

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.373>



金属矿床勘查与开发定量生态评估体系初探： 以福建罗卜岭斑岩型铜钼矿为例

张纪伟^{1,2}, 陈华勇^{1,2,3*}

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 广东省矿物物理与材料研究开发重点实验室, 广东广州 510640

摘要: 定量评估矿床的经济价值与未来勘查开发对生态环境产生的影响, 可以缓解矿产资源开发与生态文明建设之间的矛盾。基于多元数据, 构建了以驱动力-压力-状态-影响-响应 (Driving-Pressure-State-Impact-Response, DPSIR) 模型为理论框架的综合评价指标体系, 包含 6 个一级指标和 23 个二级指标。根据评价等级表, 利用多层次模糊综合评价法进行指标权重计算以及综合均值分析, 建立了一个完整的评估体系。该体系在福建罗卜岭斑岩型矿床开发设计中的应用表明, 福建罗卜岭矿区开发适宜度评价为 II 级, 即对当地的经济发展到起到明显的推动作用, 但对生态环境会产生轻微干扰。该方法能较好地反映金属矿床勘查与开发对生态的综合影响, 可操作性较强, 可为国土资源、环境保护以及矿山企业等部门进行矿产资源的开发评估提供参考。

关键词: 金属矿床; 勘查与开发; 定量生态评估指标体系; DPSIR 模型; 多层次模糊评价方法; 矿床地质。

中图分类号: P618.2

文章编号: 1000-2383(2021)11-3818-11

收稿日期: 2020-12-01

Preliminary Study on Quantitative Ecological Evaluation of Exploration and Development of Ore Deposits: A Case Study of Luoboling Porphyry Copper Molybdenum Deposit, Fujian Province

Zhang Jiwei^{1,2}, Chen Huayong^{1,2,3*}

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Physics and Materials, Guangzhou 510640, China

Abstract: The accurate quantitative assessment, which is about economic value of mining and ecological impact of future exploration and development on the environment, is highly needed and it can help to alleviate the contradiction between the development of mineral resources and the construction of ecological civilization. Based on multivariate data, in this study it constructs a comprehensive evaluation index system with the DPSIR model (Driving-Pressure-State-Impact-Response) as the theoretical framework, including 6 first-level indicators and 23 second-level indicators. According to the evaluation rating table, a multi-level fuzzy comprehensive evaluation method is used to calculate the weight of the indicators and analyze the comprehensive average value to establish a complete evaluation system. The application of this system in the development of the Luoboling

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(No.41725009); 广东省财政项目“广东省矿产资源国情调查”(No.09-2019-XMZC-0011-82-0003)。

作者简介: 张纪伟(1997—), 男, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事金属矿床勘查与开发生态影响评估体系的研究。ORCID: 0000-0003-0602-5666. E-mail: zhangjiwei20@mails.ucas.ac.cn

* **通讯作者:** 陈华勇, ORCID: 0000-0001-9106-9297. E-mail: huayongchen@gig.ac.cn

引用格式: 张纪伟, 陈华勇, 2021. 金属矿床勘查与开发定量生态评估体系初探: 以福建罗卜岭斑岩型铜钼矿为例. 地球科学, 46(11):3818-3828.

porphyry deposit in Fujian shows that the development suitability of the Luoboling mining area in Fujian is rated as Grade II, that is, it plays a significant role in promoting local economic development, but it will produce slight environment negative impact. The evaluation system constructed in this study provides a practical method which can be referred for the development and evaluation of mineral resources by the different levels of government and mining enterprises.

Key words: metal deposit; exploration and development; ecological assessment; DPSIR model; multi-level fuzzy comprehensive evaluation method; mineral deposit.

矿产资源是地球赋予人类的宝贵财富,是国民经济发展的必要物质保障,但对矿产资源的勘查与开发不可避免会对生态环境产生一定的破坏.近年来,国内日益重视生态保护.目前已从对矿山建设环境治理,逐步过渡到对矿产资源勘查开发整个阶段的综合环境保护.如何尽快建立有效的金属矿床勘查与开发生态评估指标体系,为政府与企业决策提供精准的评价标准和科技支撑,是当前矿产研究的一个新方向和重要任务(陈华勇,2020).此类研究也将有力推动地学、生态学、信息科学等多学科交叉融合与前沿创新.国内绿色勘查工作不断推进,地勘工作中的环境保护不断细化(马骋等,2019;吴永阔,2019),如对勘查阶段的地勘设备冲洗液进行了研究,研制出环境友好型环保冲洗液系统,降低地勘工作对生态的影响(付帆等,2020).之后青海地质局首次在三江源地区对勘查所带来的生态影响价值进行了定量研究,推动了勘查工作生态影响由定性向定量评价的转变(罗长海等,

2019),这些工作丰富和完善了绿色勘查的内容.2020年自然资源部对矿山建设指标进行细化分析,进一步约束矿山开采对环境所带来的影响.从中我们可看出,我国在勘查阶段和矿山开发建设阶段环境保护力度不断增大.同时,如何尽可能减少或消除对勘查区和矿区生态环境影响,特别是在矿床开发之前做出准确的判断,需要一个科学完整的体系进行定量评估,但目前该体系尚未建立,这也是导致当前矿业勘查开发与生态保护尖锐对立的一个重要原因.

本文以此为出发点,以金属矿床为主要研究对象,探讨如何建立一个矿床开发前科学合理的综合定量预评估体系,从而更好地保护生态环境、服务矿业,促进国内矿产资源开发与生态环境保护“双赢局面”的早日形成.

1 指标筛选及评价体系构建过程

1.1 生态影响评估指标体系理论框架结构

金属矿山勘查与开发所产生的生态影响不仅

表 1 矿产资源勘查与开发阶段环境影响因素统计

Table 1 Statistics of environmental influence factors during mineral exploration

阶段	序号	影响因素	影响内容	环境影响	影响强度
勘查阶段	1	测量工作	设备安装等	植被干扰	一般
	2	物探化探工作	设备安装\取样等	植被干扰	一般
	3	驻地建设	营地建设\生产生活垃圾等	植被扰动\土壤\水影响	中度
	4	钻探施工	油料泄露\冲洗液排放\岩心切割\粉尘等	植被扰动\土壤\水影响	中度
	5	道路施工	土石挖掘\路基建设等	植被扰动\土壤	强
	6	探槽(剥土)施工	设备安装\土石挖掘与堆放等	植被扰动\土壤	强
	7	浅井施工(小圆井、方井)	设备安装\土石挖掘与堆放等	植被扰动\土壤	强
	8	坑道施工	平硐\斜井\竖井等	植被扰动\土壤	强
开发阶段	1	资源开采	钻孔\爆破\铲装\排土\矿井水等	土地占用\植被破坏\水\大气影响	强
	2	选矿加工	矿物选矿加工\尾矿\废石\废水等	土壤\水影响	强
	3	固体废弃物排放	废石\矿渣等	土地占用\植被破坏\水影响	强
	4	废水排放	工艺排水\尾矿池流水\矿场水等	土壤\水影响	强
	5	废气排放	爆破炮烟\粉尘\选矿废气等	大气影响	强
	6	驻地建设	营地建设\生产生活垃圾等	土地占用\植被破坏\水影响	强

注:资料来源于《绿色勘查指南》、《绿色地质勘查规范》、《绿色矿山评价指标》以及《国家绿色矿山建设规范》等.

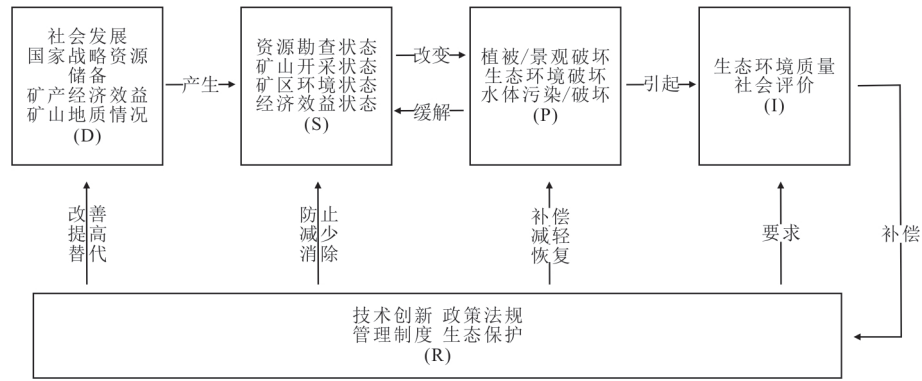


图 1 DPSIR 模型评价指标体系框架结构

Fig.1 The framework of evaluation construction based on DPSIR model

表 2 金属矿床勘查与开发生态评估指标

Table 2 The indexes of metal ore deposit exploration and exploitation for ecological evaluation

目标层	系统层	指标层				
		勘查阶段		预开发阶段		
		评价指标	指标属性	评价指标	指标属性	
金属矿床勘查与开发评估体系	驱动力系统(D)	矿山经济价值 d_1	+	矿山经济效益 d_1	+	
		国家金属矿产资源需求 d_2	+	国家金属矿产资源需求 d_2	+	
		修路、机台修建 p_1	-	植被损坏面积 p_1	-	
		槽探、钻探工程施工 p_2	-	地质灾害 p_2	-	
	压力系统(P)	设备、车辆、物料运输 p_3	-	土地占用面积(km^2) p_3	-	
		营地、生产和生活垃圾 p_4	-	环保搬迁规模 p_4	-	
		冲洗液排放 p_5	-	环保搬迁潜在生态、人文及敏	-	
		油料泄露 p_6	-	感因素 p_5	-	
		岩心切割、粉尘 p_7	-	水均衡破坏程度 p_6	-	
		化探采样 p_8	-	废水排放 p_7	-	
	状态系统(S)				废气排放 p_8	-
		地形地貌 s_1	+	噪声污染 p_9	-	
		地表植被 s_2	+	固体废弃物排放 p_{10}	-	
		生物多样性 s_3	+	矿山的规模 s_1	+	
					矿床的成矿类型 s_2	+
					矿山开采方式 s_3	+
	影响系统(I)	社区群众满意度 i_1	+	地形地貌 s_4	+	
				地表植被 s_5	+	
	响应系统(R)	政府干预程度 r_1	+	生物多样性 s_6	+	
		企业生态政策执行情况 r_2	+	社区群众满意度 i_1	+	

与地勘工作的勘查方式、矿山开发时期土地的占用面积、道路修建、尾矿库等有关,同时也与矿区所处的地理位置有关,如西北戈壁、东南低山丘陵、西南高山丘陵等,不同的地质地理环境,矿山开发的生态影响和矿山本身的修复功能也会不同(翟裕生, 2020)。勘查与开发对生态的主要影响见表 1。

本文基于 DPSIR 模型(Azapagic, 2014; 包蕊等, 2020)的要素结构构建了生态影响评估指标体系(图 1)。该体系是通过对于矿床勘查开发生态影响的内涵、机理等进行综合比较分析,归类筛选不同的要素因子,咨询专家、查阅文献,分析生态环境特征、社会文化背景等步骤组成。

如图 1 所示,驱动力(D)是指引起环境变化的

表 3 生态影响综合评估等级

Table 3 Rating scale of the comprehensive ecological impact assessment

开发适宜度级别	生态综合影响程度	风险描述
I	基本无影响	有效促进当地经济发展,满足国家战略需求
II	轻度影响	对当地的经济发展到明显的推动作用,但对生态环境产生轻微干扰
III	中度影响	可以推动当地经济发展,实现矿产资源开发的经济效益大于生态破坏价值
IV	强烈影响	对当地的生态环境带来强烈影响,虽可以推动经济发展,但经济效益无法明显大于所破坏的生态价值
V	极端影响	对环境造成极大破坏,且经济效益低下,经济效益无法高于生态破坏价值

初始原因,如经济发展需要、国家战略需求等;压力(P)是指人类活动对自然生态施加的压力,如直接导致环境变化的活动;状态(S)是指环境影响对状态造成的改变,压力可以直接作用于状态系统致使其发生改变,同时状态又可以缓解自然环境所承载的压力,如矿区地形地貌状态,其既受环境压力的影响,又可反作用于压力变化;影响(I)是指生态环境问题产生的后果,直接对人类活动产生的影响;响应(R)是指人类根据生态环境破坏对人类生活产生的影响进行的一系列措施,代表人类维持生态文明现状而采取的恢复自然生态的措施,其通过人类活动又再次反作用于以上各个方面,形成一个完整的有机循环体。

1.2 确定生态评估指标体系

金属矿床勘查与开发是一个复杂的系统,包含了经济、矿产和自然等多个因素,本文借鉴国内绿色矿山和绿色勘查等相关评价指标,结合国家相关法律法规如《绿色矿山建设评估指导手册》、《绿色勘查行动指南》、《大气污染物综合排放标准》等,以及利用频度统计法从生态影响评价的文献中(王智明和王羽佳,2019;刘亦晴等,2020;宋栋梁,2020;孙映祥,2020)进行指标的筛选确定,并通过与国内生态评估指标对比、结合等方式最终确定指标体系(表2)。

1.3 构建评价等级标准

查阅大量文献资料,以及向相关专家和行业专业人员咨询,并结合指标选取相关具体规定,可按一定标准将金属矿床勘查与开发生态评估划分为5个等级(表3)。通过该等级,可以初步定量判断矿山建设项目的开发适宜度。

2 建立金属矿床勘查与开发生态影响定量评估模型

本文首先根据 DPSIR 模型构建了一个涵盖经济、社会、环境等多方面、多层次、多指标的评估体系,而评估体系中各指标权重的确定是实现从定性到定量评价的重要过程,直接影响最后评价结果的科学合理性。现有的权重确定方法有指数加权法、层次分析法、主分量分析评价法、灰色关联分析法等(赵学等,2020),本文根据评估需要采用层次分析法(AHP)进行指标权重的确定。此外,由于矿床勘查与开发地区环境的优劣及评定等级的划分,没有具体量化的等级边界,故采用模糊集理论中的隶属度函数概念来表征环境状况,这样能够得到更加科学合理且接近客观实际的评价结果(缪海花和何建军,2017)。

2.1 层次分析法计算权重向量

运用层次分析法确定各评估指标权重(Kasap and Subasi, 2017),步骤如下:

(1) 评估目标分层,得出各个指标相互作用关系;

(2) 采用 1—9 级标度法(骆正清和杨善林,2004)(表4)构造判断矩阵 A (表5),确定指标的相对重要性;

(3) 计算判断矩阵权重向量与最大特征值 λ_{\max} ;

a. 计算判断矩阵 a 每行元素间的平均值,即有

$$w_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

b. 归一化,得到权重向量

表 4 判断矩阵

Table 4 Judgement matrix

A	A_1	A_2	...	A_n
A_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}
A_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}
...
A_m	a_{m1}	a_{m2}	...	a_{mn}

$$W_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{kj}\right)^{\frac{1}{n}}}, i=1,2,\dots,n, \quad (2)$$

c. 计算最大特征值

$$\lambda \sum_{i=1}^n \frac{(CW)}{nW_i} \Big|_{\max}, i=1,2,\dots,n. \quad (3)$$

(4) 判断矩阵的一致性检验

a. 计算一致性指标:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}, \quad (4)$$

b. 计算平均随机一致性指标 CR :

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (5)$$

式中 RI 的值可根据 CI 的值对照平均随机一致性指标 RI 值表(表 6)直接得出. 判断是否满足 $CR \leq 0.1$, 若满足, 这说明权重的选取合理, 进而说明矩阵 A 满足一致性要求, 否则需要调整矩阵.

2.2 构建模糊关系矩阵

以上文层次分析法建立的权重向量 W 为基础, 为尽可能地与实际情况保持一致, 将现有的施行标准与已有数据进行模糊变换处理, 对环境影响进行综合评价, 即环境影响模糊综合评

表 6 平均随机一致性 RI 值

Table 6 Average random consistency (RI)

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.26	1.36	1.41	1.45

价, 分为以下 4 步:

a. 整理出含有评估指标元素的合集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$.

b. 根据评估等级构建评价集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$.

c. 确定隶属函数与隶属度. 该过程基于评价指标量化表进行量化. 对于指标元素的合集 U , 很难确定一致的、能定量描述的隶属函数. 在模糊数学中, 隶属函数和隶属度的确定方法主要有 3 种, 分别为模糊统计法(设计调查问卷)、借助已有客观尺度(如设备质量——设备完好率)和指派法(直接套用某些分布作为隶属函数)(韩利等, 2014; 金菊良等, 2014). 分析不同指标的评价等级比例可得出模糊关系矩阵 R , 以 $R = (r_{ij})_{nm} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ 表示.

d. 确定模糊权重向量. 在建立的评价因素指标体系中, 不同的评价指标对环境影响评价结果的影响程度也不尽相同, 为了能够准确地对影响程度大小进行表示, 定义了 1 个因素权重集 A , 将 A 作为 U 的模糊权重向量, 表达式为 $A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$, 其中, A_i 为 U_i 对 A 的隶属度(朱小飞等, 2016).

2.3 多层次多因素模糊综合评估

根据所得的评价指标因素模糊合集 R 以及模糊权重向量 A , 两者进行数学运算, 可得出评价目标的多层次模糊综合评价结果为:

$$Y = A \times R, \quad (6)$$

表 5 评估指标重要性的判断标度

Table 5 Evaluation indicator importance judgment

标度	含义
1	两个因素相比, 具有同样的重要性
3	两个元素相比, 前一个元素(i)比后一个元素(j)稍微重要
5	两个元素相比, 前一个元素(i)比后一个元素(j)明显重要
7	两个元素相比, 前一个元素(i)比后一个元素(j)强烈重要
9	两个元素相比, 前一个元素(i)比后一个元素(j)极端重要
2, 4, 6, 8	上述两相邻判断中间值
倒数	元素(i)与元素(j)的重要性之比为 a_{ij} , 那么因(j)与因(i)的重要性之比为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

对于结果 Y 中的任意一个元素 y_i 为金属矿床勘查与开发生态影响的综合评价 i 级的隶属度. 根据最大隶属度原则(张科学等, 2021)知, 若生态环境影响评价为 k 级别, 则 $y_k = \max(y_1, y_2, \dots, y_n)$.

$$Y = (A_1, A_2, \dots, A_n) \times \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} = (y_1, y_2, \dots, y_n). \tag{7}$$

3 实例分析

本文选取福建省罗卜岭铜钼矿进行实例分析. 罗卜岭矿段铜钼矿床位于福建省上杭县紫金山矿区的正东侧, 是紫金山矿区斑岩成矿系列的一部分, 为斑岩型中高温热液矿床(谢其锋等, 2019). 矿段有用组分主要包括铜 105.42 万 t, 钼 87 601 t. 工作区属于中、南亚热带过渡地带, 低山丘陵地貌, 温暖潮湿, 雨量充足. 植被主要以杉树林为主, 矿区原绿化覆盖率为 96.6%(胡燕, 2017). 项目建设部分有选矿场、采矿场、辅助工业场、办公区、生活区、尾矿库、废石场等, 并将采用地下自然崩落的方式进行矿山开发(刘欢等, 2020).

目前, 罗卜岭铜钼矿处于开采设计阶段(任凤玉等, 2019), 在 2014 年已完成地勘详查工作, 根据矿山生态环境现状(钟均华, 2018), 可看出前期地勘工作对其造成的生态影响已基本消除, 即目前罗卜岭地区生态恢复良好, 因此, 本次主要对其矿产资源的预开发阶段生态影响进行评估.

3.1 评估体系指标层权重分析

针对罗卜岭斑岩型矿床的开发特点进行预开发阶段的评估指标权重分析. 根据上述层次分析法式(1)~(5)依次计算得到金属矿床勘查与开发评估体系指标权重分配结果(表 7).

3.2 模糊综合评价

根据模糊评价步骤(6)~(7), 可确定生态影响评估指标评判等级(表 8). 从而确定每一个指标的隶属度, 可得到模糊评价矩阵 Y , 由上文可知, 我们已利用层次分析法得到二级评估指标权重集:

$$H = (0.041\ 4, 0.082\ 7, 0.001\ 8, 0.000\ 6, 0.041\ 4, 0.082\ 7, 0.001\ 8, 0.000\ 6, 0.006, 0.000\ 3, 0.003\ 4, 0.001\ 8, 0.000\ 6, 0.000\ 6, 0.000\ 6, 0.000\ 3, 0.064\ 9, 0.021\ 6, 0.064\ 9, 0.098\ 0, 0.017\ 9, 0.033\ 1, 0.059\ 4, 0.036\ 6, 0.009\ 9, 0.024\ 9, 0.074\ 8)^T.$$

模型, 得出矿产勘查与开发生态评估结果 B .

$$B = Y \times H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.35 & 0.5 & 0.15 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times$$

$$(0.041\ 4, 0.082\ 7, 0.001\ 8, 0.000\ 6, 0.006, 0.000\ 3, 0.003\ 4, 0.001\ 8, 0.000\ 6, 0.000\ 6, 0.000\ 6, 0.000\ 3, 0.064\ 9, 0.021\ 6, 0.064\ 9, 0.098\ 0, 0.017\ 9, 0.033\ 1, 0.059\ 4, 0.036\ 6, 0.009\ 9, 0.024\ 9, 0.074\ 8) = (0.173, 0.407, 0.320, 0.067, 0.033).$$

3.3 评估结果

由上述计算可知, 罗卜岭铜钼矿矿山建设项目对生态影响的模糊评价结果为:

$$B = (0.173, 0.407, 0.320, 0.067, 0.033).$$

通过罗卜岭斑岩型铜钼矿勘查与开发的生态评价因素, 并结合最大隶属度关系原则知: 罗卜岭铜钼矿开发生态影响最大隶属度指数 $\chi = 0.407$, 其隶属度指数评价如图 2 所示.

结合评价等级(表 2)以及图 2 可知, 其评价结果中建设开发适宜度评价 II 级权重最多, 为 0.407, 占总评价值的 40.7%; 其次为 III 级, 权重占比为 0.320, 占总评价值的 32.0%; I 级所占权重为 0.173, 占总评价值的 17.3%; IV 级权重为 0.067, 占总权重的 6.7%; V 级权重为 0.033, 占总评价值的 3.3%.

(1)一级指标要素权重结果分析. 如表 7 所示, 五大系统中的 6 个一级指标按照权重大小降序排列

表 7 评估指标权重表

Table 7 Weights for evaluation indicators

目标层	I级指标层	II级指标层	权重	评价指标	权重	总权重	一致性检验
金属矿床勘查与开发评估体系	驱动力系统(D)	矿山经济效益	0.372 2	矿山经济效益	0.333 3	0.041 4	RI=0,完全一致
				国家金属矿产资源需求	0.666 7	0.082 7	
	压力系统(P)	生态破坏	0.032 1	植被损坏面积(比值)	0.165 8	0.001 8	CR=CI/ RI=0.094 7
				地质灾害	0.056 3	0.000 6	
				土地占用面积(km ²)	0.057 1	0.000 6	
				环保搬迁规模	0.028 4	0.000 3	
				环保搬迁潜在生态、 人文及敏感因素	0.316 7	0.003 4	
				水均衡破坏程度	0.166 1	0.001 8	
				水污染	0.060 5	0.000 6	
				大气污染	0.060 5	0.000 6	
				固体废弃物污染	0.060 5	0.000 6	
				噪声超标程度	0.027 9	0.000 3	
	状态系统(S)	自然禀赋状态	0.244 9	地形地貌	0.400 0	0.098 0	CR=CI/ RI=0.017 0
				地表植被类型	0.073 1	0.017 9	
				矿区植被覆盖率	0.135 0	0.033 1	
				区域野生动物类型	0.242 4	0.059 4	
				生物多样性	0.149 4	0.036 6	
	影响系统(I)	社会影响	0.099 7	矿山的规模	0.428 6	0.064 9	CR=CI/ RI=0.001 8
				矿床的成矿类型	0.142 9	0.021 6	
				矿山开采方式	0.428 6	0.064 9	
响应系统(R)	政策响应	0.099 7	政府干预程度	0.250 0	0.024 9	RI=0,完全一致	
			矿山企业生态政策 执行情况	0.750 0	0.074 8		

注:一阶矩阵和二阶矩阵的RI的值为0,本身具有完全一致性,故不需要再次判断一致性。

得:矿山经济效益>矿山自然禀赋状态>矿山状态>社会影响=政策响应>生态破坏。矿山经济效益的权重值为0.372 2,是最重要指标,这说明罗卜岭铜矿区矿产资源开发能够有效推动当地的经济建设。生态破坏权重值为0.032 1,所占权重最小,表明矿区开发对生态的影响较小,当地较为重视矿区生态建设。

(2)二级指标要素权重结果分析。矿产经济效益要素层中指标权重排序为:国家金属矿产战略需求>社会经济发展需要,表明金属矿产的开发要与国家需求紧密结合,建立资源节约型社会。生态破坏要素层权重大小基本一致,均小于0.05,表明罗卜岭生态破坏类指标对矿区的影响较小。矿山状态要素层权重排序为:矿山规模=矿山开采方式>矿山资源种类。该矿区为中等规模铜钼矿山,且将设计采用自然崩塌法地下开采方式,能够在有效促进经济发展的同时,降低对环境的干扰程度。自然禀赋状态要素层中指标权重排序为:

地形地貌>矿区指标覆盖率>区域野生动物类型>地表植被类型,表明矿区所处的东南丘陵低山地貌能够有效地恢复矿区生态,降低对环境的干扰。政策响应要素层中指标权重排序为:矿山企业生态环保执行情况>政府干预程度。以上表明矿山开发集团(紫金矿业集团)非常重视矿区生态环保,能够自觉遵守矿山环境保护相关法律法规。

(3)模糊综合评价结果分析。根据最终评价结果(表8与图2)知该项目建设开发适宜度评价为II级,即对当地经济发展起到明显的推动作用,但对生态环境会产生轻微干扰(表3)。

在评价结果中基本无影响和轻度影响主要体现在矿床经济效益、国家战略资源需求、矿山开采方式、企业绿色矿山政策执行力度4个指标,表明对罗卜岭铜钼矿进行开发可以发挥其在国家资源需求和对当地经济发展的推动作用。目前国内铜资源缺乏,自给率低,在2020年1—2月铜矿对外依存度达79.1%(曾涛,2020),因此对该铜钼矿床的开发能

表 8 生态影响评估指标评判等级
Table 8 Evaluation grade of ecological impact assessment index

目标层	I级指标层	II级指标层	开发适宜度评判等级					评判等级确定方式
			I	II	III	IV	V	
金属矿床勘查与开发评估体系	矿山经济效益	矿山经济效益	0	0	1	0	0	定量计算
		国家金属矿产资源需求	0.2	0.8	0	0	0	调查问卷
	生态破坏	植被损坏面积	0	1	0	0	0	定量计算
		地质灾害	0.2	0.6	0.2	0	0	调查问卷
		土地占用面积(km ²)	0	1	0	0	0	定量计算
		环保搬迁规模	1	0	0	0	0	根据已有客观尺度
		环保搬迁潜在生态、人文及敏感因素	0.4	0.6	0	0	0	调查问卷
		水均衡破坏程度	0	0.2	0.4	0.4	0	调查问卷
		水污染	0	0	1	0	0	根据已有客观尺度
		大气污染	1	0	0	0	0	根据已有客观尺度
		固体废弃物污染	0	0	1	0	0	根据已有客观尺度
		噪声超标程度	0	1	0	0	0	根据已有客观尺度
	自然禀赋状态	地形地貌	0	0	1	0	0	根据已有客观尺度
		地表植被类型	0	1	0	0	0	根据已有客观尺度
		矿区植被覆盖率	0	0	0	0	1	文献综述
		区域野生动物类型	0	0	1	0	0	文献综述
	矿山状态	生物多样性	0	1	0	0	0	文献综述
		矿山的规模	0	0	0	1	0	根据已有客观尺度
		矿床的成矿类型	1	0	0	0	0	根据已有客观尺度
	社会影响	矿山开采方式	0	1	0	0	0	根据已有客观尺度
社区群众满意度		0.35	0.5	0.15	0	0	调查问卷	
政策响应	政府干预程度	0	0.3	0.7	0	0	调查问卷	
	矿山企业生态政策执行情况	0.8	0.2	0	0	0	调查问卷	

注:①定量计算:利用已有方程或前人研究,如矿山经济效益:经济发展贡献率=(建设项目产生的经济价值)/地区生产总值×100%;②调查问卷:针对某一指标进行调查分析,如社区满意度,共有上杭县48人填写调查网络问卷,35%的人认为非常满意,50%的群众认为满意,15%对该矿山的开发建设持有中立态度,根据结果进行开发适宜度评估等级的确定;③根据已有客观尺度:根据已有的量化的指标进行分析研究,如水污染采用水污染单项因子超标浓度进行量化、大气污染采用大气污染单项因子超标程度;④文献综述:根据前人的研究结果或已有数据,直接进行赋值。

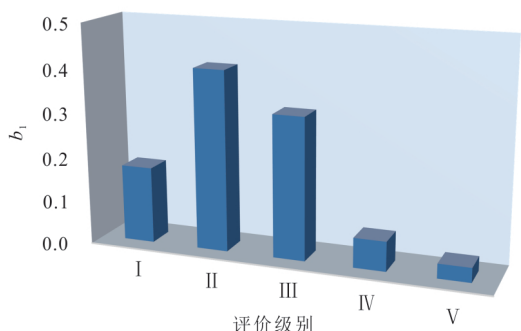


图 2 罗卜岭矿床开发生态影响隶属度指数评价
Fig.2 Evaluation chart of ecological impact for the Luobuling deposit development

够缓解国内对国外铜资源的依存度;不计综合回收利用的伴生金、伴生银和硫,矿床总潜在经济价值为 675.32 亿元,服务年限为 40 年(赖晓丹和祁进平,2014),能够长期有效推动上杭当地的经济的发展;矿山的开采方式采取地下机械化开采方式能够很好地保护矿区茂密的松杉林,最大程度降低对矿区生态环境的干扰;企业绿色矿山政策执行力度主要体现在紫金矿业集团高度重视生态文明和绿色矿山建设,目前拥有国家级绿色矿山 9 家、全国工业旅游示范点 2 家、国家矿山公园 1 座等(胡燕,2017),紫金矿业对生态的高度重视能够为罗卜岭的生态保护奠定有力的基础。

中度影响因素主要为矿山地表植被类型和土壤污染. 矿区种植大量的松杉林, 是当地野生动物的重要栖息地(庄小静, 2017), 以及当地生态调节的重要组成部分. 对该矿床进行开发时, 要加大对松杉林的保护力度, 降低对其的干扰影响; 矿山开采产生的废石、选矿产生的尾矿以及冶炼废渣(Pb、Zn、As等有害元素)经历风化淋滤作用, 会转移到土壤中, 造成土壤质量的下降等风险(高知睿等, 2017). 在开发过程中可种植玉米草、黑麦草以及苏丹草等植物对铜污染土壤区进行修复, 从而降低对土壤的污染(李清光等, 2019).

重度和强烈影响因素主要为水均衡破坏程度. 该矿山使用旧县河作为选矿和采矿用水水源, 该河流属于Ⅲ类水, 是当地居民生活用水的主要供水水源之一(张玉珍等, 2009), 采用其作为矿山供水水源, 会对当地的渔产养殖、生活用水带来较大的影响.

4 讨论

本研究运用模糊层次分析法进行权重计算, 结合构建的指标体系与评价等级, 从而实现勘查与开发带来的生态影响进行定量评估.

在指标体系的构建过程中, 本文采用DPSIR模型来确定各指标之间的层次关系, 并进行指标的选取和体系的构建. 该模型涵盖了经济、社会、政策和环境等要素, 对众多指标因子系统、层次化的选取情况决定了指标体系能否有效地表达矿山勘查开发带来的生态影响.

针对层次分析法获得各指标在指标体系中的权重, 重点在于需要由专家对任意两指标进行比较, 得到一致性检验结果小于0.1的比较矩阵. 该部分需要根据多个专家的意见并结合研究区域的情况进行比较矩阵的构建, 从而提高层次分析法的使用效果.

模糊综合评价分析方法的基础理论是模糊数学, 其根据建立的隶属函数, 可以全面地汇总层次分析评价指标权重所代表的含义, 综合反映被评对象的优劣程度. 该过程涉及到了如何基于数据驱动确定隶属度. 隶属度的确定方法有多种, 本文采用调查问卷、定量计算和根据已有客观尺度的方法进行确定, 但由于指标较多, 且含有定性指标, 故缺少了详细的隶属函数的建立过程, 无法做到具体的定量化研究, 在之后的工作中需要对该方面进行更进一步的探讨.

评估体系数据的来源及处理同样是极其重要

的一部分. 本次虽对罗卜岭铜钼矿进行了勘查与开发生态影响分析, 但对特定金属矿床的针对性分析仍有待提高. 目前, 国内勘查地球化学数据库建设已经取得了有效进展(左仁广等, 2021), 故在之后的研究中要结合国内已经建立的勘查地球化学大数据, 加强对特定金属矿床的分析, 从而进一步提高评估体系的科学性和实用性.

5 结论

(1) 借助DPSIR模型, 确定了6个一级指标和23个二级指标, 对罗卜岭铜矿开发生态影响进行评价. 其中6个一级指标为矿山经济效益、生态破坏、矿山状态、矿山自然禀赋状态、社会影响、政策响应.

(2) 提出了矿床勘查与开发生态环境影响价值的多层次模糊综合评价模型. 该模型可以衡量矿床勘查与开发对生态环境带来的多方面影响, 能够客观实际定量展示产生的生态环境状况, 使评价结果更加准科学.

(3) 初步建立了一个矿床勘查与开发生态环境影响评估体系, 定量评估矿山开发所带来的生态环境影响, 通过罗卜岭实例分析表明, 该评估体系评价结果较为合理, 能够接近矿床开发生态影响的实际情况, 为解决生态文明建设和资源开发之间的矛盾提供了较好的借鉴与参考.

致谢: 感谢紫金矿业集团的各位领导和技术人员对本文的大力支持, 数据收集与整理得到了福州大学紫金矿业学院王翠芝教授、肖爱芳副教授以及刘文元高级工程师的帮助, 谨此致以诚挚的谢意, 同时衷心感谢各位专家及编辑在审稿过程中对本文提出的修改意见!

References

- Azapagic, A., 2014. Developing a Framework for Sustainable Development Indicators for the Mining and Minerals Industry. *Journal of Cleaner Production*, 12(6): 639–662.
- Bao, R., Qiu, S., Tang, M.F., et al., 2020. Evaluation of Ecological Carrying Capacity in Xilingol League Based on DPSIR Model. *Ecological Economy*, 36(8): 139–145 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H.Y., 2020. Meditations on the Future Development of Ore Deposit Science in China. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 99–105 (in Chinese with English abstract).
- Fu, F., Tao, S.X., Li, X.D., 2020. Research on Environment-Friendly High-Temperature Drilling Fluid for Green Exploration. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drill-*

- ing and Tunneling), 47(4): 129—133 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Z.R., Zhao, Y.Y., Cao, C., et al., 2017. Ore Mineralogy of the Heap Leaching Field of the Dexing Copper Deposit and Geochemistry of Cu and Associated Elements. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(6): 785—799 (in Chinese with English abstract).
- Han, L., Mei, Q., Lu, Y. M., et al., 2004. Analysis and Study on AHP-Fuzzy Comprehensive Evaluation. *China Safety Science Journal*, 14(7):89—92+3 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Y., 2017. Factor Analysis of the Attraction of Industrial Tourism of National Mine Park in Zijinshan (Dissertation). Xiamen University, Xiamen (in Chinese with English abstract).
- Jin, J.L., Wei, Y.M., Ding, J., 2004. Fuzzy Comprehensive Evaluation Model Based on Improved Analytic Hierarchy Process. *Journal of Hydraulic Engineering*, 35(3): 65—70 (in Chinese with English abstract).
- Kasap, Y., Subaşı, E., 2017. Risk Assessment of Occupational Groups Working in Open Pit Mining: Analytic Hierarchy Process. *Journal of Sustainable Mining*, 16(2): 38—46.
- Lai, X.D., Qi, J.P., 2014. The Regularity of Structural Controls on Ore Mineralization in the Luoboling Porphyry Cu-Mo Deposit, Shanghang, Fujian. *Acta Geologica Sinica*, 88(10): 1904—1916 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q.G., Wu, P., Gu, S.Y., et al., 2019. Pollution Characteristics of Toxic and Harmful Elements and Its Environmental Impact in Water Co-Produced from Coalbed Methane Wells in the CBM Development Block in Western Guizhou. *Earth Science*, 44(9): 2862—2873 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H., Ren, F.Y., Fu, Y., et al., 2020. Study on the Efficient Mining Scheme of Block Caving Mining of Luoboling Copper-Molybdenum Mine. *Metal Mine*, (1): 44—48 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.Q., Liang, Y.R., Liu, N.N., et al., 2020. Study on Evaluation Index System of Green Mine Construction Based on High Quality Development Perspective. *Gold Science and Technology*, 28(2): 176—187 (in Chinese with English abstract).
- Luo, C.H., Li, F.J., Ma, D.Q., et al., 2019. Work Situation and Effect Analysis of Green Prospecting in Qinghai Province—Duocai Integrated Exploration Area as Example. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 34(3): 471—477 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Z.Q., Yang, S.L., 2004. Comparative Study on Several Scales in AHP. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 24(9): 51—60 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C., Zhang, F. L., Lei, X. L., Zhao, Y. D., 2019. Experience and Enlightenment of Environmental Management in Green Exploration in Foreign Countries. *Metal Mine*, 35(10):1—4 (in Chinese with English abstract).
- Miao, H. H., He, J. J., 2017. Benefit Evaluation of Tailings Reservoir Reclamation Based on the Fuzzy Comprehensive Evaluation. *China Metal Bulletin*, (10):70—71 (in Chinese).
- Ren, F.Y., Liu, H., He, R.X., et al., 2019. The Spatial Distribution of Rock Mass Basic Quality of the Luoboling Copper-Molybdenum Mine Based on SURPAC Software. *China Mining Magazine*, 28(9): 80—84 (in Chinese with English abstract).
- Song, D. L., 2020. Evaluation of Mineral Resources Exploration and Development of Protection Zoning, Qinghai Province (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Sun, Y.X., 2020. A Summary and Reflection on the Research Status of Green Mine Construction in China. *Natural Resource Economics of China*, 33(9): 35—40, 85 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.M., Wang, Y.J., 2019. Ecological Geological Environment Quality Evaluation in the Duocai Exploration Area. *Mineral Exploration*, 10(7): 1713—1721 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y, K., 2019. Understanding and Thinking about Green Exploration. *China Metal Bulletin*, (1): 172—174 (in Chinese).
- Xie, Q.F., Cai, Y.F., Dong, Y.P., et al., 2019. Zircon Geochronology and Hf Isotope Compositions of Biotite Granite in Southeast Ore Section of Zijinshan Ore Field, Fujian Province. *Earth Science*, 44(4): 1311—1327 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, T., 2020. Research on Safety Early Warning of Copper Resources Supply in China (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y. S., 2020. On the Method of Thinking in Studying Mineral Deposits. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 1—12 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K.X., Wang, X.L., He, M.C., et al., 2021. Research on Multi-Level Fuzzy Comprehensive Evaluation of the Applicability of Intelligent Unmanned Mining Face. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 3(1): 47—56 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.Z., Liu, Y.J., Duan, Y., et al., 2009. Environmental Risk Analysis and the Load of Livestock Manure in Tingjiang River Watershed. *Areal Research*

- and Development*, 28(3): 122—125, 134 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X., Wu, Z. C., Tian, Z. D., 2020. Mining Technology and Safety Evaluation of Unmanned Intelligent Fully Mechanized Mining Face. *Energy and Energy Conservation*, (7):156—157 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, J.H., 2018. Initial Analysis on the Soil Conservation & Vegetation Reconstruction in the Zijinshan Mining Areas. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 30(4): 54—57 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X.F., Wang, Y.J., Li, D.J., 2016. The Effectiveness Test of the Maximum Membership Principle in Fuzzy Comprehensive Evaluation. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 39(5): 135—137, 143 (in Chinese with English abstract).
- Zhuang, X.J., 2017. The Comprehensive Benefit Evaluation on Redeveloping Mining Derelict Land into Green Space—A Case Study of Fujian Mt. Zijin National Mine Park (Dissertation). Fujian Normal University, Fuzhou (in Chinese with English abstract).
- Zuo, R.G., Wang, J., Xiong, Y.H., et al., 2021. Progresses of Researches on Geochemical Exploration Data Processing during 2011—2020. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 40(1): 81—93, 4 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 包蕊, 邱莎, 唐明方, 等, 2020. 基于 DPSIR 模型的锡林郭勒盟生态承载力评价. *生态经济*, 36(8): 139—145.
- 陈华勇, 2020. 对我国矿床学未来发展方向的思考. *地学前缘*, 27(2): 99—105.
- 付帆, 陶士先, 李晓东, 2020. 绿色勘查高温环保冲洗液研究. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 47(4): 129—133.
- 高知睿, 赵元艺, 曹冲, 等, 2017. 德兴铜矿堆浸场矿石矿物学、Cu 伴生元素地球化学特征及意义. *岩石矿物学杂志*, 36(6): 785—799.
- 韩利, 梅强, 陆玉梅, 等, 2004. AHP-模糊综合评价方法的分析与研究. *中国安全科学学报*, 14(7):89—92+3.
- 胡燕, 2017. 紫金山国家矿山公园工业旅游吸引力分析(硕士学位论文). 厦门: 厦门大学.
- 金菊良, 魏一鸣, 丁晶, 2004. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型. *水利学报*, 35(3): 65—70.
- 赖晓丹, 祁进平, 2014. 福建省上杭县罗卜岭斑岩铜钼矿床构造控矿规律研究. *地质学报*, 88(10): 1904—1916.
- 李清光, 吴攀, 顾尚义, 等, 2019. 黔西某煤层气开发区块产出水有毒有害元素污染特征及其环境效应. *地球科学*, 44(9): 2862—2873.
- 刘欢, 任凤玉, 付毅, 等, 2020. 罗卜岭铜钼矿自然崩落法安全开采方案研究. *金属矿山*, (1): 44—48.
- 刘亦晴, 梁雁茹, 刘娜娜, 等, 2020. 基于高质量发展视角的绿色矿山建设评价指标体系研究. *黄金科学技术*, 28(2): 176—187.
- 罗长海, 李福军, 马德庆, 等, 2019. 青海省绿色勘查工作开展情况及成效分析: 以多彩整装勘查区为例. *地质找矿论丛*, 34(3): 471—477.
- 骆正清, 杨善林, 2004. 层次分析法中几种标度的比较. *系统工程理论与实践*, 24(9): 51—60.
- 马骋, 张福良, 雷晓力, 等, 2019. 国外绿色勘查环境管理经验与启示. *现代矿业*, 35(10):1—4.
- 缪海花, 何建军, 2017. 基于模糊综合评判的尾矿库土地复垦效益评价. *中国金属通报*, (10): 70—71.
- 任凤玉, 刘欢, 何荣兴, 等, 2019. 基于 SURPAC 软件构建罗卜岭铜钼矿岩体基本质量的空间分布. *中国矿业*, 28(9): 80—84.
- 宋栋梁, 2020. 青海省矿产资源勘查开发与保护区划评价(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 孙映祥, 2020. 我国绿色矿山建设研究现状综述与思考. *中国国土资源经济*, 33(9): 35—40, 85.
- 王智明, 王羽佳, 2019. 多彩整装勘查区的生态地质环境质量评价. *矿产勘查*, 10(7):1713—1721.
- 吴永阔, 2019. 关于绿色勘查的认识与思考. *中国金属通报*, (1):172—174.
- 谢其锋, 蔡元峰, 董云鹏, 等, 2019. 福建紫金山矿田黑云母花岗岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成. *地球科学*, 44(4): 1311—1327.
- 曾涛, 2020. 中国铜资源供应安全预警研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 翟裕生, 2020. 矿床学思维方法探讨. *地学前缘*, 27(2):1—12.
- 张科学, 王晓玲, 何满潮, 等, 2021. 智能化无人开采工作面适用性多层次模糊综合评价研究. *采矿与岩层控制工程学报*, 3(1): 47—56.
- 张玉珍, 刘怡靖, 段勇, 等, 2009. 汀江流域畜禽粪便污染负荷及其环境影响. *地域研究与开发*, 28(3): 122—125, 134.
- 赵学, 武智超, 田子栋, 2020. 无人智能化综采面开采技术及其安全评价. *能源与节能*, (7):156—157.
- 钟均华, 2018. 浅谈紫金山矿区水土保持与植被重建. *亚热带水土保持*, 30(4):54—57.
- 朱小飞, 王永君, 李大军, 2016. 模糊评价中最大隶属度原则有效性检验. *测绘与空间地理信息*, 39(5): 135—137, 143.
- 庄小静, 2017. 矿业废弃地再利用为绿色空间综合效益评价: 以福建紫金山国家矿山公园为例(硕士学位论文). 福州: 福建师范大学.
- 左仁广, 王健, 熊义辉, 等, 2021. 2011—2020 年勘查地球化学数据处理研究进展. *矿物岩石地球化学通报*, 40(1): 81—93, 4.