

矿山环境正效应开发利用适宜性评价理论与方法

武强^{1,2,3}, 张守成¹, 刘宏磊¹, 曾一凡^{1,2,3}

(1. 中国矿业大学(北京)国家煤矿水害防治工程技术研究中心, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)内蒙古研究院, 内蒙古鄂尔多斯 017000; 3. 矿山水防治与资源化利用国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100083)

摘要: 改革开放以来, 矿产资源开发为国家经济发展做出巨大贡献, 由于多数矿产资源具有不可再生性, 相当数量的矿山面临着资源枯竭、关闭。如何开发利用这些矿山所留下的矿山环境正效应资源将成为延长矿业产业链、保障能源绿色低碳发展、实现“碳达峰、碳中和”战略目标的重要支撑。为了科学开发矿山适宜的环境正效应资源, 以矿山环境正效应开发利用中的“资源、能源、科普文娱、生态碳汇”4类目标为研究对象, 基于矿山供给本体特征、特定市场需求及开发利用条件的“供给(Supply)-需求(Demand)-开发(Development)”(SDD)约束组合, 创建了包含6类一级约束、38个相应属性二级约束的矿山环境正效应开发利用评价约束体系; 根据开发利用目标导向的原则, 依据目标特征组建了18项实施项目单目标评价指标集; 构建了单目标适宜性评价模型, 引入三角模糊数确定指标权重, 并依据适宜性指数划定了“适宜、较适宜、较困难、困难”四类适宜性分级标准。此外, 鉴于矿山环境正效应开发利用系统复杂性, 剖析了各开发利用目标的逻辑关系, 提出了基于经济、生态、社会效益综合最优理念的矿山环境正效应开发利用多目标线性评价理论, 通过理想点法或单目标线性规划求解, 获取矿山环境正效应开发利用多目标效益综合最优解或最适宜集。最后, 从国家战略、社会需求、流域生态、正效应市场开发等角度, 展望了矿山环境正效应开发利用及其系统评价落地的重要意义。

关键词: 矿山环境; 环境正效应; 评价指标体系; 三角模糊数; 多目标评价

中图分类号: TD167; TD88 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)01-0114-17

Theory and method of suitable evaluation for mine environmental positive effects development and utilization

WU Qiang^{1,2,3}, ZHANG Shoucheng¹, LIU Honglei¹, ZENG Yifan^{1,2,3}

(1. National Engineering Research Center of Coal Mine Water Hazard Controlling, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. University of Mining and Technology (Beijing) Inner Mongolia Research Institute, Ordos 017000, China; 3. Key Laboratory of Mine Water Control and Resources Utilization, National Mine Safety Administration, Beijing 100083, China)

Abstract: Since the economic reform and opening up, the exploitation of mineral resources has made significant contributions to the economic development of China. However, due to the non-renewable nature of most mineral resources, a considerable number of mines are facing resource depletion and closure. How to develop and utilize the positive environmental effects left by these mines will become a crucial support for extending the mining industry value chain, ensuring green and low-carbon energy development, and achieving China's strategic goals of “carbon peak” and “carbon neutrality”. To

收稿日期: 2023-09-04 修回日期: 2023-12-18 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YH23.1094

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42027801); 内蒙古科技重大专项资助项目(2020ZD0020-4, 2020ZD0021)

作者简介: 武强(1959—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 中国工程院院士。E-mail: wuq@cumt.edu.cn

通讯作者: 张守成(1984—), 男, 山东莒县人, 副教授, 博士。E-mail: zsc@student.cumt.edu.cn

引用格式: 武强, 张守成, 刘宏磊, 等. 矿山环境正效应开发利用适宜性评价理论与方法[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 114-130.

WU Qiang, ZHANG Shoucheng, LIU Honglei, et al. Theory and method of suitable evaluation for mine environmental positive effects development and utilization[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 114-130.



移动阅读

scientifically develop environmentally positive resources in mines, this study focused on four categories of goals in the development and utilization of positive environmental effects in mines: resources, energy, popular science and entertainment, and ecological carbon sinks. Based on the “Supply - Demand - Development” (SDD) constraint combination of mining supply ontology characteristics, specific market demands, and development and utilization conditions, a comprehensive evaluation constraint system was developed, consisting of 6 first-level constraints and 38 second-level constraints of corresponding attributes. Following the principles of goal-oriented development and utilization, a single-goal evaluation index set with 18 implementation items was constructed. Also, a single-goal suitability evaluation model was built which introduced the triangular fuzzy numbers to determine the index weights, and classified suitability into “suitable, more suitable, more difficult and difficult” based on suitability indices. Furthermore, considering the systematic complexity of the positive effects development and utilization of the mine environment, the logical relationships between the development and utilization objectives were analyzed. In addition, a multi-goal linear evaluation theory was proposed based on the comprehensive optimal concept of economic, ecological and social benefits. By solving through the ideal point method or single-goal linear programming solution, the comprehensive optimal solution or the most suitable set for the positive effects development and utilization of the mine environment was obtained. Finally, from the perspectives of national strategy, social needs, watershed ecology, and positive effect market development, the study provides some insights into the significant implications of the implementation and systematic evaluation of mine environmental positive effects development and utilization.

Key words: mine environment; positive environmental effects; evaluation index system; triangular fuzzy numbers; multi-goal evaluation

依据能源资源禀赋,我国能源资源呈现富煤贫油少气的特点^[1]。随着能源结构的优化升级,煤炭作为我国能源的压舱石,虽然消费量占比呈逐年走低趋势,但近5 a 原煤产量不断增长,煤炭资源的消费总量并未降低^[2]。在矿业供给侧结构性改革背景下^[3],一些中小型矿山面临政策性闭矿,根据全国矿产资源规划(2016—2020年),矿山数量较规划基期减少3.3万座,其中小型矿山减少2.8万座,全国采矿权由49 063个降低为32 536个^[4],若这些矿山的直接关闭,不仅难以避免二次诱发矿山环境负效应^[5],而且会造成矿山环境正效应资源浪费^[6]。

“矿山环境正效应”的概念由笔者在文献^[5]提出,指出矿产资源开采对矿山生态环境产生作用,有些会对矿山环境产生如地质灾害、土地资源损毁、地下水均衡破坏、污染与浪费等负效应^[7-8],这些负效应在西部水资源匮乏、生态环境脆弱地区^[9-10]表现更为显著;但有些负效应在加以开发利用后可转化为地下采掘空间、地表土地资源、矿井水与热资源^[11]、矿山科学研究、文化科普、旅游观光及休闲娱乐立地资源等,这些正效应资源在科学系统规划和实施后,能够给矿山及周边区域发展带来良好的经济、生态及社会效益。从开发利用的具体途径来讲,分为储藏效应、资源效应等11类正效应,从开发利用的属性来看,归纳为资源、能源、科普文娱、生态服务4类正效应开发利用目标^[5, 12]。

自2016年以来,我国开始探索构建“开发式治理、市场化运作”的矿山环境修复治理^[13],不过修复治理和开发利用目标仍相对单一,比如侧重开发利用矿山残留资源,侧重开发利用矿山风、光、水等正效应资源,在注重单一资源开发利用的情况下,忽视了其他正效应资源开发利用,尚未形成系统的环境正效应开发利用理论体系。根据矿山空间(包含地上、地表、地下空间)、矿产、水等资源的多维属性,矿山环境正效应开发利用也应具备多维属性,如废弃矿山往往具有“地下、地表、地上”空间资源、残留矿产资源、水资源、生态服务资源^[14-15],某些特殊矿山还具备科普文娱资源,但在开发利用过程中未能充分研究、利用,造成了正效应资源的埋没。笔者在文献^[12]的研究基础上,开展正效应开发利用目标、子目标的适宜性评价,为遴选矿山环境正效应资源开发利用模式及项目提供评价理论和依据支撑。

1 科学内涵和关键路径

1.1 科学内涵

“矿山环境正效应开发利用”旨在充分挖掘矿山环境中地上空间资源、地表土地资源、地下空间资源、残留矿产资源、矿山水资源等,运用理学、工学、农学、经济学、管理学及交叉学科等学科门类的专业知识,统筹区域产业规划、矿山转型利用方向、服务终端范围等因素,科学、合理制定矿山正效应开发利用目标,

在治理矿山环境负效应的基础上,全面开展正效应的开发利用,使矿山环境正效应资源得以充分利用。其本质是通过科学合理规划、设计、实施、监测等手段,使矿区修复治理后的土地和环境所产生的价值高于矿区开采前的价值,变废弃矿山为金山银山,实现矿业资源开发和生态环境协调发展。

矿山环境正效应开发利用研究具有整体性、系统性、多维性、多向性、互适性、约束性 6 种特性,是在解析、总结国内、外矿山环境修复治理和开发利用案例的基础上,凝练提出的矿山环境正效应资源的开发利用理论与实践研究,是矿山环境保护与修复治理 3.0 阶段的必经之路^[5,12]。

1.2 关键路径

正效应开发利用目标可归纳为 4 类:资源正效应、能源正效应、科普文娱正效应、以及生态服务正效应^[12]。其中,根据正效应资源的属性,资源正效应开发利用目标可归纳为矿山土地、空间、残留资源 3 类子目标;根据开发利用能源的类型,能源正效应开发利用目标有电力能源和热力能源 2 类子目标;根据开发利用的方向和功能,科普文娱正效应开发利用目标分为科学研究和文旅娱乐开发 2 类子目标;根据土地恢复利用方向,生态服务正效应开发利用目标包含生态服务功能和碳汇服务功能 2 类子目标。各子目标又可分为不同的实施项目,矿山环境正效应开发利用目标、子目标、实施项目关系如图 1 所示。

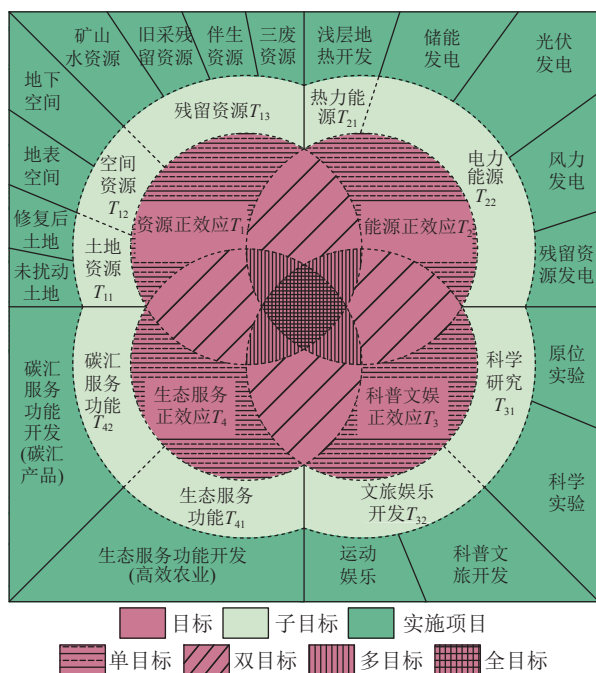


图 1 矿山环境正效应开发利用目标及实施项目关系

Fig.1 Relationship between goals and implementation projects for the development and utilization of positive effects in mine environments

矿山环境正效应开发利用的特性决定了开发利用目标规划时有多种组合,即单目标、双目标、多目标及全目标(图 1)。按照“目标导向→目标分解→实施项目划分→评价指标体系构建→单目标适宜性评价理论→实施项目集构建→多目标融合适宜性评价理论”的思路,厘定出适宜的子目标^[5,12],划定清晰的实施项目,构建科学、完善的评价指标体系,提出基于定量、定性计算的单目标评价模型,评价实施项目适宜性及排序,构建多向性的实施项目集,并基于经济、生态、社会效益的定量化模型,建立多目标评价理论,确定矿山环境正效应开发利用最优目标组合及实施项目集,为矿山环境正效应开发利用模式构成研究提供基础支撑(图 2)。图 2 中, T_n 为正效应开发利用 4 类目标, $n=1, 2, 3, 4$; T_{ni} 为正效应开发利用 4 类目标下的子目标; p_j 为正效应开发利用 4 类目标下的具体实施项目, $j=1, 2, \dots, 18$; I_j 为实施项目 p_j 单目标评价指标集。

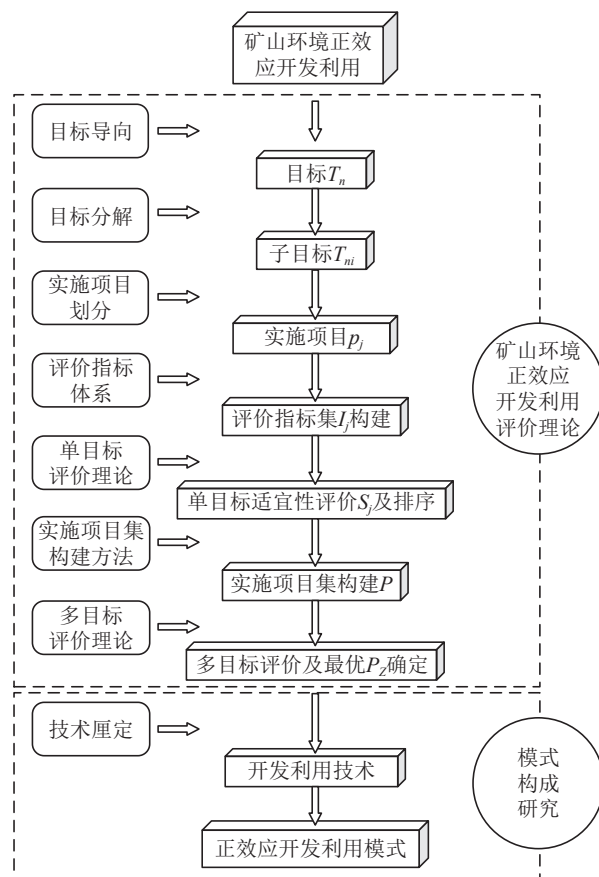


图 2 矿山环境正效应开发利用实施路线

Fig.2 Implementation route for the development and utilization of positive effects in mine environments

2 正效应开发利用评价指标体系

2.1 评价原理

依据矿山资源多维属性及开发利用的特性,厘定子目标对应的实施项目,并剖析开发利用各实施项目

约束因素, 提出针对实施项目适宜性评价的指标体系与标准, 形成单目标评价理论和多目标融合评价理论, 系统构建开发利用评价原理框架 (图 3), 为矿山环境正效应开发利用目标及实施项目的规划提供理论支撑。

2.2 “供给-需求-开发”约束条件

根据矿山环境正效应开发利用的内涵、关键路径

及特性, 约束矿山环境正效应开发利用目标及方向的因素应包括矿山禀赋、自然条件、地质环境、外在需求、开发技术以及经济可行性等^[16-17]。据此, 建立起基于“供给 (Supply)-需求 (Demand)-开发 (Development)”的 SDD 约束结构体系 (图 4), 共包含 6 类一级约束因素, 38 个二级约束因子。

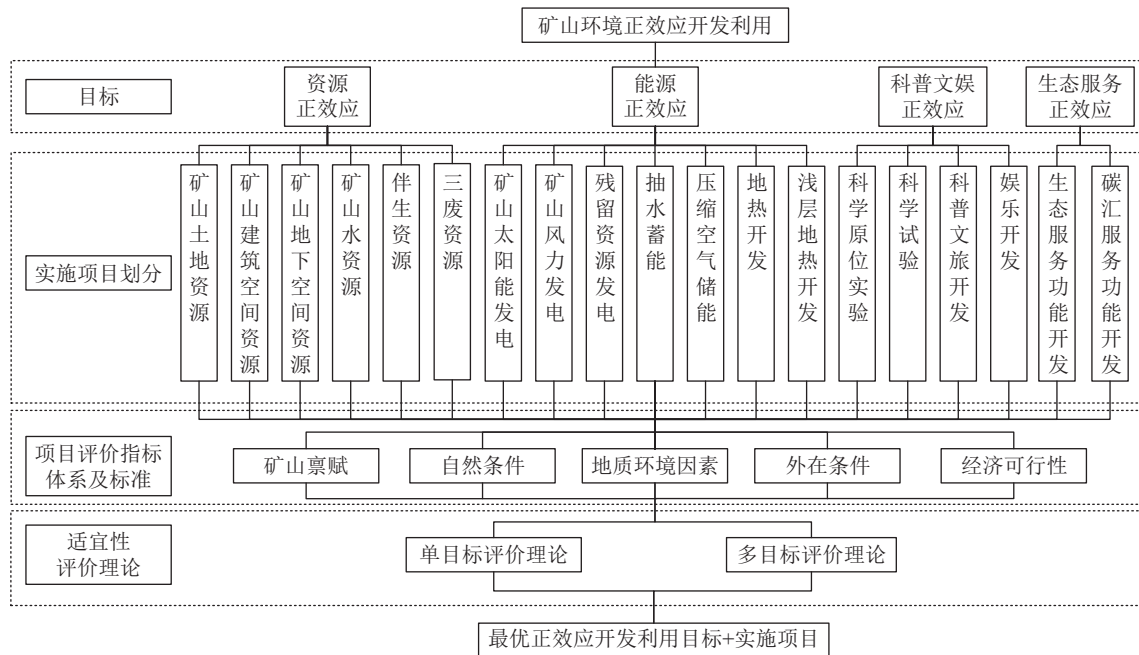


图3 矿山环境正效应开发利用评价原理框架

Fig.3 Framework of principles for evaluating the development and utilization of positive effects in mine environments

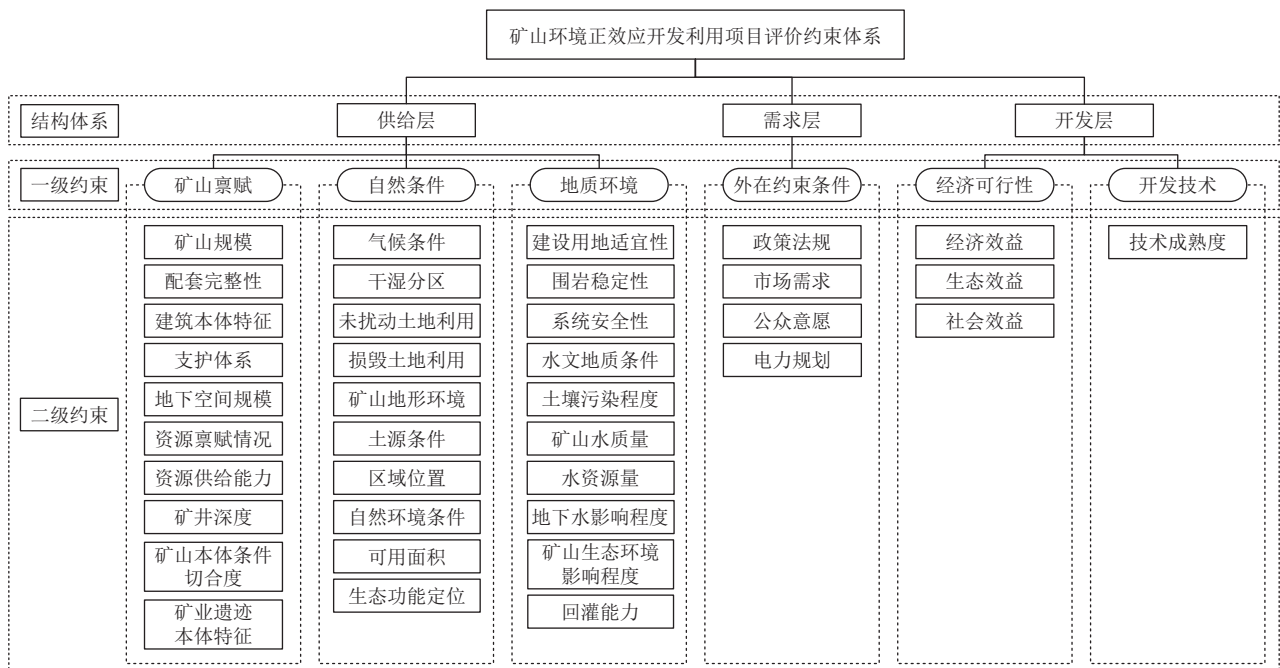


图4 矿山环境正效应开发利用目标评价约束体系

Fig.4 Target evaluation constraint system for the development and utilization of positive effects in mine environments

供给层是矿山环境正效应开发利用的基础,体现了矿山的本体条件,分为矿山禀赋、自然条件及地质环境 3 类约束条件,为后续矿山正效应开发利用实施项目提供本体供给评价。

需求层反映了矿山环境正效应开发外部因素约束,关系到实施项目完工后续矿山可持续发展,为后续矿山正效应开发利用实施项目提供需求评价。

开发层反映了矿山环境正效应开发技术和经济因素的约束,其中经济可行性是目标确定的关键约束条件之一,一般为综合效益最优是开发利用目标和实施项目评价的标准。此外,由于个别开发利用目标中技术的复杂程度决定了能否实施,例如矿山地下空间被用来储存核废料、二氧化碳和能源时,对项目开发实施提出了重大的技术挑战,因此技术因素也是确定

开发利用目标的约束条件之一。

2.3 正效应开发利用实施项目评价指标集

矿山环境正效应开发利用实施项目具有多目标、多选择性,为探究最优开发利用目标,需构建项目评价指标集 I ,厘定项目单目标评价体系。针对厘定的 18 类实施项目 (表 1),从评价约束体系中的矿山禀赋、自然条件、地质环境、外在约束条件及开发条件 5 类一级约束中的 35 个二级约束中构建了 62 个对应的评价指标 (表 2)。

2.4 实施项目单目标评价指标集构建

通过目标导向,分析矿山本体特征基础条件、外部需求情况及实施项目开发技术现状,确定实施项目可行性的主控因素,从评价指标集中构建 18 类实施项目单目标评价指标集 I_j (表 1)。

表 1 正效应开发利用实施项目单目标评价指标集 I_j

Table 1 Single-goal evaluation indicator set I_j for the implementation of positive effects development and utilization projects		
目标分类(T_i)	实施项目(p_j)	评价指标集 I_j
资源正效应	矿山土地资源	B ₀₁ 、B ₀₂ 、B ₂₁ 、B ₃₁ 、B ₄₁ 、B ₅₁ 、C ₄₁ 、D ₀₁ 、D ₂₁
	矿山建筑空间资源	A ₀₁ 、A ₁₁ 、A ₂₁ 、B ₆₁
	矿山地下空间资源 ^[19]	A ₀₁ 、A ₁₁ 、A ₃₁ 、B ₆₁ 、C ₁₁ 、C ₂₁
	矿山水资源利用(以农业为例)	B ₁₁ 、B ₂₁ 、C ₃₁ 、C ₅₂ 、C ₈₁
	伴生资源(以煤层气资源为例) ^[20]	A ₅₁ 、A ₅₂ 、A ₅₃ 、A ₅₄ 、A ₅₅
能源正效应	太阳能发电	B ₀₃ 、B ₀₄ 、C ₀₁ 、D ₀₁ 、D ₃₁
	风力发电	B ₀₅ 、C ₀₁ 、D ₀₁ 、D ₃₁
	残留资源(煤矸石)发电	A ₅₆ 、A ₆₁ 、D ₁₁
	抽水蓄能	A ₃₁ 、A ₄₁ 、A ₇₂ 、C ₀₁ 、C ₁₁ 、C ₆₁
	压缩空气储能	A ₃₁ 、A ₇₁ 、C ₁₁ 、C ₃₂
	地热开发	A ₅₇ 、A ₇₁ 、B ₆₁
	浅层地热开发	B ₆₁ 、C ₃₃ 、C ₅₁ 、C ₇₁ 、C ₇₂ 、C ₉₁ 、D ₀₁
科普文娱正效应	科学原位实验	A ₈₂ 、B ₆₁ 、C ₀₁ 、D ₁₄
	科学试验	A ₃₁ 、A ₈₁ 、C ₁₁ 、C ₂₁
	科普文旅开发	A ₉₁ 、A ₉₂ 、A ₉₃ 、A ₉₄ 、A ₉₅ 、B ₇₁ 、B ₇₄ 、D ₁₂
	娱乐开发	B ₇₂ 、B ₇₂ 、C ₀₁ 、D ₀₁
生态服务正效应	生态服务功能	A ₁₁ 、B ₆₁ 、B ₇₃ 、B ₈₁ 、D ₀₁ 、D ₁₃
	碳汇服务功能	B ₁₁ 、B ₅₂ 、B ₉₁ 、D ₀₁ 、D ₂₁

3 正效应开发利用单目标适宜性评价理论

3.1 模型构建

因矿山具有空间、资源、环境、技术、管理等多维属性,其开发利用目标存在多向性,构建开发利用单目标适宜性评价模型是矿山环境正效应开发利用目标筛选、决策的关键,是实现矿山资源开发与生态环境协调发展的基础。依据不同实施项目评价指标集

(表 1),根据适宜性评价指标取值标准 (表 3),定性、定量确定各指标分值 t_i ,选择权重确定方法并求取各评价指标权重 w_i ,计算矿山环境正效应开发利用实施项目适宜性指数 S :

$$S = \sum_{i=1}^n t_i w_i$$

(1)

式中, n 为实施项目 p_j 单目标评价指标集 I_j 中的评价指标数量, $i=1, 2, \cdots, n$ 。

表 2 矿山环境正效应开发项目评价指标集 I

Table 2 Evaluation indicator set I for the development of positive effects in mine environments

一级约束	二级约束	评价指标
矿山禀赋A	矿山规模A ₀	矿山生产建设规模A ₀₁
	配套完整性A ₁	道路、市政、电力、矿井运输A ₁₁
	建筑本体特征A ₂	房屋危险等级A ₂₁
	支护体系A ₃	地下支护体系A ₃₁
	地下空间规模A ₄	空间适用性A ₄₁
	资源禀赋情况A ₅	单煤厚(m)A ₅₁ 、含气量(m ³ /t)A ₅₂ 、煤层埋深(m)A ₅₃ 、煤层渗透率(10 ⁻¹⁵ m ²)A ₅₄ 、煤层压力状态A ₅₅ 、资源品质A ₅₆ 、地热田规模A ₅₇
	资源供给能力A ₆	供给能力A ₆₁
	矿井深度A ₇	矿井深度A ₇₁ 、上下地下水库高度差A ₇₂
	矿山本体条件切合度A ₈	环境、空间切合度A ₈₁ 、场地切合度A ₈₂
自然条件B	矿业遗迹本体特征A ₉	稀有性A ₉₁ 、典型性A ₉₂ 、科学价值A ₉₃ 、历史文化A ₉₄ 、完整性A ₉₅
	气候条件B ₀	年积温、年均降雨量B ₀₁ 、水源条件B ₀₂ 、太阳能资源B ₀₃ 、年平均风速B ₀₄ 、风功率密度B ₀₅
	干湿分区B ₁	干湿分区类型B ₁₁
	未扰动土地利用B ₂	未扰动土地利用现状分类B ₂₁
	损毁土地利用B ₃	损毁土地利用分类B ₃₁
	矿山地形环境现状B ₄	地形坡度B ₄₁
	土源条件B ₅	土壤保障率B ₅₁ 、土壤厚度B ₅₂
	区域位置B ₆	区域位置B ₆₁
	自然环境条件B ₇	科普文娱环境条件B ₇₁ 、娱乐开发环境条件B ₇₂ 、生态服务环境条件B ₇₃ 、开发条件B ₇₄
地质环境C	可用面积B ₈	可开发利用面积B ₈₁
	生态功能定位B ₉	生态功能定位B ₉₁
	建设用地适宜性C ₀	建设用地适宜性C ₀₁
	围岩稳定性 ^[18] C ₁	地质类型C ₁₁
	系统安全性C ₂	系统安全性C ₂₁
	水文地质条件C ₃	矿井水文地质类型C ₃₁ 、水文地质条件C ₃₂ 、水文地质类型C ₃₃
	土壤污染程度C ₄	污染程度C ₄₁
	矿山水质量C ₅	地下水水质C ₅₁ 、矿山水水质C ₅₂
	水资源量C ₆	矿井水资源量C ₆₁
外在约束D	地下水影响程度C ₇	地下水位年下降量C ₇₁ 、温差条件C ₇₂
	生态环境影响程度C ₈	生态环境影响程度C ₈₁
	回灌能力C ₉	回灌率C ₉₁
	政策法规D ₀	规划及产业政策D ₀₁
	市场需求D ₁	电力需求D ₁₁ 、发展前景D ₁₂ 、市场供需D ₁₃ 、实验场所需求D ₁₄
	公众意愿D ₂	意愿程度D ₂₁
	相关规划D ₃	电力消纳与并网D ₃₁
开发技术E	技术成熟度E ₁	技术成熟度E ₁₁

注：评价指标中有指标类似而代号不同的情形，其二级约束或评价依据不同。

3.2 单目标适宜性评价指标评分标准

遵循国家、行业、地方、行政法规等现有规范、文件，结合实施项目 SDD 约束条件，以定量为主、定性为辅的

评价原则，对实施项目评价指标进行等级划定及赋分，其中适宜性评价指标评分标准划分为 3 个等级和 4 个等级，由专业人员依据评分标准对研究矿山进行赋分(表 3)。

表 3 矿山环境正效应开发利用实施项目适宜性评价指标评分标准

Table 3 Scoring criteria for the suitability evaluation indicators of implementation projects for the development and utilization of positive effects in mine environments

适宜性评价指标	等级Ⅰ (80≤t _i ≤100)		等级Ⅱ (70≤t _i <80)		等级Ⅲ (60≤t _i <70)		等级Ⅳ (0≤t _i <60)		备注
	等级Ⅰ (80≤T _i ≤100)		等级Ⅱ (60≤T _i <80)		等级Ⅲ (0≤T _i <60)				
矿山生产建设规模A ₀₁	大型矿山			中型矿山		小型矿山			①
道路、市政、电力、 矿井运输A ₁₁	便利, 国道或省道; 市政、电力设施完善	交通较便利, 县道; 周边市政、电力设施完 善, 矿区内部分损毁		交通一般, 乡道; 市政、电力设施多损毁, 需重建		交通差, 道路、市政、电力设 施全部损毁, 修建成本高			
房屋危险等级A ₂₁	A级		B级		C级		D级		①②③
地下支护体系A ₃₁	钢筋混凝土浇筑		混凝土浇筑		锚喷支护		喷射混凝土支护		⑤⑩
空间适用性A ₄₁	上、下水库空间充足	上、下水库空间适宜		上、下水库空间基本适宜, 通过工程易切合空间要求		上、下水库空间不满足, 通过 工程亦很难满足空间要求			
单煤厚A ₅₁	气煤~无烟煤>5 m; 褐煤~长烟煤>10 m			气煤~无烟煤2~5 m; 褐煤~长烟煤5~10 m		气煤~无烟煤<2 m; 褐煤~长烟煤<5 m			⑥
含气量A ₅₂	气煤~无烟煤>10 m ³ /t; 褐煤~长烟煤>4 m ³ /t			气煤~无烟煤 4~10 m ³ /t; 褐煤~长烟煤2~4 m ³ /t		气煤~无烟煤<4 m ³ /t; 褐煤~长烟煤<2 m ³ /t			⑥
煤层埋深A ₅₃	气煤~无烟煤300~1 000 m 褐煤~长烟煤<500 m			气煤~无烟煤 1 000~1 500 m 褐煤~长烟煤 500~1 000 m		气煤~无烟煤>1 500 m 褐煤~长烟煤>100 m			⑥
煤层渗透率 A ₅₄	气煤~无烟煤>1×10 ⁻¹⁵ m ² ; 褐煤~长烟煤>10×10 ⁻¹⁵ m ²			气煤~无烟煤 0.1×10 ⁻¹⁵ m ² ~1×10 ⁻¹⁵ m ² ; 褐煤~长烟煤 5×10 ⁻¹⁵ m ² ~10×10 ⁻¹⁵ m ²		气煤~无烟煤<0.1×10 ⁻¹⁵ m ² ; 褐煤~长烟煤<5×10 ⁻¹⁵ m ²			⑥
煤层压力状态A ₅₅	气煤~无烟煤 正常~超压; 褐煤~长烟煤 正常			气煤~无烟煤 正常; 褐煤~长烟煤 欠压		气煤~无烟煤 欠压; 褐煤~长烟煤 欠压			⑥
资源品质A ₅₆	热值≥6 272 kJ/kg		5 000 kJ/kg<热值< 6 272 kJ/kg		3 000 kJ/kg<热值< 5 000 kJ/kg		热值<3 000 kJ/kg		⑦
地热田规模A ₅₇	大型、中型、小型满足或基本达到开发要求; 小型不满足开发要求								①
供给能力A ₆₁	依托特大型煤矿企业 或供应充足		依托大型煤矿企业或供应 满足发电需求		依托中型煤矿企业 或供应基本满足发电 需求		供应不能满足发电需求		
矿井深度A ₇₁	<1 000 m		1 000~2 000 m		2 000~3 000 m		>3 000 m		⑧
上下地下水 高度差A ₇₂	800~1 200 m		500~800 m		1 200~1 500 m		其他深度		⑨
环境、空间 切合度A ₈₁	环境、空间切合试验要求, 且无备选场区		较切合, 通过简单工程措 施可满足试验要求, 且无 备选场区		切合度一般, 通过工 程可基本满足试验要 求, 多个备选场区		不切合, 通过工程亦很难满足 试验要求; 有多个备选场区		
场地切合度A ₈₂	场地高度切合		场地切合, 有少数备选场区		基本切合, 备选场地较多		场地不切合		
稀有性A ₉₁	世界罕见或极特殊		世界少有或国内 罕见的遗迹		国内少有的遗迹		省内常见		⑩⑪
典型性(矿业类型、 规模、内容等)A ₉₂	全球或大区域代表性		全国代表性		地区代表性		不具有地区代表性		⑩⑪
科学价值A ₉₃	极高的科考、科普价值		国内最高科技水平, 很高 的科考、科普价值		国内先进科技水平, 较高科考、科普价值		国内科技水平一般, 科考、科普价值一般		⑩⑪
历史文化A ₉₄	当时世界最高科技水平, 极高的历史、文化价值, 在 矿业发展史上具有 极其重要意义		很高的历史、文化价值, 在国内矿业发展史上 具有很重要意义		具有较高的历史、文 化价值, 在地区矿业 发展史上具有较重要 意义		历史、文化价值普通, 在地区 矿业发展史上具有普遍性		⑩⑪
完整性(矿业遗迹)A ₉₅	矿业遗迹类型、内容、设施 非常系统、完整		矿业遗迹类型、内容、设 施系统、完整		矿业遗迹类型、内容 设施较系统、完整		矿业遗迹类型、内容、 设施单一, 保存较少		⑩⑪

续表

适宜性评价指标	等级 I (80≤ <i>t_i</i> ≤100)	等级 II (70≤ <i>t_i</i> <80)	等级 III (60≤ <i>t_i</i> <70)	等级 IV (0≤ <i>t_i</i> <60)	备注
	等级 I (80≤ <i>T_i</i> ≤100)	等级 II (60≤ <i>T_i</i> <80)	等级 III (0≤ <i>T_i</i> <60)		
≥年积温、年均 降雨量B ₀₁	≥10℃年积温≥1 800℃；且 年均降雨量≥400 mm	≥10℃年积温≥1 800℃；且 年均降雨量<400 mm		≥10℃年积温<1 800℃；且 年均降雨量<400 mm	⑫
水源条件B ₀₂	区内有地表水源	附近有地表水源，通过 修建灌溉与排水工程满 足水源要求	无地表水源， 修建灌排工程 能够满足部分 耕地水源	无地表水源，修建灌排工程 很难达到水源要求	
太阳能资源B ₀₃	A级	B级	比C级	D级	⑬
年平均风速B ₀₄	≤3级	≤4级	≤5级	>5级	⑬
风功率密度B ₀₅	风功率密度等级为 5、6、7级	风功率密度等级为4级	风功率密度等 级为3级	风功率密度等级<3级	⑭
干湿分区类型B ₁₁	湿润区	半湿润区	半干旱区	干旱区	⑮
未扰动土地利用分类B ₂₁	I级：未利用地，低效利用、损毁和退化的非耕地(宜耕未利用地)； II级：旱地；III级：水浇地；IV级：水田				⑯
损毁土地利用分类B ₃₁	I级：未利用地、其他草地、裸地等宜耕未利用地、工矿用地等；II级：草地；III级：林地；IV级：耕地				⑯
地形坡度B ₄₁	0°～6°	6°～15°	15°～25°	>25°	⑫
土壤保障率B ₅₁	土壤保障率100%	土壤保障率80%～100%	土壤保障率 50%～80%	土壤保障率小于50%	⑫
(矿区内)土壤厚度B ₅₂	20 cm≤覆土厚度≤40 cm	覆土厚度不足20 cm，通过土壤重构、 人造土壤满足覆土		40 cm≤覆土厚度≤60 cm	⑫
区域位置B ₆₁	城区型	城郊型	乡镇型	旷野型	
科普文娱环境条件B ₇₁	无三废污染及地质灾害隐患；遗迹景观资源丰富、优美，或部分资源价值 高；矿区周边环境质量好	局部存在三废污染及地质灾 害隐患；遗迹景观资源较丰 富、优美，或部分资源价值 较高；矿区周边环境质量中 等		存在大量的三废污染及地质灾害隐患； 遗迹景观及其他景观资源一般，或资源 价值一般；矿区周边环境质量一般	⑩⑪
娱乐开发环境条件B ₇₂	无三废污染及地质灾害隐患；矿区周 边环境质量优，景观资源丰富、优美	局部存在三废污染及地质灾 害隐患；矿区周边环境质量 中等，景观较丰富优美		存在大量三废污染及地质灾害隐患；矿 区周边环境质量一般，景观一般	⑩⑪
生态服务环境条件B ₇₃	自然生态基本恢复；无三废污染及地 质灾害隐患；矿区周边环境质量优	自然生态已初步恢复，局部 存在三废污染及地质灾害隐 患；矿区周边环境质量中等		自然生态尚未恢复，存在大量三废污染 及地质灾害隐患；环境质量一般	⑩⑪
开发条件B ₇₄	场地切合开发要求；地理区位优势(距 离城市20 km以内)；交通便利(一级公 路)；矿区内与周边市政、 电力设施完善	场地基本切合开发要求；地 理区位优势较好(距城市50 km以 内)；交通较便利(二、三级 公路)；周边市政、电力设施 较完善；矿区市政、电力设 施需重建		场地切合娱乐开发要求一般；地理 区位优势差(距离城市120 km以内)； 交通条件一般；矿区及周边市政、电力 设施全部损毁，修建成本高	⑰
可开发利用面积B ₈₁	省级现代农业 产业园面积	市级现代农业 产业园面积	县级	其他	
生态功能定位B ₉₁	防风固沙、土壤保持、水源涵养极重要区、林产品提供； 防风固沙、土壤保持、水源涵养重要区；洪水调蓄；生物多样性				⑱
建设用地适宜性C ₀₁	建设用地适宜	建设用地基本适宜	局部建设用 地适宜性差	建设用地适宜性差	⑲
a井工煤矿、b有色金属 地质类型C ₁₁	a地质构造简单；顶底板平整，顶 板完整性好，裂隙不发育；岩层 倾角8°以下；b岩体质量级别I级	a地质构造中等；顶底 板较平整，局部凹凸不 平，顶板较完整，裂隙 不发育；岩层倾角 8°～25°(含8°)；b岩体 质量级别II级	a顶底板凹凸 不平，顶板裂 隙比较发育； 岩层倾角 25°～45°(含 25°)；b岩体 质量级别III级	a顶底板凹凸不平；顶板岩性松软、 破碎，裂隙发育；岩层倾角≥45°； b岩体质量级别IV、V级	⑳㉑㉒

续表

适宜性评价指标	等级Ⅰ (80≤t _i ≤100)	等级Ⅱ (70≤t _i <80)	等级Ⅲ (60≤t _i <70)	等级Ⅳ (0≤t _i <60)	备注
	等级Ⅰ (80≤T _i ≤100)	等级Ⅱ (60≤T _i <80)	等级Ⅲ (0≤T _i <60)		
系统安全性C ₂₁	无有害物质； 水文地质条件简单	含有害物质，简单治理 可以永久消除；水文地 质条件中等，简单防水	有害物质性低使用中需专业 处理；水文地质类型复杂	有害物质中等或高，防治难度 大水文地质类型极复杂	⑳㉔
矿井水文地质类型C ₃₁	极复杂	复杂	中等	简单	㉔
水文地质条件C ₃₂	简单		中等	复杂、极复杂	㉔
水文地质类型C ₃₃	极复杂	复杂	中等	简单	㉔
污染程度C ₄₁	无污染	轻度污染	中度污染	重度污染	㉔
地下水水质C ₅₁	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	其他	㉔
矿山水质C ₅₂	地下水水质属Ⅰ、Ⅱ、 Ⅲ类	地下水水质属Ⅳ类	通过常规水处理，满足Ⅰ、 Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类水质	水质污染严重，通过处理仍达 不到Ⅳ类水	㉔㉔
矿井水资源量C ₆₁	适宜	丰沛	一般	紧缺	
地下水位年下降量C ₇₁	< 0.8 m	0.8～1.1 m	1.1～1.5 m	> 1.5 m	㉔
温差条件C ₇₂	完全符合开发利用温差	基本符合开发利用温差	基本不符合开发利用温差	不符合开发利用温差	㉔
生态环境影响程度C ₈₁	强	中	弱	无	㉔
回灌率C ₉₁	> 80%	60%～80%	50%～60%	< 50%	㉔
规划及产业政策D ₀₁	符合生态、国土空间 规划和产业政策		局部场区不符合规划及产业政策	多数场区不符合相关产业政策	调查
电力需求D ₁₁	本区电力需求旺盛		本区电力基本满足， 外区域送电缺口大	区域基本无电力增加需求	
发展前景D ₁₂	巨大潜力	强劲	稳定	激烈竞争	
市场供需D ₁₃	巨大需求	增长型需求	供需饱和	激烈竞争	
实验场所需求D ₁₄	迫切需求，且无可替代	非紧迫，有规划	非紧迫，有多处场地选择	无需求	
意愿程度D ₂₁	农业意愿强烈	农业意愿较好	农业意愿一般	无农业意愿	
电力消纳与并网D ₃₁	完全具备消纳和接入电网的条件		基本具备	不具备消纳和接入电网的条件	
技术成熟度E ₁₁	市场成熟	高度成熟	基本成熟	不成熟	

注:① 矿山生产建设规模分类一览表[国土资发[2004]208号];② GB50144—2019《工业建筑可靠性鉴定标准》;③ JGJ125—2016《危险房屋鉴定标准》;④ GB50292—2015《民用建筑可靠性鉴定标准》;⑤ GB50915—2013《有色金属矿山井巷工程设计规范》;⑥ DZ/T0378—2021《煤层气资源评价规范》;⑦《关于加强煤矿发电项目规划和建设管理工作的通知》发改办能源[2004]864号;⑧ DB37/T 4253—2021《地热资源勘查技术规程》;⑨ 张春生,姜忠见.《抽水蓄能电站设计》,2012;⑩ 国家矿山公园评审指标赋分说明;⑪ 国家地质公园评审指标赋分说明;⑫ 耕地后备资源调查评价技术规程;⑬ GB/T37526—2019《太阳能资源评估方法》;⑭ GB/T18710—2002《风电场风能资源评估方法》;⑮ 政府网(https://www.gov.cn/guoqing/2005-09/13/content_2582628.htm);⑯ GB/T21010—2017《土地利用现状分类》;⑰《旅游景区质量等级的评定与划分》国家标准评定细则;⑱ 关于印发《全国生态功能区划(修编版)》的公告[2015年 第61号];⑲ DZ/T0286—2015《地质灾害危险性评估规范》;⑳ 煤矿地质工作规定;㉑ GB51060—2014《有色金属矿山水文地质勘探规范》;㉒ 谢和平《特殊地下空间的开发利用》;㉓ GB50771—2012《有色金属采矿设计规范》;㉔《煤矿防治水细则》,2018;㉕ GB/T14848—2017《地下水质量标准》;㉖ GB 5084—2021《农田灌溉水质标准》;㉗ DZ/T 0225—2009《浅层地热能勘查评价规范》;㉘ GB/T14848—2017《浅层地热能勘查评价技术规范》;㉙ HJ19—2022《环境影响评价技术导则——生态影响》;㉚ GB/T50511—2022《煤矿井巷工程施工标准》。

3.3 评价指标权重

实施项目适宜性评价指标集 I_j 构成指标数量不同,且各指标对项目适宜性的影响程度不一。由于矿山环境正效应开发利用受矿山禀赋条件、区域自然条件、地质环境条件、外在约束条件、开发技术条件的多种限制因素影响,且不同类型矿山评价指标影响程度具有模糊性,因此在计算权重过程中,引入三角模糊数表示指标权重的评价结果,构建模糊判断矩阵,将主观判断的模糊语言评价映射为定量的三角模糊

数以计算各指标权重系数^[21]。设 $N=(l,m,u)$, 其中 $u \geq m \geq l$, 其隶属函数为

$$\mu_N(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l}, & l \leq x \leq m \\ \frac{x-u}{m-u}, & m < x \leq u \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (2)$$

其中, l 、 m 、 u 分别为三角模糊数 N 的下限值、中值和上限制, l 、 u 用来表示模糊度, $u-l$ 差值越大, 则判断

的 x 值模糊度越大^[22]。运用三角模糊数对《Satty9 级标度法》进行改善, 构建模糊标度, 克服两两指标主观评判的模糊性。计算步骤如下:

(1) 构建实施项目评价指标集, 见表 2。

(2) 构建模糊标度。对指标集中的两两指标进行主观对比, 评判采用“同等重要”“稍微重要”“较为重要”“强烈重要”“绝对重要”等定性语言描述, 同时依据模糊标度表, 映射得到三角模糊数和三角模糊倒数, 见表 4。

表 4 模糊标度及其映射表
Table 4 Fuzzy scale and its mapping table

对比等级	描述语言	三角模糊数 (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})	三角模糊数倒数 ($1/u_{ij}, 1/m_{ij}, 1/l_{ij}$)
1	同等重要	(1,1,2)	(1/2,1,1)
3	稍微重要	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)
5	较为重要	(4,5,6)	(1/6,1/5,1/4)
7	强烈重要	(6,7,8)	(1/8,1/7,1/6)
9	绝对重要	(8,9,9)	(1/9,1/9,1/8)
2	介于同等与稍微之间	(1,2,3)	(1/3,1/2,1)
4	介于稍微与明显之间	(3,4,5)	(1/5,1/4,1/3)
6	介于明显与强烈之间	(5,6,7)	(1/7,1/6,1/5)
8	介于强烈与绝对之间	(7,8,9)	(1/9,1/8,1/7)

(3) 构建模糊判断矩阵。评价人员对实施项目评价指标集中 n 个指标因素两两依次主观对比判断, 得到 $n \times n$ 模糊判断矩阵 A , 即

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}, i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

式中, $a_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ 、 $a_{ji} = (1/u_{ij}, 1/m_{ij}, 1/l_{ij})$ 为三角模糊数值, 具体数值根据表 4 确定。

(4) 模糊判断矩阵一致性检验。对于模糊判断矩阵 A 取其三角模糊数中值构成的矩阵 A_m 进行一致性检验, 当 A_m 满足一致性条件时, 相应的模糊判断矩阵 A 也满足一致性条件。设矩阵 A_m 的最大特征根 λ_{\max} , 则模糊判断矩阵一致性比例 C_R 为

$$C_R = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1)I_R} \quad (4)$$

其中, I_R 为相容性指标修正值, 与矩阵 A_m 维数有关, 可参考表 5。若 $C_R \leq 0.1$, 可认定为模糊判断矩阵满足一致性要求, 否则需评价人员重新评判。

表 5 相容性指标修正值 I_R

Table 5 Compatibility indicator adjustment value

维数								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
—	—	0.58	0.96	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

(5) 确定模糊权重。由于模糊判断矩阵考虑了主观判断模糊性, 因此评价效率和准确度得到了提高, 若有 T 位评价专家进行评判, 其判断矩阵 $A^T = (a_{ij}^T)_{n \times n} = [(l_{ij}^T, m_{ij}^T, u_{ij}^T)]_{n \times n}$, 取平均值, 常见的平均值有算数平均值、加权平均值、几何平均值等, 平均值选取取决于专家权重, 本文假定为专家权重基本一致, 取算数平均值, 即

$$\bar{A} = (\bar{a}_{ij})_{n \times n} = \left(\frac{1}{T} \otimes \sum_{t=1}^T a_{ij}^t \right)_{n \times n} = [(\bar{l}_{ij}, \bar{m}_{ij}, \bar{u}_{ij})]_{n \times n} \quad (5)$$

式中, a_{ij}^t 为第 t 位专家对 i, j 指标主观对比评判得到的三角模糊数。

专家评分平均值后, 得到模糊判断矩阵 \bar{A} , 选取几何平均值计算每行指标权重模糊数 \bar{a}_r :

$$\bar{a}_r = (\bar{l}_r, \bar{m}_r, \bar{u}_r) = \left(\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n l_{rj}}, \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n m_{rj}}, \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n u_{rj}} \right) \quad (6)$$

计算每行指标权重模糊数 \bar{a}_r 中值归一化模糊权重值 w_i , 即

$$w_i = (l_i, m_i, u_i) = \left(\frac{\bar{l}_r}{\sum_{r=1}^n \bar{u}_r}, \frac{\bar{m}_r}{\sum_{r=1}^n \bar{m}_r}, \frac{\bar{u}_r}{\sum_{r=1}^n \bar{l}_r} \right) \quad (7)$$

(5) 权重去模糊化。对 w_i 进行去模糊化, 使三角模糊数转换为标准权重值 $S(w_i)$, 去模糊化公式为

$$S(w_i) = \frac{1}{2}[(1-\alpha)l_i + m_i + \alpha u_i] \quad (8)$$

α 的取值由评价问题环境及评价专家偏好因素决定, 当 $\alpha=0.5$ 时, 表示评价中立型, 当 $\alpha \neq 0.5$ 时, 表示评价保守型或激进型。

(6) 标准权重归一化。对 $S(w_i)$ 进行归一化处理, 计算每个评价指标的最终权重 $w_{F,i}$, 公式为

$$w_{F,i} = \frac{S(w_i)}{\sum_{i=1}^n S(w_i)} \quad (9)$$

3.4 单目标实施项目适宜性评价

根据矿山本体供给、实施项目外部需求及开发技术约束条件, 依据适宜性评价指标评分标准(表 4), 对矿山环境正效应开发利用单目标实施项目适宜性评

价指标评分;运用三角模糊数确定各评价指标权重;通过评价模型式(1)计算实施项目适宜性得分,按照表6评定单目标实施项目适宜程度,并依据适宜分值高低进行适宜性排序。

表 6 正效应开发利用单目标实施项目适宜程度分级

Table 6 Grading of suitability level for single-goal implementation projects in the development and utilization of mine environmental positive effects

等级I	等级 II	等级 III	等级IV
$80 \leq S \leq 100$	$70 \leq S < 80$	$60 \leq S < 70$	$0 \leq S < 60$
适宜	较适宜	较困难	困难

4 正效应开发利用多目标评价理论

矿山环境资源多维属性,决定矿山环境正效应开发利用目标的多目标性;科学、合理的多目标融合评价理论是矿山环境正效应充分利用的关键,它是建立在单目标适宜性评价结果上,对满足正效应开发利用“适宜”和“较适宜”的实施项目集中具备组合开发的项目进行组合,结合矿山开发层约束体系中的经济、生态及社会效益,构建多目标线性规划效益模型,通过求解约束条件下的目标函数最大化,确定矿山环境正效应开发利用最优目标及实施项目组合(图5)。

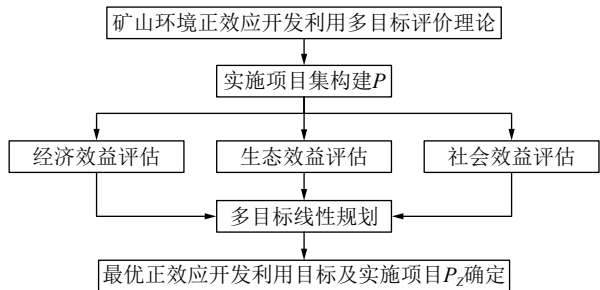


图 5 矿山环境正效应开发利用多目标评价理论框架

Fig.5 Framework of multi-goals evaluation theory for the development and utilization of positive effects in mine environments

4.1 实施项目集的构建

(1) 实施项目维度划分。依据实施项目空间维度,对 18 类实施项目进行划分(表7)。

(2) 实施项目集构建。根据单目标适宜性评价结果,对“适宜”和“较适宜”的实施项目进行汇总,依据项目实施逻辑相互关系(表8),构建实施项目集 $P=\{P_n\}$, 其中 $P_n=\{p_j\}$, $j=1,2,\cdots,18$, P_n 为实施项目集子集(子项目 p_j 存在互斥关系时候的不同子项目的组合集,即 P_n 中不能含有互斥关系的 p_j 子项目), $\{p_j\}$ 为满足项目实施逻辑关系且单目标适宜性评价为“适宜”和“较适宜”的 p_j 子项目集合。

表 7 矿山环境正效应开发利用实施项目 p_j 维度划分

Table 7 Dimension division of implementation project p_j in multi-goals evaluation theory for the development and utilization of positive effects in mine environments

地表空间维度	地表+地下空间维度	地下空间维度
矿山土地资源 p_1	矿山水资源利用 p_8	矿山地下空间资源 p_{15}
矿山建筑空间资源 p_2	伴生资源 p_9	地热开发 p_{16}
太阳能发电 p_3	残留资源 p_{10}	浅层地热开发 p_{17}
风力发电 p_4	抽水蓄能 p_{11}	压缩空气储能 p_{18}
娱乐开发 p_5	科学原位实验 p_{12}	
生态服务功能 p_6	科学试验 p_{13}	
碳汇服务功能 p_7	科普文旅开发 p_{14}	

表 8 项目实施逻辑关系

Table 8 Logical relationship of project implementation

序号	项目关系	适用条件
1	预备关系	项目A、B之间为存在预备关系
2	互斥关系	A、B项目互斥,只能选其一
3	独立关系	项目A、B间相互独立
4	函数关系	项目A、B间满足某种函数

4.2 经济效益评估

经济效益可概括为直接经济效益和间接经济效益,直接经济效益一般为直接产品产生的效益,间接经济效益是除项目直接产品产生的效益后的对社会产生的其他经济效益^[23],构建实施项目产品经济效益与规划面积的效益评估算式(表9)。

4.3 生态效益评估

矿山环境治理生态评估一般从治理措施与生态问题的关联性、生态胁迫因子消除程度、生态系统质量改善及生态系统服务提升等方面内容进行评价,对此笔者选取了植被覆盖度增加、土地石漠化/荒漠化/盐渍化面积减少、水源涵养、水土保持、防风固沙、洪水调蓄、固碳释氧、生物多样性 8 个方面指标并进行定量评估,构建实施项目生态效益与规划面积的效益评估算式(表10)。其中治理措施费用已作为经济效益包含的项目实施投资费用(C_p)中,生态效益评估计算中不再扣除 C_p 费用。

4.4 社会效益评估

矿山环境正效应开发利用项目社会效益具有潜在性、间接性、长久性等特点,与经济效益、生态效益紧密关联、相互依存^[30],其评估内容一般包括新增就业岗位、人居环境改善、本地居民参与度、满意度、后期管护及可持续影响,其内涵是项目对当地社会生产、

表 9 经济效益评估计算

Table 9 Economic benefit evaluation calculation table

算式	适用范围
① $B_{E,1} = \left\{ \sum_{a=1}^n \sum_{j=1}^m [(V_{Saj} - C_{Saj})S_j(1+i)^{1-a}] - \sum_{j=1}^m c_{pj}S_j \right\} \left/ \left(n \sum_{j=1}^m S_j \right) \right.$	农用地直接产品农牧产品
② $B_{E,2} = \left[\sum_{a=1}^n (v_{Ma} - c_{Ma})V_a(1+i)^{1-a} - (c_p + c_r)V_a \right] / (nS_m)$	残留矿产资源
③ $B_{E,3} = \left[\sum_{a=1}^n (e_a - c_a)S_e(1+i)^{1-a} - c_pS_e \right] / (nS_e)$	电力能源
④ $B_{E,4} = (v_s - c_s)V_s/S_s$	地表、地下空间
⑤ $B_{E,5} = (V_r c_r - C_p)/S_r$	水资源储备库
⑥ $B_{E,6} = \left[\sum_{a=1}^n (t_{ae} - c_{ae})p_a S(1+i)^{1-a} - c_p S \right] / (nS)$	文旅娱乐、生态服务功能开发
⑦ $B_{E,7} = \sum_j = 1^m S_j(P_j - c_{pj}) \left/ \sum_j = 1^m S_j \right.$	占补平衡、增减挂钩
⑧ $B_{E,8} = \sum_{j=1}^m f_j S_j(P_j - c_{pj}) \left/ \sum_{j=1}^m S_j \right.$	土地价值、收益提升
⑨ $B_{E,9} = \left[\sum_{a=1}^n \frac{Q_a \delta m}{qh} p_a (1+i)^{1-a} - C_p \right] / (nS_g)$	地热资源 ^[24]
⑩ $B_{E,10} = \left[\sum_{a=1}^n (t_a e_{sa} + a_{na} w_{ea} + p_{na} w_{pa})(1+i)^{1-a} - C_p \right] / (nS_s)$	科学原位实验、科学试验 ^[25-26]

注: $B_{E,i}$ 为单位产品平均每年产生的经济效益; ① n 为计算年限; m 为作物类型数量; V_{Saj} 为 j 类作物第 a 年单位面积产值; C_{Saj} 为 j 类作物第 a 年单位面积产值消耗成本; S_j 为 j 类作物种植面积; i 为年利率; c_{pj} 为单位面积 j 项目实施投资费用; ② v_{Ma} 、 c_{Ma} 为第 a 年残留(伴生)矿产资源单位产值、单位产值消耗成本; c_p 、 c_r 为平均单位体积资源项目实施投资及后续修复费用; V_a 为第 a 年残留资源开采量; S_m 为残留矿产压占面积; ③ e_a 为第 a 年单位面积发电量产值; c_a 为第 a 年单位面积发电量消耗成本; S_e 为发电占用面积; c_p 为平均单位面积项目实施投资; ④ v_s 为空间单位体积产值; c_s 为空间单位体积消耗成本; V_s 为空间总体积; S_s 为空间总体积所占面积; ⑤ V_r 为蓄水量; c_r 为单位蓄水量水库建设成本; S_r 为蓄水库占用面积; ⑥ t_{ae} 为第 a 年单位人数的平均消费; c_{ae} 为第 a 年单位人数平均消费成本; p_a 为第 a 年单位面积人流数; S 为占地面积; c_p 为平均单位面积项目实施投资; ⑦ S_j 为 j 类地新增指标面积; P_j 为 j 类地单位面积指标价格; c_{pj} 为 j 类地单位面积项目实施投资费用; ⑧ f_j 为 j 项目提升土地价值、收益区域的放大区域系数; S_j 为 j 项目占地面积; P_j 为 j 项目提升土地价值收益的平均价格。 c_{pj} 为单位面积 j 项目实施投资费用; ⑨ Q_a 为第 a 年可采热资源量; δ 为浅层地温能可利用系数; m 为热能有效利用率; q 为热量, 20 962.7 kJ/kg; h 为锅炉热效率; p_a 为第 a 年燃煤价格, 元/t; C_p 为项目实施投资费用; S_g 为计算可采热资源量的面积; ⑩ t_a 、 a_{na} 、 p_{na} 为第 a 年社会服务次数、学术成果篇数、科技成果数量; e_{sa} 、 w_{ea} 、 w_{pa} 为第 a 年社会服务平均每次服务费用、平均每篇学术成果价值、科技成果(专利、产品)价值; S_s 为项目占地面积。量含义仅适用于对应公式。

生活的影响程度; 笔者选取新增就业人数、改善人居环境、增加地区上下游产业消费 3 个方面指标并进行定量评估, 构建实施项目社会效益与规划面积的效益评估算式(表 11)。

4.5 多目标线性规划模型构建

(1) 变量构建。依据表 7, 设置实施项目集 P 中各子项目 p_j 的变量 x_j 、 y_j , x_j 、 y_j 分别表示实施项目 p_j 的地表占地面积和地下占地面积, 计算过程中注意 p_j 面积单位的统一。

(2) 目标函数确定。矿山环境正效应开发利用多目标线性规划的目标是使经济、生态、社会效益最佳, 为此构建经济、生态、社会效益的目标函数, 其目标函数系数基于效益评估表 9~11, 具体见表 12, 经济效益目标函数 $f_1(x) + f_1(y)$ 、环境效益目标函数 $f_2(x) + f_2(y)$ 、社会效益目标函数 $f_3(x) + f_3(y)$ 构建如下:

$$\max \begin{cases} f_1(x) + f_1(y) = \sum_{j \in P_n} \alpha_i^j B_{E,i}^j x_j + \sum_{j \in P_n} \beta_i^j B_{E,i}^j y_j \\ f_2(x) + f_2(y) = \sum_{j \in P_n} \gamma_i^j E_{E,i} x_j + \sum_{j \in P_n} \eta_i^j E_{E,i} y_j \\ f_3(x) + f_3(y) = \sum_{j \in P_n} \delta_i^j (E_{S,1} + E_{S,2} + E_{S,3})_i x_j + \\ \sum_{j \in P_n} \varepsilon_i^j (E_{S,1} + E_{S,2} + E_{S,3})_i y_j \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\sum_{j \in P_n}$ 为对所有属于 P_n 实施项目子集的 p_j 子项目依次求和; $B_{E,i}^j$ 为 p_j 子项目单位产品平均每年产生的经济效益 $B_{E,i}$; α_i^j 为 p_j 子项目地表总面积中能够产生 $B_{E,i}$ 经济效益的地表面积占地表总面积的比例; β_i^j 为 p_j 子项目地下总面积中能够产生 $B_{E,i}$ 经济效益的地下面积占地表总面积的比例; γ_i^j 为 p_j 子项目地表总面

表 10 生态效益评估计算
Table 10 Ecological benefit evaluation calculation

计算公式	适用范围
参考占补平衡、增减挂钩、土地价值、收益提升中的经济效益公式(不要重复计费)	植被覆盖度、 土地石漠化/荒漠化/盐渍化面积减少
$\textcircled{1} E_{E,1} = Q_{\text{wr}} C_r = \sum_{j=1}^m [S_j (P_j - R_j - T_{E,j}) \times 10^{-3} c_r]$	水源涵养价值 ^[27]
$\textcircled{2} E_{E,2} = \sum_{j=1}^m (Q_{j\text{sep}} - Q_{j\text{sea}}) Q_{j\text{ei}} G_j P_{j\text{ei}} (i = N, P, K) = \sum_{j=1}^m R_j K_j L_j G_j (1 - C_j) Q_{j\text{ei}} G_j P_{j\text{ei}}$	水土保持价值 ^[27]
$\textcircled{3} E_{E,3} = \sum_{j=1}^m (S_{Lqj} - S_{Lj}) S_{jcs}$	防风固沙
$\textcircled{4} E_{E,4} = \sum_{j=1}^m (v_{jg} + v_{jv} + v_{jr}) S_j C_r$	洪水调蓄
$\textcircled{5} E_{E,5} = (f_c S_F + g_c S_G + s_c S_S) c_c$	固碳价值 ^[28-29]
$\textcircled{6} E_{E,6} = (1.20 B_g S_G + 1.19 B_f S_F F) C_o$	释氧价值 ^[28-29]
$\textcircled{7} E_{E,7} = A_b C_b$	生物多样性价值

注： $E_{E,i}$ 为单位产品平均每年产生生态效益； $\textcircled{1}$ Q_{wr} 为水源涵养量， m^3/a ； S_j 为 j 类生态系统面积， m^2 ； P_j 为 j 类生态系统降雨量， mm/a ； R_j 为 j 类生态系统地表径流量， mm/a ； $T_{E,j}$ 为 j 类生态系统蒸散发量， mm/a ； c_r 为单位蓄水量水库建设成本； $\textcircled{2}$ $Q_{j\text{sep}}$ 、 $Q_{j\text{sea}}$ 、 $Q_{j\text{ei}}$ 、 S_j 、 $P_{j\text{ei}}$ 为 j 类生态系统潜在土壤侵蚀量($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)、实际土壤侵蚀量($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)、土壤中N、P、K的含量($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)、土壤保持面积、单位面积(hm^2)土壤中N、P、K的价格； R_j 、 K_j 、 L_j 、 G_j 、 C_j 为 j 类生态系统降雨侵蚀因子、土壤可蚀性因子、坡长因子、坡度因子、植被覆盖度因子； $\textcircled{3}$ S_{Lqj} 、 S_{Lj} 、 S_j 为 j 类生态系统潜在风力侵蚀量($\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$)、实际风力侵蚀量($\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$)、面积(km^2)； c_s 为当地沙尘清理费用($\text{元}/\text{t}$)； $\textcircled{4}$ v_{jg} 、 v_{jv} 、 v_{jr} 为(调洪蓄水区)单位面积 j 类生态系统增加土壤、植被、河流湖泊调洪量； S_j 为(调洪蓄水区) j 类生态系统面积； c_r 为单位蓄水量水库建设成本； $\textcircled{5}$ f_c 、 g_c 、 s_c 为评估林分、草地、土壤年固碳量($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)； S_F 、 S_G 、 S_S 为评估林分、草地、土壤面积， hm^2 ； c_c 为固碳价格， $\text{元}/\text{t}$ ； $\textcircled{6}$ B_g 为草原净生产力， $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ； S_G 为草原面积， hm^2 ； B_f 为实测林分净生产力， $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ； S_F 为林分面积， hm^2 ； F 为森林生态系统服务修正系数； C_o 为工业制氧成本， $\text{元}/\text{t}$ ； $\textcircled{7}$ A_b 为生物多样性保护面积， hm^2 ； C_b 为单位面积生物多样性保护价值量， $\text{元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。量含义仅适用于对应公式。

表 11 社会效益评估计算
Table 11 Social benefit evaluation calculation table

计算公式	适用范围
$\textcircled{1} E_{S,1} = \frac{\sum_{a=1}^n \sum_{j=1}^m N_{apj} S_j e_j (1+i)^{1-a}}{n \sum_{j=1}^m S_j}$	新增就业岗位收益
$\textcircled{2} E_{S,2} = \frac{\sum_{j=1}^m (c_{nj} + c_{rj} + c_{wj} + c_{ej} + c_{sj} + c_{pj}) S_j}{\sum_{j=1}^m S_j}$	人居环境改善
$\textcircled{3} E_{S,3} = \frac{\sum_{a=1}^n \sum_{j=1}^m c_j S_j (1+i)^{1-a} + \sum_{j=1}^m c_{jb} S_j}{n \sum_{j=1}^m S_j}$	地区上下游产业消费增加

注： $E_{S,i}$ 为单位产品平均每年项目产生社会效益； $\textcircled{1}$ N_{apj} 为第 a 年 j 项目单位面积下产生就业人数； S_j 为 j 项目总面积； e_j 为 j 项目人均年收入； i 为年利率； $\textcircled{2}$ c_{nj} 、 c_{rj} 、 c_{wj} 、 c_{ej} 、 c_{sj} 、 c_{pj} 为单位面积项目人居自然生态、道路、饮用水、电力通讯、环卫设施及公共服务设施改善投入资金； $\textcircled{3}$ c_j 为第 i 年单位面积 j 项目带动当地上下游消费量； c_{jb} 为单位面积 j 项目建设拉动使用地方消费量。量含义仅适用于对应公式。

积中能够产生 $E_{E,i}$ 环境效益的地表面积占地表总面积

的比例； η_i^j 为 p_j 子项目地下总面积中能够产生 $E_{E,i}$ 环境效益的地下面积占地下总面积的比例； δ_i^j 为 p_j 子项目地表总面积中能够产生 $E_{S,i}$ 社会效益的地表面积占地表总面积的比例； ϵ_i^j 为 p_j 子项目地下总面积中能够产生 $E_{S,i}$ 社会效益的地下面积占地下总面积的比例； x_j 为 p_j 子项目地表总面积； y_j 为 p_j 子项目地下总面积； α_i^j 、 β_i^j 、 γ_i^j 、 η_i^j 、 δ_i^j 、 ϵ_i^j 通过矿山环境正效应资源现状调查求取。

(3) 约束条件。

1) 总面积约束。地表维度中，各实施子项目 p_j 面积 x_j 之和为总面积 S 。

$$\sum_{j=1}^n x_j \leq S, \quad x_j \geq 0 \quad (11)$$

2) 土地利用及项目用地规划约束。对矿山实施区域及影响区域的土地利用状况开展调查，调查至二级地类，构建土地利用面积集 $F=\{A_f\}$ ， $A_f=\{A_{f,s}\}$ ，其中， A_f 为调查区土地利用为 f 一级类的土地面积； $A_{f,s}$ 为调查区土地利用为 f 一级类($f=01、02、\cdots、12、20$)、 s 为二级类的面积， s 指 f 一级类下面的二级类编码。依据国土空间规划、相关专项规划及行政法规规定，开展

矿山环境正效应开发利用实施项目规划土地利用约束。

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 \leq A_{01} + \sum A_{04,s} + \sum A_{10,s} + \sum A_{11,s} + \sum A_{12,s} + \sum A_{20} \\ x_2 \leq \sum A_{20,s} + \sum A_{12,s} \\ x_3 \leq \sum A_{04,s} + \sum A_{11,s} + \sum A_{12,s} + \sum A_{20,s} \\ x_4 \leq \sum A_{03,s} + \sum A_{04,s} + \sum A_{11,s} + \sum A_{12,s} + \sum A_{20,s} \\ x_5 \leq \sum A_{11,s} + \sum A_{12,s} + \sum A_{20,s} \\ x_6 \leq A_{01} + \sum A_{12,s} + \sum A_{20,s} \\ x_7 \leq A_{03} + A_{04} + \sum A_{12,s} + \sum A_{20,s} \\ x_8 \leq \sum A_{11,s} + \sum A_{12,s} + \sum A_{12,s} \\ x_9 \leq \sum A_{20,s} \\ x_{10} \leq \sum A_{20,s} \\ x_{11} \leq \sum A_{12,s} + \sum A_{20,s} \\ x_{12} \leq \sum A_{12,s} + \sum A_{20,s} \\ x_{13} \leq \sum A_{12,s} + \sum A_{20,s} \\ x_{14} \leq \sum A_{11,s} + \sum A_{12,s} + \sum A_{20,s} \\ \sum_{i=1}^{14} x_i \leq S, \text{ 且 } x_i \geq 0, x_1 \geq A_{01} \end{array} \right. \quad (12)$$

式中, $\sum A_{f,s}$ 为符合实施 p_j 项目土地利用规划要求的 f 一级类、 s 二级类土地面积之和。

3) 地下空间约束。开采地下空间正效应开发利用实施项目受区域位置、地质条件、围岩特征、空间位置、环境特点等条件的限制, 具有特定的逻辑约束, 依据项目逻辑关系表 (表 8), 对地下空间维度上的实施项目进行逻辑关系划分, 构建地下空间开发利用实施项目集 B (表 13)。

依据地下空间开发利用逻辑约束实施项目集 B , 构建地下空间约束。

$$\text{S.T. } \begin{cases} \sum_{j \in B} y_j \leq S_u \\ y_j \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中, $j \in B$ 表示 j 为地下空间开发利用逻辑约束实施项目集 B 的子集 (子项目); y_j 表示 j 子项目占用的地下空间面积; S_u 为地下空间可开发利用面积。

4.6 多目标线性规划求解

矿山环境正效应开发利用多目标线性规划求解可采用理想点法求解, 即分别求解经济、生态、社会效益单目标最优问题, 得到最优解 Z_i^* , 则 $Z_i^* = (Z_1^*, Z_2^*, Z_3^*)$ 为值域中的一个理想点; 由于同一场地开发很难同时使经济、生态、社会达到最优, 寻求近似值 $Z_i = (Z_1,$

$Z_2, Z_3)$, 令距理想点的距离为 $S^* = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (Z_i - Z_i^*)^2}$, 求解 $\min S^*$, 得到的 Z 为最优解^[31-33], 从而确定出最优目标组合实施项目集 P_{Z^*} 。

此外, 多目标线性规划中若目标函数数量纲一致时, 可转换为单目标线性规划求解。经济、生态、社会效益采用货币化定量描述, 故式 (10) 可简化单目标线性规划, 即求解在约束条件式 (11)~(13) 下矿山环境正效应开发利用实施项目总效益目标函数 $\sum_{i=1}^3 [f_i(x) + f_i(y)]$ 最大, 目标函数为

$$\max \sum_{i=1}^3 [f_i(x) + f_i(y)] \quad (14)$$

通过上述方法, 求解出经济、生态、社会效益达到最优时候的组合形式, 根据理想点法或式 (14), 得到矿山环境正效应开发利用最优目标、实施项目组合及相应规划面积, 以此为决策者提供技术支撑。

5 结 论

我国现阶段登记采矿权超 3 万个, 面积近 30 万 km^2 , 充分挖掘矿产资源在开发过程中的矿山环境正效应资源, 化害为利, 实现绿色、低碳、零碳、负碳开采, 是响应“双碳”战略目标的内在要求。随着开发利用技术的进步, 以及工业多源物联网感知数据等技术的成熟, 矿山环境正效应开发利用研究仍有巨大的进步空间, 特别是指向区域性和差异性的矿山环境正效应资源开发利用模式体系将愈加完善, 实现矿业转型、城市发展、流域可持续以及市场化道路等方面的矿业绿色发展新格局。

(1) 绿色矿业高质量发展。“双碳”战略目标的实施, 倒逼矿山企业升级发展, 开展矿业工程活动“源头绿色开采、过程低碳排放、末端固碳实施”是矿山绿色转型发展的必由之路, 通过矿山环境正效应开发利用评价理论, 评估、确定正效应开发利用目标和实施方案, 为矿山“低碳、零碳”开采提供环境方面支持。此外, 正效应开发利用理论能够为矿山绿色、可持续发展提供精准规划, 尤其是矿产资源开发利用、地质环境保护与修复治理、矿山土地修复等前期精准规划以及中、后期矿山环境修复治理等, 通过矿山环境治理开发, 构建矿区多能互补综合系统及生态服务碳汇系统, 是实现煤炭全生命周期“低碳、零碳”开采的重要手段。

(2) 资源型城市转型发展。建国以来, 作为能源、资源战略保障的资源型城市, 为国家经济建设持续发

表 12 决策变量及目标函数系数的构建
Table 12 Construction of decision variables and objective function coefficients

项目	面积变量构建	经济目标函数系数	环境目标函数系数	社会目标函数系数
矿山土地资源 p_1	x_1	$\alpha_1^1 B_{E,1}$ 、 $\alpha_7^1 B_{E,7}$	$\sum_{i=1}^7 \gamma_i^1 E_{E,i}$	$\sum_{i=1}^3 \delta_i^1 E_{S,i}$
矿山建筑空间资源 p_2	x_2	$\alpha_4^2 B_{E,4}$	—	$\sum_{i=1}^3 \delta_i^2 E_{S,i}$
太阳能发电 p_3	x_3	$\alpha_3^3 B_{E,3}$	$\sum_{i=1}^7 \gamma_i^3 E_{E,i}$	$\sum_{i=1}^3 \delta_i^3 E_{S,i}$
地表空间维度	风力发电 p_4	x_4	$\alpha_3^4 B_{E,3}$	— $\sum_{i=1}^3 \delta_i^4 E_{S,i}$
	娱乐开发 p_5	x_5	$\alpha_6^5 B_{E,6}$ 、 $\alpha_8^5 B_{E,8}$	$\sum_{i=1}^3 \delta_i^5 E_{S,i}$
	生态服务功能 p_6	x_6	$\alpha_1^6 B_{E,1}$ 、 $\alpha_6^6 B_{E,6}$	$\sum_{i=1}^3 \delta_i^6 E_{S,i}$
	碳汇服务功能 p_7	x_7	$\alpha_1^7 B_{E,1}$	$\sum_{i=1}^3 \delta_i^7 E_{S,i}$
地表及地下维度	矿山水资源利用 p_8	x_8 、 y_8	$\sum_{i=1}^7 \gamma_i^8 E_{E,i}$ 、 $\sum_{i=1}^7 \eta_i^8 E_{E,i}$	$\sum_{i=1}^3 \delta_i^8 E_{S,i}$ 、 $\sum_{i=1}^3 \epsilon_i^8 E_{S,i}$
	伴生资源 p_9	x_9 、 y_9	$\alpha_2^9 B_{E,2}$ 、 $\beta_2^9 B_{E,2}$	— $\sum_{i=1}^3 \delta_i^9 E_{S,i}$ 、 $\sum_{i=1}^3 \epsilon_i^9 E_{S,i}$
	残留资源 p_{10}	x_{10} 、 y_{10}	$\alpha_2^{10} B_{E,2}$ 、 $\beta_2^{10} B_{E,2}$	— $\sum_{i=1}^3 \delta_i^{10} E_{S,i}$ 、 $\sum_{i=1}^3 \epsilon_i^{10} E_{S,i}$
	抽水蓄能 p_{11}	x_{11} 、 y_{11}	$\alpha_5^{11} B_{E,5}$ 、 $\beta_5^{11} B_{E,5}$	— $\sum_{i=1}^3 \delta_i^{11} E_{S,i}$ 、 $\sum_{i=1}^3 \epsilon_i^{11} E_{S,i}$
	科学原位实验 p_{12}	x_{12} 、 y_{12}	$\alpha_{10}^{12} B_{E,10}$ 、 $\beta_{10}^{12} B_{E,10}$	— $\sum_{i=1}^3 \delta_i^{12} E_{S,i}$ 、 $\sum_{i=1}^3 \epsilon_i^{12} E_{S,i}$
	科学试验 p_{13}	x_{13} 、 y_{13}	$\alpha_{10}^{13} B_{E,10}$ 、 $\beta_{10}^{13} B_{E,10}$	— $\sum_{i=1}^3 \delta_i^{13} E_{S,i}$ 、 $\sum_{i=1}^3 \epsilon_i^{13} E_{S,i}$
	科普文旅开发 p_{14}	x_{14} 、 y_{14}	$\alpha_6^{14} B_{E,6}$ 、 $\beta_6^{14} B_{E,6}$	$\sum_{i=1}^7 \gamma_i^{14} E_{E,i}$ 、 $\sum_{i=1}^7 \eta_i^{14} E_{E,i}$ $\sum_{i=1}^3 \delta_i^{14} E_{S,i}$ 、 $\sum_{i=1}^3 \epsilon_i^{14} E_{S,i}$
地下空间维度	矿山地下空间资源 p_{15}	y_{15}	$\beta_4^{15} B_{E,4}$	— $\sum_{i=1}^3 \epsilon_i^{15} E_{S,i}$
	地热开发 p_{16}	y_{16}	$\beta_9^{16} B_{E,9}$	— $\sum_{i=1}^3 \epsilon_i^{16} E_{S,i}$
	浅层地热开发 p_{17}	y_{17}	$\beta_4^{17} B_{E,4}$	— $\sum_{i=1}^3 \epsilon_i^{17} E_{S,i}$
	压缩空气储能 p_{18}	y_{18}	$\beta_4^{18} B_{E,4}$	— $\sum_{i=1}^3 \epsilon_i^{18} E_{S,i}$

注：矿山环境正效应开发利用后，原矿山环境某一效应面积减少时，其函数系数为负值。

展做出巨大贡献的同时，随着资源枯竭，面临着经济衰退、社会问题突出及生态环境恶化等困境；摆脱资源依赖、创新产业发展、培内生发展动力是转型发展的导向；借助资源开采后的矿山环境正效应资源，全力挖掘并充分开发利用，在解决生态环境问题的基础上，开发绿色、低碳、可持续发展产业，对资源型城市转型发展具有重要的示范效应。

(3) 黄河流域矿区历史遗留废弃矿山环境正效应开发利用。黄河流域中上游地区气候类型主要是干

旱半干旱，生态环境脆弱，而我国现有的 14 个大型煤炭生产基地中，有 9 个分布在黄河流域，如何在保障国家能源安全的同时又促进区域绿色、高质量、可持续发展具有重大意义；基于矿山环境正效应开发利用理论，评估和利用黄河流域历史遗留废弃矿山修复治理后的土地、空间、遗留资源、光能、风能等正效应资源，构建生态碳汇产品模式、“清洁能源+农牧”产业模式、科普文旅开发模式、运动娱乐开发模式等绿色、可持续性产品，在修复和保护流域内矿山环境的同时，

表 13 地下空间开发利用逻辑约束实施项目集 B 构建

Table 13 The setting of implementation project B under the logic constraint of underground space development and utilization

实施项目逻辑分类	逻辑关系/实施项目集 D_{nj} 构建	逻辑关系/实施项目集 C_j 构建	逻辑关系/实施项目集B确定
$p_8、p_{14}、p_{15}、p_{18}$	独立/ D_{1j} , $D_{1j} \subseteq E_1, E_1 = \{p_8、p_{14}、p_{15}、p_{18}\}$	独立/ C_1 $C_1 = C_{1j}, C_{1j} \subseteq D_1$, $D_1 = \{D_{1j}, D_{2j}\}$	互斥/ B $B = B_j, B_j \subseteq C$, $C = \{C_1, C_2\}$
$p_{11}、p_{16}、p_{17}$	互斥/ D_{2j} , $D_{2j} = \{d_j\}, d_j \in E_2, E_2 = \{p_{11}、p_{16}、p_{17}\}$		
$p_9、p_{10}$	独立/ D_{3j} , $D_{3j} \subseteq E_3, E_3 = \{p_9、p_{10}\}$	互斥/ C_2 $C_2 = C_{2j}, C_{2j} \subseteq D_2$, $D_2 = \{D_{3j}, D_{4j}\}$	
$p_{12}、p_{13}$	独立/ D_{4j} , $D_{4j} \subseteq E_4, E_4 = \{p_{12}、p_{13}\}$		

注: p_j 为实施项目代码; E_j 为地下空间可开发利用逻辑分类后的实施项目集全集; D_{nj} 为地下空间开发利用逻辑关系一级约束可实施项目集; C_j 为地下空间开发利用逻辑关系二级约束可实施项目集; B 为逻辑约束下, 地下空间可开发利用确定的实施项目集。

实现生态优先、绿色发展的可持续性发展。

(4) 废弃矿山市场化运作模式。为缓解矿山生态修复资金不足问题, 我国开展了“开发式治理、市场化运作”修复模式, 通过资源使用权、耕地指标及资金等方面的激励, 鼓励社会资金参与; 政策措施的实施虽取得了一定成果, 但缺乏对矿山环境整体性、系统性的认识, 重视开发式治理中的遗留矿产资源、土地指标资源等吹糠见米的利益, 缺少对空间、生态等隐形资源深谋远猷的规划, 甚至出现了以生态修复名义违法采矿、破坏生态等现象。矿山环境正效应开发利用理论以整体性、系统性、多维性、多向性的思维方式, 挖掘蕴含在矿山中的正效应资源, 依据评价理论方法, 评价及规划矿山正效应开发利用最优目标及实施项目配置, 为废弃矿山市场化运作提供方向和理论支撑。

参考文献(References):

- [1] 武强, 涂坤, 曾一凡, 等. 打造我国主体能源(煤炭)升级版面临的主要问题与对策探讨[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1625–1636.
WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan, et al. Discussion on the main problems and countermeasures for building an upgradeversion of main energy(coal)industry in China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1625–1636.
- [2] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告[R]. 2022.
- [3] 朱厚伦. 新常态下我国矿业供给侧结构性改革问题研究[J]. 理论动态, 2016(35): 12–31.
- [4] 中华人民共和国自然资源部. 全国矿产资源规划(2016—2020年)[R]. 2016.
- [5] 武强, 李松营. 闭坑矿山的正负生态环境效应与对策[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 21–32.
WU Qiang, LI Songying. Positive and negative environmental effects of closed mines and its countermeasures[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 21–32.
- [6] 刘宏磊. 矿山环境修复治理和开发利用模式的理论与实践研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2020.
LIU Honglei. Research on the theory and practice of the restoration andutilization model for the mine environment [D]. Beijing: China University of Mining and Technology–Beijing, 2020.
- [7] 武强, 刘宏磊, 赵海卿, 等. 解决矿山环境问题的“九节鞭”[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 10–22.
WU Qiang, LIU Honglei, ZHAO Haiqing, et al. Discussion on the nine aspects of addressing environmental problems ofmining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 10–22.
- [8] 武强, 陈奇. 矿山环境问题诱发的环境效应研究[J]. 水文地质工程地质, 2008(5): 81–85.
WU Qiang, CHEN Qi. An analysis of environmental effects induced by environmental problems in mines[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008(5): 81–85.
- [9] ZENG Yifan, MENG Shihao, WU Qiang, et al. Ecological water security impact of large coal base development and its protection[J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2023, 619: 129319.
- [10] 曾一凡, 孟世豪, 吕扬, 等. 基于矿井安全与生态水资源保护等多目标约束的超前疏放水技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 3091–3100.
ZENG Yifan, MENC Shihao, LÜ Yang, et al. Advanced drainage technology based on multi-objective constraintof mine safety and water resources protection[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 3091–3100.
- [11] 曾一凡, 刘晓秀, 武强, 等. 双碳背景下“煤–水–热”正效协同共采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 538–550.
ZENG Yifan, LIU Xiaoxiu, WU Qiang, et al. Theory and technical conception of coal-water-thermal positive synergistic co-extraction under the dual carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 538–550.
- [12] 武强, 刘宏磊, 敖嫩, 等. 矿山环境正效应开发利用理论模式与工程应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1405–1415.
WU Qiang, LIU Honglei, AO Nen, et al. Development and utilization models for the positive environmental impacts in mines[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1405–1415.
- [13] 中华人民共和国自然资源部地质环境司. 《关于加强矿山地质环境恢复和综合治理的指导意见》国土资发[2016]63号[S]. 2016.
- [14] LIU Honglei, WU Qiang, CHEN Jianxin, et al. Environmental impacts related to closed mines in inner mongolia[J]. Sustainability, 2021, 13(23): 13473.
- [15] 王根锁, 刘宏磊, 武强, 等. 碳中和背景下废弃矿山环境正效应资

- 源化开发利用[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(6): 321–328.
- WANG Gensuo, LIU Honglei, WU Qiang, et al. Resource development and utilization of positive environmental impacts of abandoned mines under carbon neutrality[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(6): 321–328.
- [16] 程稳, 钱红露, 尹维清, 等. 多目标协同下长江航道承载力研究——I. 理论[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2022, 30(5): 1061–1070.
- CHENG Wen, QIAN Honglu, YIN Weiqing, et al. Research on waterway carrying capacity of the yangtze river under multi-objective cooperation: I. Theory[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2022, 30(5): 1061–1070.
- [17] 董雾红, 吉莉, 高华东, 等. 关闭矿山空间资源特征解析与转型路径[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(6): 2228–2242.
- DONG Jihong, JI Li, GAO Huadong, et al. Characteristics analysis and transformation path of space resources in closed mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(6): 2228–2242.
- [18] ZHANG Cun, WANG Fangtian, BAI Qingsheng. Underground space utilization of coalmines in China: A review of underground water reservoir construction[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 107: 103657.
- [19] CUI Chaoqun, WANG Bing, ZHAO Yixin, et al. Waste mine to emerging wealth: Innovative solutions for abandoned underground coal mine reutilization on a waste management level[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 252: 119748.
- [20] XIE Jun, XIN Lin, HU Xiangming, et al. Technical application of safety and cleaner production technology by underground coal gasification in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 250: 119487.
- [21] 王亮, 郝海鹏, 郑向向, 等. 基于 FAHP-TOPSIS 的岩溶隧道超前地质预报方案优化[J]. *灾害学报*, 2023, 38(4): 39–44.
- WANG Liang, HAO Haipeng, ZHENG Xiangxiang, et al. Scheme optimization of advanced geological prediction for karst tunnel based on FAHP-TOPSIS[J]. *Journal of Catastrophology*, 2023, 38(4): 39–44.
- [22] 康娜. 公路隧道运营火灾风险综合评估模式研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
- KANG Na. Study on comprehensive model for fire risk assessment in road tunnel operation [D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2019.
- [23] 蒋正举. “资源-资产-资本”视角下矿山废弃地转化理论及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- JANG Zhengju. Research on abandoned mine lands conversion theory and its application under perspective of resource-asset-capital [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [24] 杨超. 银川地区浅层地温能资源综合评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- YANG Chao. Research on the comprehensive evaluation of shallow geothermal energy resource in Yinchuan [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [25] 王婷, 陈凯华, 卢涛, 等. 重大科技基础设施综合效益评估体系构建研究——兼论在 FAST 评估中的应用[J]. *管理世界*, 2020, 36(6): 213–236.
- WANG Ting, CHEN Kaihua, LU Tao, et al. The research on the evaluation system of large research infrastructures comprehensive benefits with an application in the evaluation of FAST[J]. 2020, 36(6): 213–236.
- [26] 吴金栋, 任光辉, 刘剑文, 等. 建立实验室效益评估机制的研究与实践[J]. *实验技术与管理*, 2018, 35(10): 218–221.
- WU Jindong, REN Guanghui, LIU Jianwen, et al. Research and practice of establishing laboratory benefit assessment mechanism[J]. *Experimental Technology and Management*, 2018, 35(10): 218–221.
- [27] 生态环境部. 全国生态状况调查评估技术规范——生态系统服务功能评估: HJ 1173—2021 [S]. 2021.
- [28] 国家林业和草原局. 森林生态系统服务功能评估规范: GB/T 38582—2020 [S]. 2020.
- [29] 赵吉. 内蒙古草原碳储量及其增汇潜力分析[M]. 第 1 版. 北京: 中国社会科学出版社, 2015.
- [30] 马跃. 废弃矿山资源化生态修复模式构建与效益评价[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- MA Yue. Construction and benefit evaluation of resource-based ecological restoration mode of abandoned mine [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [31] 余慧容, 蒲春玲, 李玉, 等. 绿洲城市土地利用多目标优化研究——以新疆奎屯市为例[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(4): 1267–1272.
- YU Huirong, PU Chunling, LI Yu, et al. Multi-objective land-use optimization of Oasis City: A case study in Kuytun, Xinjiang[J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(4): 1267–1272.
- [32] 康艳, 伊丽, 龚家国. 基于分期设权理想点法的水文模型参数多目标优化[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2021, 54(5): 458–467.
- KANG Yan, YI Li, GONG Jianguo. Multi-objective optimization of hydrological model parameters based on the stage-weighted ideal point method[J]. *Journal of Tianjin University(Science and Technology)*, 2021, 54(5): 458–467.
- [33] 李克钢, 李明亮, 秦庆词. 基于改进综合赋权的岩爆倾向性评价方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(S1): 2751–2762.
- LI Kegang, LI Mingliang, QIN Qingci. Research on evaluation method of rock burst tendency based on improved comprehensive weighting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(S1): 2751–2762.