

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.06.005

基于组合权重的金阳县生态地质环境承载力评价

王欣^{1,2}, 赵其华^{1,2}, 张朝俊^{1,2}, 王红^{1,2}

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059;

2. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘要: 由于不同区域生态地质环境系统的复杂性与差异性, 目前在进行评价时, 权重的确定仍存在一定的分歧。因此, 从权重计算优化入手, 将组合权重应用到金阳县生态地质环境承载力评价中去, 以期对其进行定量的客观评价。主要从地质环境、生态环境和社会环境3个方面进行影响因素的分析, 构建了一套生态地质环境承载力评价的递阶层次指标体系。基于多目标线性规划原理将计算权重的主观层次分析法与客观 CRITIC 法相结合, 获得了各评价因子的组合权重。利用 Arcgis10.2 软件平台对数据处理后, 将组合权重应用到评价模型中去, 并进行了实证评价, 最终获得了金阳县生态地质环境承载力的现状和空间格局。研究表明, 金阳县整体生态地质环境承载力中等, 基于组合权重的评价结果与实际调查结果相符。

关键词: 生态地质环境; 组合权重; CRITIC 法; 承载力评价

中图分类号: X141

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)06-0029-07

Ecological Geological Environment Carrying Capacity Evaluation of Jinyang County based on Combined Weight Method

WANG Xin^{1,2}, ZHAO Qihua^{1,2}, ZHANG Chaojun^{1,2}, WANG Hong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geological Hazard Prevent and Geo Environmental Protection,

Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Due to the complexity and difference of the ecological geological environment systems in different regions, during its evaluation, there are still some differences in the determination of weights. Therefore, starting from the weight calculation optimization, this paper applied the combined weight method to quantitatively evaluate the ecological geological environment carrying capacity of Jinyang County. It mainly analyzes the influencing factors from three aspects: geological environment, ecological environment and social environment. A set of hierarchical index system was then constructed to evaluate the ecological geological environment carrying capacity. Based on the principle of multi-objective linear programming, the subjective analytic hierarchy process of calculating weights is combined with the objective CRITIC method, and the combined weights of each evaluation factor are obtained. Arcgis10.2 software platform is adopted to process the data, the combined weights were applied to the evaluation model, and the empirical evaluation was carried out. Finally, the status and spatial pattern of the ecological geological environment carrying capacity of Jinyang County were obtained. The research results show that the overall ecological carrying capacity of Jinyang County is medium. The evaluation results based on combined weights are consistent with the actual survey results.

Keywords: ecological geological environment; combined weight; CRITIC method; carrying capacity evaluation

收稿日期: 2019-10-10

修稿日期: 2019-11-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41272333); 国家重点基础研究发展计划(2011CB013501)

作者简介: 王欣(1995—), 男, 云南曲靖人, 硕士研究生, 研究方向为生态地质、地质灾害评价与预防。E-mail: 730393065@qq.com

通讯作者: 赵其华(1965—), 男, 江苏泰兴人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事岩土工程、地质工程方面的研究工作。

E-mail: zhqh@163.com

地质环境是生态环境的载体,生态环境是地质环境的“屏障”,生态环境的优劣与发展演化在很多方面受地质环境的影响,而两者的稳定运行又为人类生存环境提供了坚实的保障。生态地质环境作为一个组合概念,前人给出了不同的定义与研究方向^[1-4],但始终离不开岩石圈近地表受人为影响的地带。其本底值取决于地质环境,而承载力则受地质环境、生态环境、社会环境三者的共同制约与影响。目前,许多学者针对环境承载力进行了许多研究并取得丰硕的成果^[5-10],但其评价指标主要集中在生态环境系统与人类社会环境系统的组合上,有关地质环境系统方面的评价指标却很少。随着我国生态环境的日益恶化与山区城镇建设步伐的加快,许多学者围绕不同区域开展了生态地质环境承载力的综合评价,并取得丰硕的成果^[11-14],但由于评价指标众多且难以量化,导致评价结果适用性不强。因此,许多学者利用 GIS 强大的空间可视化及统计分析功能开展了不同区域的生态地质环境承载力研究^[15-19],其研究成果不仅直观地展现了承载力在空间上的差异性,而且为决策提供了有力的依据。但是,由于不同区域生态地质环境系统的复杂性与差异性,目前在评价过程中,权重的确定上仍存在一定的分歧,没有形成统一的认识。因此,本文从权重计算入手,通过将权重组合,降低权重计算的人为主观性,以期对金阳县生态地质环境承载力进行客观的评价。

1 金阳县生态地质环境背景

1.1 社会环境

金阳县地理坐标为 $102^{\circ}56' \sim 103^{\circ}30'E$, $27^{\circ}22' \sim 27^{\circ}58'N$,位于四川省凉山彝族自治州东部边缘,坐落于金沙江大峡谷北岸,东南与云南省昭通市隔金沙江相望,西与布拖县毗邻,东北与雷波县相接,西北与昭觉县相连。金阳县域总面积约 $1\ 587\text{ km}^2$,共辖 34 个乡镇,截止 2016 年末总人口达 20.6 万人,人口密度 $129.8\text{ 人}/\text{km}^2$,国内生产总值 28.9 亿元,人均 GDP 达 14 052 元,对外交通主要依赖于省道 S208 线,交通安全通道单一,道路网络建设不均衡。

1.2 生态环境

金阳县全县年平均气温 15.7°C ,年平均降水量 800 mm ,属中亚热带季风季候,降雨集中在 5 月—10 月,时空分布不均,局部暴雨现象时有发生。地下水资源贫乏,共发育大小 23 条河流,均属金沙江水系,三条主干流近南北向纵贯全县,从西向东依次

为西溪河、金阳河、金沙江,其中金沙江境内全长 98.8 km ,沿河发育多条冲沟,受自然和人类活动的影响,水土流失严重。据遥感影像统计,金阳县耕地面积 247.2 km^2 ,占全县总面积的 15.5%,且大都处于金沙江及其支流沿岸的陡坡地带。植被归一化指数介于 $-0.26 \sim 0.56$,以草地、灌木林为主,植被覆盖率不均衡,全年空气质量良好,人均生态承载力 $0.85\text{ hm}^2/\text{人}$,略高于全国人均 $0.8\text{ hm}^2/\text{人}$ ^[20],随着人口的增长和社会经济发展,会出现生态赤字的情况。另外,金阳县耕地与草地生态承载力占比达 78%,生态系统结构较差,一经破坏,将很难恢复。

1.3 地质环境

金阳县总体地势西北高东南低,是山原地貌向山地地貌过渡的区域,波洛梁子与东山梁子为境内两大山脉,以波洛梁子为界,西部为凉山山原地貌,东部为中山山地地貌,最高海拔 $4\ 036\text{ m}$,最低海拔 447 m ,落差 $3\ 589\text{ m}$ 。金阳县属上扬子台拗凉山隆褶区,为“川滇南北构造带”与“华夏式”构造交汇处,主要构造体系金沙江断裂束,属小江断裂波及范围,构造骨架为燕山运动期产物,以北东向和南北向构造为主^[21]。断裂构造十分发育,其中金阳断裂近南北向穿越县城主城区,构造裂隙发育,断裂面两侧岩体挤压破碎强烈。区内地层除白垩系、石炭系缺失外,其余均有出露,寒武系、奥陶系、志留系地层广泛分布于县域中部,岩性以碳酸盐岩夹碎屑灰岩为主,二叠系峨眉山玄武岩在北部山原地区大面积出露,震旦系、二叠系、侏罗系地层以长条状分布于金沙江、金阳河沿岸,地层岩性主要为变质砂岩、灰岩、泥岩。据已有地震资料显示,金阳县未有 7 级以上地震记载,地震烈度 VII 度。截止 2018 年,全县共发育地质灾害(隐患)点 211 处,灾害点密度达 $14.36\text{ 个}/100\text{ km}^2$,其中滑坡 137 处,崩塌 23 处,泥石流 39 处,不稳定斜坡 12 处,主要集中分布在断裂及水系附近(见图 1)。

2 数据处理与评价模型

2.1 数据来源与评价流程

本研究采用的数据包括:(1) 30 m 分辨率的 DEM(数字高程模型)数据,用于提取地形地貌数据、河网数据;(2) 30 m 分辨率的 Landsat 8 遥感影像数据(2018 年),用于提取植被归一化指数(NDVI)与土地利用情况数据,生态承载力数据在土地利用情况数据的基础上,利用生态足迹法计算得到;

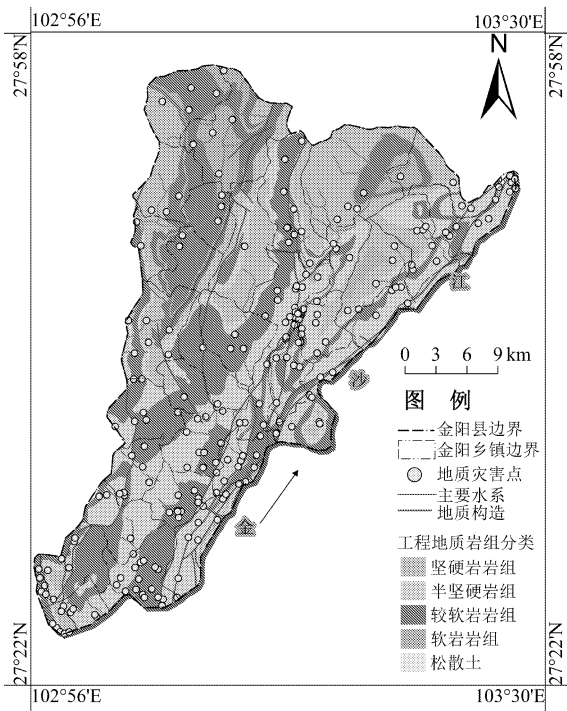


图 1 金阳县地质环境示意图

(3) 1:5 万数字地质图,用于工程岩组分类及地质构造矢量化;(4)地震动峰值加速度数据由国家地震科学数据共享中心获取;(5)四川蜀通岩土公司提供的 2018 年金阳县地质灾害编录数据及野外调查资料;(6)降雨量数据由中国气象数据网下载后空间插值处理得到;(7)空气质量数据由中国空气质量在线监测分析平台获取后空间插值处理得到;(8)人口、经济数据通过金阳县统计年鉴获取;(9)道路数据通过公开发表资料进行矢量化处理得到。

通过对金阳县生态地质环境系统的调查与相关资料的收集与分析,将金阳县生态地质环境系统划分为地质环境、生态环境和社会环境三个子系统。通过层次分析法构建了一套递阶式评价指标体系。地质环境子系统从地形地貌、地质灾害、地层岩性、地质构造四个方面考虑,共选取 10 个二级评价指标;生态环境子系统评价指标借鉴前人的研究成果^[13-19],主要从水、土资源与环境质量三方面进行考虑,共选取 6 个二级指标;社会环境子系统从人口、经济、基础设施建设状况三方面进行考虑,共选取 3 个二级指标。具体评价流程见图 2。

2.2 评价指标体系分级

在原始数据收集的基础上,使用 ArcGIS 软件建立各评价指标的专题图层,并进行坐标系的统一转换与投影,具体处理流程在此不再赘述。在评价过程中,首先统计各指标数据的分布特征,依据自然间

断法和金阳县实际情况对其进行 4 级划分,得出分级标准(见表 1)。其次,将各指标图层转换成 30 m × 30 m 空间分辨率的栅格数据,最后利用重分类功能,将相应栅格按分值 4、3、2、1 进行赋值。

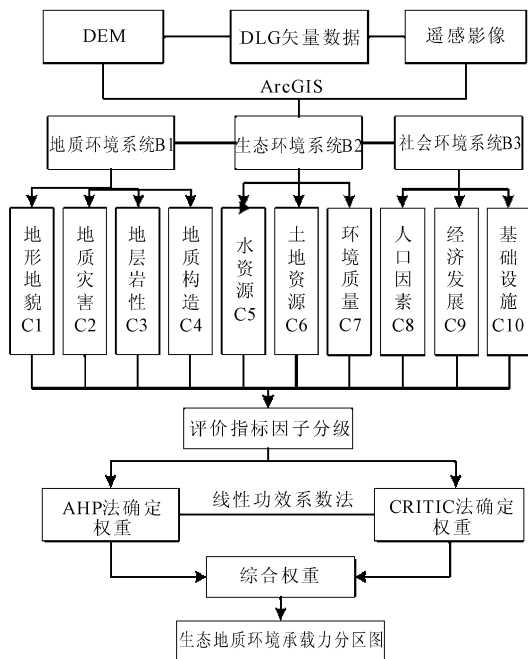


图 2 评价流程图

2.3 权重的确定

2.3.1 AHP 法

层次分析法(AHP)可以合理地确定指标权重的排序,一般不会出现与实际重要程度相悖的情况^[22]。每个指标的权重按递阶层次结构进行分系统、分层次计算得到。在层次模型建立的基础上,使用专家打分法对不同指标按重要性等级进行相互比较,从而构建出判断矩阵,采用“和积法”算出判断矩阵的特征向量,根据式(1)求得最大特征根,用式(2)、式(3)进行判断矩阵的一致性检验,若 $CR < 0.1$,则一致性检验通过,否则,修正原判断矩阵,直到一致性检验通过。经上述计算后得到主观权重(见表 2)。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n (AW)_i / nW_i \quad (1)$$

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (2)$$

$$CR = CI / RI \quad (3)$$

式中: λ_{\max} 为最大特征根; $(AW)_i$ 为向量 AW 的第 i 个分量; n 为指标个数; CR 为一一致性比例; CI 为一一致性检验指标; RI 为随机一致性指标。

表 1 金阳县生态地质环境承载力评价指标体系与分级标准

目标层	准则层及代号	指标层及代号	方案层及代号	分级标准及赋值				
				1	2	3	4	
金阳县生态地质环境承载力系统 A	地质环境系统 B1	地形地貌 C1	高程 D1/m	>3100	2200 ~ 3100	1300 ~ 2200	<1300	
			坡度 D2/(°)	>45	30 ~ 45	15 ~ 30	<15	
			坡向 D3	全阳坡	半阳坡	阴坡	平地	
			坡型 D4	凸形	凹形	复合	平地	
	地质环境系统 B1	地质灾害 C2	地表起伏度 D5/m	>300	200 ~ 300	100 ~ 200	<100	
			灾害点密度 D6/(个·km ⁻²)	>12	7 ~ 12	3 ~ 7	<3	
		地层岩性 C3	工程地质岩组 D7/MPa	$f_{rk} \leq 15$	$15 < f_{rk} \leq 30$	$30 < f_{rk} \leq 60$	$f_{rk} > 60$	
			距断层距离 D8/m	<15	15 ~ 200	200 ~ 400	>400	
		地质构造及地震 C4	断裂带密度 D9/(km·km ⁻²)	>2.1	1.4 ~ 2.1	0.5 ~ 1.4	<0.5	
			地震峰值加速度 D10/g	≥ 0.30	0.20	0.10/0.15	≤ 0.05	
		水资源 C5	年降雨量 D11/mm	<800	800 ~ 900	900 ~ 1000	>1000	
			河网密度 D12/(km·km ⁻²)	>1.8	1.2 ~ 1.8	0.6 ~ 1.2	<0.6	
		生态环境系统 B2	土地资源 C6	适宜耕地面积 D13/(°)	>25	15 ~ 25	5 ~ 15	<5
			环境质量 C7	植被归一化指数 D14	<0.18	0.18 ~ 0.30	0.30 ~ 0.40	>0.40
	空气质量指数 AQI D15	>150		100 ~ 150	50 ~ 100	<50		
	社会环境系统 B3	人口因素 C8	人均生态承载力 D16/(hm ² ·人 ⁻¹)	<0.01	0.01 ~ 0.03	0.03 ~ 0.30	>0.30	
			人口密度 D17/(人·km ⁻²)	>250	130 ~ 250	70 ~ 130	<70	
		经济发展因素 C9	人均 GDP D18/万元	<0.6	0.6 ~ 1.0	1.0 ~ 1.8	>1.8	
			基础设施 C10	道路密度 D19/(km·km ⁻²)	>3.0	2.0 ~ 3.0	1.2 ~ 2.0	<1.2

注:MPa;表示岩石饱和单轴抗压强度;hm²表示公顷;表中的 1、2、3、4 为不同等级评分。

表 2 基于层次分析法确定的主观权重

目标层	准则层	准则层权重	指标层	指标层权重	方案层	方案层权重	主观权重
A	B1	0.540	C1	0.426	D1	0.311	0.132
					D2	0.285	0.121
			C2	0.301	D3	0.136	0.058
					D4	0.054	0.023
			C3	0.060	D5	0.214	0.091
					D6	0.301	0.301
			C4	0.213	D7	0.060	0.061
					D8	0.649	0.138
			C5	0.163	D9	0.072	0.015
					D10	0.279	0.060
	B2	0.297	C6	0.540	D11	0.500	0.082
					D12	0.500	0.082
					D13	0.540	0.540
					D14	0.320	0.095
					D15	0.122	0.035
	B3	0.163	C7	0.297	D16	0.558	0.166
					D17	0.196	0.196
					C8	0.196	0.196
					C9	0.311	0.311
C10	0.493	D18	0.311	0.311			
		D19	0.493	0.493			

2.3.2 CRITIC 法

CRITIC 法能反映各指标之间差异分布的特性,

通过指标间的对比强度和冲突性来计算权重^[23]。其中,对比强度用标准差表示,标准差越大,差异性

越明显,对承载力的影响越大。冲突性由相关系数计算得到,相关性越大,冲突性越小,指标越相似,对承载力的影响越相同。计算过程如下:首先计算各指标数据的标准差 STD 与协方差,确定协方差矩阵,由协方差矩阵计算得到相关系数 r_{ij} 矩阵。在相关系数计算的基础上,冲突性由式(4)获得,根据式(5)、式(6)分别计算得到各指标的信息量与客观权重(见表3)。

$$R_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (4)$$

$$C_j = \sigma_j \cdot R_j \quad (5)$$

$$W_j = C_j / \sum_{j=1}^n C_j \quad (6)$$

式中: R_j 表示冲突性; r_{ij} 为指标 i 和 j 之间的相关系数; n 为指标数量; C_j 表示第 j 项指标所包含的信息量; σ_j 为标准差; W_j 表示第 j 项指标的客观权重。

表 3 基于 CRITIC 法确定的客观权重

目标层	准则层	指标层	方案层	STD	R_j	C_j	客观权重
A	B1	D1	D1	1.274	12.581	16.029	0.177
			D2	0.873	9.801	8.553	0.094
		C1	D3	1.125	9.499	10.689	0.118
			D4	0.722	9.586	6.921	0.076
			D5	1.014	19.699	19.967	0.220
	B2	C2	D6	0.139	13.891	1.928	0.021
			C3	0.874	8.448	7.380	0.081
		D8	D8	1.167	8.876	10.361	0.115
			C4	0.625	8.434	5.272	0.058
			D10	0.395	8.914	3.518	0.040
B3	C5	D11	1.296	4.823	6.252	0.219	
		D12	0.676	4.859	3.282	0.115	
	C6	D13	2.362	4.641	10.962	0.384	
		D14	1.023	4.561	4.665	0.163	
		C7	0.000	5.000	0.000	0.000	
D16	D16	0.840	4.041	3.393	0.119		
	C8	1.193	1.380	1.647	0.403		
	D18	0.470	2.008	0.944	0.231		
C10	D19	1.050	1.425	1.496	0.366		

注: D15 数据统计为 0,是因为评价指标空气质量指数 AQI 全县插值计算结果整体为 0。

2.3.3 权重组合

本文采用线性功效系数法将主观权重与客观权重进行组合^[24],经线性加权后得到综合权重。计算过程如下:首先通过式(7)建立权重之间的函数关系,然后根据式(8)求得主、客观权重的分配系数,最后依据式(9)对主、客观权重进行线性加和,求得

综合权重(见表4)。

$$F(w_s, w_o) = \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (w_{s_i} - w_{o_i})^2 \right] \quad (7)$$

$$\begin{cases} F^2(w_s, w_o) = (\alpha - \beta)^2 \\ \alpha + \beta = 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$w_c = \alpha w_{s_i} + \beta w_{o_i} \quad (9)$$

式中: w_s 、 w_o 为主、客观权重; i 为指标个数; α 、 β 为主、客观权重分配系数; w_c 为综合权重。

表 4 评价指标综合权重

目标层	准则层	指标层	方案层	w_s	w_o	分配系数	w_c
A	B1	D1	D1	0.132	0.177	$\alpha = 0.5269$ $\beta = 0.4731$	0.153
			D2	0.121	0.094		0.109
		C1	D3	0.058	0.118		0.086
			D4	0.023	0.076		0.048
			D5	0.091	0.220		0.152
	B2	C2	D6	0.301	0.021		0.169
			C3	0.061	0.081		0.070
		D8	D8	0.138	0.115		0.127
			C4	0.015	0.058		0.036
			D10	0.060	0.040		0.050
B3	C5	D11	0.082	0.219	0.149		
		D12	0.082	0.115	0.098		
	D16	C6	0.540	0.384	$\alpha = 0.5131$ $\beta = 0.4869$	0.464	
		D14	0.095	0.163	0.128		
		C7	0.035	0.000	0.019		
D17	D16	0.166	0.119	0.142			
	C8	0.196	0.403	0.296			
	D18	0.311	0.231	$\alpha = 0.5164$ $\beta = 0.4836$	0.272		
C10	D19	0.493	0.366	0.432			

以地质环境子系统 B1 各指标权重为例,将主观权重、客观权重、组合权重三种不同类型的权重值进行比较(见图3)发现,组合权重值介于主、客观权重值之间,一定程度上弥补了主、客观权重的不足。其他两个子系统类似。

2.4 评价模型

在建立指标体系分级标准和权重计算的基础上,构建金阳县生态地质环境承载力评价模型如下:

$$C = \sum_{i=1}^n W_{Bi} V_i \quad (10)$$

$$V_i = \sum_{j=1}^m W_{ij} C_{ij} \quad (11)$$

式中: C 为生态地质环境承载力综合值; W_{Bi} 为第 i 个子系统的权重值; V_i 为第 i 个子系统的承载力评价值; W_{ij} 为第 i 个子系统的第 j 个指标权重; C_{ij} 为第 i

个子系统的第 j 个方案层指标归一化后的值; n 为子系统的个数; m 为第 i 个子系统中方案层评价指标的个数。

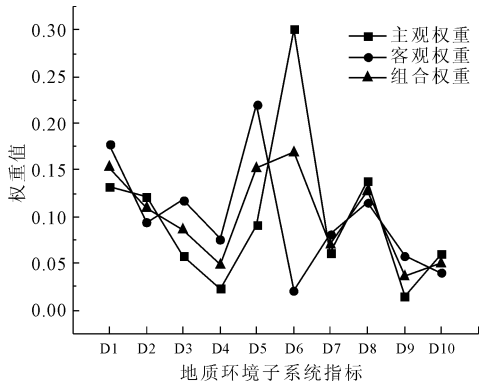


图 3 地质环境子系统指标权重值比较

2.5 评价结果与分析

综合上述评价方法与模型,通过 ArcGIS 的栅格计算功能将各评价指标栅格图层乘以综合权重进行加权总和后得到各子系统的承载力空间分级图。利用自然断点分级方法,将承载力评价值分为优、良、中、差四个等级。对各系统不同等级所占面积进行统计后得到图 4。

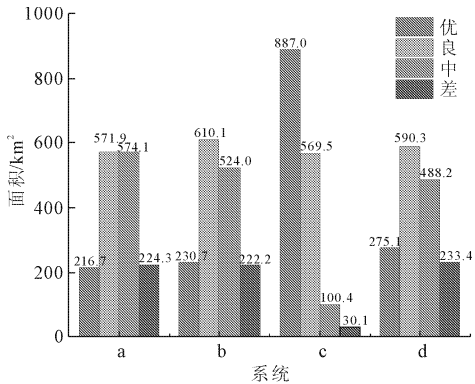


图 4 各系统对应不同等级面积统计

结合图 4 各系统生态地质环境承载力分级图发现:

承载力为优的区域,主要分布在县城西北部,马依足乡与老寨子乡部分区域。该区地形较为平坦,平均海拔在 2 200 m 以上,地质灾害基本不发育,地层岩性以坚硬岩为主。发育小型断裂,地震动峰值加速度 0.1g,植被茂密,人口分布较少。各子系统承载力均为优,地质环境系统、生态环境系统与综合评价结果面积相近,约占全县总面积的 17.3% 左右,社会环境系统为优的区域较多主要原因在于金阳县人口集中分布在少数几个乡镇,交通不发达,经

济落后。

承载力为良的区域,主要分布在县城中西部,坡度 $8^{\circ} \sim 15^{\circ}$,地质灾害发育较少,地层岩性以较硬岩类为主,断裂以小型断裂为主,地震动峰值加速度 0.1g,垂向上主要分布在海拔 2 200 m 以上的中高山区域以及 1 300 m 以上的河谷区域,植被覆盖中等,交通较为落后。各子系统与综合评价结果面积相近,约占全县面积的 37% 左右。

承载力为中的区域,主要分布在南东部及北东部,垂向上分布在海拔 1 300 m ~ 2 100 m 之间的半山人口聚集区域,该区域地形起伏较大,往往位于缓坡与陡坎交界地带,人口密度中等,地质灾害中等易发,中部及南东沿江断裂较发育,地震动峰值加速度 0.15g,地层岩性以软岩为主。地质环境系统、生态环境系统与综合评价结果面积相近,约占全县总面积的 30.8% 左右,社会环境系统为中的区域有 100.4 km²,主要为县城中部人类工程活动加剧所致。

承载力为差的区域,主要分布在县城北部及中东部沿江区域,该区地质环境复杂,断裂构造密集,由于地形起伏较大,且山区河流流量随季节变化较大,河谷冲刷下切,侵蚀作用强烈,导致两岸岸坡陡峻,斜坡地质灾害极为发育,沿交通干线崩塌现象也比较普遍。地层岩性以泥岩、页岩、砂岩等互层状较硬岩为主。地震动峰值加速度为 0.15g。植被破坏严重,为金阳县主要人口聚集地,耕地较多,北部区域生态环境脆弱,水土流失严重。地质环境系统,生态环境系统与综合评价结果十分相近,约占全县总面积的 14.7%,社会环境系统急剧下降,只有 30.1 km²,体现了人类社会经济活动相对集中的情况。

3 结论与讨论

本文以山区城镇金阳县为例,构建了金阳县生态地质环境承载力评价指标体系,将组合权重应用到评价模型中去,并进行了实证评价,得到了金阳县生态地质环境承载力的现状和空间格局,评价结果与实际调查结果较吻合。结果显示,金阳县整体生态承载力中等,生态环境优良,为长江上游生态环境建设提供了保障,但是复杂的地质环境又决定了其生态环境的脆弱性,一旦遭到破坏则很难恢复。另一方面,基于组合权重建立的评价模型,可以从更客观的角度对生态地质环境承载力进行定量综合评价。

与此同时,在研究过程中,由于数据收集的难易

程度,没有做时间序列上的比较。对于降水与空气质量数据,县域尺度的空间分布只能通过地统计方法进行空间插值得到。此外,针对生态地质环境承载力的量化模型和评价方法应用相对较少,在进行综合评价时,可以结合不同评价目的对不同子系统进行单独的评价。

参考文献:

- [1] Trofimov V T. 生态地质学——地质科学的新分支(英文)[J]. 地学前缘,2001,8(1):27-35.
- [2] 陈梦熊. 论生态地质环境系统与综合性生态环境地质调查[J]. 水文地质工程地质,1999(3):3-6.
- [3] 黄润秋. 生态环境地质的基本特点与技术支撑[J]. 中国地质,2001,28(11):20-24
- [4] 卢耀如,张凤娥,刘琦,等. 建设生态文明保障新型城镇群环境安全与可持续发展[J]. 地球学报,2015,36(4):403-412.
- [5] 彭再德,杨凯,王云. 区域环境承载力研究方法初探[J]. 中国环境科学,1996,16(1):6-10.
- [6] 唐剑武,郭怀成,叶文虎. 环境承载力及其在环境规划中的初步应用[J]. 中国环境科学,1997,17(1):8-11.
- [7] 曾维华,杨月梅,陈荣昌,等. 环境承载力理论在区域规划环境影响评价中的应用[J]. 中国人口·资源与环境,2007,17(6):27-31.
- [8] 冯小铭,郭坤一,王爱华,等. 城市地质工作的初步探讨[J]. 地质通报,2003,22(8):571-579.
- [9] 夏既胜,付黎涅,刘本玉,等. 基于GIS的昆明城市发展地质环境承载力分析[J]. 地球与环境,2008,36(2):148-154.
- [10] 姚治华,王红旗,郝旭光. 基于集对分析的地质环境承载力研究——以大庆市为例[J]. 环境科学与技术,2010,33(10):183-189.
- [11] 许向宁,王文俊,黄润秋. 基于GIS的安宁河流域生态环境地质质量评价[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2004,31(3):243-248.
- [12] 何政伟,黄润秋,许向宁,等. 金沙江流域生态地质环境现状及其对梯级水电站工程开发过程中生态环境保护的建议[J]. 地球与环境,2005,33(S1):605-613.
- [13] 赵银兵,何政伟,倪忠云,等. 矿产资源开发的生态地质环境风险研究——以甘孜州东部为例[J]. 地球与环境,2010,38(2):207-213.
- [14] 李树文,康敏娟. 生态-地质环境承载力评价指标体系的探讨[J]. 地球与环境,2010,38(1):85-90.
- [15] 倪忠云. 西藏曲水-桑日地区生态地质环境承载力研究[D]. 成都:成都理工大学,2011:123-135.
- [16] 邓辉. 基于遥感和GIS的泸定县生态地质环境质量评价[D]. 成都:成都理工大学,2011:28-37
- [17] 王克晓,陈刚,陈伟涛,等. 生态地质环境评价方法研究[J]. 测绘科学,2015,40(7):78-82.
- [18] 汪宙峰,张廷山,王蕾,等. 都汶公路沿线生态地质环境承载力综合评价[J]. 测绘科学,2016,41(7):77-81.
- [19] 郑娇玉,邹明亮,杨超,等. 兰州市城区生态地质环境承载力空间格局[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2017,53(3):355-361.
- [20] 徐中民,张志强,程国栋. 甘肃省1998年生态足迹计算与分析[J]. 地理学报,2000,55(5):607-616.
- [21] 贾逸,王佃明,冯志峰,等. 金阳县野猪湾1~#滑坡稳定性分析及治理措施[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(6):172-177
- [22] 罗日洪,黄锦林,唐造造. 基于AHP和GIS的曹江上游小流域山洪灾害风险区划[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(6):153-157.
- [23] 郭晓晶,何倩,张冬梅,等. 综合运用主客观方法确定科技评价指标权重[J]. 科技管理研究,2012,32(20):64-67,71.
- [24] 邓庆. 松坪沟景区地震地质灾害风险评价及其应用研究[D]. 成都:成都理工大学,2018:43-49.