

## 基于 AHP-熵权法的金属矿山开发利用水平综合评价研究

薛盈杉<sup>1</sup>, 张军军<sup>2,3</sup>, 曾小波<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学信息工程学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)研究生院, 北京 100083; 3. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041)

**摘要:** 为全面客观评价金属矿山的开发利用水平, 采用德尔菲法和 Pearson 相关分析法, 从资源生产水平、资源利用水平、科技水平、经济效益、环境效益五个维度构建综合评价的指标体系; 运用主客观结合分析法, 并通过层次分析和熵权法计算, 分别得到各指标的主观和客观权重, 采用乘数合成归一法将二者进行耦合得出综合权重; 基于该综合权重, 选取 14 家金矿企业进行实证评价; 运用 K 均值聚类法和 Pearson 相关分析法分析评价结果, 将 14 家企业分为领先型、发展型、成长型三类, 三种类型的比例分别占 7%、43%、50%。结果表明, 科技水平对于矿产资源开发利用水平贡献度最为显著。

**关键词:** AHP-熵权法; 金属矿山; 开发水平; 综合评价

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2021.04.010

中图分类号: TD982 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2021) 04-0066-08

铁、铜、金等金属矿产是我国重要的战略性矿产资源。从 21 世纪初期开始, 消费量长期居全球第一, 对外依存度都超过 60%<sup>[1]</sup>。我国金属资源赋存条件本身欠佳, 贫矿多富矿少, 中小型矿床多, 大型-超大型矿床少, 低品位难选冶矿石比例大, 共伴生矿床多, 单一矿床少<sup>[2]</sup>。长期较高的开发强度, 使得金属资源的开发利用条件更加恶化, 开采深度不断加大, 矿体形态、产状和有价值组分嵌布特征愈加复杂, 采出品位趋于下降, 资源开采和选别难度持续加大。复杂难采低品位资源的开发势必会带来大量残矿、尾矿、低品位矿、难开发矿的回收利用问题<sup>[3]</sup>。在保障国家资源安全, 逐步形成以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局背景下, 促进资源高效绿色清洁开发利用, 提高国内矿产资源开发利用水平日益紧迫。

为此, 2015 年中央发布的《生态文明体制改革总体方案》明确要求, 建立矿产资源开发利用水

平调查评估制度<sup>[4]</sup>。几年来, 由自然资源主管部门牵头, 发改、财政、能源、工信部门协作, 对矿产资源开发利用水平调查评估工作进行了有益的试点和探索。严伟平等<sup>[5]</sup>建立了评估指标体系, 并利用专家打分对选取矿山资源开发利用水平进行了评价; 武秋杰等<sup>[6]</sup>利用层次分析法计算指标权重, 对不同矿山节约集约利用水平进行对比评价; 赵国彦等<sup>[7]</sup>利用博弈组合赋权对三山岛金矿的安全绿色生产情况进行了实证研究; 杨树旺等<sup>[8]</sup>运用模糊综合评价方法对青海南部矿区可持续发展能力进行了评价。但是, 目前对矿产资源开发利用水平的综合评价, 国内尚没有权威统一的评价指标和评价方法, 重要原因之一就是矿山开发利用条件千差万别, 专业性差异性都很大, 单独依靠理论方法和经验评判都难以保证评价结果的客观性、公正性。

基于此, 为了从资源、社会、经济、环境、科技方面全面评价金属矿山资源开发利用状况, 本文

收稿日期: 2021-05-23

基金项目: 中国地质调查项目 (DD20211235)

作者简介: 薛盈杉 (2000-), 女, 主要研究方向为土地矿产领域地理信息科学。

通讯作者: 张军军 (1974-), 男, 博士研究生在读, 主要从事地质工程技术研究和管理。

采取了专家经验与理论推导相结合的方法、主客观观相统一的思路,构建了评价指标体系和各自权重。

本文建立的评价指标体系是基于金属矿山生产与管理实际而得到的。为了对这一指标体系进行实证研究和验证,需要有可靠全面的数据支撑。根据数据的可得性,本文选取了数据较为齐全、时效性强、数据质量较好的14座金矿矿山进行实证评价和分类,以期对提高我国矿产资源保护和利用水平,促进矿业高质量发展提供参考。

原始指标的获得是根据《中国黄金年鉴》及其后台统计数据,从中初选了12项指标数据,经过一系列加工处理,建立最终评价指标体系,并运用层次分析法与熵权法,对指标进行定量评价。

## 1 综合评价指标体系的确定

### 1.1 建立初始评价指标体系

设计矿产资源开发利用水平评价指标体系应以矿产资源可持续利用和生态环境与社会经济可持续发展为目标,体现“以最少的资源消耗、最低的环境代价,取得最大的经济效益”<sup>[5]</sup>,以矿产资源利用最大化与环境经济消耗最小化为基础,综合考虑科学性、合理性、有效性、系统性,从主要影响因素构建评价指标体系,才能够更客观、准确地反映矿产资源开发利用的现状、制约程度和未来发展趋势<sup>[6]</sup>。

综合金属矿山生产、经营、环保、技术创新等方面的指标数据,本研究选择资源生产效益、资源利用效益、环境效益、技术效益、经济效益五个方面展开研究,从这五个不同维度分别细化

并构建评价指标体系,进而衍生出矿产资源生产水平、利用水平、生态环境保护水平、科技水平、经济社会效益五个一级指标。通过对一级指标的细化研究,选取达产率、开采回采率、选矿回收率、共伴生资源综合利用率、尾矿利用率、矿山复垦率、人均年产矿石、吨矿电耗、吨矿水耗、劳动生产率、吨矿成本、人均矿业产值共12个二级指标,建立的初始评价指标体系(表1)。

表1 初始评价指标体系

| Table 1 Initial evaluation index system |                           |
|-----------------------------------------|---------------------------|
| 一级指标                                    | 二级指标                      |
| 矿产资源生产水平                                | 达产率(%)                    |
|                                         | 开采回采率(%)                  |
| 矿产资源利用水平                                | 选矿回收率(%)                  |
|                                         | 共伴生资源综合利用率(%)             |
| 生态环境保护水平                                | 尾矿利用率(%)                  |
|                                         | 矿山复垦率(%)                  |
|                                         | 人均年产矿石(t/人)               |
| 科技水平                                    | 吨矿电耗(kwh/t原矿)             |
|                                         | 吨矿水耗(m <sup>3</sup> /t原矿) |
|                                         | 劳动生产率(kg/人)               |
|                                         | 吨矿成本(元/t)                 |
| 经济社会效益                                  | 人均矿业产值(万元/人)              |

### 1.2 冗余指标剔除

综合评价矿山开发利用水平是一个需要从不同角度、多个指标的多目标决策的问题。每个指标对最终的评分结果都应有一定程度的影响,否则视其为无效指标或冗余指标。本研究建立的初始评价指标体系并未考虑各指标间的相似度,可能造成指标含义的重复导致信息的冗余,降低了最终决策的有效性与系统性。

为避免指标间的重复以及无效指标信息冗余,本研究在分析指标重要性之前,先对初始选取的12个二级指标进行相关性分析并筛选(表2)。

表2 初始指标 Pearson 相关分析结果  
Table 2 Pearson correlation analysis results of initial indexes

|                 | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | A <sub>3</sub> | A <sub>4</sub> | A <sub>5</sub> | A <sub>6</sub> | A <sub>7</sub> | A <sub>8</sub> | A <sub>9</sub> | A <sub>10</sub> | A <sub>11</sub> | A <sub>12</sub> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| A <sub>1</sub>  | 1              |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                 |
| A <sub>2</sub>  | 0.498          | 1              |                |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                 |
| A <sub>3</sub>  | -0.419         | -0.152         | 1              |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                 |
| A <sub>4</sub>  | 0.218          | -0.264         | -0.459         | 1              |                |                |                |                |                |                 |                 |                 |
| A <sub>5</sub>  | .743**         | .631*          | -0.414         | 0.018          | 1              |                |                |                |                |                 |                 |                 |
| A <sub>6</sub>  | -0.207         | 0.024          | 0.081          | -.572*         | 0.131          | 1              |                |                |                |                 |                 |                 |
| A <sub>7</sub>  | .623*          | 0.528          | -.862**        | 0.265          | .678**         | 0.024          | 1              |                |                |                 |                 |                 |
| A <sub>8</sub>  | -0.324         | 0.031          | 0.076          | -0.120         | -0.332         | -0.271         | -0.202         | 1              |                |                 |                 |                 |
| A <sub>9</sub>  | -0.322         | -0.170         | 0.370          | -0.246         | -0.349         | 0.260          | -0.329         | -0.266         | 1              |                 |                 |                 |
| A <sub>10</sub> | .704**         | 0.358          | -0.292         | 0.488          | 0.504          | -0.241         | 0.444          | -0.273         | 0.001          | 1               |                 |                 |
| A <sub>11</sub> | -0.337         | -0.139         | 0.217          | 0.275          | -0.408         | -.573*         | -0.334         | 0.408          | 0.122          | -0.021          | 1               |                 |
| A <sub>12</sub> | .734**         | 0.416          | -0.283         | 0.426          | .544*          | -0.221         | 0.478          | -0.267         | -0.007         | .988**          | -0.039          | 1               |

\*\* . 在 0.01 级别 (双尾), 相关性显著; \* . 在 0.05 级别 (双尾), 相关性显著。

$A_1 \sim A_{12}$  代表初始指标体系中的 12 个二级指标。通过对相关系数大于 0.9 的指标进行处理 (将相关系数在 0.9 以上的指标视为重复指标), 最终筛选得到 11 个评价指标, 分别为达产率、开采回采率、选矿回收率、共伴生资源综合利用率、尾矿利用率、矿山复垦率、人均年产矿石、吨矿电耗、吨矿水耗、吨矿成本和人均矿业产值。

### 1.3 建立最终评价指标体系

根据筛选得出的 11 个评价指标, 参考《资源综合利用企业评价规范》国家标准<sup>[9]</sup>, 将 11 个评价指标按照矿产资源生产能力、矿产资源利用率、环境保护能力、工艺与设备水平与经济社会效益五个维度进行分类。为提高评价指标体系的科学性和合理性, 本研究选择德尔菲法<sup>[10]</sup>, 进一步对指标体系进行核校。

为了保证专家打分的代表性、客观性、合理性, 本研究从全国金属行业选取了长期从事生产研发和管理服务的 55 个专家, 这些专家涵盖了行业协会、科研院所、矿山企业、管理机关等领域。除管理机关外, 都具有高级以上专业技术职称。综合各专家意见和 Pearson 相关分析, 确定了评价指标体系 (表 3)。

表 3 综合评价指标体系

Table 3 Multipurpose evaluation index system

| 系统层 (一级指标) | 指标层 (二级指标)                  | 属性 |
|------------|-----------------------------|----|
| 生产水平       | 达产率 (%)                     | 正向 |
|            | 开采回采率 (%)                   | 正向 |
|            | 选矿回收率 (%)                   | 正向 |
| 利用水平       | 共伴生资源综合利用率 (%)              | 正向 |
|            | 人均年产矿石 (t/人)                | 正向 |
| 科技水平       | 吨矿电耗 (kwh/t 原矿)             | 负向 |
|            | 吨矿水耗 (m <sup>3</sup> /t 原矿) | 负向 |
| 经济效益       | 吨矿成本 (元/t)                  | 负向 |
|            | 人均矿业产值 (万元/人)               | 正向 |
| 环境效益       | 尾矿利用率 (%)                   | 正向 |
|            | 矿山复垦率 (%)                   | 正向 |

## 2 综合评价指标权重的确定

### 2.1 采取层次分析法确定指标主观权重

层次分析法是一种经典的主观权重计算方法, 可依据专家经验权衡各指标的相对重要程度。本研究对表 3 确定的评价指标进行标准化处理, 然后采用层次分析法计算各指标主观权重。

运用专家打分法获得各层级指标重要性的评价信息, 综合专家意见, 根据 Satty 的 1-9 标度法 (表 4), 建立各层级间的判断矩阵。为保证判断矩阵的一致性, 本研究选择仅通过判断矩阵的首行元素值, 根据互反矩阵的特性, 确定出其余行元素的比较结果<sup>[11]</sup>。该计算方法需要首先假设一个转换矩阵 C, 接着利用首行元素值计算其余任一元素  $a_{ij}$  的公式如下:

$$c_{1i} = \begin{cases} a_{1i}, & a_{1i} \geq 1 \\ 2 - \frac{1}{a_{1i}}, & a_{1i} < 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$c_{1i} = \begin{cases} a_{1i}, & a_{1i} \geq 1 \\ 2 - \frac{1}{a_{1i}}, & a_{1i} < 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$c_{ij} = c_{1i} - c_{1j} \quad (3)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{c_{ij}+1}, & c_{ij} \geq 0 \\ |c_{ij}| + 1, & c_{ij} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $a_{ij}$  表示判断矩阵 A 中第 i 行第 j 列的值,  $c_{ij}$  表示转换矩阵 C 中第 i 行第 j 列的值。

表 4 Satty 1-9 标度法  
Table 4 Satty 1-9 scale method

| 标度值 | 重要性比较                       |
|-----|-----------------------------|
| 1   | $B_i$ 元素与 $B_j$ 元素具有同等重要性   |
| 3   | $B_i$ 元素比 $B_j$ 元素具有稍强的的重要性 |
| 5   | $B_i$ 元素比 $B_j$ 元素具有较强的的重要性 |
| 7   | $B_i$ 元素比 $B_j$ 元素具有明显重要性   |
| 9   | $B_i$ 元素比 $B_j$ 元素具有绝对重要性   |

以上标度值之间对应的重要性程度: 2,4,6,8

倒数—— $B_i$  元素与  $B_j$  元素相比重要性为  $a_{ij}$ , 则  $B_i$  元素与  $B_j$  元素相比重要性为  $a_{ji}=1/a_{ij}$ , 其中  $a_{ii}=1$

以系统层的各一级指标为例, 建立系统层的判断矩阵  $A_1$  (表 5)。其中,  $B_1 \sim B_5$  表示系统层中的 5 个一级指标。

表 5 系统层判断矩阵

Table 5 System layer judgment matrix

|       | $B_1$ | $B_2$ | $B_3$ | $B_4$ | $B_5$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $B_1$ | 1.00  | 0.14  | 0.20  | 0.25  | 0.33  |
| $B_2$ | 7.00  | 1.00  | 3.00  | 4.00  | 5.00  |
| $B_3$ | 5.00  | 0.33  | 1.00  | 2.00  | 3.00  |
| $B_4$ | 4.00  | 0.25  | 0.50  | 1.00  | 2.00  |
| $B_5$ | 3.00  | 0.20  | 0.33  | 0.50  | 1.00  |

在使用该判断矩阵求得权重之前, 需要对其进行矩阵一致性检验。矩阵  $A_1$  为一致矩阵的充要条件为:

$$\begin{cases} a_{ij} > 0 \\ a_{ii} = 1 \\ [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}] = k_i [a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}] \end{cases} \quad (5)$$

由矩阵理论可知, 当 n 阶判断矩阵具有完全

一致性时当且仅当判断矩阵具有唯一非零的最大特征根 $\lambda_{\max}=n$ ，且除 $\lambda_{\max}=n$ 外，其余特征根均为零，这样基于层次分析法得出的结论才合理。

进行矩阵 $A_1$ 的一致性检验首先根据最大特征根 $\lambda_{\max}$ 计算一致性指标 $CI$ ：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

再根据表6查找对应的平均随机一致性指标 $RI$ 。

| 表6 平均随机一致性指标 $RI$ 值                             |   |   |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------------------|---|---|------|------|------|------|------|------|
| Table 6 Average random consistency index values |   |   |      |      |      |      |      |      |
| $n$                                             | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
| $RI$                                            | 0 | 0 | 0.52 | 0.89 | 1.12 | 1.26 | 1.36 | 1.41 |

最后进一步求出随机一致性比率 $CR$ ：

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

| 表8 金属矿山开发利用评价指标体系的权重                                                                      |            |        |        |        |                             |        |        |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------|--------|--------|-----------------------------|--------|--------|--------|
| Table 8 Weight of evaluation index system for exploitation and utilization of metal mines |            |        |        |        |                             |        |        |        |
| 目标层                                                                                       | 系统层 (一级指标) | 主观权重   | 客观权重   | 综合权重   | 指标层 (二级指标)                  | 主观权重   | 客观权重   | 综合权重   |
| 金属矿山<br>开发利用<br>水平                                                                        | 生产水平       | 0.0435 | 0.1045 | 0.0231 | 达产率 (%)                     | 0.0435 | 0.1045 | 0.0548 |
|                                                                                           |            |        |        |        | 开采回采率 (%)                   | 0.1625 | 0.0208 | 0.0408 |
|                                                                                           | 利用水平       | 0.4878 | 0.0905 | 0.2242 | 选矿回收率 (%)                   | 0.2778 | 0.0151 | 0.0505 |
|                                                                                           |            |        |        |        | 共生再生资源综合利用率 (%)             | 0.0475 | 0.0546 | 0.0313 |
|                                                                                           | 科技水平       | 0.2310 | 0.4745 | 0.5563 | 人均年产矿石 (t/人)                | 0.1333 | 0.2739 | 0.4399 |
|                                                                                           |            |        |        |        | 吨矿电耗 (kwh/t 原矿)             | 0.0790 | 0.1420 | 0.1352 |
|                                                                                           |            |        |        |        | 吨矿水耗 (m <sup>3</sup> /t 原矿) | 0.0187 | 0.0586 | 0.0132 |
|                                                                                           | 经济效益       | 0.1457 | 0.1544 | 0.1142 | 吨矿成本 (元/t)                  | 0.0827 | 0.0617 | 0.0615 |
|                                                                                           |            |        |        |        | 人均矿业产值 (万元/人)               | 0.0630 | 0.0928 | 0.0704 |
|                                                                                           | 环境效益       | 0.0920 | 0.1761 | 0.0822 | 尾矿利用率 (%)                   | 0.0500 | 0.1380 | 0.0832 |
|                                                                                           |            |        |        |        | 矿山复垦率 (%)                   | 0.0420 | 0.0381 | 0.0192 |

## 2.2 采用熵权法确定指标客观权重值

根据信息论基本原理，信息是系统有序程度的度量，而熵是无序程度的度量，即熵权法是一种客观赋权法<sup>[13]</sup>。由于在层次分析法中判断矩阵的构建引入了专家打分法，得到的权重结果主观性过强。因此本研究采用熵权法对层次分析法进行修正，将两种方法求得的权重进行耦合，得到的综合权重增加了指标权重的客观性，减少主客观因素带来的误差，使最终的评价结果更加合理客观。

利用信息熵计算得到的客观熵权并不反映评价指标在矿产资源开发利用水平评价中的重要程度，而是各个评价指标在矿产资源开发利用水平

一般而言，当 $CR \leq 0.1$ 时，认为判断矩阵 $A_1$ 基本符合随机一致性指标；当 $CR > 0.1$ 时，认为判断矩阵 $A_1$ 不符合随机一致性指标，必须进行调整和修正<sup>[12]</sup>。根据上述公式，求得判断矩阵 $A_1$ 的一致性检验结果（表7）。

| 表7 判断矩阵 $A_1$ 的一致性检验结果                              |        |        |        |
|-----------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| Table 7 Consistency test results of judgment matrix |        |        |        |
| 最大特征根                                               | $CI$ 值 | $RI$ 值 | $CR$ 值 |
| 5.1374                                              | 0.0344 | 1.12   | 0.0307 |

可以看出， $CR < 0.1$ ，说明判断矩阵 $A_1$ 的一致性合理。按照上述方法，计算出各一级指标的权重以及对应的二级指标权重，再根据一级指标的权重值确定各二级指标相对目标层的总权重，得出本研究所选指标体系的主观权重（表8）。

评价上的优差程度<sup>[14]</sup>。

为了消除各个指标在各自维度上的差异，使得最终权重的计算结果更具有客观性，利用熵权法计算各个指标的权重之前，需要先对指标层的各二级指标数据进行标准化处理，将其转化为无量纲标准值。本研究采用极差变换法对指标进行标准化，以保证综合评价结果的准确性。根据二级指标的属性，正向指标和负向指标的变换公式分别为公式(8)、(9)。

$$x_{ij} = \frac{x_j - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (8)$$

$$x_{ij} = \frac{\max(x_{nj}) - x_{nj}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (9)$$

式中， $x_{ij}$ 表示第 $j$ 家矿山第 $i$ 个指标的标准值；



$x_j$  表示第  $j$  家矿山第  $i$  个指标的实际值,  $\min(x_j)$  表示所有矿山中第  $i$  指标的最小值,  $\max(x_j)$  表示所有矿山中第  $i$  指标的最大值。

为了使数据运算处理有意义, 需要消除负值与零的影响, 因此本研究对无量纲化后的数据进行整体平移, 即  $x_{ij}=x_{ij}+\alpha$ 。为了最大限度保留原始数据的内在规律, 本研究取  $\alpha=0.0001$ 。

接着计算第  $i$  个指标下, 第  $j$  家矿山企业所占的比重或贡献度  $p_{ij}$ :

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (10)$$

根据  $p_{ij}$  计算第  $i$  个指标的熵值:

$$e_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (11)$$

再计算第  $i$  个指标的差异性系数  $g_i$ :

$$g_i = 1 - e_i \quad (12)$$

最后确定第  $i$  个指标的权重  $\omega_i$ :

$$\omega_i = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^n g_i} \quad (13)$$

计算多层次结构评价指标体系的系统层权重值, 可以利用熵的可加性原理, 通过指标层的差异性系数  $g_i$ , 得到各系统层指标的变异系数值之和, 再利用公式 (13) 计算出系统层各指标的权重值<sup>[15]</sup>。基于上述步骤, 求出本评价指标体系的客观权重。

### 2.3 层次分析 - 熵权法耦合确定指标综合权重

本研究采用乘数合成归一法, 将层次分析法得到的主观权重与熵权法得到的客观权重进行耦合求得综合权重  $\omega_i$ :

$$\omega_i = \frac{\omega_{1i}\omega_{2i}}{\sum_{i=1}^n \omega_{1i}\omega_{2i}} \quad (14)$$

式中,  $\omega_i$  表示第  $i$  个二级指标的综合权重;  $\omega_{1i}$  表示第  $i$  个二级指标的主观权重;  $\omega_{2i}$  表示第  $i$  个二级指标的客观权重, 经耦合计算得出综合权重。

## 3 综合评价结果

利用表 8 的综合权重, 从《中国黄金年鉴 2018》及其后台统计数据中选取 2017 年 14 家金矿

企业, 对其开发利用水平进行评估。将 14 家金矿的各项指标值按照公式 (8)、(9) 进行无量纲化处理, 再对结果进行整体平移, 加权求和得到各金矿公司的资源开发利用水平得分 (表 9)。

表 9 14 家金矿资源开发利用水平实证评价结果  
Table 9 Empirical evaluation results of resource exploitation and utilization level of 14 gold mines

| 企业名称           | 综合得分   | 企业类型 | 企业名称        | 综合得分   | 企业类型 |
|----------------|--------|------|-------------|--------|------|
| 内蒙古太平矿业浩尧尔忽洞金矿 | 0.7103 | 领先型  | 山金焦家金矿      | 0.2031 |      |
| 嵩县山金矿业         | 0.3279 |      | 招金夏甸金矿      | 0.2020 |      |
| 贵州紫金水银洞金矿      | 0.3020 |      | 贵州锦丰矿业烂泥沟金矿 | 0.1891 |      |
| 湖南辰州矿业         | 0.2347 |      | 湖南新龙矿业龙山金梯矿 | 0.1450 | 成长型  |
| 山金新城金矿         | 0.2191 | 发展型  | 凌源日兴矿业柏杖子金矿 | 0.1325 |      |
| 甘肃早子沟金矿        | 0.2173 |      | 河南金源金业祁雨沟金矿 | 0.1281 |      |
| 海南山金抱伦金矿       | 0.2156 |      | 陕西太白金矿      | 0.1010 |      |

为了更直观清晰地评价 14 家矿山的资源开发利用水平, 本研究通过 SPSS 25.0 软件, 采用 K 均值聚类分析法, 对表 9 中的评价结果进行等级迭代分类。按照组内数据相似最大化和组间相似最小化原则, 通过交叉表计算, 观察各类的数据特点。参考原始得分数据, 经过对比分析, 将 14 家矿山开发利用水平分为 3 种类型。将资源生产水平、科技水平与环境效益所属的二级指标分值以及综合得分较高的矿山划入领先型, 将资源利用水平与经济效益所属的二级指标分值较高的矿山划入发展型, 将各指标分值与综合得分都较低的矿山划入成长型 (表 9)。三种类型的比例分别为 7%、43% 和 50%。三类矿山的一级层指标和二级指标均值见表 10。

表 10 三类矿山指标均值  
Table 10 Average value of index of three types of mines

| 系统层<br>(一级指标) | 领先型    | 发展型    | 成长型    | 指标层 (二级指标)     | 领先型      | 发展型      | 成长型      |
|---------------|--------|--------|--------|----------------|----------|----------|----------|
| 综合分值          |        |        |        |                | 0.710282 | 0.252775 | 0.157267 |
| 生产水平          | 0.0548 | 0.0194 | 0.0060 | 达产率 (%)        | 0.054805 | 0.019415 | 0.006000 |
| 利用水平          | 0.0721 | 0.0889 | 0.0750 | 开采回采率 (%)      | 0.040755 | 0.024083 | 0.018175 |
|               |        |        |        | 选矿回收率 (%)      | 0.000005 | 0.042584 | 0.041076 |
| 科技水平          | 0.4400 | 0.0682 | 0.0263 | 共伴生资源综合利用率 (%) | 0.031294 | 0.022211 | 0.015723 |
|               |        |        |        | 人均年产矿石 (t/人)   | 0.439982 | 0.010626 | 0.009758 |
|               |        |        |        |                | 0.000014 | 0.052948 | 0.008906 |
| 经济效益          | 0.0521 | 0.0559 | 0.0232 | 吨矿成本 (元/t)     | 0.000001 | 0.004618 | 0.007671 |
|               |        |        |        |                | 0.000006 | 0.028348 | 0.014551 |
|               |        |        |        | 人均矿业产值 (万元/人)  | 0.052113 | 0.027554 | 0.008624 |
| 环境效益          | 0.0913 | 0.0204 | 0.0268 | 尾矿利用率 (%)      | 0.083234 | 0.015093 | 0.016669 |
|               |        |        |        | 矿山复垦率 (%)      | 0.008073 | 0.005297 | 0.010113 |

为了更清晰体现矿山综合得分与各级指标之间以及各指标之间的关系，本研究采用 Pearson 相关分析，将矿山综合得分与各级指标进行相关性分析比较（表 11）。

表 11 矿山综合得分与各级指标的相关系数  
Table 11 Correlation coefficient between mine Multipurpose score and indexes at all levels

|        |        |                                 |         |
|--------|--------|---------------------------------|---------|
| 资源生产水平 | 0.994  | 达产率 /%                          | .707**  |
|        |        | 开采回采率 /%                        | .657*   |
| 资源利用水平 | -0.501 | 选矿回收率 /%                        | -.734** |
|        |        | 共伴生资源综合利用率 /%                   | 0.303   |
|        |        | 人均年产矿石 / (t·人 <sup>-1</sup> )   | .913**  |
| 科技水平   | .998*  | 吨矿电耗 / (kwh·t <sup>-1</sup> 原矿) | 0.033   |
|        |        | 吨矿水耗 (m <sup>3</sup> /t 原矿)     | -0.385  |
| 经济效益   | 0.548  | 吨矿成本 (元/t)                      | -0.117  |
|        |        | 人均矿业产值 (万元/人)                   | .652*   |
| 环境效益   | 0.970  | 尾矿利用率 /%                        | .725**  |
|        |        | 矿山复垦率 /%                        | -0.169  |

\*\*、在 0.01 级别 (双尾)，相关性显著；\*、在 0.05 级别 (双尾)，相关性显著。

表 10 表明，成长型矿山的资源生产水平得分最低，为 0.006，科技水平与经济效益得分也较低，分别为 0.0263 和 0.0232。这是由于科技水平较低影响了产量和效益的增长。表 11 表明，综合得分与科技水平的分值呈极强的正相关性，与资源生产水平和经济效益也都呈现较明显的正相关，相关系数分别为 0.984、0.488。表明科技水平对于矿产资源开发利用水平的贡献度最为显著。成长型矿山应当特别注重科技水平的提升，促进先进设备和高新技术在资源开发利用中的应用；领先型矿山的科技水平得分较高，为 0.44，再次表明科技水平在矿产资源开发利用水平评价过程中的重要性；发展

型矿山的资源利用水平得分较高，为 0.0889，而环境效益得分最低，为 0.0204，这类矿山应当关注生产中可能引发的环境问题，需超前谋划矿山环境恢复治理和生态修复。

4 结 论

本研究从资源生产水平、资源利用水平、科技水平、经济效益与环境效益五个方面，建立了金属矿山开发利用水平评价指标体系。考虑到层次分析法与熵权法的单一局限性，将二者结合，基于层次分析法得出主观权重；基于熵权法得出客观权重；基于乘数合成归一法并加以修正，建立了矿产资源开发利用水平评价的指标体系。据此选取位于全国不同省市的 14 家金矿进行实证评价。基于 K 均值聚类分析将 14 家矿山分为领先型、发展型、成长型。三类矿山的指标特征表明，科技水平对于矿产资源开发利用水平贡献度最为显著。

参考文献：

[1] 王蔷, 苏轶娜, 闻少博, 等. 主要矿产品供需形势分析报告 [M]. 北京: 地质出版社, 2020.  
WANG Q, SU Y N, WEN S B, et al. Analysis report on the supply and demand situation of major mineral products[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.  
[2] 曹新元, 吕古贤, 朱裕生. 我国主要金属矿产资源及区域分布特点 [J]. 资源产业, 2004(4):20-22.  
CAO X Y, LV G X, ZHU Y S. Main metal mineral resources and their regional distribution characteristics of China [J]. Resources Industry, 2004(4):20-22.  
[3] 李文超, 王海军, 王雪峰, 等. 全国矿产资源节约与综合

利用报告 [M]. 北京:地质出版社,2020.

LI W C, WANG H J, WANG X F, et al. National Mineral Resources Conservation and Multipurpose Utilization Report [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.

[4] 李得立, 曾小波, 魏友华, 等. 矿山企业矿产资源开发利用水平评价方法——以湖南省金矿矿山为例 [J]. 矿产综合利用, 2019(5):22-27.

LI D L, ZENG X B, WEI Y H, et al. Evaluation Method for the development and utilization level of mineral resources in mining enterprises——a case study of gold mines in Hunan Province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(5):22-27.

[5] 严伟平, 曾小波. 攀西地区钒钛磁铁矿资源开发利用水平评估方法研究 [J]. 矿产综合利用, 2020(6):79-83+36.

YAN W P, ZENG X B. Research on evaluation method of development and utilization level of vanadium-titanium magnetite resources in Panxi area[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6):79-83+36.

[6] 武秋杰, 吕振福, 曹进成, 等. 基于层次分析法的矿产资源节约集约利用水平评价 [J]. 中国矿业, 2021,30(1):33-39.

WU Q J, LV Z F, CAO J C, et al. Evaluation of conservation and intensive utilization of mineral resources based on analytic hierarchy process[J]. China Mining, 2021,30(1):33-39.

[7] 赵国彦, 邱菊, 赵源, 等. 金属矿绿色开采评价指标体系及组合赋权法研究 [J]. 安全与环境学报, 2020,20(6):2309-2316.

ZHAO G Y, QIU J, ZHAO Y, et al. Research on evaluation index system and combination weighting method for green mining of metal mines[J]. Journal of Safety and Environment, 2020,20(6):2309-2316.

[8] 杨树旺, 潘天洋. 青海省南部矿区可持续发展能力评价研究 [J]. 中国矿业, 2015,24(6):57-62+84.

YANG S W, PAN T Y. Research on evaluation of sustainable development ability of southern mining areas in Qinghai Province[J]. China Mining, 2015,24(6):57-62+84.

[9] 朱艺, 高东峰. 《资源综合利用企业评价规范》国家标准解读 [J]. 资源再生, 2021(3):22-23.

ZHU Y, GAO D F. Interpretation of the national standard of "Resources Multipurpose Utilization Enterprise Evaluation

Norm"[J]. Resources Regeneration, 2021(3):22-23.

[10] 邹伟, 阴江宁, 陈兴华, 等. 德尔菲法在全国铁铝资源潜力评价中的应用 [J]. 地质通报, 2010,29(10):1539-1546.

ZOU W, YIN J N, CHEN X H, et al. Application of delphi method in the evaluation of national iron and aluminum resources potential[J]. Geological Bulletin, 2010,29(10):1539-1546.

[11] 孙宏达. 煤炭资源枯竭矿井煤层气(瓦斯)资源分布规律及资源评价方法研究 [D]. 北京:中国矿业大学, 2014.

SUN H D. Research on the distribution law of coal bed methane (gas) resources and resource evaluation methods in exhausted coal mines[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2014.

[12] 洪志国, 李焱, 范植华, 等. 层次分析法中高阶平均随机一致性指标(RI)的计算 [J]. 计算机工程与应用, 2002(12):45-47+150.

HONG Z G, LI Y, FAN Z H, et al. Calculation of high-order average random consistency index (RI) in the analytic hierarchy process [J]. Computer Engineering and Applications, 2002(12):45-47+150.

[13] 薛黎明, 龚爽, 崔超群, 等. 主客观权重相结合的湖南省矿产资源可持续力综合评价 [J]. 中国矿业, 2015,24(9):44-49.

XUE L M, GONG S, CUI C Q, et al. Multipurpose evaluation of the sustainability of mineral resources in Hunan Province based on the combination of subjective and objective weights[J]. China Mining, 2015,24(9):44-49.

[14] 杜建磊, 申宇鹏, 李杨, 等. 集成 AHP/熵权法的煤炭资源开发利用综合评价:以潞宁煤业公司为例 [J]. 中国矿业, 2020,29(4):32-37.

DU J L, SHEN Y P, LI Y, et al. Multipurpose evaluation of coal resources development and utilization integrated AHP/entropy method: taking Luning coal industry company as an example[J]. China Mining, 2020,29(4):32-37.

[15] 陈冬冬. 基于 AHP-熵权综合评价法的郑州市水资源安全问题研究 [D]. 保定:华北水利水电大学, 2020.

CHAN D D. Research on water resources security of ZhengZhou City based on ahp-entropy multipurpose evaluation method[D]. Baoding North China University of Water Conservancy and Hydropower, 2020.

(下转至 58 页)