

# 基于 FCE-AHP 的黄石市地质环境承载力评价

席茜<sup>1</sup>, 丁赞<sup>2</sup>, 叶润青<sup>3</sup>, 牛瑞卿<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 武汉 430074; 2. 湖北省地质环境总站, 武汉 430022;  
3. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 武汉 430205)

**摘要:** 随着城市化进程的加快, 人类工程活动日益强烈, 地质环境问题已经成为阻碍绿色城市发展的关键因素。了解区域地质环境承载现状, 有助于提出有效的地质环境调控手段, 科学指导区域发展规划。以湖北省黄石市为研究区, 基于地质环境、生态环境、社会环境三个方面共 16 个评价指标, 构建地质环境承载力评价体系。采用模糊综合评价(Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCE)确定各因子的隶属度、层次分析法(Antalytic Hierarchy Process, AHP)确定各因子权重, 最后通过 GIS 空间分析对黄石市地质环境承载力进行综合评价。研究表明: 黄石市东北区域承载力较差, 主要受地灾因子制约, 建议对地质灾害问题进行修复治理; 中西部陈贵镇附近因矿山开采导致其承载力较差, 建议开展矿山环境恢复工程; 南部阳新县承载力整体较好, 可进行适度开发利用。不同区域地质环境承载力的短板要素不同, 需要找到制约因子并对其进行改善来提高地质环境承载力。

**关键词:** 黄石市; 地质环境; 承载力; 模糊评价; 层次分析; 空间分析

随着科技水平和社会生产力的不断提高, 人类开发、利用、改造环境的规模、强度越来越大, 社会发展与资源环境之间的矛盾日益突出, 已成为区域可持续发展的重要制约因素<sup>[1]</sup>。了解区域发展现状是协调这一矛盾的前提<sup>[2]</sup>。资源环境承载力是摸清家底、推进资源环境与经济社会协调发展的关键所在<sup>[3,4]</sup>, 进行资源环境承载力评价是进行区域资源开发、经济发展战略决策的基础依据<sup>[5]</sup>, 也是指导国土空间规划的双评价之一<sup>[6]</sup>。资源环境承载力系统包含资源承载力要素系统与环境承载力要素系统, 环境承载力要素有水环境承载力<sup>[7]</sup>、土壤环境承载力<sup>[8]</sup>、地质环境承载力<sup>[9]</sup>。目前研究较多的为水环境承载力, 地质环境承载力研究则相对较少。地质环境是指与大气、水、生物圈相互作用着的岩石圈接近地表的部分, 与人类社会的发展有特殊、紧密的联系, 地质环境控制着其他环境场的基本格局<sup>[10]</sup>, 是资源环境系统中最重要的重要组成部分。但社会经济发展使得地质环境受到的影响和压力越来越大, 直接影响到区域经济社会安全及可持续发展能力, 明确地质环境对人类社会、经济活动的承载力阈值就要开展地质环境承载力研究<sup>[9,11]</sup>。马传明等<sup>[12]</sup>根据环境承载力的理论, 提出地质环境承载力的概念, 明确地质环境承载力是指一定时期一定区域内, 在一定的环境目标下, 在维持地质环境系统结构不发生质的改变, 系统功能朝着有利于人类社会、经济活动方向发展的前提下, 地质环境系统所能承

收稿日期: 2019-07-17; 修订日期: 2019-10-24

基金项目: 湖北省地质局科技项目 (ETZ201807A06); 中国地质调查局地质调查项目 (0431203); 国家重大水利工程建设基金项目 (0001212012AC50021, 0001212018CC60010)

作者简介: 席茜 (1995-), 女, 山西运城人, 硕士, 主要从事地质环境承载力研究。

E-mail: 737766908@qq.com

通讯作者: 牛瑞卿 (1969-), 男, 河南南阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事 3S 与地质灾害研究。

E-mail: rqnju@163.com

受人类活动和外部力量的影响与改变的最大能力。地质环境承载力在本质上反映了人类活动与地质环境之间的辩证关系,建立了人类活动与地质环境的联系,为人类活动和地质环境之间的发展提供了理论依据<sup>[12,13]</sup>。进行区域地质环境承载力评价,有助于认识地质环境与社会发展格局态势,促进资源环境的优化配置和合理利用,提出有效的地质环境调控手段,科学指导区域空间规划。

地质环境承载力评价是在地质环境调查的基础上,按照一定的评价标准和评价方法评估地质环境承载力的优劣。对地质环境承载力评价来说,评价指标的选择、权重的确定和数学模型的建立都是相当重要的步骤,贯穿于地质环境承载力评价的全过程之中<sup>[14]</sup>。姚治华等<sup>[15]</sup>从资源、环境、调节和社会经济四个方面刻画大庆市地质环境承载力情况,但其评价单元为县市区,不足以反映局部空间信息。夏既胜等<sup>[16]</sup>将GIS空间叠置技术应用到昆明市地质环境承载力研究中,评价过程更高效,结果更准确。近年来,地质环境承载力评价不仅只是各评价要素简单叠加的结果,孙金辉等<sup>[17]</sup>先利用层次分析法确定各评价指标的权重,再对北川县地质环境承载力进行评价。姚翔龙<sup>[18]</sup>以秦巴山区的柞水县为研究区,通过综合分析法得到地质环境承载力评价结果,对地质环境背景、地质环境承载力进行分区,为柞水县划定地质红线。但当前研究大多聚焦承载力结果分区且评价指标的选取依据多样,对其短板要素的分析以及根据评价结果提出相应的改善建议较少,因此地质环境承载力评价具有结合案例深入研究的必要。

黄石市是我国第二批资源枯竭型城市<sup>[19]</sup>之一,也是长江经济带<sup>[20]</sup>(武汉—黄石段)的重要城市之一。黄石市地质构造复杂,临近大别造山活动带,岩浆活动强烈,以中生代岩浆内生成矿过程为代表<sup>[21]</sup>,蕴含着丰富的矿产资源。长期的矿产开发造成黄石市矿产资源枯竭、经济结构失衡,地质环境与生态环境破坏严重。因此,开展黄石市地质环境承载力评价对黄石市社会经济绿色发展、资源空间合理优化有着非常重要的意义,并且可以为依赖矿业发展的城市进行地质环境承载力评价起到示范、参考作用。研究在评价结果的基础上,结合GIS空间分析技术<sup>[22,23]</sup>,研究不同县市区的地质环境承载力短板要素,提出改善其地质环境承载力的对策与建议,可为黄石市区域经济发展与后期资源配置提供参考。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

黄石市位于湖北省东南部,长江中游南岸,西靠武汉市江夏区,是中国中部最大城市圈武汉城市圈的副中心城市<sup>[24]</sup>,总面积约4583 km<sup>2</sup>,地跨29°30′~30°15′N, 14°31′~115°30′E之间,总体地势西南高,东北低。黄石市现辖五区(黄石港区、西塞山区、下陆区、铁山区、经济技术开发区)、一市(大冶市)、一县(阳新县)(图1a),属亚热带大陆性季风气候,全年70%~80%的雨量集中在4-9月份。区内湖泊众多,河道纵横,水系发达,大冶湖是区内最大的地表水体,其次为保安湖、王英水库,长江由北向东流过。

黄石市地处鄂东南低山丘陵和江汉平原的过渡地带,主要地貌为低山、丘陵、沉积盆地和火山盆地<sup>[21]</sup>。研究区地质构造复杂(图1b),大地构造位置属淮阳山字型褶皱构造前弧近弧顶偏西部位,岩浆活动强烈,中酸性侵入岩发育,铜、铁、金等多金属矿产,石灰石、天青石、大理岩等非金属矿产资源均很丰富,是长江中下游成矿带的重要组成部分<sup>[25]</sup>。同时,黄石还是我国三千年矿冶古都,是全国六大铜矿基地、十大铁矿基地之



对应的标准值（分级阈值）及数据来源如表1所示<sup>[25,27-30]</sup>。地质环境中的地层岩性依据岩性组合方式分为坚硬岩组、较坚硬岩组、软硬相间岩组、软弱岩组、极软弱岩组五类，极软弱岩组以第四纪砂砾层为主，主要分布在北部大冶湖盆地与南部阳新湖盆地。研究区在三叠纪之前的地壳运动方式以升降方式为主，北部受下陆—姜桥断裂带呈北北东向贯穿切割，南部山地为幕阜山脉的支脉南山头，山体南北两侧均被走向断层所切割。生态环境中，采用归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI）反映研究区植被覆盖情况，NDVI数值越大的区域说明植被覆盖度越高。研究区中部与东部区域年降雨量多为1700~1900 mm，西部区域降雨量>1900 mm。社会环境作为地质环境承载力中的承载体，其现状情况反映了地质环境对人类经济社会活动的支撑力。本文以乡镇为单位，从人口密度、耕地密度、道路密度、NDBI以及主要的经济指标量化人类社会经济活动的强度、规模，反映黄石地区社会发展现状。社会经济发展越好的区域，说明其可承载的空间越少，即社会环境中的各因子均为负向因子。

表1 黄石市地质环境承载力评价指标分级

Table 1 Classification of evaluation index of geological environmental carrying capacity in Huangshi city

指标层	分级					数据来源或计算方法
	好	较好	中等	较差	差	
NDVI $X_1$	>0.72	0.58~0.72	0.43~0.58	0.26~0.43	<0.26	地理空间数据云
降雨量 $X_2$ /mm	<1700	1700~1900	1900~2100	2100~2200	>2200	中国气象数据网 ( <a href="http://data.cma.cn">http://data.cma.cn</a> )
石漠化程度 $X_3$	—	—	轻	中	重	湖北省地质环境总站提供
地下水质量 $X_4$	宜饮用	—	处理后 可饮用	—	不可 饮用	湖北省地质环境总站提供
距水体距离 $X_5$ /m	<200	200~300	0~100	300~500	>500	计算欧式距离
地层岩性 $X_6$	坚硬	较坚硬	软硬相间	较软弱	极软弱	区域地质图提取
距断层距离 $X_7$ /km	>12	9~12	6~9	3~6	<3	计算欧式距离
高程 $X_8$ /m	<50	50~200	200~350	350~500	>500	地理空间数据云
坡度 $X_9$ (°)	<5	5~10	10~15	15~20	>20	slope 提取
矿区破坏程度 $X_{10}$	—	—	>0.50	0.30~0.50	<0.30	AHP 分析处理
地灾严重程度 $X_{11}$	—	—	<0.09	0.09~0.28	>0.28	点密度处理
人口密度 $X_{12}$ /(人/km <sup>2</sup> )	<251	251~410	410~620	620~1100	>1100	黄石统计年鉴
耕地密度 $X_{13}$ /(km <sup>2</sup> /km <sup>2</sup> )	0.15	0.15~0.3	0.3~0.45	0.45~0.6	>0.6	湖北省土地利用数据
NDBI $X_{14}$	<-0.35	-0.35~-0.26	-0.26~-0.18	-0.18~-0.1	>-0.1	地理空间数据云
道路密度 $X_{15}$ /(km/km <sup>2</sup> )	<0.22	0.22~0.44	0.44~0.66	0.66~1.22	>1.22	湖北省土地利用数据
经济指标 $X_{16}$ /(万元/人)	<0.3	0.3~0.8	0.8~1.5	1.5~3.0	>3.0	黄石统计年鉴

由于黄石市矿产种类丰富，不同矿区对地质环境的影响也不尽相同，为了量化采矿活动造成的影响和破坏，从矿区开采图斑的类型、开采方式、矿种、占地类型对其进行分类，并结合矿区开采密度数据得出矿区破坏程度，具体分类标准如表2所示。黄石市共有重点矿区14个，主要分布在黄石市西北部，开采矿种以金、铜、铁、煤矿为主。

### 1.2.3 指标隶属度确定

由于地质环境系统的复杂性，地质环境承载力评价需要的因子既有确定的变化规律，又有不确定的变化规律。因子对于地质环境的影响并非“非此即彼”，即1真（好）或0假（不好）二值逻辑，多数情况下存在着“亦此亦彼”的模糊现象，需要用区



表2 开采图斑破坏程度分类

Table 2 Classification of damage degree in mining area

开采图斑破坏程度	等级	好	较好	中等	较差	差
	类型	—	—	排土场、废石渣堆	露天采场	冶炼厂、尾矿库、选矿厂
	开采方式	—	—	露天开采	联合开采	地下开采
	开采矿种	—	—	非金属矿	金属矿	能源矿
	占地类型	—	—	占用破坏林地或草地 $\leq 2 \text{ hm}^2$ 占用与破坏荒地或未开发利用土地 $\leq 10 \text{ hm}^2$	占用破坏耕地 $\leq 2 \text{ hm}^2$ ; 占用破坏林地或草地 $2 \sim 4 \text{ hm}^2$ 占用与破坏荒地或未开发利用地 $10 \sim 20 \text{ hm}^2$	占用与破坏基本农田; 占用破坏耕地 $> 2 \text{ hm}^2$ 占用破坏林地或草地 $> 4 \text{ hm}^2$ 占用与破坏荒地或未开发利用地 $> 20 \text{ hm}^2$

间  $[0, 1]$  的多值或连续值进行描述<sup>[14]</sup>。

评价体系指标层中的评价指标构成评价因素集  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ , 评价集用  $V$  表示,  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ , 其中  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$ 、 $v_4$ 、 $v_5$  分别表示好、较好、中等、较差、差。若因素集  $U$  中第  $i$  个元素对评价集  $V$  中第  $1$  个元素的隶属度为  $r_{i1}$ , 则矩阵  $R$  中第  $i$  行  $R_i$  为第  $i$  个评价因素  $u_i$  的单因素评价, 是  $V$  上的模糊子集。以  $m$  个单因素评价集  $R_1, R_2, \dots, R_m$  为行组成矩阵  $R_{m \times n}$ , 称为模糊关系矩阵。

$$R = \begin{bmatrix} R|u_1 \\ R|u_2 \\ \vdots \\ R|u_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

模糊综合评价<sup>[31]</sup>的关键步骤在于隶属度与权重的确定, 隶属度实际上是单个评价因子落在不同评价标准区间范围内的概率。评价因子中既有定量因子也有定性因子, 对于实数型定量因子, 采用两端半梯形中间三角函数进行隶属度计算; 对于特征状态类型的定性因子, 采用专家经验法进行隶属度的确定。进行隶属度计算时需先确定该评价因子的分级标准, 即确定各评价标准区间之间的代表值, 以坡度因子和地层岩性因子为例进行介绍。坡度隶属度函数具体表达式如下:

$$\mu_1 = \begin{cases} 1, & x \leq 5 \\ \frac{10-x}{5}, & 5 < x \leq 10 \\ 0, & x > 10 \end{cases} \quad \mu_2 = \begin{cases} 0, & x \leq 5 \\ \frac{x-5}{5}, & 5 < x \leq 10 \\ \frac{15-x}{5}, & 10 < x \leq 15 \\ 0, & x > 15 \end{cases} \quad \mu_3 = \begin{cases} 0, & x \leq 10 \\ \frac{x-10}{5}, & 10 < x \leq 15 \\ \frac{20-x}{5}, & 15 < x \leq 20 \\ 0, & x > 20 \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_4 = \begin{cases} 0, & x \leq 15 \\ \frac{x-15}{5}, & 15 < x \leq 20 \\ \frac{25-x}{5}, & 20 < x \leq 25 \\ 0, & x > 25 \end{cases} \quad \mu_5 = \begin{cases} 0, & x \leq 20 \\ \frac{x-20}{5}, & 20 < x \leq 25 \\ 1, & x > 25 \end{cases}$$

式中:  $\mu$  为隶属度值; 1、2、3、4、5 分别为好到差的等级。

地层岩性的单因素评价如表3所示。

1.2.4 指标权重确定

权重是指各评价因子对评价目标所起作用的重要程度，本文采用层次分析法<sup>[32]</sup> (Analytic Hierarchy Process, AHP) 进行各指标权重的确定，该方法根据多位专家经验判断，再结合适当的数学模型进一步运算确定，是一种合理可行的系统分析方法。

该方法将决策问题按总目标、各层次目标、评价指标顺序分解为不同的层次结构，然后用求解判断矩阵特征向量的办法，求得每一层次的各元素对上一层某元素的优先权重。本文评价指标体系已将各因子分层，由专家根据Satty1-9标度，两两比较各评价指标，分别构造生态环境、地质环境、社会环境判断矩阵；对每个判断矩阵计算最大特征值及其对应的特征向量，特征向量归一化后即为权向量 $A$ ， $A=(a_1,a_2,\cdots,a_m)$ 且满足 $a_1+\cdots+a_m=1$ ，并进行一致性检验。得到的权重及一致性检验值见表4。

表3 地层岩性单因素评价

Table 3 Single factor evaluation of stratum lithology

岩性	$v_1$ 好	$v_2$ 较好	$v_3$ 中等	$v_4$ 较差	$v_5$ 差
坚硬	0.8	0.2	0	0	0
较坚硬	0.3	0.6	0.1	0	0
软硬相间	0	0.4	0.5	0.1	0
较软弱	0	0	0.3	0.6	0.1
极软弱	0	0	0.1	0.3	0.6

表4 评价体系指标权重

Table 4 Indicator weight of the evaluation system

权重	准则层	准则层一致性检验	权重	指标层	指标层一致性检验
0.33	生态环境	0.0136	0.18	NDVI	0
			0.12	降雨量	
			0.36	石漠化程度	
			0.14	地下水质量	
			0.19	距水体距离	
0.59	地质环境		0.08	地层岩性	0.0279
			0.20	距断层距离	
			0.07	高程	
			0.09	坡度	
			0.25	矿区破坏程度	
			0.31	地灾严重程度	
0.08	社会环境		0.20	人口密度	0.028
			0.12	耕地密度	
			0.21	NDBI	
			0.39	道路密度	
			0.08	经济指标	

1.2.5 综合评价

确定各因子单因素评价和其对应的权重值后，将权向量 $A$ 与模糊矩阵 $R$ 进行“合成”，即 $B=A\times R$ ，求出综合隶属度 $B$ 。为了确定各子环境最终得分，根据各因子数据本身特点，将评价等级为好的级分设为100分，其他等级依次为80、60、30、10。即 $S=\{100, 80, 60, 30, 10\}$ ，将不同环境的综合隶属度 $B$ 与得分集 $S$ 相乘，即可分别得到黄石市在生态环境、地质环境与社会环境的得分 $F$ ，即 $F=B\times S^T$ 。最后利用ArcGIS软件地图代数工具，将三个环境的得分乘以其权重相加得到黄石市地质环境承载力。

## 2 结果分析

### 2.1 地质环境承载力评价

结果表明,研究区内生态环境质量整体较好。生态环境质量差的区域主要分布在黄石市西塞山与大冶市交界处的条带状丘陵区域,部分分布在陈贵镇东南部与金湖街道中部,主要原因是该区域石漠化发育较为严重,且朝恶化方向演变,不易恢复(图3a)。生态环境较差区域与中等区域的分布受地下水质量与NDVI影响较大,主要分布在大冶市东部与黄石市各区交界地带、阳新县中部及北部,该区域多为建筑物密集区,植被指数偏低,且地下水水质为不宜饮用。西部金牛镇地下水质量多为不宜饮用或处理后可饮用,区内NDVI整体偏低,加之其年降雨量可达2200 mm,连降暴雨则易发生洪涝灾害,导致其生态环境质量整体处于中等状态,局部呈现差的状态。沿江一带区域植被指数偏低,但由于距水体距离较近,生态环境质量为中等或较好状态,其中黄石市黄石港区位于长江西岸,区内水体分布较多,缓解了其植被指数偏低的劣势,生态环境质量整体偏好。

地质环境受地灾严重程度要素的影响较大,这是因为区域一旦发生地质灾害,说明该区域地质环境系统处于失衡状态,受到的压力超过其所能承受的范围。研究区东北角由于地质灾害点分布密集,加之矿山开采,其地质环境质量处于差的状态(图3b)。其中,黄石市铁山区范围与大冶铁矿矿区范围基本吻合,矿山开采丰富,以开采石灰石矿

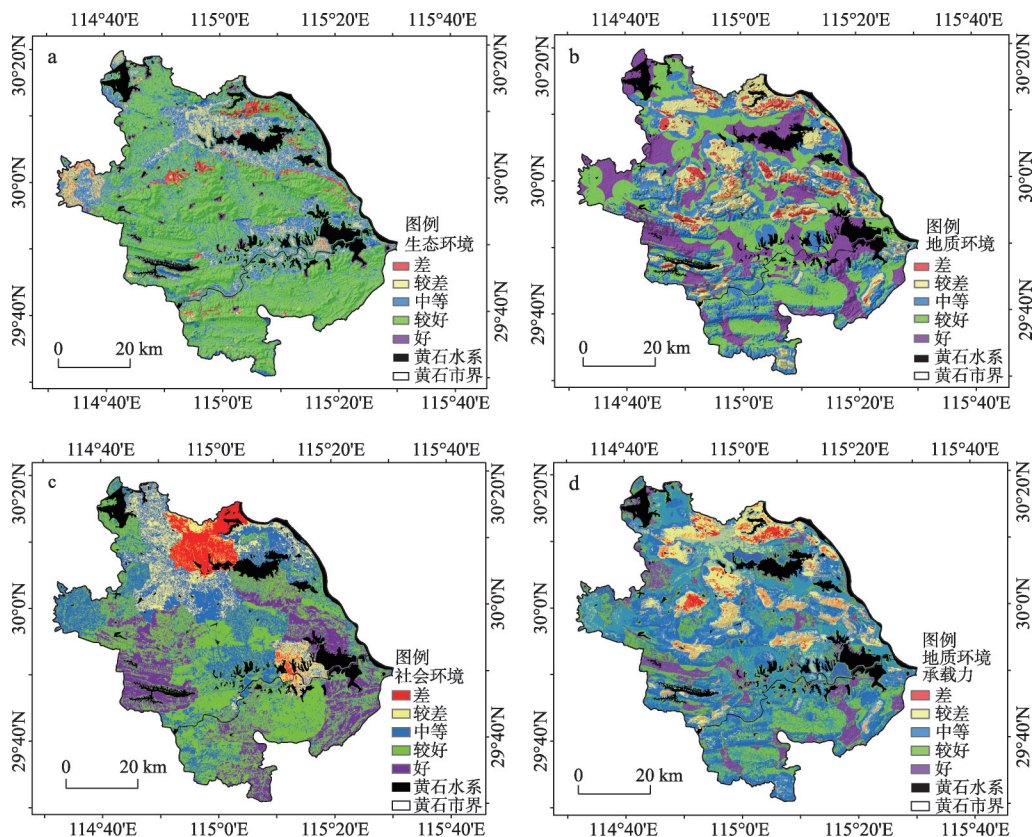


图3 研究区地质环境承载力与子环境评价结果

Fig. 3 Geological environment carrying capacity and sub-environmental evaluation results in the study area

和铁矿为主,致使铁山区地质环境质量整体为较差及差。矿山开采主要分布在大冶市保安镇、金山店镇、陈贵镇及金湖街道四个乡镇街道内,矿山开采的区域同时也是地灾高发区,两种要素综合影响了这四个乡镇街道的地质环境质量。阳新县中北部断层较为发育,且断层附近区域的坡度均大于 $15^{\circ}$ ,使其地质环境质量下降,阳新县其余区域地质环境整体状态为中等及以上,无矿产开采活动,且地灾发育较少。

社会环境是负向因子,即社会环境分值越低,表示该区域经济越发达、交通越便利,区域环境所能承载的发展空间便越小。如图3c所示,黄石市区及大冶市的东风路街道、罗家桥街道、东岳路街道、金山街道社会环境均为差,主要原因是其人口密度、道路密度及NDBI指数高,即其可承载的空间小。阳新县仅有兴国镇社会环境处于较差或差的状态,兴国镇为城中镇,阳新县政府所在地,经济水平比阳新县其他乡镇较高,道路相对便捷,人口密度较大,相应的可承载空间小。王英镇、陶港镇、枫林镇社会环境状态为好,NDBI指数、道路密度与人口密度都偏低,可承载的空间相对较大。

由图3d可见,承载力差的区域主要分布在北部丘陵一带以及中部陈贵镇附近,面积约 $91\text{ km}^2$ ,约占总面积的2%,也是占比最小的区域,结合其子环境质量状态可知,该区域生态质量多为较差或差,地灾发育较多,矿山开采严重,且人口密集、社会经济发展水平较高;承载力较差区域主要分布在大冶市北部、大冶湖西部以及兴国镇北部,面积约 $720\text{ km}^2$ ,约占总面积的17%,该区域地质环境质量多为较差状态,位于矿权覆盖范围内,地灾较为发育,兴国镇北部则是由断层存在致使地质环境承载力较差;承载力中等区域面积约 $2197\text{ km}^2$ ,是面积占比最大的区域,约占53%,多分布于阳新县及大冶市西侧,该区域整体生态环境与地质环境较好,地灾较少发育,局部区域被矿区覆盖;承载力较好区域面积约 $801\text{ km}^2$ ,占比约19%,主要分布在阳新县南部木港镇、洋港镇及大冶湖北部的汪仁镇,该区域生态环境较好,基本无地灾发育,整体地质环境承载力偏好;承载力好的区域面积约 $356\text{ km}^2$ ,约占总面积9%,主要分布在大冶市茗山乡、阳新县王英镇北侧及枫林镇与木港镇交界处,该区域无地灾发育,生态环境与地质环境质量均好,社会发展水平较低。

## 2.2 短板要素分析

采用短板效应理论<sup>[33]</sup>探索地质环境承载力体系中关键制约因素,对其进行改善优化,可以有效提高地质环境承载力。由上述地质环境承载力评价结果可知,不同区域的承载力情况各不相同,因此,本文在县市区尺度上寻找其短板要素,根据各县市区内的各要素得分分值,将要素分值以40、80为界划分短板要素、限制性要素、优势要素。其中,短板要素是地质环境承载力有效提升的关键。利用ArcGIS分区统计工具得到各县市区各因子得分的均值。

由图4可看出,各区域生态环境中距水体距离因子得分最低,其原因主要是在设置水体缓冲区距离时,将距水体1000 m外的区域对生态环境影响的隶属度归为差。黄石市黄石港区紧邻长江,加之区内磁湖等水域面积约占全区总面积15%,因此距水体距离因子得分相对其他区域较高。黄石港区NDVI得分较低的主要原因是区内建筑用地面积占比达65%,植被覆盖面积仅约占20%。黄石市石漠化总面积约占全市面积的3%,影响区域较小,计算均值时“稀释”了石漠化严重区域的得分,使得各县市区中该因子得分较高。地下水质量要素在黄石市下陆区为限制性因素,下陆区是重要的冶金工业基地,可能源于冶金过程中污染物处理不当。综上可知,制约各区域生态环境质量的短板因素为



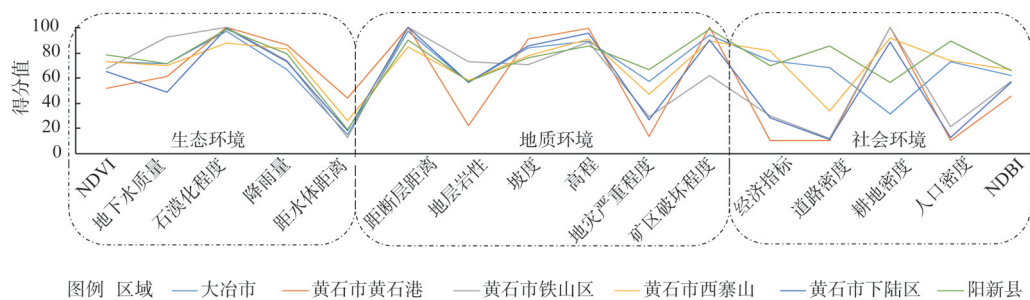


图4 各区域各因子得分均值

Fig. 4 Average scores of factors in each region

距水体距离。

地质环境中的地灾严重程度因子在各区域内得分均处于最低位置,是地质环境中的短板因素。其中黄石港区受其影响最为严重,这是因为地质灾害隐患点主要分布于黄石港区、西塞山西北角与下陆区东部,黄石港区地层岩性为极软弱岩组,主要分布第四纪沙砾层,得分较低,也是其地质环境中的短板。黄石市铁山区矿区开采程度相比其他区域较高,且矿区开采伴随的地质灾害也发育较多,因此矿区开采是其亟需改善的限制性要素。大冶市矿区开采程度平均得分较高,原因是大冶市内的矿权区覆盖范围仅占大冶市总面积16%,且矿权以外区域状态均设为好的等级。

社会环境中,制约各区域发展的短板因素各不相同。阳新县与大冶市的耕地密度是制约其社会环境中的短板要素,黄石港区、铁山区、下陆区的短板要素为人口密度。进行承载力评价研究是为了更好地推动社会发展,从发展角度来看,社会环境中得分较高的因子便是发展中的短板,也是其区域待提高的因素。譬如道路密度要素,在黄石港区、铁山区、下陆区及西塞山区得分较低,是地质环境承载力的短板,但却是发展中的优势要素。阳新县道路密度得分较高,即该区域交通条件较差,是发展中的短板要素,也是今后发展过程中需要优化的要素。

### 2.3 乡镇承载力状态分析

如图5a所示,大冶市大部分乡镇承载力处于较差与中等交界处。其中,金牛镇、东风农场管理区、东风路街道承载力状态所处等级较为集中,即区域内空间差异较小。金牛镇部分区域得分较差,主要原因在于地下水水质较差,建议合理开采地下水,控制污水排放。还地桥镇、保安镇、金山店镇、陈贵镇、金湖街道处于大冶市中北部,承载力状态差异较大,该区域发展以工矿产业为主,矿山开采造成的生态地质破坏是其承载力的主要限制因素,应积极开展工矿废弃地治理工程,划分矿产资源禁止开采区、限制开采区和允许开采区,关停禁采区内的采矿活动。同时,通过政策引导寻找新的经济增长点,调整产业结构,加快矿产资源结构转型。大冶湖西侧的东风路街道、罗家桥街道、东岳路街道、金山街道是大冶市的中心城区,承载力状态均较差。东风路街道由于所占区域较小,承载力状态较集中,人口密度大、建筑物密集、社会经济发展水平较高。在发展过程中要优化空间布局,改善中心城区人居环境,建议今后发展可沿大冶湖周边而建,发挥大冶湖生态功能,推动城市生态文明建设。茗山乡地质环境承载力整体较好,该乡地处陈贵苗木花卉走廊,森林覆盖率可达29%,充分利用自身山水资源优势及其芳香产业发展基础,打造芳香特色小镇,是大冶市资源环境与社会发展协调最好的区域。

阳新县除金海开发区外,其余乡镇承载力处于中等或较好状态(图5b)。金海开发

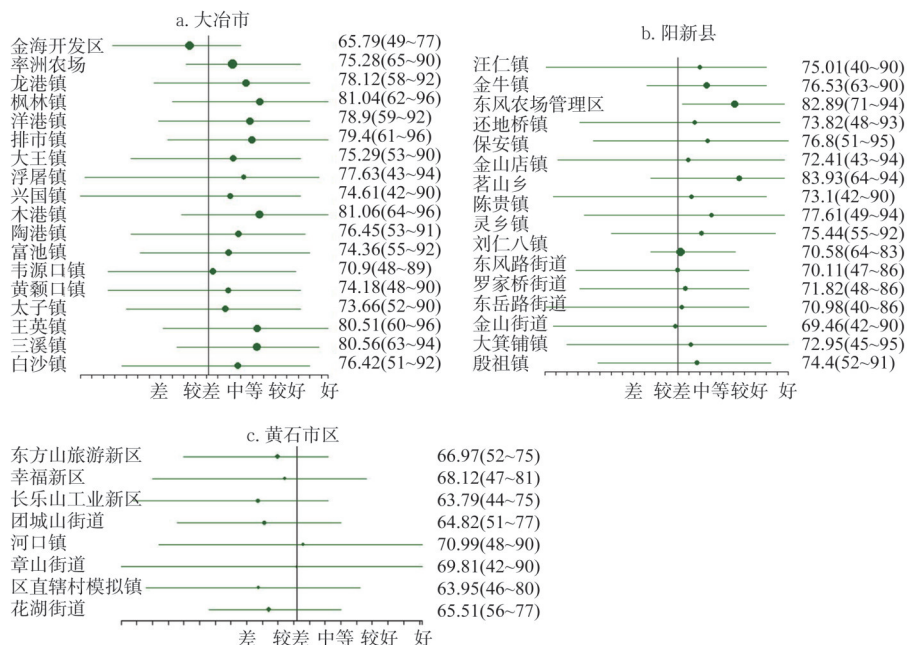


图5 各乡镇地质环境承载力得分区间

Fig. 5 Grading interval of geological environment carrying capacity of each township

区位于大冶湖东侧，是主要的煤炭产煤基地，该区与韦源口镇都处于阳金海煤炭开发管理区煤矿矿区范围内，地面塌陷与地面沉降严重，是其地质环境承载力的短板要素，建议逐步建立、完善地质灾害监测系统，对塌陷、沉降进行动态监测。浮屠镇与兴国镇承载力区间跨度大，在于两镇北部交界处断层发育明显，存在多处不稳定斜坡隐患点，建议区域规划时可向南发展，避开地灾易发区。枫林镇、木港镇、王英镇和三溪镇承载力状态较好，但是社会发展程度水平普遍较低，建议这些乡镇依托自身丰富山水资源，发展休闲旅游，拓宽经济增长的动力。

黄石市各区（街道）除河口镇外承载力得分均属于较差区间（图5c）。其中，长乐山工业新区得分最低，该区位于黄石市下陆区，区内企业多为有色金属产业，对其生态环境造成较大影响，建议推行清洁生产、打造循环经济产业链条。区直辖村模拟镇即黄石市铁山区，也是黄石国家矿山公园所在地，区内矿区开采图斑面积约占16%，地质灾害多以滑坡为主，地质环境较差，建议对已停止开采的矿区加以利用，进行复垦恢复或工业遗迹景观建设，完成矿区转型。花湖街道、团山城街道是地灾高发区，建议对已存在的地灾开展排险与治理工程，黄石港区在经济上可依托港口优势，建设智慧物流，培育新的经济增长点。

### 3 结论

本文从生态环境、地质环境和社会环境三个方面选取16个评价指标，考虑到黄石以矿业发展的特点，在体系中加入矿山开采程度因子，构建了黄石市地质环境承载力评价体系。采用模糊层次分析法进行因子隶属度及权重的确定，基于GIS空间分析得到研究区地质环境承载力分区，得到以下结论：

（1）评价指标分级根据分级标准值采用模糊隶属度函数进行确定，模糊化评价指标之

间的等级界限,可以较真实地反映不同等级之间的相对特征,有利于更科学地定量评价。

(2)在综合评价的基础上,在县市区尺度上进行短板要素的甄别,得出地灾严重程度是影响黄石市中心城区的主要短板要素。

建议黄石市中心城区应及时对已发现的地质灾害进行治理,建立地质环境监测及预警平台,合理利用自然有效空间,在发展经济的同时保护好生态环境。大冶市应全力推进生态整治,实施“治山工程”,加强对矿山开采区的监督及环境治理,同时,建议以工业旅游作为资源枯竭型城市转型之路的切入点,整合周边工业遗址资源,形成独特矿冶文化旅游。阳新县应积极融入武汉城市圈发展,以旅游农业为产业结构调整突破点,大力发展以生态旅游为引领的服务业,推动其生态经济发展。

### 参考文献(References):

- [1] 刘文政,朱瑾.资源环境承载力研究进展:基于地理学综合研究的视角.中国人口·资源与环境,2017,27(6):75-86. [LIU W Z, ZHU J. Research progress of resources and environmental carrying capacity: From the perspective of the comprehensive study of geography. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(6): 75-86.]
- [2] 盖美,聂晨,柯丽娜.环渤海地区经济—资源—环境系统承载力及协调发展.经济地理,2018,38(7):163-172. [GAI M, NIE C, KE L N. Carrying capacity and coordinated development of ERE system in the coastal area of Bohai Sea. Economic Geography, 2018, 38(7): 163-172.]
- [3] 沈春竹,谭琦川,王丹阳,等.基于资源环境承载力与开发建设适宜性的国土开发强度研究:以江苏省为例.长江流域资源与环境,2019,28(6):1276-1286. [SHEN C Z, TAN Q C, WANG D Y, et al. Research on land development intensity based on carrying capacity of resources and environment and suitability of development and construction: A case study of Jiangsu. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(6): 1276-1286.]
- [4] 封志明,李鹏.承载力概念的源起与发展:基于资源环境视角的讨论.自然资源学报,2018,33(9):1475-1489. [FENG Z M, LI P. The genesis and evolution of the concept of carrying capacity: A view of natural resources and environment. Journal of Natural Resources, 2018, 33(9): 1475-1489.]
- [5] 刘金花,李向,郑新奇.多尺度视角下资源环境承载力评价及其空间特征分析:以济南市为例.地域研究与开发,2019,38(4):115-121. [LIU J H, LI X, ZHENG X Q. Evaluation on resources and environment carrying capacity and its spatial characteristics under multi-scale perspective: A case of Jinan city. Areal Research and Development, 2019, 38(4): 115-121.]
- [6] 张茂省,岳东霞,孙萍萍,等.面向县级国土空间规划的自然资源综合调查与双评价:以延安市延川县为例.兰州大学学报:自然科学版,2019,55(3):281-289. [ZHANG M S, YUE D X, SUN P P, et al. A comprehensive survey of natural resources and double evaluation of county-level land spatial planning: A case study of Yanchuan county in Shaanxi, China. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2019, 55(3): 281-289.]
- [7] 苏贤保,李勋贵,赵军峰.水资源—水环境阈值耦合下的水资源系统承载力研究.资源科学,2018,40(5):1016-1025. [SU X B, LI X G, ZHAO J F. Carrying capacity of water resources system coupling water resources with water environment thresholds. Resources Science, 2018, 40(5): 1016-1025.]
- [8] 靳相木,柳乾坤.基于三维生态足迹模型扩展的土地承载力指数研究:以温州市为例.生态学报,2017,37(9):2982-2993. [JIN X M, LIU Q K. Analysis of a land carrying capacity index based on an expanded three-dimensional ecological footprint model: A case study of Wenzhou. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 2982-2993.]
- [9] 殷志强,李瑞敏,李小磊,等.地质资源环境承载能力研究进展与发展方向.中国地质,2018,45(6):1103-1115. [YIN Z Q, LI R M, LI X L, et al. Research progress and future development directions of geo-resources and environment carrying capacity. Geology in China, 2018, 45(6): 1103-1115.]
- [10] 蔡鹤生,周爱国,唐朝晖.地质环境质量评价中的专家—层次分析定权法.地球科学,1998,23(3):299-302. [CAI H S, ZHOU A G, TANG Z H. Expert-analytic hierarchy weighting process in geological environment quality assessment. Earth Science, 1998, 23(3): 299-302.]
- [11] LI R, YIN Z, WANG Y, et al. Geological resources and environmental carrying capacity evaluation review, theory, and practice in China. China Geology, 2018, 1(4): 556-565.

- [12] 马传明, 马义华. 可持续发展理念下的地质环境承载力初步探讨. 环境科学与技术, 2007, 30(8): 64-65. [MA C M, MA Y H. Tentative investigation of bearing capacity of geological environment for sustainable development. Environmental Science and Technology, 2007, 30(8): 64-65.]
- [13] 周爱国. 地质环境评价. 武汉: 中国地质大学出版社, 2008, 13-14. [ZHOU A G. Geological Environment Evaluation. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2008, 13-14.]
- [14] 黄润秋. 地质环境评价与地质灾害管理. 北京: 科学出版社, 2008, 9-19. [HUANG R Q. Geological Environment Evaluation and Geological Disaster Management. Beijing: Science Press, 2008, 9-19.]
- [15] 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. 环境科学与技术, 2010, 33(10): 183-189. [YAO Z H, WANG H Q, HAO X G. Evaluation of geological environment carrying capacity based on set pair analysis: A case study in Daqing. Environment Science and Technology, 2010, 33(10): 183-189.]
- [16] 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. 地球与环境, 2008, 36(2): 148-154. [XIA J S, FU L N, LIU B Y, et al. Study on the geo-environment load capacity for Kunming's development based on GIS. Earth and Environment, 2008, 36(2): 148-154.]
- [17] 孙金辉, 谢忠胜, 陈欢, 等. 基于层次分析法的北川县环境地质承载力评价. 水土保持通报, 2018, 38(4): 131-134. [SUN J H, XIE Z S, CHEN H, et al. Assessment of geological environment carrying capacity of Beichuan county based on AHP. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 131-134.]
- [18] 姚翔龙. 陕南秦巴山区地质环境承载力评价研究. 西安: 长安大学, 2016. [YAO X L. Evaluation research on geological environment capacity in qinba area of Southern Shaanxi: A case study in Zhashui county. Xi'an: Chang'an University, 2016.]
- [19] 安慧, 张澜奇. 资源枯竭型城市可持续发展定量评价: 以黄石市和潜江市为例. 中国矿业, 2017, 26(12): 128-133. [AN H, ZHANG L Q. Quantitative evaluation of sustainable development for resource-exhausted cities: A case study of Hangshi city and Qianjiang city. China Mining Magazine, 2017, 26(12): 128-133.]
- [20] 段学军, 邹辉, 陈维肖, 等. 长江经济带形成演变的地理基础. 地理科学进展, 2019, 38(8): 1217-1226. [DUAN X J, ZOU H, CHEN W X, et al. Formation and change of the Yangtze River Economic Belt from a geographical perspective. Progress in Geography, 2019, 38(8): 1217-1226.]
- [21] 韦俊铭. 黄石地区构造地貌分析. 大冶科技, 1997, (1): 49-53. [WEI J M. Analysis of structural geomorphology in Huangshi area. Daye Technology, 1997, (1): 49-53.]
- [22] LU C, YANG J, LI H, et al. Research on the spatial-temporal synthetic measurement of the coordinated development of Population-Economy-Society-Resource-Environment (PESRE) systems in China based on Geographic Information Systems (GIS). Sustainability, 2019, 11(10): 2877.
- [23] DAI F, LEE C, ZHANG X. GIS-based geo-environmental evaluation for urban land-use planning: A case study. Engineering Geology, 2001, 61(4): 257-271.
- [24] 王海军, 翟丽君, 刘艳芳, 等. 基于多维城市要素流的武汉城市圈城市联系与功能分析. 经济地理, 2018, 38(7): 50-58. [WANG H J, ZHAI L J, LIU Y F, et al. Urban connection and function in Wuhan Urban Agglomeration based on multi-dimensional urban factor flows. Economic Geography, 2018, 38(7): 50-58.]
- [25] 孙晓玲, 韦宝玺, 相洪波. 黄石市地质环境适宜性评价. 中国国土资源经济, 2015, (9): 66-69. [SUN X L, WEI B X, XIANG H B. Suitability evaluation of geological environment in Huangshi city. Natural Resource Economics of China, 2015, (9): 66-69.]
- [26] 李建春, 袁文华. 基于 GIS 格网模型的银川市土地生态安全评价研究. 自然资源学报, 2017, 32(6): 988-1001. [LI J C, YUAN W H. Assessment of urban land ecological security in Yinchuan city based on the grid method. Journal of Natural Resources, 2017, 32(6): 988-1001.]
- [27] 王念秦, 蒲凯超, 李仁伟. 基于变异系数法的临潼区地质环境承载力综合评价. 地下水, 2018, (2): 77-80. [WANG N Q, PU K C, LI R W. Comprehensive evaluation of geological environment carrying capacity for Lintong district based on variation coefficient method. Ground Water, 2018, (2): 77-80.]
- [28] 杨春发. 闽北山区(延平区)地质灾害临界降雨量研究. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(5): 219-223. [YANG C F. Critical rainfall amount of geological hazards at northern mountains in Fujian province (Yanping district). Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(5): 219-223.]
- [29] 刘明. 丘陵山区资源环境承载力评价与土地利用功能分区研究. 重庆: 西南大学, 2016. [LIU M. Research on resource-environment carrying capacity and regional division of land use function in hilly areas. Chongqing: Southwest



University, 2016.]

- [30] JIANG Y, LIN L, NI H, et al. An overview of the resources and environment conditions and major geological problems in the Yangtze River Economic Zone, China. *China Geology*, 2018, 1(3): 435-449.
- [31] GONG L, JIN C. Fuzzy comprehensive evaluation for carrying capacity of regional water resources. *Water Resources Management*, 2009, 23(12): 2505-2513.
- [32] SAATY T L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 1994, 24(6): 19-43.
- [33] 钟姗姗, 刘鹏. 2007—2015年湖南省水资源安全状态与短板要素甄别. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(5): 54-60. [ZHONG S S, LIU L. Water resources security state of Hunan province during 2007-2015 and the short-board factors. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(5): 54-60.]

## Evaluation of geological environment carrying capacity of Huangshi city based on FCE-AHP

XI Xi<sup>1</sup>, DING Zan<sup>2</sup>, YE Run-qing<sup>3</sup>, NIU Rui-qing<sup>1</sup>

(1. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Province Geological Environment Terminus, Wuhan 430022, China; 3. Wuhan Center of Geological Survey, China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, China)

**Abstract:** With the continuous acceleration of urbanization, human engineering activities have become increasingly strong, and geological environmental problems have become a pivotal factor hindering the development of green cities. Understanding the status of regional geological environment carrying capacity can help to provide effective geological environment control measures and scientifically guide regional development planning. We take Huangshi city in Hubei province as the research area, and build a geological environment carrying capacity evaluation system consisting of 16 evaluation indexes of geological environment, ecological environment and social environment. The FCE (fuzzy comprehensive evaluation) is used to determine the membership degree of each factor. The AHP (analytic hierarchy process) is used to determine the weight of each factor. Finally, the GIS spatial analysis is used to comprehensively evaluate the geological environment carrying capacity of Huangshi city. The research indicates that the geological environment carrying capacity is low in the northeast of the study area, which is mainly restricted by the disaster factors. Therefore, we recommended that disasters should be reduced. The geological environment carrying capacity is low in the southwestern part of Chengui town owing to mining over-exploitation. Thus, we recommended that mining environment restoration project should be carried out. The Southern Yangxin county, which has a high geological environment carrying capacity, can be appropriately developed and utilized. Generally, we should take targeted measures to improve geological environment carrying capacity in different parts of the study area.

**Keywords:** Huangshi city; geological environment; carrying capacity; FCE; AHP; spatial analysis