	0.3527	0.3487
	$X_{18}$	0.9964	0.4102	0.4015	0.3826	0.3476	0.3333	0.3906	0.4012	0.3775
	$X_{19}$	0.5539	0.5856	0.4047	0.4807	0.5819	0.4535	0.3341	1.0000	0.3558

将表 4 数据按 3 个维度层代入公式(7),分别得到各地市在敏感性、暴露度、适应能力评价指标方面与理想最优向量的加权关联度。对贵州岩溶山区人地耦合系统脆弱度进行综合关联度计算,根据第一级评价结果,可得规范化矩阵,并求出其综合关联度(表 5)。在咨询专家的基础上,结合对岩溶山区的长期实

地考察与研究,对评价指标的关联度进行分级,构建人地耦合系统脆弱度的评价标准。划分贵州省各地市人地耦合系统关联度值在 0~0.3 之间为极强度脆弱,0.30~0.45 之间为强度脆弱,0.45~0.60 之间为次强度脆弱,0.60~0.75 之间为中度脆弱,0.75~1 之间为轻度脆弱。

表 5 贵州省各地市人地耦合系统脆弱性评价指标的关联度及脆弱度等级

层次	关联度	贵阳市	六盘水市	遵义市	安顺市	铜仁地区	毕节地区	黔西南州	黔东南州	黔南州
一级综合评价	$R_{\text{敏感性}}$	0.6885	0.6097	0.6674	0.6678	0.7583	0.5720	0.7149	0.7722	0.6767
	脆弱度等级	中度	中度	中度	中度	轻度	次强度	中度	轻度	中度
	$R_{\text{暴露度}}$	0.9382	0.5689	0.5699	0.5211	0.4983	0.5110	0.5114	0.4834	0.5489
	脆弱度等级	轻度	次强度							
	$R_{\text{适应能力}}$	0.9735	0.5753	0.5424	0.5365	0.5295	0.5162	0.529	0.5782	0.5277
	脆弱度等级	轻度	次强度							
二级综合评价	$R_{\text{综合}}$	0.9409	0.4060	0.4568	0.4242	0.5304	0.3639	0.4667	0.5012	0.4365
	脆弱度等级	轻度	强度	次强度	强度	次强度	强度	次强度	次强度	强度

3.2.2 结果分析 分析表 5 可知,人地耦合系统脆弱性的各维度层指标评价结果为:敏感性维度的指标评价等级仅有黔东南州与铜仁地区属于轻度脆弱,毕节地区是次强度脆弱,其它地市均是中度脆弱;暴露度与适应能力维度的指标评价等级仅是贵阳市是轻度脆弱等级,其它地区均是次强度脆弱等级。贵州岩溶山区人地耦合系统脆弱性的综合评价结果是:六盘水市、毕节地区、安顺市与黔南州属于强度脆弱等级;黔东南州、黔西南州、铜仁地区与遵义市属于次强度脆弱等级;贵阳市属轻度脆弱等级。依据贵州省人地耦合系统脆弱性评价等级,在空间上按严重程度划分

为 3 个区域:中西部、西部、南部、西北部主要区域为强度脆弱区;东部、东北部、东南部、西南部主要地区为次强度脆弱区;中部为轻度脆弱区。

贵州省中西部、西部、南部、西北部的强度脆弱区主要包括六盘水市、毕节地区、安顺市、黔南州。这 4 个地区的人地耦合系统综合评价的脆弱度最高。它们人地关系系统耦合特点:(1)六盘水市,位于贵州省西部,平均海拔约 1 800 m,地形破碎,山体坡度陡峭,沟壑与峡谷分布较多,碳酸盐岩基岩裸露度高,石漠化程度高、面积比重大(32.94%),森林覆盖率较低;区域内经济主要以煤等矿产资源开发为主,常住

人口密度高(287.47人/km<sup>2</sup>)、人地矛盾突出,农村贫困率高(38.30%),卫生医疗、教育、交通、通信等基础条件较差。(2)毕节地区位于贵州省北部,是国务院批准的“开发扶贫、生态建设”实验区,区域内以中低山山地为主,地形破碎、水土流失严重,石漠化面积大(26.10%)且较严重,山地面积大,森林植被覆盖率低;常住人口密度高(242.80人/km<sup>2</sup>),交通、通信基础设施差,教育水平低,主要以农业生产为主,农村贫困率高(35.54%),经济发展水平较低,医疗、教育、交通、通信等均落后。(3)安顺市,位于贵州省中西部,>25°的坡地面积比重高(19.99%),森林覆盖率较低,石漠化面积比重高(32.04%),土地石漠化严重;常住人口密度大(246.03人/km<sup>2</sup>),以农业与旅游业为主,经济发展较落后,人均生产总值低,农业贫困率高(30.79%),交通、通信、教育、医疗等均较差。(4)黔南州,位于贵州省南部,地形破碎度高,山地面积广大(60.4%),>25°的坡地面积比重达26.88%,石漠化面积比重高(29.46%),水土流失严重;区域经济发展水平较低,农业贫困率高(36.00%),人均生产总值低,交通、通信设施落后,受高等教育比重低,医疗卫生条件差。

从以上4个地区的人地关系地域系统特点分析可知,其生态环境基质系统稳定性均较脆弱,区域在气候变化扰动与自然灾害的作用与胁迫下,在人类不合理的生产活动作用下,人地矛盾突出,石漠化等生态环境问题严重,形成了敏感性较高、暴露度较强的人地关系特征,造成其人地耦合系统自身维持稳定的能力非常低。同时,其落后的经济、教育、通信、交通等现状,导致对其人地关系的社会经济、政策等干预措施作用弱、效率低,最终形成人地耦合系统脆弱性为强度等级的人地关系地域系统。

贵州省东部、东北部、东南部、西南部的次强度脆弱性区主要包括黔东南州、黔西南州、铜仁地区与遵义市。这4个地市的人地关系系统耦合特点为:(1)黔东南州属于贵州高原向东南倾斜下降的过渡地带,地形起伏大,山地面积比重高(72.8%),>25°的坡地面积比重高(31.29%),石漠化面积最低(5.88%),石漠化生态环境问题不突出,森林覆盖率全省最高(63%);常住人口密度低(114.05%),但区内乡村从业人口比例高(69.39%),农村贫困率全省中最高(42.11%),区内经济发展以农业、林业、旅游为主,经济发展水平低下,医疗、教育、交通等落后。(2)黔西南州,位于贵州省西南部,山地面积比重大(62.8%),>25°的坡地面积比重高(36.23%),石漠化面积比重较低(29.94%),森林覆盖率低;区内乡村

从业人口比例高(65.55%),农村贫困率较高(36.23%),区内经济发展以农业、旅游业、黄金矿产资源开发等为主,经济发展水平低,交通、通信、医疗、教育等较落后。(3)遵义市,山地面积大,地形起伏较大,但>25°的坡地面积比重稍低(14.71%),石漠化面积较少(15.19%),石漠化程度较轻;常住人口密度高(198.30人/km<sup>2</sup>),乡村从业人口比重高(65.64%),人地矛盾突出,区内经济以农业生产、矿产资源开发为主,农村贫困率高(21.85%),卫生医疗、教育、交通、通信等发展水平低。(4)铜仁地区,山地面积比重较大(64.1%),>25°的坡地面积比重达20.71%,石漠化面积比不高(18.18%),程度较轻,森林覆盖率高(49.8%);区内常住人口密度高(171.08人/km<sup>2</sup>),乡村从业人口比例非常高(72.94%),农村贫困率较很高(38.75%),区内经济发展以农业、旅游业等为主,交通、通信、医疗、教育等也较落后,经济发展水平较低。

对以上4个地区的人地关系地域系统特点进行分析可知,其石漠化面积相对较少、石漠化程度较轻,区域地形条件也相对较好,山地面积与>25°的坡地面积比重也相对不高,表明其生态环境基质系统稳定性比贵州省中西部、西部、南部、西北部相对较好。但该区域内人地矛盾依然突出,资源相对匮乏,经济发展水平非常低,农村贫困率比重很大。同时,其落后的社会、经济状况,导致其人地系统中的社会对自然灾害或危害的调整、稳定能力与管理能力等非常弱,最终形成人地耦合系统脆弱性为次强度等级的人地关系地域系统。

贵州省中部的轻度脆弱性区主要分布于贵阳市,敏感性评价呈中度脆弱,适应能力及暴露度指标都呈轻度脆弱,人地耦合系统脆弱性的综合评级也为轻度脆弱。结果表明,贵阳市的生态环境系统被破坏的临界条件较低,其系统易损性在人地发生矛盾时也具有较强的敏感性。但贵阳市位于贵州省中部台地地形区内,其经济、政治、文化等发展水平较高,交通、通信、地理区位条件等较完善和优越,构成的人地耦合系统结构特征较为稳定,促使其人地系统遭受的灾害或危害的程度较低。

## 4 结论

本研究运用熵权灰色关联法与VSD评价框架,选择与贵州岩溶山区人地关系地域系统最密切的影响因子,从敏感性、暴露度、适应能力三个维度,对贵州省各地市的人地耦合系统脆弱性进行了定量研究。得到如下结论:

(1) 贵阳市人地耦合系统脆弱性状态:敏感性指数不高,人地系统易受外部干扰,稳定性较差;暴露度指数值很大,其人地耦合系统易于遭受灾害或危害的程度低;适应能力指数值很大,人地耦合系统具有较强的对灾害的响应、应对与恢复能力。其它各地市人地耦合系统脆弱性状态:① 敏感性指数不高,人地耦合系统结构稳定性较低;② 暴露度指数很低,其人地耦合系统遭受灾害或危险的潜在程度相对较高,在自然灾害事件胁迫下的潜在损失大,③ 适应能力指数较低,其人地系统中的社会对自然灾害或危害的调整、稳定能力与管理能力等非常弱。

(2) 对贵州省人地耦合系统脆弱度的各维度层指标评价结果显示:敏感性维度的指标评价等级仅有黔东南州与铜仁地区属于轻度脆弱;暴露度与适应能力维度的指标评价等级仅贵阳市是轻度脆弱等级,其它地区均是次强度脆弱等级。贵州省人地耦合系统脆弱度的综合评价结果:六盘水市、毕节地区、安顺市与黔南州属于强度脆弱级;黔东南州、黔西南州、铜仁地区与遵义市属于次强度脆弱级;贵阳市脆弱度综合评级属轻度脆弱级。据此可将贵州省中西部、西部、南部、西北部主要区域划分为强度脆弱区;东部、东北部、东南部、西南部主要区域划分为次强度脆弱区;中部为轻度脆弱区。

(3) 对贵州省人地关系特征与人地耦合系统脆弱度等级的对应分析表明:① 六盘水市、毕节地区、安顺市与黔南州 4 个地市,其生态环境基质系统稳定性均较脆弱,社会经济水平低、人地矛盾突出、石漠化生态问题非常严重,其社会经济政策、管理等干预措施作用力弱、效率低,形成人地耦合系统脆弱度非常高的人地关系地域系统。② 黔东南州、黔西南州、铜仁地区与遵义市其石漠化面积相对较少,区域地形条件也相对较好,其生态环境基质系统稳定性稍好,但该区域内人地矛盾依然突出,经济发展水平非常低,农村贫困率比重很大,因而其人地耦合系统遭受自然灾害时的恢复能力低,形成人地耦合系统脆弱度为次强度等级的人地关系地域系统。③ 贵阳市生态环境系统被破坏的临界条件较低、易损性与其它地区相当。但其经济、政治、文化等发展水平较高,构成较稳定的人地关系地域系统,从而人地耦合系统脆弱度为轻度等级。

#### 参考文献:

- [1] 吴传钧. 论地理学的研究核心:人地关系地域系统[J]. 经济地理,1991,11(3):1-6.
- [2] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京:地质出版社,1993.
- [3] 杨明德. 论喀斯特环境的脆弱性[J]. 云南地理环境研究,1990,2(1):21-29.
- [4] 苏维词,朱文孝. 贵州喀斯特生态脆弱区农业可持续发展的内涵与构想[J]. 经济地理,2000,20(5):75-79.
- [5] 李阳兵,邵景安,王世杰. 岩溶生态系统脆弱性研究[J]. 地理科学进展,2006,25(5):1-9.
- [6] 曹欢,苏维词. 基于模糊数学综合评价法的喀斯特生态系统健康评价[J]. 水土保持研究,2009,12(3):148-154.
- [7] 何才华,熊康宁. 贵州喀斯特生态环境脆弱性类型区及其开发治理研究[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版,1996,14(1):1-9.
- [8] 胡宝清,金妹兰,曹少英. 基于 GIS 技术的广西喀斯特生态环境脆弱性综合评价[J]. 水土保持学报,2004,18(1):103-106.
- [9] 李军,蔡运龙. 脆弱生态区综合治理模式研究[J]. 水土保持研究,2005,12(4):124-127.
- [10] 王建,曹光杰. 具有中国特色的地球系统科学研究前沿:三角洲人地耦合系统[J]. 科学中国人,2004(12):64-65.
- [11] 李吉均,赵志军. 长江三角洲人地耦合系统:过去、现在与未来[J]. 科学中国人,2004(11):30-31.
- [12] Turner B L, Kasperson R E, Matson P A. A Framework for Vulnerability Analysis in Sustainability Science[C]//Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2003,100(14):8074-8079.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 张洁,李同昇,王武科. 渭河流域人地关系地域系统耦合状态分析[J]. 地理科学进展,2010,29(6):733-739.
- [17] 李济,李岩,李德峰. 基于改进 AHP 法定权的模糊优选模型在地下水水质评价中的应用[J]. 华北水利水电学院学报,2002,23(2):4-6.
- [18] 宋平. 小排放量印花废水处理工程实例分析[J]. 环境科学与管理,2007,32(1):94-96.
- [19] 宋喜民,周书敬. 建设项目投资方案优选的熵权系数法[J]. 建筑技术开发,2004,31(7):113-115.
- [20] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2005.
- [21] 郭秀云. 灰色关联法在区域竞争力评价中的应用[J]. 统计与决策,2004,179(11):55-56.
- [22] 贵州师范大学地理研究所,贵州省农业资源区划办公室. 贵州省地表自然形态信息数据量测研究[M]. 贵阳:贵州科技出版社,2000.