



生态文明背景下云南省绿色矿山评价方法

伍 伟

昆明冶金高等专科学校, 云南 昆明 650033

摘 要: 在国家绿色矿山指标体系基础上, 依托层次分析法, 选用矿区环境、资源开发方式、资源综合利用、节能减排、科技创新与智能矿山、企业管理与形象 6 个一级评价指标共计 100 项绿色矿山评价指标, 构建层次判断矩阵, 计算出不同指标在绿色矿山建设过程中的重要程度。采用经改良后的二态(-1, 1)赋值方法, 更加准确地对绿色矿山建设进行综合评分, 并在此基础上, 采用等级模糊评价方法确定绿色矿山等级, 为确定云南省示范性绿色矿山提供数据支撑。

关键词: 生态文明; 绿色矿山; 层次模型; 等级评价; 云南省

EVALUATION METHOD FOR GREEN MINES IN YUNNAN PROVINCE UNDER THE BACKGROUND OF ECOLOGICAL CIVILIZATION

WU Wei

Kunming Metallurgy College, Kunming 650033, China

Abstract: On the basis of the national green mine index system, relying on the analytic hierarchy process (AHP), a total of 100 indicators involved in 6 first-level evaluation indexes, including mine environment, resources development mode, resources comprehensive utilization, energy saving and emission reduction, sci-tech innovation and intelligent mine, as well as enterprise management and image, are chosen to construct a hierarchical judgment matrix and calculate the importance of different indexes in the process of green mine construction. The improved two-state (-1, 1) assignment method is used for more accurate comprehensive evaluation of green mine construction. On this basis, the hierarchical fuzzy evaluation method is used to determine the grade of green mine, which provides data support for the demonstration green mine in Yunnan Province.

Key words: ecological civilization; green mine; hierarchical model; grade evaluation; Yunnan Province

0 前言

矿产资源为经济社会的发展提供基础物质保障, 但由于矿产资源的赋存形式与自然环境不可分割, 开发矿产资源不可避免地会对生态环境造成影响。而伴随着经济社会的高速发展, 生态文明建设成为实现人

与自然和谐共生全面可持续发展的科学实践和重要保障^[1-3]。而建设绿色矿山是发展生态矿业的基础, 只有全面建成绿色矿山, 才能为矿业生态文明建设提供保障。

云南作为我国有名的“有色金属王国”, 是矿产种

收稿日期: 2023-01-30; 修回日期: 2023-03-23. 编辑: 张哲.

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目“生态文明背景下云南省资源型企业生态矿山发展模式研究——以铅锌矿企业为例”(2022J1308).

作者简介: 伍伟(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事绿色矿山建设研究、综合信息成矿预测工作, 通信地址 云南省昆明市玉华区学府路 388 号,

E-mail/tourist1105@163.com

类最齐全的省份之一,现已发现矿产 157 种,全省共有探矿权 2 970 个,采矿权 7 119 个^[4].

云南矿业开发历史悠久,生态保护和矿业经济发展矛盾突出,发展绿色矿业、建设绿色矿山十分必要^[5-6].

1 云南省绿色矿山建设情况

截至 2022 年 6 月,云南省共有 25 座矿山符合国家级绿色矿山标准,并纳入全国绿色矿山名录.云南省绿色矿山主要分布在 11 个地州(市),其中昆明市 10 个,文山州 3 个,保山市 3 个,普洱市 2 个,大理州、丽江市、德宏州、临沧市、昭通市、玉溪市、红河州各 1 个(图 1).

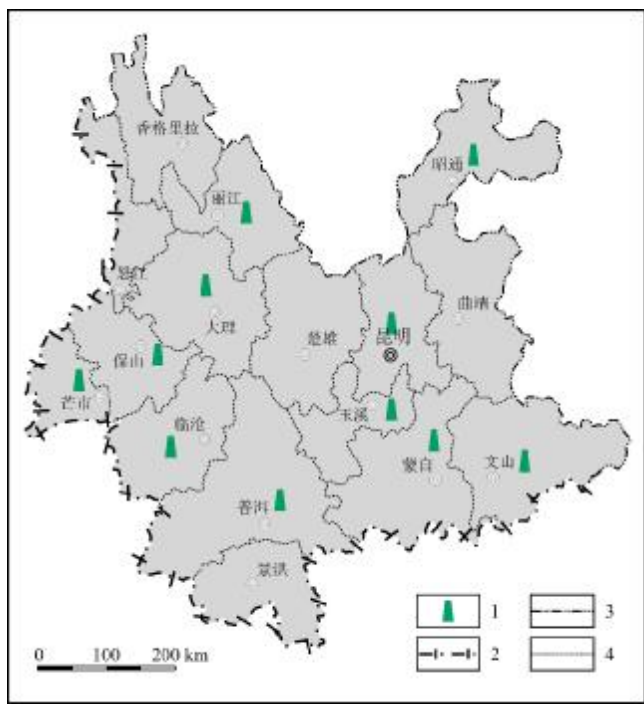


图 1 云南省绿色矿山区域分布图

Fig. 1 Regional distribution map of green mines in Yunnan Province

1—绿色矿山所在区域(green mine area); 2—国界线(national boundary); 3—省界线(provincial boundary); 4—州市界线(prefecture boundary)

在 25 座绿色矿山中,按矿种进行分类(见图 2),包括水泥用石灰岩矿 6 座,金矿 4 座,磷矿 7 座,铅锌矿、铅矿、锌矿、煤、铁矿、铜矿、钨矿、锗矿各 1 座.

2 国家绿色指标体系现状

根据我国发布的绿色矿山建设指标,包括证照合法有效、企业三年内未受到行政处罚、未被列入矿业权

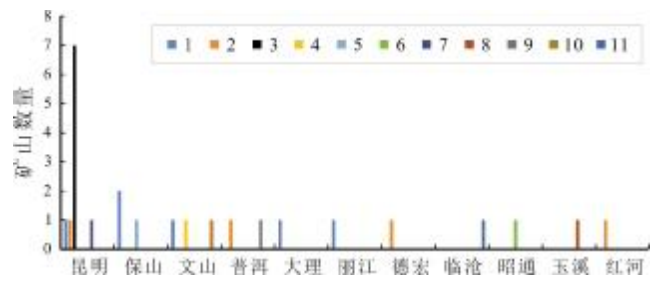


图 2 云南省不同矿种绿色矿山分布范围

Fig. 2 Distribution of green mines by mineral types in Yunnan Province

1—水泥用石灰岩 (cement limestone); 2—金矿 (gold mine); 3—磷矿 (phosphorite mine); 4—铅锌矿 (lead-zinc mine); 5—铅矿 (lead mine); 6—锌矿 (zinc mine); 7—煤矿 (coal mine); 8—铁矿 (iron mine); 9—铜矿 (copper mine); 10—钨矿 (tungsten mine); 11—锗矿 (germanium mine)

人异常名单、剩余储量可采年限不少于三年、矿区范围不涉及各类自然保护地等 5 项必备基本条件,以及满足必备基本条件后,才能进行评价的其他参评指标.参评指标包括矿区环境、资源开发方式、资源综合利用、节能减排、科技创新与智能矿山、企业管理与形象^[7-9]等 6 项一级指标合计 100 项三级详细指标(图 3).

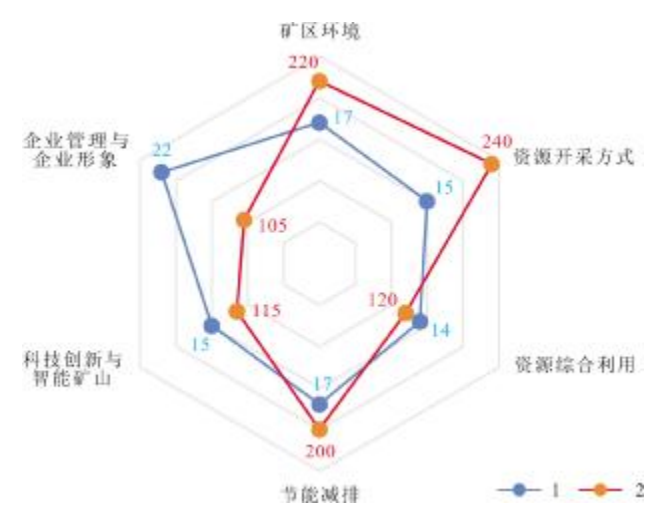


图 3 绿色矿山评价指标分布及分值图

Fig. 3 Evaluation index distribution and score diagram for green mines

1—三级指标数量 (number of three-level indexes); 2—指标分值 (index score)

对国家绿色矿山指标体系参评指标进行分析,从指标数量(图 3 中蓝色线)方面看,绿色矿山建设以矿区环境、资源开发方式、资源综合利用、节能减排、科技

创新与智能矿山建设为基础,最终体现在良好的企业管理与企业形象,在获取经济效益的同时,实现人类社会与自然环境和谐发展。从指标分值(图3中红色线)方面看,矿区环境、资源开采方式、资源综合利用、节能减排是对自然资源环境是否造成重大扰动的最重要影响因素。因此需要在开发利用矿产资源过程中,针对不同的生产矿山,根据资源禀赋制定恰当的开采方式,加大资源综合利用研究,降低生产过程中的能源消耗和直接外排,实现优美的矿区内外环境。

3 云南绿色矿山评价方法的建立

云南作为西部矿业大省,有着丰富的矿产资源,同时也拥有优质的绿色本底和相对良好的生态环境^[10],但也正因为如此,其生态环境更加敏感,更需要在生产过程中注重绿色发展,才能保持优良的生态环境。

目前云南省可供开采的矿山7 000余座,但达到国家级绿色矿山标准的矿山仅有25座,绿色矿山数量相对较低。因此需要依据国家绿色矿山建设评价指标,从云南省自身实际出发建立绿色矿山建设的评价方法,选出能起到示范作用的矿山,再通过带动模式,使云南省矿山逐步走上绿色化道路,最终实现矿业生态文明建设。

3.1 基于GIS的空间分析构建绿色矿山评价模式

不同省份建立绿色矿山评价体系,往往都是基于国家绿色矿山建设评价标准而开展的,而在评价过程中根据各自不同的特点探索采用不同的评价方法,对本省绿色矿山建设是行之有效的。

MapGIS是以数字、图像等信息对事件内容、特性等进行表述,为生产、建设和决策等提供直观的依据。绿色矿山评价指标体系中三级指标是进行综合评定的最基本要素,是度量矿山不同综合总指标的基本工具,对三级指标要素进行快速直接的平对,其结果能够直接影响最终评价结论。

运用MapGIS建立绿色矿山评价模式,其主要原理是将拟评价矿山设为一个生产矿山块模型^[11-12],再将绿色矿山评价体系中的各项三级指标作为属性参数赋到生产矿山块模型中(如图4所示)。生成属性参数后,可对属性进行数值检索、运算、统计分析等,能够快速纠正评价过程中出现的误差,且快速得到各项总指标的评价得分,计算其总指标评价得分。

属性名称	赋值
矿山名称	
固体废弃物堆放	0.0
固体废弃物管理	0.0
矿区绿化覆盖	0.0
环境保护设施	0.0
环境监测制度	0.0
环境监测设备	0.0
共生资源的综合利用	0.0

图4 生产矿山块模型属性赋值图

Fig. 4 Attribute assignment of production mine block model

本研究在生成矿山块模型中,将原有的每一项三级指标对应有不同的分值,改变为以(-1,1)的二态赋值方式对各项三级指标进行赋值。若矿山采取有利绿色矿山建设的设备、制度、技术等,赋值“1”;若矿山在生产过程中没有相应的制度,采用的措施、使用的设备等不利于矿山绿色发展要素的,则对该指标赋值“-1”。而后根据矿山实际情况,完成所有评价指标赋值,使得生产矿山块模型中对应的属性参数被赋予一个数值。随后再运用属性计算方式,将各详细指标按照分类进行计算,可依次得到矿山绿色评价体系中相应类别总指标的评价分值。所得分值可通过生成矿山块模型属性分析进行直观展示,如图5所示。

由于在赋值的过程中,并没有考虑不同评价项目对绿色矿山评价目标的贡献大小,故而可能会出现详细指标项目不一致但指标总评分相同的情况,这显然不是十分符合实际情况的。因此还需要对计算出不同指标加权后再进行计算才可能得到更加贴合实际的指标总评,本研究通过建立绿色矿山评价层次模型确定指标权重。

3.2 云南绿色矿山建设评价层次模型

绿色矿山建设数学模型是以矿山绿色评价一级(上级)指标中的项目拥有情况为基础建立的。在评价过程中,将矿山作为一个块模型单元,在这个单元中取 n 个绿色矿山评价指标变量 X_i ($i=1,2,\dots,n$),取 Y 为总评价得分。这个得分就是评价该矿山单元绿色矿山建设情况的综合性定量指标,并且是用一级(上级)指标项目进行度量,它们之间的关系为:



图 5 各评价总指标二态赋值结果图

Fig. 5 Results of two-state assignment for each evaluation index

$$Y=a_1X_1+a_2X_2+\cdots+a_nX_n$$

式中, a_i ($i=1,2,\cdots,n$)是评价指标的权重. 某一指标对应的权值越大, 那么在绿色矿山评价过程中该指标对总目标的贡献程度也将越高.

因此在绿色矿山建设评价模型中, 求出各指标变量的权重是得出矿山综合评分的关键. 在得出各矿山的综合评价得分后, 结合其隶属程度, 得到矿山等级最终评价结果, 为下一步矿山建设方向提供依据.

3.3 指标权重数学计算方法

在上述绿色矿山评价模型中, 结合绿色矿山指标分布, 选用能够在不同参数间进行相互比较的层次分析法来计算指标权重值. 首先需要将模型中的指标进行分类划分, 即把有相关联的指标归为一类, 并在同类型中按指标对结果影响程度的高低将其排序, 使得指标间的条理清晰. 在完成指标有序分类后, 要对不同类型的属性指标及同一类型不同指标的权重进行计算. 采用指标间的两两成对比较的方法对其重要度进行定量描述, 其原理是将客观事物中内含的指标对其影响程度形成主观判断结构, 并与不同指标对该事物造成的后果进行客观评判, 将判断结构与判断结果按

其对应层次有效地结合起来, 即可实现同一层次指标间重要程度的定量描述. 通过上述过程, 也就完成了成对判断结构矩阵的构建, 结合不同层次之间的总排序, 即可运用数学方法计算出同一层次中各自所含指标的相对权值并可对这些指标进行排序^[13].

运用层次分析法计算得到各指标的权重值后, 对于所得结果是否有效即是否符合该客观事物的实际情况, 则还需通过进一步的计算进行验证, 即对判断结构的正确性进行验证. 其验证依据为对随机一致性比例 CR 进行判断: 若 $CR < 0.1$, 说明对该客观事物形成的主观判断结构是正确的, 因此通过判断结构计算得到的权重值也是有效的, 是符合客观实际的; 反之 $CR > 0.1$, 则说明计算出的权重值不符合实际情况, 需要对判断结构进行重新调整. 验证参数 $CR = \frac{CI}{RI}$, 式中 CI 为判断结构矩阵一致性指标, RI 为平均随机一致性指标^[14], 其中 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ ($\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征根, n 为矩阵阶数)^[15]. RI 的取值则是通过表 1^[16]进行查询.

3.4 指标权重数学计算步骤

3.4.1 评价模型结构层次

在绿色矿山建设指标评价模型中的最高层次目标或总目标(A)是计算出矿山绿色评价总评得分 Y ,而要得到这个总评分则与方案层(C)也即最终的实施考评项目(三级指标)不可分割. 在最高目标与方案之间则是对方案进行评价时所涉及的中间层, 即评价基准层(B),也是方案的属性^[17]. 它们之间的关系如图 6 所示.

3.4.2 绿色矿山评价模型矩阵构建

构建成对比较矩阵, 是指对同一层次中的指标进行成对比较, 常采用 1~9 的比例尺度标准. 其标准意义是, 同一层次中的两个指标 a_i 和 a_j 同等重要, 成对比较的标准为 1; 当 a_i 较 a_j 稍微重要, 其成对比较标准为 3; a_i 较 a_j 相当重要, 成对比较标准为 5; a_i 较 a_j 明显重要, 成对比较标准为 7; a_i 较 a_j 绝对重要, 成对比

较标准为 9^[18], 在确保两指标之间重要性方向保持不变的前提下, 仅仅是重要强度步入上述标准的, 则可对比较标准进行折中处理, 即将两指标间的比较标准取值为 2、4、6、8. 相反地, a_j 相对于 a_i 的比较标准取值为上述标度的倒数^[19].

基于矿山绿色建设这个总目标, 根据绿色矿山评价模型层次结构关系, 对基准层中的 6 个属性进行成对比较. 按照前述的评价比例尺度标准, 构建出基准层的成对比较矩阵(B), 具体见表 2.

同理在基准层各评价项目下的子项目间也要进行成对比较, 建构各评价项目下的子项目间的成对比较矩阵.

按现行绿色矿山评价指标体系^[20], 矿区环境项目(X_1)包括 17 个子项目, 分别是功能分区(F_1)、生产配套设施(F_2)、生活配套设施(F_3)、生产区标牌(F_4)、定置化管理(F_5)、固体废物堆放(F_6)、固体废物管理(F_7)、

表 1 不同判断结构矩阵阶数所对应的 RI 值
Table 1 RI values corresponding to different judgment matrix exponents

矩阵阶数(n)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.58	1.58	1.59

矩阵阶数(n)	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
RI	1.5943	1.6064	1.6133	1.6207	1.6292	1.6358	1.6403	1.6462	1.6497	1.6556	1.6587	1.6631	1.6670	1.6693	1.6724

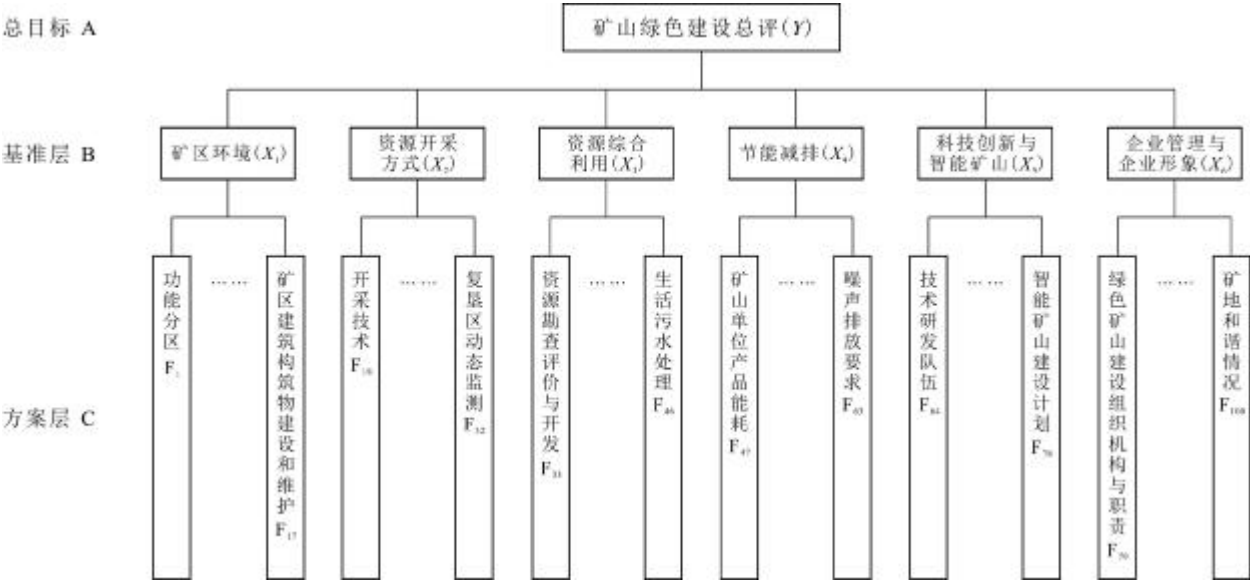


图 6 绿色矿山评价模型层次关系图

Fig. 6 Hierarchical diagram of green mine evaluation model

表 2 基准层(B)成对比较矩阵

Table 2 Paired comparison matrix of reference layer (B)

矿山绿色发展总评	矿区环境	资源开采方式	资源综合利用	节能减排	科技创新与智能矿山	企业管理与形象
矿区环境	1	1/3	1	1	5	7
资源开采方式	3	1	3	3	7	9
资源综合利用	1	1/3	1	1	5	7
节能减排	1	1/3	1	1	5	7
科技创新与智能矿山	1/5	1/7	1/5	1/5	1	5
企业管理与形象	1/7	1/9	1/7	1/7	1/5	1

生活垃圾处置与利用(F₈)、主干道路面(F₉)、道路清洁(F₁₀)、矿区清洁(F₁₁)、矿区建筑构筑物建设和维护(F₁₂)、矿区绿化覆盖(F₁₃)、专用主干道绿化美化(F₁₄)、绿化保障机制(F₁₅)、绿化保障效果(F₁₆)、矿区美化(F₁₇)。通过成对比较,得到矿区环境所涉子项目间的成对比较矩阵(C₁),见表 3。

表 3 矿区环境项目所涉子项目间的成对比较矩阵

Table 3 Paired comparison matrix of subitems involved in environmental item in mining area

X ₁	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	F ₉	F ₁₀	F ₁₁	F ₁₂	F ₁₃	F ₁₄	F ₁₅	F ₁₆	F ₁₇
F ₁	1	1/2	1/2	1/2	1/2	3	3	1/3	1/2	1	1/3	1/3	1/3	1	3	3	1
F ₂	2	1	1	1	1	3	3	1/2	1	2	1/2	1/2	1/2	2	4	4	2
F ₃	2	1	1	1	1	3	3	1/2	1	2	1/2	1/2	1/2	2	4	4	2
F ₄	2	1	1	1	1	3	3	1/2	1	2	1/2	1/2	1/2	2	4	4	2
F ₅	2	1	1	1	1	3	3	1/2	1	2	1/2	1/2	1/2	2	4	4	2
F ₆	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1	1/5	1/3	1/2	1/5	1/5	1/5	1/2	2	2	1/2
F ₇	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1	1/5	1/3	1/2	1/5	1/5	1/5	1/2	2	2	1/2
F ₈	3	2	2	2	2	5	5	1	2	3	1	1	1	3	7	7	3
F ₉	2	1	1	1	1	3	3	1/2	1	2	1/2	1/2	1/2	2	4	4	2
F ₁₀	1	1/2	1/2	1/2	1/2	3	3	1/3	1/2	1	1/3	1/3	1/3	1	3	3	1
F ₁₁	3	2	2	2	2	5	5	1	2	3	1	1	1	3	7	7	3
F ₁₂	3	2	2	2	2	5	5	1	2	3	1	1	1	3	7	7	3
F ₁₃	3	2	2	2	2	5	5	1	2	3	1	1	1	3	7	7	3
F ₁₄	1	1/2	1/2	1/2	1/2	3	3	1/3	1/2	1	1/3	1/3	1/3	1	3	3	1
F ₁₅	1/3	1/4	1/4	1/4	1/4	1/2	1/2	1/7	1/4	1/3	1/7	1/7	1/7	1/3	1	1	1/3
F ₁₆	1/3	1/4	1/4	1/4	1/4	1/2	1/2	1/7	1/4	1/3	1/7	1/7	1/7	1/3	1	1	1/3
F ₁₇	1	1/2	1/2	1/2	1/2	3	3	1/3	1/2	1	1/3	1/3	1/3	1	3	3	1

资源开采方式项目(X₂)包括 15 个子项目,分别是开采技术(F₁₈)、开采工作面(F₁₉)、选矿及加工工艺(F₂₀)、矿区功能范围(F₂₁)、治理要求(F₂₂)、土地利用功能(F₂₃)、生态功能(F₂₄)、环境保护设施(F₂₅)、环境管理认证(F₂₆)、环境监测制度(F₂₇)、环境监测设备(F₂₈)、应急响应(F₂₉)、矿山地质环境动态监测(F₃₀)、废水尾矿等监测(F₃₁)、复垦区监测(F₃₂)。通过成对比较,得到成对比较矩阵(C₂),见表 4。

表 4 资源开采方式项目所涉子项目的成对比较矩阵

Table 4 Paired comparison matrix of subitems involved in resource mining mode item

X ₂	F ₁₈	F ₁₉	F ₂₀	F ₂₁	F ₂₂	F ₂₃	F ₂₄	F ₂₅	F ₂₆	F ₂₇	F ₂₈	F ₂₉	F ₃₀	F ₃₁	F ₃₂
F ₁₈	1	2	1/2	2	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
F ₁₉	1/2	1	1/3	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3
F ₂₀	2	3	1	3	5	5	5	7	7	7	7	7	7	7	7
F ₂₁	1/2	1	1/5	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3
F ₂₂	1/3	1/2	1/5	1/2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
F ₂₃	1/3	1/2	1/5	1/2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
F ₂₄	1/3	1/2	1/5	1/2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
F ₂₅	1/4	1/3	1/7	1/3	1/2	1/2	1/2	1	1	1	1	1	1	1	1
F ₂₆	1/4	1/3	1/7	1/3	1/2	1/2	1/2	1	1	1	1	1	1	1	1
F ₂₇	1/4	1/3	1/7	1/3	1/2	1/2	1/2	1	1	1	1	1	1	1	1
F ₂₈	1/4	1/3	1/7	1/3	1/2	1/2	1/2	1	1	1	1	1	1	1	1
F ₂₉	1/4	1/3	1/7	1/3	1/2	1/2	1/2	1	1	1	1	1	1	1	1
F ₃₀	1/4	1/3	1/7	1/3	1/2	1/2	1/2	1	1	1	1	1	1	1	1
F ₃₁	1/4	1/3	1/7	1/3	1/2	1/2	1/2	1	1	1	1	1	1	1	1
F ₃₂	1/4	1/3	1/7	1/3	1/2	1/2	1/2	1	1	1	1	1	1	1	1

资源综合利用项目(X_3)共有 14 个子项目,分别从非金属、化工、黄金、冶金、有色、石油、煤炭等(第一类)及砂石、水泥灰岩、建筑石材(第二类)进行分类评价,其中第一类包括 10 个评价子项目,分别是资源勘查评价与开发(F_{33})、共伴生资源综合利用(F_{34})、复杂难处理和低品位矿石综合利用(F_{35})、暂不能利用共伴生矿产的保护(F_{36})、工业固废处置与利用(F_{37})、表土(F_{38})、回收提取(F_{39})、开采废水处置与利用(F_{40})、生产废水处置与利用(F_{41})、生活污水处置(F_{42});而石材类则包括 4 个评价子项目,分别是开采加工产物综合利用(F_{43})、剥离物综合利用(F_{44})、生产废水处置与利用(F_{45})、生活污水处置(F_{46}),需要进行分类成对比较矩阵的构建,结果见表 5(C_{3-1})、表 6(C_{3-2}),

表 5 资源综合利用项目所涉一类子项目成对比较矩阵

Table 5 Paired comparison matrix of Type I subitems involved in resources comprehensive utilization item

X_{3-1}	F_{33}	F_{34}	F_{35}	F_{36}	F_{37}	F_{38}	F_{39}	F_{40}	F_{41}	F_{42}
F_{33}	1	1/3	2	2	1/5	1	2	1/2	1/2	1
F_{34}	3	1	4	4	1/2	3	4	4	4	4
F_{35}	1/2	1/4	1	1	1/7	1/2	1	1/3	1/3	1/2
F_{36}	1/2	1/4	1	1	1/7	1/2	1	1/3	1/3	1/2
F_{37}	5	2	7	7	1	5	7	3	3	5
F_{38}	1	1/3	2	2	1/5	1	2	1/2	1/2	1
F_{39}	1/2	1/4	1	1	1/7	1/2	1	1/3	1/3	1/2
F_{40}	2	1/2	3	3	1/3	2	3	1	1	2
F_{41}	2	1/2	3	3	1/3	2	3	1	1	2
F_{42}	1	1/3	2	2	1/5	1	2	1/2	1/2	1

表 6 资源综合利用项目所涉二类子项目成对比较矩阵

Table 6 Paired comparison matrix of Type II subitems involved in resources comprehensive utilization item

X_{3-2}	F_{43}	F_{44}	F_{45}	F_{46}
F_{43}	1	1	2	3
F_{44}	1	1	2	3
F_{45}	1/2	1/2	1	2
F_{46}	1/3	1/3	1/2	1

节能减排项目(X_4)共有 17 个子项目,包括全过程能耗核算(F_{47})、能源管理(F_{48})、矿山单位产品能耗(F_{49})、能源管理体系认证(F_{50})、产尘点(F_{51})、生产粉尘排放(F_{52})、地面运输粉尘排放(F_{53})、贮存场所粉尘排放(F_{54})、其他废弃排放(F_{55})、生活污水排放(F_{56})、工业废水排放(F_{57})、排水管道(F_{58})、地表径流淋溶水排放(F_{59})、固废排放(F_{60})、噪声点(F_{61})、噪声处置(F_{62})、噪声排放(F_{63}),经成对比较,得到比较矩阵(C_4),见表 7.

表 7 节能减排项目所涉子项目的成对比较矩阵

Table 7 Paired comparison matrix of subitems involved in energy saving and emission reduction item

X_4	F_{47}	F_{48}	F_{49}	F_{50}	F_{51}	F_{52}	F_{53}	F_{54}	F_{55}	F_{56}	F_{57}	F_{58}	F_{59}	F_{60}	F_{61}	F_{62}	F_{63}
F_{47}	1	1/2	1/3	1	1	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2	1/3	1/2	1/3	1/7	1	1/3	1/2
F_{48}	2	1	1/2	2	2	1/2	1/2	1	1	1	1/2	1	1/2	1/5	2	1/2	1
F_{49}	3	2	1	3	3	1	1	2	2	2	1	2	1	1/5	2	1	2
F_{50}	1	1/2	1/3	1	1	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2	1/3	1/2	1/3	1/7	1	1/3	1/2
F_{51}	1	1/2	1/3	1	1	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2	1/3	1/2	1/3	1/7	1	1/3	1/2
F_{52}	3	2	1	3	3	1	1	2	2	2	1	2	1	1/5	2	1	2
F_{53}	3	2	1	3	3	1	1	2	2	2	1	2	1	1/5	2	1	2
F_{54}	2	1	1/2	2	2	1/2	1/2	1	1	1	1/2	1	1/2	1/5	2	1/2	1
F_{55}	2	1	1/2	2	2	1/2	1/2	1	1	1	1/2	1	1/2	1/5	2	1/2	1
F_{56}	2	1	1/2	2	2	1/2	1/2	1	1	1	1/2	1	1/2	1/5	2	1/2	1
F_{57}	3	2	1	3	3	1	1	2	2	2	1	2	1	1/5	2	1	2
F_{58}	2	1	1/2	2	2	1/2	1/2	1	1	1	1/2	1	1/2	1/5	2	1/2	1
F_{59}	3	2	1	3	3	1	1	2	2	2	1	2	1	1/5	2	1	2
F_{60}	7	5	5	7	7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	1	7	5
F_{61}	1	1/2	1/3	1	1	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2	1/3	1/2	1/3	1/7	1	1/3	1/2
F_{62}	3	2	1	3	3	1	1	2	2	2	1	2	1	1/5	2	1	2
F_{63}	2	1	1/2	2	2	1/2	1/2	1	1	1	1/2	1	1/2	1/5	2	1/2	1

科技创新与智能矿山项目(X_5)共有 15 个子项目,包括技术研发队伍(F_{64})、技术研发(F_{65})、协同创新(F_{66})、科技获奖(F_{67})、研发及技改投入(F_{68})、高新技术企业(F_{69})、知识产权(F_{70})、先进技术和装备(F_{71})、智能矿山建设(F_{72})、矿山自动化管控平台(F_{73})、矿山生产自动化(F_{74})、远程监控(F_{75})、资源储量系统(F_{76})、智能工作面(F_{77})、矿区环境在线监测系统(F_{78}),经成对比

较,得到比较矩阵(C_5),见表 8.

表 8 科创与智能矿山项目所涉子项目的成对比较矩阵

Table 8 Paired comparison matrix of subitems involved in sci-tech innovation and intelligent mine item

X_5	F_{64}	F_{65}	F_{66}	F_{67}	F_{68}	F_{69}	F_{70}	F_{71}	F_{72}	F_{73}	F_{74}	F_{75}	F_{76}	F_{77}	F_{78}
F_{64}	1	1	1/2	1/7	1/2	1	1/2	1/7	1/2	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2
F_{65}	1	1	1/2	1/7	1/2	1	1/2	1/7	1/2	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2
F_{66}	2	2	1	1/5	1	2	1	1/5	1	1/2	1/2	1/2	1	1	1
F_{67}	7	7	5	1	5	7	5	1	5	3	3	3	5	5	5
F_{68}	2	2	1	1/5	1	2	1	1/5	1	1/2	1/2	1/2	1	1	1
F_{69}	1	1	1/2	1/7	1/2	1	1/2	1/7	1/2	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2
F_{70}	2	2	1	1/5	1	2	1	1/5	1	1/2	1/2	1/2	1	1	1
F_{71}	7	7	5	1	5	7	5	1	5	3	3	3	5	5	5
F_{72}	2	2	1	1/5	1	2	1	1/5	1	1/2	1/2	1/2	1	1	1
F_{73}	3	3	2	1/3	2	3	2	1/3	2	1	1	1	2	2	2
F_{74}	3	3	2	1/3	2	3	2	1/3	2	1	1	1	2	2	2
F_{75}	3	3	2	1/3	2	3	2	1/3	2	1	1	1	2	2	2
F_{76}	2	2	1	1/5	1	2	1	1/5	1	1/2	1/2	1/2	1	1	1
F_{77}	2	2	1	1/5	1	2	1	1/5	1	1/2	1/2	1/2	1	1	1
F_{78}	2	2	1	1/5	1	2	1	1/5	1	1/2	1/2	1/2	1	1	1

企业管理与企业形象项目(X_6)共有 22 个子项目,包括绿色矿山建设计划(F_{79})、绿色矿山建设组织机构(F_{80})、绿色矿山考核(F_{81})、绿色矿山改进提升(F_{82})、绿色矿山建设培训(F_{83})、职工满意度(F_{84})、职工文娱活动(F_{85})、工会活动(F_{86})、绿色矿山文化建设(F_{87})、员工收入与企业业绩关系(F_{88})、功能区管理(F_{89})、采选设备管理(F_{90})、职业健康(F_{91})、环境保护制度(F_{92})、人员目视化管理(F_{93})、绿色矿山宣传(F_{94})、员工体检(F_{95})、矿地和谐(F_{96})、扶贫或公益活动(F_{97})、企业纳税情况(F_{98})、企业义务履行(F_{99})、信息公开(F_{100})。经成对比较,得到比较矩阵(C_6),见表 9.

3.4.3 成对比较矩阵计算

将基准层、方案层的成对比较矩阵构建完成后,对比较矩阵进行计算,求出各子项目的综合权重值,其计算步骤如下.

1)分别对构建出的成对比较矩阵中每一行评价指标进行相乘,得到乘积 $M_i^{[19]}$,按照基准层、方案层分别

计算,结果如下:

$$M(B)=(11.66,1701,11.667,11.667,0.006)^T$$

$$M(C_1)=(0.0313,144,144,144,144,10^{-6},10^{-6},3175200,144,0.0313,3175200,3175200,3175200,0.0313,10^{-9},10^{-9},0.0313)^T$$

$$M(C_2)=(3538944,8748,12970802250,5248.8,4.267,4.267,4.267,0.0005,0.0005,0.0005,0.0005,0.0005,0.0005,0.0005,0.0005,0.0005)^T$$

$$M(C_{3-1})=(0.133333,18432,0.0005,771750,0.1333,0.0005,36,36,0.1333)^T$$

$$M(C_{3-2})=(6,6,0.5,0.056)^T$$

$$M(C_4)=(3.06 \times 10^{-6},0.05,691.2,3.06 \times 10^{-6},3.06 \times 10^{-6},691.2,691.2,0.05,0.05,0.05,691.2,0.05,691.2,5.86 \times 10^{11},3.06 \times 10^{-6},691.2,0.05)^T$$

$$M(C_5)=(5.91 \times 10^{-6},5.91 \times 10^{-6},0.04,723515625,0.04,5.91 \times 10^{-6},0.04,723515625,0.04,384,384,384,0.04,0.04,0.04)^T$$

$$M(C_6)=(819.2,819.2,819.2,819.2,68024448,0.0004,0.0004,0.0004,0.0004,0.0004,0.0004,2.27 \times 10^{16},0.0004,0.0004,0.0004,819.2,0.0004,0.0004,819.2,819.2,0.0004,0.0004,0.0004)^T$$

2)根据比较矩阵的阶数(n),求取基准层、方案层 M_i 的 n 次方根,计算公式^[19]为 $D_i=\sqrt[n]{M_i}$. 求出结果分别为:

$$D(B)=(1.506,3.455,1.506,1.506,0.423,0.2)^T$$

$$D(C_1)=(0.816,1.34,1.34,1.34,1.34,0.446,0.446,2.412,1.34,0.816,2.412,2.412,2.412,0.816,0.3,0.3,0.816)^T$$

$$D(C_2)=(2.733,1.832,4.723,1.77,1.102,1.102,1.102,0.602,0.602,0.602,0.602,0.602,0.602,0.602,0.602,0.602)^T$$

$$D(C_{3-1})=(0.818,2.67,0.467,0.467,3.879,0.818,0.468,1.431,1.431,0.818)^T$$

$$D(C_{3-2})=(1.565,1.565,0.841,0.485)^T$$

$$D(C_4)=(0.474,0.838,1.469,0.474,0.474,1.47,1.47,0.838,0.838,0.838,1.469,0.838,1.469,4.923,0.474,1.469,0.838)^T$$

$$D(C_5)=(0.448,0.448,0.807,3.896,0.807,0.448,$$

表 9 企业管理与企业形象项目所涉子项目的成对比较矩阵
Table 9 Paired comparison matrix of subitems involved in enterprise management and image item

X ₆	F ₇₉	F ₈₀	F ₈₁	F ₈₂	F ₈₃	F ₈₄	F ₈₅	F ₈₆	F ₈₇	F ₈₈	F ₈₉	F ₉₀	F ₉₁	F ₉₂	F ₉₃	F ₉₄	F ₉₅	F ₉₆	F ₉₇	F ₉₈	F ₉₉	F ₁₀₀
F ₇₉	1	1	1	1	1/2	2	2	2	2	2	2	1/5	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2
F ₈₀	1	1	1	1	1/2	2	2	2	2	2	2	1/5	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2
F ₈₁	1	1	1	1	1/2	2	2	2	2	2	2	1/5	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2
F ₈₂	1	1	1	1	1/2	2	2	2	2	2	2	1/5	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2
F ₈₃	2	2	2	2	1	3	3	3	3	3	3	1/3	3	3	3	2	3	2	2	3	3	3
F ₈₄	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	1	1	1	1	1	1	1/7	1	1	1	1/2	1	1/2	1/2	1	1	1
F ₈₅	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	1	1	1	1	1	1	1/7	1	1	1	1/2	1	1/2	1/2	1	1	1
F ₈₆	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	1	1	1	1	1	1	1/7	1	1	1	1/2	1	1/2	1/2	1	1	1
F ₈₇	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	1	1	1	1	1	1	1/7	1	1	1	1/2	1	1/2	1/2	1	1	1
F ₈₈	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	1	1	1	1	1	1	1/7	1	1	1	1/2	1	1/2	1/2	1	1	1
F ₈₉	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	1	1	1	1	1	1	1/7	1	1	1	1/2	1	1/2	1/2	1	1	1
F ₉₀	5	5	5	5	3	7	7	7	7	7	7	1	7	7	7	5	7	5	5	7	7	7
F ₉₁	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	1	1	1	1	1	1	1/7	1	1	1	1/2	1	1/2	1/2	1	1	1
F ₉₂	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	1	1	1	1	1	1	1/7	1	1	1	1/2	1	1/2	1/2	1	1	1
F ₉₃	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	1	1	1	1	1	1	1/7	1	1	1	1/2	1	1/2	1/2	1	1	1
F ₉₄	1	1	1	1	1/2	2	2	2	2	2	2	1/5	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2
F ₉₅	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	1	1	1	1	1	1	1/7	1	1	1	1/2	1	1/2	1/2	1	1	1
F ₉₆	1	1	1	1	1/2	2	2	2	2	2	2	1/5	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2
F ₉₇	1	1	1	1	1/2	2	2	2	2	2	2	1/5	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2
F ₉₈	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	1	1	1	1	1	1	1/7	1	1	1	1/2	1	1/2	1/2	1	1	1
F ₉₉	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	1	1	1	1	1	1	1/7	1	1	1	1/2	1	1/2	1/2	1	1	1
F ₁₀₀	1/2	1/2	1/2	1/2	1/3	1	1	1	1	1	1	1/7	1	1	1	1/2	1	1/2	1/2	1	1	1

0.807,3.896,0.807,1.487,1.487,1.487,
0.807,0.807,0.807)^T
 $D(C_6)=(1.357,1.357,1.357,1.357,2.27,0.698,$
0.698,0.698,0.698,0.698,0.698,5.539,
0.698,0.698,0.698,1.357,0.698,1.357,
1.357,0.698,0.698,0.698)^T
3)将基准层、方案层重要度(M_i)的 n 次方根 D_i 进
行归一化处理,得到重要度向量 W_i ,即

$$W_i=\frac{D_i}{\sum_{i=1}^n D_i} \quad (i=1,2,\cdots,n)$$

依次得到结果如下:
 $W(B)=(0.1752,0.4019,0.1752,0.1752,0.0492,$
0.0233)^T
 $W(C_1)=(0.039,0.063,0.063,0.063,0.063,0.021,$
0.021,0.114,0.063,0.039,0.114,0.114,
0.114,0.039,0.014,0.014,0.039)^T
 $W(C_2)=(0.14,0.1,0.25,0.09,0.06,0.06,0.06,$
0.03,0.03,0.03,0.03,0.03,0.03,0.03,0.03)^T
 $W(C_{3-1})=(0.062,0.201,0.035,0.035,0.292,0.062,$
0.035,0.108,0.108,0.062)^T
 $W(C_{3-2})=(0.351,0.351,0.189,0.189)^T$

$$W(C_4)=(0.023, 0.041, 0.071, 0.023, 0.023, 0.071, \\ 0.071, 0.041, 0.041, 0.041, 0.071, 0.041, \\ 0.071, 0.238, 0.023, 0.071, 0.041)^T$$

$$W(C_5)=(0.023, 0.023, 0.042, 0.202, 0.042, 0.023, \\ 0.042, 0.202, 0.042, 0.077, 0.077, 0.077, \\ 0.042, 0.042, 0.042)^T$$

$$W(C_6)=(0.051, 0.051, 0.051, 0.051, 0.086, 0.026, \\ 0.026, 0.026, 0.026, 0.026, 0.026, 0.21, \\ 0.026, 0.026, 0.026, 0.051, 0.026, 0.051, \\ 0.051, 0.026, 0.026, 0.026)^T$$

4)在得到重要度向量 W_i 后,还需对其进行一致性检验,以确定所构建的成对比较矩阵是合理的.只有成对比较合理,才能将重要度 W_i 作为评价子项目的权重值使用,否则需要重新构建成对矩阵.需要求取基准层、方案层归一化处理后的最大特征根 $\lambda_{\max}$,即

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{W_i}$$

其中 $(AW)_i$ 表示向量 AW 的第 i 个分量,即成对比较矩阵与向量 W_i 矩阵的乘积^[21],求取结果分别为:

$$\lambda(B)_{\max} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \frac{(AW)_i}{W_i} = \frac{1}{6} \times \left(\frac{1.0687}{0.1752} + \frac{2.5328}{0.4019} + \right. \\ \left. \frac{1.0687}{0.1752} + \frac{1.0687}{0.1752} + \frac{0.3283}{0.0492} + \frac{0.1529}{0.0233} \right) = 6.3057$$

$$\lambda(C_1)_{\max} = \frac{1}{17} \times \left(\frac{0.678}{0.039} + \frac{1.096}{0.063} + \frac{1.096}{0.063} + \frac{1.096}{0.063} + \right. \\ \left. \frac{1.096}{0.063} + \frac{0.367}{0.021} + \frac{0.367}{0.021} + \frac{1.966}{0.114} + \frac{1.096}{0.063} + \frac{0.678}{0.039} + \right. \\ \left. \frac{1.966}{0.114} + \frac{1.966}{0.114} + \frac{1.966}{0.114} + \frac{0.678}{0.039} + \frac{0.246}{0.014} + \frac{0.246}{0.014} + \right. \\ \left. \frac{0.678}{0.039} \right) = 17.329$$

$$\lambda(C_2)_{\max} = \frac{1}{15} \times \left(\frac{2.16}{0.14} + \frac{1.44}{0.1} + \frac{3.71}{0.25} + \frac{1.41}{0.09} + \frac{0.87}{0.06} + \right. \\ \left. \frac{0.87}{0.06} + \frac{0.87}{0.06} + \frac{0.47}{0.03} + \frac{0.47}{0.03} + \frac{0.47}{0.03} + \frac{0.47}{0.03} + \frac{0.47}{0.03} + \right. \\ \left. \frac{0.47}{0.03} + \frac{0.47}{0.03} + \frac{0.47}{0.03} \right) = 15.05$$

$$\lambda(C_{3-1})_{\max} = \frac{1}{10} \times \left(\frac{0.63}{0.062} + \frac{2.249}{0.201} + \frac{0.362}{0.035} + \frac{0.362}{0.035} + \right. \\ \left. \frac{3.006}{0.292} + \frac{0.63}{0.062} + \frac{0.362}{0.035} + \frac{1.101}{0.108} + \frac{1.101}{0.108} + \frac{0.63}{0.062} \right) = 10.336$$

$$\lambda(C_{3-2})_{\max} = \frac{1}{4} \times \left(\frac{1.407}{0.351} + \frac{1.407}{0.351} + \frac{0.758}{0.189} + \frac{0.437}{0.108} \right) \\ = 4.01$$

$$\lambda(C_4)_{\max} = \frac{1}{17} \times \left(\frac{0.39}{0.023} + \frac{0.688}{0.041} + \frac{1.213}{0.071} + \frac{0.39}{0.023} + \right. \\ \left. \frac{0.39}{0.023} + \frac{1.213}{0.071} + \frac{1.213}{0.071} + \frac{0.688}{0.041} + \frac{0.688}{0.041} + \frac{0.688}{0.041} + \right. \\ \left. \frac{1.213}{0.071} + \frac{0.688}{0.041} + \frac{1.213}{0.071} + \frac{4.23}{0.238} + \frac{0.39}{0.023} + \frac{1.213}{0.071} + \right. \\ \left. \frac{0.688}{0.041} \right) = 17.05$$

$$\lambda(C_5)_{\max} = \frac{1}{15} \times \left(\frac{0.352}{0.023} + \frac{0.352}{0.023} + \frac{0.63}{0.042} + \frac{3.057}{0.202} + \right. \\ \left. \frac{0.63}{0.042} + \frac{0.352}{0.023} + \frac{0.63}{0.042} + \frac{3.057}{0.202} + \frac{0.63}{0.042} + \frac{1.163}{0.077} + \right. \\ \left. \frac{1.163}{0.077} + \frac{1.163}{0.077} + \frac{0.63}{0.042} + \frac{0.63}{0.042} + \frac{0.63}{0.042} \right) = 15.058$$

$$\lambda(C_6)_{\max} = \frac{1}{22} \times \left(\frac{1.133}{0.051} + \frac{1.133}{0.051} + \frac{1.133}{0.051} + \frac{1.133}{0.051} + \right. \\ \left. \frac{1.908}{0.086} + \frac{0.583}{0.026} + \frac{0.583}{0.026} + \frac{0.583}{0.026} + \frac{0.583}{0.026} + \frac{0.583}{0.026} + \right. \\ \left. \frac{0.583}{0.026} + \frac{4.676}{0.21} + \frac{0.583}{0.026} + \frac{0.583}{0.026} + \frac{0.583}{0.026} + \frac{1.133}{0.051} + \right. \\ \left. \frac{0.583}{0.026} + \frac{1.133}{0.051} + \frac{1.133}{0.051} + \frac{0.583}{0.026} + \frac{0.583}{0.026} + \frac{0.583}{0.026} \right) = \\ 22.042$$

5)如前所述,在分别得到各判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 后,即可分别求出其相应的一致性指标 CI ,随后可分别完成成对比较矩阵的一致性验证.计算过程及结果如下:

$$\textcircled{1} CI(B) = \frac{\lambda(B)_{\max} - n}{n-1} = \frac{6.3057-6}{6-1} = 0.061$$

$$CR(B) = \frac{CI(B)}{RI} = \frac{0.061}{1.26} = 0.048 < 0.1$$

故可以将基准层成对比较矩阵确定为满意一致性矩阵,则用该矩阵求出的重要度向量 W_i 是基准层评价项目的合理权重值.

$$\textcircled{2} CI(C_1) = \frac{\lambda(C_1)_{\max} - n}{n-1} = \frac{17.329-17}{17-1} = 0.021$$

$$CR(C_1) = \frac{CI(C_1)}{RI} = \frac{0.021}{1.6064} = 0.013 < 0.1$$

可以判断针对矿区环境项目(X_1)所属 17 个子项目构建的成对比较矩阵是满意度一致性矩阵, W_i 是该项目中所有子项目的合理权重值.

$$\textcircled{3} CI(C_2) = \frac{\lambda(C_2)_{\max} - n}{n-1} = \frac{15.05-15}{15-1} = 0.003$$

$$CR(C_2) = \frac{CI(C_2)}{RI} = \frac{0.003}{1.59} = 0.002 < 0.1$$

可以判断针对资源开采方式项目(X_2)所属 15 个子项目构建的成对比较矩阵是满意度一致性矩阵, W_i 是该项目中所有子项目的合理权重值.

$$\textcircled{4} CI(C_{3-1}) = \frac{\lambda(C_{3-1})_{\max} - n}{n-1} = \frac{10.336 - 10}{10-1} = 0.037$$

$$CR(C_{3-1}) = \frac{CI(C_{3-1})}{RI} = \frac{0.037}{1.49} = 0.025 < 0.1$$

$$CI(C_{3-2}) = \frac{\lambda(C_{3-2})_{\max} - n}{n-1} = \frac{4.01 - 4}{4-1} = 0.003$$

$$CR(C_{3-2}) = \frac{CI(C_{3-2})}{RI} = \frac{0.003}{0.89} = 0.004 < 0.1$$

由于资源综合利用项目(X_3)按照不同矿种进行了分类, 针对不同类别构建了成对比较矩阵, 根据计算结果显示, 不同类别构建出的矩阵均为满意度一致性矩阵, 其所得 W_i 作为对应子项目的权重值是合理的.

$$\textcircled{5} CI(C_4) = \frac{\lambda(C_4)_{\max} - n}{n-1} = \frac{17.05 - 17}{17-1} = 0.003$$

$$CR(C_4) = \frac{CI(C_4)}{RI} = \frac{0.003}{1.6064} = 0.002 < 0.1$$

故可判定节能减排项目(X_4)所属 17 个子项目构建的成对比较矩阵符合一致性要求, W_i 是所有子项目的合理权重值.

$$\textcircled{6} CI(C_5) = \frac{\lambda(C_5)_{\max} - n}{n-1} = \frac{15.058 - 15}{15-1} = 0.004$$

$$CR(C_5) = \frac{CI(C_5)}{RI} = \frac{0.004}{1.59} = 0.0026 < 0.1$$

故可判定科技创新与智能矿山项目(X_5)所含 15 个子项目的成对比较矩阵满意度一致, 其所计算 W_i 作为子项目的权重值是合理的.

$$\textcircled{7} CI(C_6) = \frac{\lambda(C_6)_{\max} - n}{n-1} = \frac{22.042 - 22}{22-1} = 0.002$$

$$CR(C_6) = \frac{CI(C_6)}{RI} = \frac{0.002}{1.6403} = 0.001 < 0.1$$

故可判定企业管理与企业形象项目(X_6)所含 22 个子项目构建的成对比较矩阵符合一致性要求, W_i 是所有子项目的合理权重值.

6) 最终矿山单元绿色矿山建设情况的综合性定量指标, 其线性关系式为:

$$Y = 0.1752X_1 + 0.4019X_2 + 0.1752X_3 + 0.1752X_4 + 0.0492X_5 + 0.0233X_6 = 0.1752 \times [W(C_1)_i \times (F_1 + \dots + F_{17})] + 0.4019 \times [W(C_2)_i \times (F_{18} + \dots + F_{32})] + 0.1752 \times [W(C_{3-1})_i \times (F_{33} + \dots + F_{42})] \\ \text{或 } 0.1752 \times [W(C_{3-2})_i \times (F_{43} + \dots + F_{46})] + 0.1752 \times [W(C_4)_i \times (F_{47}$$

$$+ \dots + F_{63})] + 0.4019 \times [W(C_5)_i \times (F_{63} + \dots + F_{78})] + 0.0233 \times [W(C_6)_i \times (F_{79} + \dots + F_{100})]$$

即用基准层的权重值分别与其所含子项目的评价得分相乘后再相加, 可求出绿色矿山评价综合得分. 需要注意的是, 根据矿种不同, 需要选择 $W(C_3)$ 不同的分类要素参与评价计算, 才能得到符合实际矿山单元绿色矿山建设情况的综合定量分值.

4 绿色矿山等级模糊评价

依据矿山建设评价模型, 可以快速获得矿山的绿色建设综合得分, 对所有矿山绿色建设情况能够有明确的认识. 对于任何一个地区来说, 要一次性将所有矿山都达到国家绿色矿山标准显然是难以实现的, 因此需要根据评价结果选取最具潜力的矿山作为重点首先进入绿色矿山行列.

基于绿色矿山建设综合评价总得分, 通过运用模糊评价矩阵方法, 对矿山进行分级判别. 模糊评价方法主要是以评价者的评语集对各指标评价过程构建框架模型, 由低层向高层进行综合评定. 本研究根据绿色矿山总评价目标构建出的基准层成对比较矩阵为 6 阶矩阵, 故也要形成对应的等级评价集 $V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6) = (\text{优秀}, \text{良好}, \text{一般}, \text{合格}, \text{差}, \text{较差})$. 针对各个基准层的指标评价, 形成隶属矩阵 S , 其表达式为:

$$S = (\frac{C_{ij}}{C})_{mn}$$

其中 C_{ij} 表示第 i 个评价指标在第 j 个评价等级上的评定人数, C 表示总评定人数, m 为评价指标数, n 为评价等级数.

在本研究中假设参与目标层综合等级评价的人数为 10, 将评价结果构建为隶属矩阵, 如下所示:

$$S = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0 & 0.3 & 0.1 & 0.2 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.3 \end{bmatrix}$$

将基准层各属性的权重 W 与构建出的隶属矩阵 S 相乘, 即可得到模糊综合评价向量 $R^{[22]}$:

$$R = W \times S$$

$$= (0.1752, 0.4019, 0.1752, 0.1752, 0.0492, 0.0233)$$

$$\times \begin{bmatrix} 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0 & 0.3 & 0.1 & 0.2 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.3 \end{bmatrix}$$

$$=(0.191, 0.26, 0.182, 0.16, 0.107, 0.08)$$

R 作为模糊评价指标,是用来确定评价指标对应评价集的隶属程度。对这种隶属程度的确定常采用最大隶属度原则,即将模糊综合评价向量 R 中的最大值所对应评价集的项目作为最终的评价结果^[23]。在本次假设中最终评价结果为 0.26, 对应到等级评价集 V 中,可得到参评的矿山绿色等级最终评定为良好,可作为示范重点矿山进行重点培育。

5 结论

1)在对矿山划分单元块的基础上,仅应用 MapGIS 属性分析功能对划分的矿山单元块模型进行直接赋值改良的二态(-1,1),运用 MapGIS 提供的统计方法可以快速得出矿山单元块绿色建设综合得分情况。然而这样的得分显然是有失公允的,因为没有考虑指标的贡献度,会出现指标贡献度不同,得到相同的综合评分,这对评定矿山绿色等级是不利的。

2)为了明确不同贡献度指标对总目标的影响程度,本研究引入绿色矿山评价层次模型,结合国家绿色矿山指标体系分布情况,以具体绿色矿山评价指标为基础,构建了不同层次、不同指标的成对比较矩阵,计算出各个指标的权重值,并对所求结果进行了一致性检验,确保所得指标权重的准确性,最后求出不同子项目相对于总目标的综合权重值。该模型能够充分体现不同子项目对达成绿色矿山的贡献程度,避免出现不同贡献度的指标采用同种赋值方式出现相同综合得分的情况。运用层次分析法求出指标权重后,可以直观地得到不同矿山绿色矿山建设达成度,为矿山在生产建设中从哪些方面维护好生态与生产的关系提供了依据。

3)对于任何一个省份来说,要把所有矿山都同步建成国家级绿色矿山有一定的难度。运用等级模糊评价方法,通过评测者的测评结果建立矿山等级评价集,结合对应基准层的权重,就能综合客观地确定矿山的评定等级,为选择示范性绿色矿山提供基础数据支撑。

参考文献(References):

- [1] 聂选华. 云南边疆民族地区生态文明建设可持续发展研究[J]. 昆明理工大学学报(社会科学版), 2017, 17(2): 33-39.
- Nie X H. The research on sustainable development of eco-civilization construction in Yunnan frontier ethnic minority regions[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Social Sciences Edition), 2017, 17(2): 33-39.
- [2] 王富林, 杨仕教, 杨波, 等. 生态文明视阈下的绿色生态矿业发展路径[J]. 河南理工大学学报(社会科学版), 2016, 17(2): 169-173.
- Wang F L, Yang S J, Yang B, et al. Development path of green ecological mining from the perspective of ecological civilization[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Social Sciences), 2016, 17(2): 169-173.
- [3] 栗欣. 绿色矿山文化建设模式的分析[J]. 中国矿业, 2019, 28(7): 86-88, 93.
- Li X. Analysis of the construction mode of green mining culture[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(7): 86-88, 93.
- [4] 云南省自然资源厅, 云南省发展和改革委员会, 云南省工业和信息化厅, 等. 云南省矿产资源总体规划(2021—2025年)(公开发布稿)[EB/OL]. http://dnr.yn.gov.cn/html/2022/tongzhigonggao_1030/33927.html, 2022-10-30.
- Yunnan Provincial Department of Natural Resources, Yunnan Provincial Development and Reform Commission, Yunnan Provincial Department of Industry and Information Technology, et al. Yunnan Province mineral resources master plan (2021-2025) [EB/OL]. http://dnr.yn.gov.cn/html/2022/tongzhigonggao_1030/33927.html, 2022-10-30. (in Chinese)
- [5] 云南省人民政府办公厅. 云南省“十四五”区域协调发展规划[EB/OL]. https://www.yn.gov.cn/zwgk/zcwj/zxwj/202204/t20220421_241076.html, 2022-04-14.
- General Office of the People's Government of Yunnan Province. The regional coordinated development plan of Yunnan Province during the 14th Five-Year Plan [EB/OL]. https://www.yn.gov.cn/zwgk/zcwj/zxwj/202204/t20220421_241076.html, 2022-04-14. (in Chinese)
- [6] 郭冬艳, 杨繁, 路永严. 关于云南绿色矿山建设的思考与建议[J]. 铜业工程, 2021(2): 15-18, 22.
- Guo D Y, Yang F, Lu Y Y. Thoughts and suggestions on the construction of green mines in Yunnan[J]. Copper Engineering, 2021(2): 15-18, 22.
- [7] 董煜, 柳晓娟, 侯华丽. 绿色矿山评价指标解析[J]. 中国矿业, 2020, 29(12): 68-74.
- Dong Y, Liu X J, Hou H L. Analysis of green mine evaluation index [J]. China Mining Magazine, 2020, 29(12): 68-74.
- [8] 杨伟龙, 白宇明, 李永利, 等. 内蒙古包头某铁矿尾矿库生态修复的植物优选研究[J]. 中国地质, 2022, 49(3): 683-694.
- Yang W L, Bai Y M, Li Y L, et al. Plant optimal screening for contaminated soil remediation in an iron mining tailing of Baotou, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2022, 49(3): 683-694.

- [9]刘亦晴, 梁雁茹, 刘娜娜, 等. 基于高质量发展视角的绿色矿山建设评价指标体系研究[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(2): 176-187.
Liu Y Q, Liang Y R, Liu N N, et al. Study on evaluation index system of green mine construction based on high quality development perspective[J]. Gold Science and Technology, 2020, 28(2): 176-187.
- [10]刘艳, 张星梓, 李森, 等. 云南省生态文明建设指标分析研究[J]. 环境科学导刊, 2022, 41(2): 34-38.
Liu Y, Zhang X Z, Li S, et al. Analysis on indicators of ecological civilization construction in Yunnan Province [J]. Environmental Science Survey, 2022, 41(2): 34-38.
- [11]段顺荣, 李延福, 李春阳. 基于 GIS 和层次分析法的青海甘德县地质灾害危险性评价[J]. 矿产勘查, 2021, 12(2): 453-460.
Duan S R, Li Y F, Li C Y. Geological hazard risk assessment based on GIS and analytical hierarchy process in Gande County, Qinghai Province[J]. Mineral Exploration, 2021, 12(2): 453-460.
- [12]秦先燕, 彭苗枝, 焦团理, 等. 基于 GIS 的环巢湖地区地质环境承载力评价[J]. 地质与资源, 2020, 29(2): 180-186.
Qin X Y, Peng M Z, Jiao T L, et al. Assessment of GIS-based geological environment carrying capacity in circum-Chaohu Lake area, Anhui, China[J]. Geology and Resources, 2020, 29(2): 180-186.
- [13]张炳江. 层次分析法及其应用案例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 9-55, 156-157.
Zhang B J. Analytic hierarchy process and its application cases[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 9-55, 156-157. (in Chinese)
- [14]杨艺苑, 杨存建. 基于 GIS 的东川区生态环境敏感性分析[J]. 测绘通报, 2022, 3(3): 7-12.
Yang Y Y, Yang C J. Sensitivity analysis of ecological environment in Dongchuan district based on GIS[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022, 3(3): 7-12.
- [15]王红梅. 基于层次分析法的煤矿矿山生态环境评价定量模型研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(7): 70-75.
Wang H M. The study on eco-environmental evaluation model of coal mine based on analytic hierarchy process method[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(7): 70-75.
- [16]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, 38(12): 45-47, 150.
Hong Z G, Li Y, Fan Z H, et al. Calculation on high-ranked RI of analytic hierarchy process[J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 38(12): 45-47, 150.
- [17]王国卫, 李明波, 蒋明光, 等. 基于加权信息量模型的湖南省麻阳县地质灾害危险性评价与区划[J]. 地质与资源, 2020, 29(5): 266-272.
Wang G W, Li M B, Jiang M G, et al. Risk assessment and zoning of the geological hazards in Mayang County of Hunan Province based on weighted information model[J]. Geology and Resources, 2020, 29(5): 266-272.
- [18]江思义, 吴福, 黄希明, 等. 基于专家-层次分析法的岩溶地面塌陷易发性评价——以广西平桂区为例[J]. 矿产勘查, 2021, 12(11): 2294-2302.
Jiang S Y, Wu F, Huang X M, et al. Evaluation of vulnerability of karst collapse based on expert-analytic hierarchy process: A case study of Pinggui District, Guangxi[J]. Mineral Exploration, 2021, 12(11): 2294-2302.
- [19]王宇, 葛育廷, 朱晓华. 莱州湾南岸滨海典型盐化工企业绿色矿山建设评价指标体系研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(S2): 104-109.
Wang Y, Ge Y T, Zhu X H. Study on green mine construction evaluation index system of typical salt chemical enterprises in the south coast of Laizhou Bay[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(S2): 104-109.
- [20]吴冷, 张作红. 绿色矿山评价指标体系研究与构建[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2020, 36(3): 72-77, 92.
Wu L, Zhang Z H. Research and construction of evaluation index system for green mines [J]. Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition), 2020, 36(3): 72-77, 92.
- [21]周秀全, 黄海波, 郑宁, 等. 基于层次分析法的水库蓄水后滑坡易发性评价[J]. 地质与资源, 2022, 31(6): 804-810.
Zhou X Q, Huang H B, Zheng N, et al. Susceptibility assessment of landslide after reservoir impoundment based on analytic hierarchy process[J]. Geology and Resources, 2022, 31(6): 804-810.
- [22]闫志刚, 刘玉朋, 王雪丽. 绿色矿山建设评价指标与方法研究[J]. 中国煤炭, 2012, 38(2): 116-120.
Yan Z G, Liu Y P, Wang X L. Evaluation criterion and method of green mine[J]. China Coal, 2012, 38(2): 116-120.
- [23]钟琛, 胡乃联, 段绍甫, 等. 有色金属绿色矿山评价体系研究[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(7): 146-151.
Zhong C, Hu N L, Duan S F, et al. Research on evaluation system of green mines in non-ferrous metal industry[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(7): 146-151.