“双碳”目标下考虑碳绩效的采矿方案优选*

裴明松，刘林，代光俊，李小伟，陈爱章，刘海，斯小华

（湖北冶金地质研究所（中南冶金地质研究所），湖北 宜昌市 443003）

摘要：矿产资源开发利用不仅为国民经济发展提供物质基础，还是“双碳”目标下碳减排的关键“战场”。为了实现矿山低碳开发，在以往采矿方案优选评价指标的基础上，引入碳绩效相关指标，构建了考虑碳绩效的加权灰色关联采矿方案优选模型。以国内某矿山为例，除安全、经济、技术方面的指标外，引入了平均碳绩效等碳绩效相关指标，利用博弈论思想综合确定各指标权重，对阶段矿房嗣后充填开采、露天分层台阶式开采、露天分层台阶式开采（35%）和阶段矿房嗣后充填联合开采以及露天分层台阶式开采（60%）和阶段矿房嗣后充填联合开采4种采矿方案进行评价，最终确定露天分层台阶式开采为最优方案。与不考虑碳绩效的优选结果相比，碳绩效指标的引入使得各方案的加权灰色关联度发生了变化，证明在“双碳”目标下考虑碳绩效指标具有重要意义，符合发展绿色矿业的要求，可为“双碳”目标下矿山采矿方案优选提供参考。

关键词：“双碳”目标；碳绩效；采矿方案优选；加权灰色关联度；源头减碳

中图分类号：TD873；X37　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)05-0042-07

Mining Scheme Optimization Considering Carbon Performance Under the “Dual Carbon” Goals

PEI Mingsong, LIU Lin, DAI Guangjun, LI Xiaowei, CHEN Aizhang, LIU Hai, SI Xiaohua

(Hubei Institute of Metallurgical Geology (Central South Institute of Metallurgical Geology), Yichang, Hubei 443003, China)

Abstract: The development and utilization of mineral resources not only provides a material basis for the development of the national economy, but also a key “battlefield” for carbon emission reduction under the “dual carbon” goals. In order to realize the low-carbon development of mines, based on the previous evaluation indexes of mining scheme optimization, the carbon performance related indexes were introduced, and the weighted grey relational mining scheme optimization model considering carbon performance was constructed. Taking a mine in China as an example, in addition to safety, economic and technical indicators, carbon performance indicators such as average carbon performance were introduced. The weight of each index was comprehensively determined using game theory, and the four mining schemes of stage room subsequent filling mining, open-pit stratified stepped mining, open-pit stratified stepped mining (35%) and stage room subsequent filling combined mining, open-pit stratified stepped mining (60%) and stage room subsequent filling combined mining were evaluated. Finally, it is determined that open-pit stratified stepped mining is the optimal scheme. Compared with the optimization results without considering carbon performance, the introduction of carbon performance index makes the weighted grey relational grade of each scheme change, which proves that it is of great significance to consider carbon performance index under the “dual carbon” goals, which meets the requirements of developing green mining and can provide reference for mining scheme optimization of mines under the “dual carbon” goals.

Key words: “Dual carbon” goals, Carbon performance, Mining scheme optimization, Weighted grey relational grade, Source carbon reduction

0 引言

我国致力于在2030年完成“碳达峰”并在2060年实现“碳中和”。不同领域科研人员对各行业的碳排放要素、实现“双碳”目标途径以及“双碳”目标对行业发展的新挑战和新要求等进行了研究，并取得了一定的成果。2023年11月，国家发改委等五部门联合印发《关于加快建立产品碳足迹管理体系的

* **收稿日期**：2024-07-14

基金项目：湖北省自然科学基金项目（2022CFB557，2023AFB923）；湖北省转制科研院所科技发展专项项目（42000024205T000000140）

作者简介：裴明松（1991—），男，河南淅川人，硕士，助理研究员，主要研究方向为矿产资源开发利用和生态复绿。E-mail：sunnypms@163.com

意见》(发改环资〔2023〕1529号)[1]。2023年12月，中央经济工作会议提出要加快构建绿色低碳供应链。2024年政府工作报告明确提出，提升碳排放统计核算能力，建立碳足迹管理体系，扩大全国碳市场行业覆盖范围。《关于进一步加强绿色矿山建设的通知》(自然资规〔2024〕1号)将碳排放量作为考核绿色矿山的提升性指标之一。矿业作为国民经济的重要部分，必将成为未来碳足迹、碳排放研究关注的重点之一。

“双碳”目标提出之后，煤炭、有色金属等行业对已建矿山的碳排放、碳汇变化以及碳绩效等方面进行了研究。例如，岳宗耀等[2]构建了煤炭企业整体碳绩效评价指标体系及生产矿井碳绩效评价体系，并用于煤炭企业碳绩效评价；彭亚辉等[3]对湖南省矿业碳排放特征进行研究，进而构建了碳绩效模型，并用于分析湖南省2010年后10年内的矿业碳绩效；彭仁东等[4]对阜康矿区西部地下矿井碳排放估算方法进行研究，获得了地下矿井的碳排放总量；王猛等[5]厘清了煤矿区碳排放源边界，并构建了碳排放量核算模型，进而明确了煤矿区低碳发展方向；裴明松等[6]研究了露天矿山生命周期内碳排放规律等；李海英等[7]归纳了金属矿山碳排放计算方法，构建了崩落法低碳高效开采理论模型；XU Xiaochuan等[8]在经济利润的基础上考虑露天矿生态成本，进而对露天矿开采境界进行了优化；郑玉蓉等[9]通过分析识别露天煤矿的碳排放源，基于煤炭开发碳排放源清单分析方法构建了露天煤矿碳排放核算模型；乔兰等[10]构建了金属矿山井巷建设工程碳排放智能测算方法。上述研究多集中在矿山现状碳排放、碳绩效等的评估方面，进而针对性提出降低矿山碳排放的相关措施。矿山开采方案关系着矿产资源开发的安全、低碳、高效、经济、合理性。既然矿山碳排放成为了行业关注的重点之一，那么从源头方案的选择方面将减少矿山碳排放考虑进去，进而实现源头减碳也是矿山降低碳排放的措施之一。但是，该方面却鲜有研究，即现有的开采方案优选模型多结合矿山实际情况，从采矿方案的经济、技术及安全性方面综合考虑，对方案的环境影响仅进行定性评估，较少考虑矿山碳绩效方面的指标。

本文在加权灰色关联分析法的基础上，引入碳排放量、平均碳绩效以及增汇水平等碳绩效相关的指标，构建考虑碳绩效相关指标的开采方案优选模型，对采矿方案的考量涵盖了矿山开发的全生命周期，不仅仅包括矿石采出的过程，还涵盖后期生态复绿的内容，并与不考虑碳绩效指标的方案进行对比，以研究碳绩效指标在矿山开采方案选择方面的意义，为“双碳”目标下矿山采矿方案的选择提供借鉴，助力我国“碳中和”目标的实现。

1 矿山碳绩效相关指标

碳绩效体现了企业绿色低碳发展的水平，对于矿山而言，碳绩效的核算包括矿山生产直接碳排放量和植被破坏引起的间接排放量。为了更加贴合矿山实际并考虑其后期碳汇发展，本文将直接碳排放量、间接碳排放量、平均碳绩效、吨矿碳排放量以及增汇潜力作为“双碳”目标下矿山需考虑的碳绩效相关指标。其中，直接碳排放量即为矿山实现年产能所消耗的燃料、电力以及爆破等引起的碳排放量[6]。参考文献[6]和文献[11]的研究成果，采用等值替代法将因植被破坏或复绿初期而不能实现的原始固碳量作为间接碳排放量，认为矿山通过生态复绿工作能将固碳水平恢复至矿山碳汇基线水平。此外采用彭亚辉等[3]的研究成果，将排放1 t CO_2所能产生的经济价值作为平均碳绩效，即静态环境下矿山净经济效益终值与净碳排放量的比值。吨碳排放量为矿山构建低碳供应链的参考指标，即矿山生命周期内净碳排放量与可采资源量的比值。增汇潜力即矿山采用适宜的生态复绿措施超过碳汇基线值的能力。

2 考虑碳绩效指标的方案优选模型

矿山采矿方案选择方面的研究屡见不鲜，系统工程思想的引入使得学者们研究了很多具有指导意义的优选模型并将其用于矿山开采实践中。灰色关联分析是在灰色系统理论基础上发展起来的一种方法，通过因素之间发展趋势的相似性或者差异程度来判断因素间的关联程度。该方法通过分析待评价对象与评价标准各因子的距离，确定各个对象的关联程度，并结合评价因子的权重，进而确定评价结果，具有适应面广，对样本量和样本规律性要求低等特点，在诸如矿业[12-16]、建筑业、水利[17]等行业得到了广泛的应用。本文以灰色关联分析法为基础构建采矿方案优选模型。

2.1 指标体系构建

开采方案优选涉及的指标因素多而复杂，不仅要考虑具体的矿床地质条件，同时需满足矿山经济、

安全、低碳、高效采矿的目的。本文从经济、技术、安全和低碳4方面筛选能充分表征采矿方案可行性的指标,构建矿山开采方案优选的评价指标体系,见表1。

表1 采矿方案优选评价指标

Table 1 Evaluation indices of mining plans optimization

一级指标	二级指标	备注
碳绩效指标	直接碳排放量/t	定量指标
	间接碳排放量/t	定量指标
	平均碳绩效/(万元/t)	定量指标
	增汇潜力	定性指标
	吨矿碳排放量/t	定量指标
经济指标	可采资源量/万t	定量指标
	开采综合成本/(元/t)	定量指标
	建设投资/万元	定量指标
	综合剥采比	定量指标
	净利润/万元	定量指标
技术指标	综合回采率/%	定量指标
	生产能力达成难易程度	定性指标
	矿石综合贫化率/%	定量指标
	综合生产效率/(万t/a)	定量指标
	生产管理难易程度	定性指标
	生产连续性	定性指标
	综合利用率	定量指标
安全指标	安全监管难易程度	定性指标
	地压管理难易程度	定性指标
	机械化程度	定性指标

2.2 确定各指标权重

博弈论又被称为对策论,是特定条件下多对象之间对局中采用相关方的策略。根据博弈论思想,结合各种确定权重的方法,可以得到综合权重,提高权重计算的科学性[18-20]。其主要步骤如下。

(1) 将L种方法获得的n个评价指标的权重组成基础权重矩阵为:

$$\boldsymbol{P}=(p_{kq})_{L\times n} \tag{1}$$

式中,p_{kq}为第$k(k=1,2,\cdots,L)$种方法获得的第$q(q=1,2,\cdots,n)$个评价指标的权重值。

(2) 将上述权重通过线型组合得到L种权重的综合权重向量集$\boldsymbol{p}$:

$$\boldsymbol{p}=\sum_{k=1}^{L}c_k\cdot\boldsymbol{p}_k^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{p}_k$为第k种方法获得的权重向量;c_k为第k种方法获得的权重线型组合时的系数;$c_k>0$。

(3) 对c_k进行优化,使得$\boldsymbol{p}$与$\boldsymbol{p}_k$的离差最小化,即:

$$\min\left\|\sum_{k=1}^{L}c_k\boldsymbol{p}_k^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{p}_k\right\|_2 \tag{3}$$

(4) 对式(2)求一阶导数,即:

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{p}_1\cdot\boldsymbol{p}_1^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{p}_1\cdot\boldsymbol{p}_2^{\mathrm{T}} & \cdots & \boldsymbol{p}_1\cdot\boldsymbol{p}_L^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{p}_2\cdot\boldsymbol{p}_1^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{p}_2\cdot\boldsymbol{p}_2^{\mathrm{T}} & \cdots & \boldsymbol{p}_2\cdot\boldsymbol{p}_L^{\mathrm{T}}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ \boldsymbol{p}_L\cdot\boldsymbol{p}_1^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{p}_L\cdot\boldsymbol{p}_2^{\mathrm{T}} & \cdots & \boldsymbol{p}_L\cdot\boldsymbol{p}_L^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}c_1\\c_2\\\vdots\\c_L\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{p}_1\cdot\boldsymbol{p}_1^{\mathrm{T}}\\\boldsymbol{p}_2\cdot\boldsymbol{p}_2^{\mathrm{T}}\\\vdots\\\boldsymbol{p}_L\cdot\boldsymbol{p}_L^{\mathrm{T}}\end{bmatrix} \tag{4}$$

(5) 对c_k进行归一化处理,即:

$$c_k^*=\frac{c_k}{\sum_{k=1}^{L}c_k} \tag{5}$$

式中,c_k^*为归一化处理后第k种方法获得的权重线型组合时的系数。

由博弈论思想得到的因素或指标的综合权重$\boldsymbol{p}^*$:

$$\boldsymbol{p}^*=\sum c_k^*\cdot\boldsymbol{p}_k^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

2.3 优选过程

(1) 选取参考序列和比较序列。

参考序列是反映系统行为特征的数据序列,比较序列是由影响系统行为的因素组成的数据序列。一般自子序列中挑选出反映方案中系统最优的特征数据序列作为参考序列。

假设有m个待比较序列,每个序列中有n个评价指标,设$a_{ij}(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$为各待优选方案在某一评价指标下的值,则可构建比较序列矩阵$\boldsymbol{R}$:

$$\boldsymbol{R}=(a_{ij})_{m\times n}=\begin{bmatrix}a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n}\\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn}\end{bmatrix} \tag{7}$$

上述比较序列往往由于数据类型不同而无法实现数据间的可比性,需进行无量纲化处理。无量纲化的方法有很多,本模型采用极值法将指标分为正向指标和负向指标分别进行处理。

其中,正向指标采用式(8)处理[2]:

$$x_{ij}=\frac{a_{ij}-\min\limits_i a_{ij}}{\max\limits_i a_{ij}-\min\limits_i a_{ij}} \tag{8}$$

式中,x_{ij}为a_{ij}归一化处理后的无量纲化值,下同。

负向指标采用式(9)处理[2]:

$$x_{ij}=\frac{\max\limits_i a_{ij}-a_{ij}}{\max\limits_i a_{ij}-\min\limits_i a_{ij}} \tag{9}$$

则无量纲化后的比较序列矩阵$\boldsymbol{X}$如下:

$$\boldsymbol{X}=(x_{ij})_{m\times n}=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{10}$$

假设 x_{0j} 为各评价指标在各比较序列中的最优值，则构建参考序列矩阵 $\boldsymbol{X}_0$：

$$\boldsymbol{X}_0=[x_{01} \quad x_{02} \quad \cdots \quad x_{0n}] \tag{11}$$

(2) 计算灰色关联系数。

比较序列 $\boldsymbol{X}_i$ 和 $\boldsymbol{X}_0$ 中各指标灰色关联系数 r_{ij} 可采用式(12)计算得到：

$$r_{ij}=\frac{\min\{(x_{0j}-x_{ij})\}+\rho\max\{(x_{0j}-x_{ij})\}}{x_{0j}-x_{ij}+\rho\max\{(x_{0j}-x_{ij})\}} \tag{12}$$

式中，ρ 表示分辨系数，取值范围为 0～1，一般取中间值 0.5。

(4) 计算比较序列 $\boldsymbol{X}_i$ 的加权灰色关联度 R_{i0}。

$$R_{i0}=\sum p_j r_{ij} \tag{13}$$

式中，p_j 为待比较序列中第 j 个指标的权重，自 $\boldsymbol{p}^*$ 中取值。

2.4 优选结果

根据上述考虑了碳绩效相关指标的评价指标体系，利用优选模型，得到各备选方案的加权灰色关联度。加权灰色关联度越大，表明比较序列越接近参考序列，该比较序列即为最优方案。即加权灰色关联度最大的备选方案即为模型的优选结果。

3 实例验证

3.1 矿山背景资料

在 2019 年前后，建筑砂石料因供少于求而引发价格高企，为了保证建筑砂石料供应，各地出台了综合利用相关政策，为此前剥采比大于经济合理剥采比的矿山露天开采提供了可能性，部分金属、非金属矿矿业权在此背景下投放。随着房地产市场的持续低迷以及砂石供应量逐渐上升等因素的影响，砂石行业进入量价齐跌阶段，砂石骨料的价格逐渐进入理性区间。此前投放的采矿权陷入进退两难的境地，综合利用的建筑砂石料进入微利甚至负利区间，原有露天开采的可行性需要重新进行评估，若采用地下开采则面临开采成本高等问题，迫切需要能够从国家产业政策、安全以及经济性方面为矿山选择最优的开采方式和开采方法。

鄂西某玻璃用砂岩矿就是在上述背景下设立的，开采矿种为玻璃用砂岩。矿体主要赋存在二叠系梁山组(P_1l)石英砂岩中，上覆地层为二叠系栖霞组(P_1q)灰岩，即为矿体上盘围岩。上覆灰岩厚度整体呈现西薄东厚的特点，最薄处石英砂岩近似自然出露于地表，最厚处灰岩厚度超过 80 m。矿山地形及上覆灰岩情况如图 1 所示。矿山保有玻璃用砂岩资源量为 547 万 t，上覆灰岩资源量达 3 775.01 万 t。根据矿山所在地区相关产业政策，上述灰岩可进行综合利用，主要用作建筑石料，具有一定的经济价值。

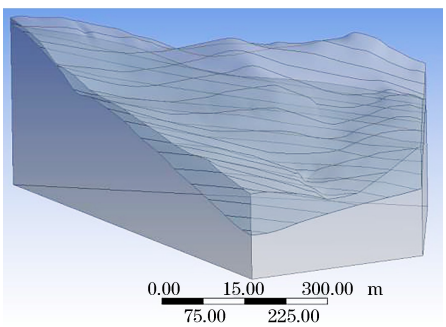


图 1 矿山三维模型

Fig.1 3D model of the mine

但是随着周边建筑石料市场的逐渐饱和，矿山所处片区建筑石料价格持续下降，综合利用上覆灰岩增加了玻璃用砂岩的开采成本。同时考虑到绿色矿山评价指标中关于碳排放核算的要求，矿山亟需寻求一种低碳、安全、经济、技术合理的采矿方案。

3.2 待优选方案

矿山上覆灰岩总量较大，根据矿山地形情况及玻璃用砂岩出露情况，参考专家和矿业权人的意见，矿山可选用的采矿方案有：阶段矿房嗣后充填开采(方案 1)，露天分层台阶式开采(方案 2)，露天分层台阶式开采(35%)和阶段矿房嗣后充填联合开采(方案 3)以及露天分层台阶式开采(60%)和阶段矿房嗣后充填联合开采(方案 4)。上述方案均建立在上覆灰岩可以综合利用的基础上。为了便于分析，联合开采方案 3 和方案 4 均为露天分层台阶式开采完毕后再进行地下开采，在露天采场和地下采场之间预留的保安矿柱厚度为 50 m。

3.3 选取评价指标及取值

根据前述模型，矿山开采方案优选的评价指标包括经济、技术、安全和碳绩效方面的指标。根据前述 4 个备选方案的特点，选取可采资源量 X_1、开采综合成本 X_2、建设投资 X_3、综合剥采比 X_4 作为经

济方面的指标,选取综合回采率 X_5、生产能力达成难易程度 X_6、矿石综合贫化率 X_7、综合生产效率 X_8、生产管理难易程度 X_9、生产连续性 X_{10}作为技术方面的指标,选取安全监管难易程度 X_{11}、地压管理容易程度 X_{12}、机械化程度 X_{13}作为安全方面的指标,选取直接碳排放量 X_{14}、间接碳排放量 X_{15}、平均碳绩效 X_{16}、增汇潜力 X_{17}、吨矿碳排放量 X_{18}作为碳绩效相关的指标。

各指标的取值主要结合专家意见和现场管理人员的经验进行确定,其中有以下几项需要说明:一是方案 2、方案 3 和方案 4 中露天开采综合利用灰岩的净利润摊入矿石的开采成本中;二是植被破坏区域(含采场及工业场地等)可通过生态复绿恢复至不低于基线水平,植被固碳能力恢复的时间按照 10 a 计算,期间固碳能力不计;三是增汇水平主要考虑通过树种改良等方式增加矿山碳汇能力,因而认为露天部分增汇水平较高。

一般而言,矿山生产能力是固定的,则可认为无论是露天开采、地下开采还是联合开采,其爆破、工程机械设备、外购电力等碳源的历年碳排放量在其服务期内(不含闭坑生态复绿期间)保持不变。矿山开采时所用机械设备较多,可分为凿岩设备、铲装设备、运输设备、通风设备等,包括潜孔钻机、凿岩台车、挖掘机、铲运机、自卸式卡车、空压机、风机等,除了通风设备外,其他设备主要为柴油设备。其中燃油、炸药、外购电力的碳排放因子以及植被破坏作为间接碳源的碳排放因子参照文献[6]选取,见表 2。

表 2 矿山碳排放因子

Table 2 Carbon emission factors of mines

碳源类型	碳排放因子
车用汽油	3.080 0 t/t
汽油/柴油	3.200 0 t/t
生物汽油	1.920 0 t/t
生物柴油	1.920 0 t/t
硝铵炸药	0.262 9 t/t
岩石硝铵炸药	0.233 5 t/t
2 号岩石硝铵炸药	0.222 2 t/t
外购电力(华中区域电网)	0.858 7 t/(MW·h)
破坏植被	95.000 0 t/hm^2

根据表 2 中的取值结果,结合矿山实际情况,构建各方案的评价指标体系,见表 3。

表 3 各方案评价指标

Table 3 Evaluation indices of each scheme

方案	X_1/万 t	X_2/(元/t)	X_3/万元	X_4	X_5/%	X_6	X_7/%	X_8/(万 t/a)	X_9
1	338.24	85.00	7 643.54	0.00	85	难	5.00	22.76	较难
2	385.25	54.00	5 326.69	7.01	95	易	0.00	25.96	较易
3	343.60	64.79	6 306.72	1.75	89	较难	2.79	22.77	难
4	350.56	52.50	5 583.63	2.64	92	较易	1.50	22.81	难

方案	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}/t	X_{15}/t	X_{16}/(万元/t)	X_{17}	X_{18}/($\times10^{-4}$ t)
1	连续	较难	难	一般	1 598.25	114.00	77 017.92	较低	5.06
2	较连续	易	易	高	58 465.02	3 984.42	6 277.54	高	162.10
3	较不连续	较难	较难	一般	14 444.94	1 550.01	14 202.45	一般	46.55
4	较不连续	较易	较易	较高	18 558.07	2 435.59	13 640.65	较高	59.89

将表 3 中各定性指标作定量化处理,并将净利润摊入开采综合成本 X_2 后更新指标,以便于利用优选模型进行方案的选择。根据专家的建议并充分参考矿山工作人员的意见,部分指标定量化后数值见表 4。

表 4 部分评价指标的定量化

Table 4 Quantification of some evaluation indicators

方案	X_2/(元/t)	X_6	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{17}
1	85.00	0.90	0.6	0.90	0.90	0.20	0.40	0.2
2	13.00	0.10	0.2	0.70	0.20	1.00	0.90	0.8
3	54.49	0.35	0.9	0.63	0.40	0.48	0.50	0.4
4	36.96	0.60	0.9	0.58	0.65	0.68	0.65	0.6

3.4 确定各指标的权重

通过专家打分法确定各指标的权重为 $\boldsymbol{p}_1$ = (0.072 0,0.064 0,0.0640,0.016 0,0.064 0,0.040 0,0.048 0,0.064 0,0.048 0,0.048 0,0.032 0,0.064 0,0.040 0,0.064 0,0.064 0,0.072 0,0.064 0,0.072 0)。采用客观赋权法即熵值法确定的权重为 $\boldsymbol{p}_2$ = (0.074 5,0.036 3,0.036 8,0.036 2,0.041 3,0.042 3,0.040 0,0.151 5,0.091 4,0.062 5,0.042 9,0.043 9,0.054 5,0.035 3,0.041 7,0.088 8,0.044 2,0.035 9)。利用博弈论思想,根据式(1)至式(5)得到的各指标的综合权重为 $\boldsymbol{p}^*$ = (0.074 0,0.041 4,0.041 8,

0.032 5，0.045 5，0.041 9，0.041 5，0.135 3，0.083 4，0.059 8，0.040 9，0.047 6，0.051 8，0.040 6，0.045 8，0.085 7，0.047 9，0.042 6)。

3.5 方案优选

根据式(7)至式(10)构建比较矩阵 $\boldsymbol{X}$，并根据式(11)构建参考序列矩阵 $\boldsymbol{X}_0$。

各备选方案的加权灰色关联度可根据式(12)和式(13)进行计算，结果见表5。

表5 各方案的灰色关联度

Table 5 Grey correlation of each scheme

备选方案	灰色关联度
1	0.549 3
2	0.798 3
3	0.456 3
4	0.491 9

3.6 优选结果

由表5可知，方案2的加权灰色关联度最大，则方案2即露天分层台阶式开采为该矿山的最优开采方案。矿山已确定采用露天分层台阶式开采并综合利用上覆灰岩资源，目前正在进行基建工作，且在绿色矿山建设方案中已将碳排放核算作为其绿色矿山考核的提升性指标之一。

3.7 结果讨论

为了进一步明确碳绩效相关指标在方案优选中所起作用，利用同样方法计算不考虑碳绩效相关指标时各方案的灰色关联度，计算结果见表6。

同样地，由表6可知，方案2即露天分层台阶式开采为该矿山的最优开采方案。

表6 不考虑碳绩效指标的方案灰色关联度

Table 6 Grey correlation of each scheme without the consideration of carbon performance indices

备选方案	灰色关联度
1	0.431 5
2	0.921 1
3	0.437 7
4	0.490 4

但是可以看出，考虑碳绩效指标时各方案的灰色关联度从大到小的排序为方案2、方案1、方案4、方案3，而不考虑碳绩效指标时各方案的灰色关联度从大到小的排序为方案2、方案4、方案3、方案1，可见，考虑了碳绩效相关指标后，各方案的灰色关联度排序发生了变化，方案1即阶段矿房嗣后充填开采的灰色关联度仅次于方案2即露天分层台阶式开采，且方案2的灰色关联度也有所降低，说明碳绩效相关指标在方案优选中发挥了作用。同时方案1的灰色关联度的提高说明碳绩效相关指标的引入符合未来低碳绿色开发的要求。矿山未来需要合理规划，加强管理，实施电能替代，降低化石燃料消耗的碳排放，同时加强矿山智能化建设，促进矿山生产系统节能降耗，此外还需发展节能减排技术，加强矿区碳汇开发，通过上述措施在生产过程中减少碳排放，提高矿山的平均碳绩效和增汇潜力。

4 结论

(1) 基于“双碳”目标，综合分析了矿山碳绩效相关指标，并将这些指标引入采矿方案优选的评价指标体系中。采用加权灰色关联分析法构建采矿方案的优选模型，并应用于鄂西某玻璃用砂岩矿山，得到该矿山最优的开采方案是露天分层台阶式开采方案(方案2)，与矿山实际采用的方案一致，可在实现矿产资源安全高效开发的同时兼顾低碳发展。

(2) 在矿山开采方案优选中引入碳绩效相关指标会影响优选结果，证明了碳绩效相关指标的引入对促进矿业低碳绿色发展具有重要的意义。

(3) 选取的采矿方案优选评价指标较多，未考虑相关指标之间的关联性和内在逻辑，未来可通过粗糙集等方法进行属性约简，以期得到更优的评价指标体系。

参考文献(References)：

[1] 刘志强.加快建立产品碳足迹管理体系[N].人民日报，2023-12-13(018).
LIU Zhiqiang. Speed up the establishment of a carbon footprint management system for products[N]. People's Daily，2023-12-13(018).

[2] 岳宗耀，范新川，原白云，等.“双碳”视角下煤炭企业及其生产矿井碳绩效评价体系与应用[J].矿业研究与开发，2024，44(1)：176-182.
YUE Zongyao，FAN Xinchuan，YUAN Baiyun，et al. Carbon performance evaluation system and application of coal enterprises and their production mines from the perspective of“double carbon”[J]. Mining Research and Development，2024，44(1)：176-182.

[3] 彭亚辉，彭述权.湖南矿业碳绩效影响因素研究[J].矿冶工程，2023，43(2)：160-163+170.
PENG Yahui，PENG Shuquan. Factors influencing carbon performance of Hunan's mining sectors[J]. Mining And Metallurgical Engineering，2023，43(2)：160-163+170.

[4] 彭仁东，韦波，李鑫，等.地下矿井煤炭碳排放量估算方法研究：以阜康矿区西部为例[J].煤田地质与勘探，2023，51(10)：9-18.
PENG Rendong，WEI Bo，LI Xin，et al. Methods for estimating carbon emissions from coals in underground mines：a case study of the western Fukang mining area[J]. Coal Geology & Exploration，2023，51(10)：9-18.

[5] 王猛,马如英,代旭光,等.煤矿区碳排放的确认和低碳绿色发展途径研究[J].煤田地质与勘探,2021,49(5):63-69.
WANG Meng, MA Ruying, DAI Xuguang, et al. Confirmation of carbon emissions in coal mining areas and research on low-carbon green development path[J]. Coal Geology & Exploration,2021,49(5):63-69.

[6] 裴明松,刘海,李小伟,等."双碳"视角下露天建材矿山碳排放周期研究[J].中国矿业,2024,33(2):36-42.
PEI Mingsong, LIU Hai, LI Xiaowei, et al. Study on the carbon emission cycle of open-pit building material mines from the perspective of the " dual carbon"[J]. China Mining Magazine,2024,33(2):36-42.

[7] 李海英,任凤玉,丁航行.双碳背景下铁矿崩落法低碳高效开采理论模型构建[J].化工矿物与加工,2023,52(5):18-23.
LI Haiying, REN Fengyu, DING Hangxing. Construction of theoretical model for low carbon and high efficient iron ore caving under the back ground of double carbon[J]. Industrial Minerals & Processing,2023,52(5):18-23.

[8] XU Xiaochuan, GU Xiaowei, WANG Qing, et al. Open pit limit optimization considering economic profit, ecological costs and social benefits[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2021(31):3847-3861.

[9] 郑玉蓉,王耀龙,张飞,等.露天煤矿碳排放核算及碳中和实现路径:以魏家峁煤矿为例[J].中国矿业,2024,33(5):80-88.
ZHENG Yurong, WANG Yaolong, ZHANG Fei, et al. Accounting of carbon emission in open-pit coal mines and path for carbon neutrality:taking Weijiamao coal mine as an example[J]. China Mining Magazine,2024,33(5):80-88.

[10] 乔兰,邓乃夫,马世纪,等.金属矿山井巷建设工程碳排放智能测算方法[J].工程科学学报,2024,46(6):1024-1040.
QIAO Lan, DENG Naifu, MA Shiji, et al. Intelligent carbon emission assessment method for metal mine shaft construction projects[J]. Chinese Journal of Engineering, 2024,46(6):1024-1040.

[11] 郭培培,於方,王膑,等.基于替代等值分析的矿山生态环境损害评估[J].环境科学与技术,2021,44(增刊 2):359-365.
GUO Peipei, YU Fang, WANG Bin, et al. Ecological-environmental damage assessment of mine based on alternative equivalent analysis[J]. Environmental Science & Technology,2021,44(Suppl.2):359-365.

[12] 武鹏杰,吴爱祥,王少勇,等.基于灰色关联分析的全尾砂静态絮凝沉降参数优化研究[J].矿业研究与开发,2022,42(9):116-121.
WU Pengjie, WU Aixiang, WANG Shaoyong, et al. Optimization of static flocculation settlement parameters of full tailings based on grey relational analysis[J]. Mining Research and Development,2022,42(9):116-121.

[13] 陈建宏,李欢,杨珊,等.基于灰色关联分析的湖南省有色金属采选业碳排放驱动因素及影响研究[J].有色金属工程,2019,9(10):109-116.
CHEN Jianhong, LI Huan, YANG Shan, et al. The research on drivers and impacts of carbon emissions based on the gray relational analysis in Hunan nonferrous metals mining and selection industry[J]. Nonferrous Metals Engineering,2019,9(10):109-116.

[14] 赵红泽,王宇新,李淋,等.基于灰色关联分析与 GA-BP 神经网络的拉斗铲生产能力预测[J].矿业科学学报,2020,5(1):58-66.
ZHAO Hongze, WANG Yuxin, LI Lin, et al, Production capacity prediction of dragline based on grey correlation analysis and GA-BP neural network[J]. Journal of Mining Science and Technology,2020,5(1):58-66.

[15] 孙利源.基于灰色关联分析和 PSO-SVM 的煤与瓦斯突出预测应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
SUN Liyuan. Application resrarch on the coal and gas outburst prediction based on gray correlation analysis and PSO-SVM[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2019.

[16] 雷昌奎,江莉娟,邓存宝,等.采空区煤自燃极限参数灰色关联分析及预测[J].煤矿安全,2022,53(9):113-121.
LEI Changkui, JIANG Lijuan, DENG Cunbao, et al. Grey relational analysis and prediction on limit parameters of coal spontaneous combustion in goaf[J]. Safety in Coal Mines, 2022,53(9):113-121.

[17] 李继清,李阳,黄可.基于 CRITIC-加权灰色关联分析的年度洪涝灾情评估模型及应用[J/OL].中国农村水利水电:1-18[2024-06-24].http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1419.TV.20240613.1310.002.html.
LI Jiqing, LI Yang, HUANG Ke. Annual flood disaster assessment model and application based on critical weighted grey correlation analysis[J/OL]. China Rural Water and Hydropower:1-18[2024-06-24].http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1419.TV.20240613.1310.002.html.

[18] 唐晓灵,林敏,刘雷磊.基于博弈论组合赋权-TOPSIS 法的采矿方案优选模型及应用[J].矿业研究与开发,2021,41(5):5-10.
TANG Xiaoling, LIN Min, LIU Leilei. Mining method optimization model and application based on game theory combined with weighting-GTOPSIS method[J]. Mining Research and Development,2021,41(5):5-10.

[19] 裴明松,刘林,李小伟,等.中低品位磷矿山废石处置方案优选[J].采矿技术,2023,23(1):205-209.
PEI Mingsong, LIU Lin, LI Xiaowei, et al. Optimization of phosphate waste rock disposal scheme for middle-low grade phosphate mines[J]. Mining Technology, 2023, 23(1): 205-209.

[20] 肖亮,张千俊.基于组合赋权-蛛网灰靶模型的岩爆等级评价[J].矿业研究与开发,2024,44(7):149-155.
XIAO Liang, ZHANG Qianjun. Evaluation of rock burst level based on combination weighting-cobweb grey target model[J]. Mining Research and Development,2024,44(7):149-155.