吉 莉,刘 峰,尚建选,等.关闭矿山地下空间资源定量评估与再利用途径[J].煤炭科学技术,2022,50(5):281-289.
JI Li,LIU Feng,SHANG Jianxuan,*et al*.Quantitative evaluation and reuse path of underground space resources in closed mines[J].Coal Science and Technology,2022,50(5):281-289.

移动扫码阅读

关闭矿山地下空间资源定量评估与再利用途径

吉 莉[1,2],刘 峰[3],尚建选[4],董霁红[1,2],黄艳利[5]
(1.中国矿业大学 公共管理学院,江苏 徐州 221116;2 中国矿业大学 环境与测绘学院,江苏 徐州 221116;
3.中国煤炭学会,北京 100013;4.陕西煤业化工集团有限责任公司,陕西 西安 710065;
5.中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116)

摘 要:随着煤炭资源的长期开发,越来越多的煤矿面临关闭/废弃或已关闭。这些矿井历经长期开采,形成大量地下空间,传统的封井措施会造成巨大的地下空间资源浪费。在国内外关闭矿山数量增加与绿色发展时代背景之下,采用数学模型定量评估与管理关闭矿山地下空间资源,提出矿区资源再利用途径,不仅是能源环境领域的重要议题,而且也是社会关注的热点,还是矿山企业解决发展困境的迫切需求。主要研究内容包括:① 划分了关闭矿山地下空间资源类型,提出了不同类型巷道空间计算方法、工作面采空区空间计算方法和井下残留煤炭资源的估算方法。② 分析了国内外关闭矿山地下转型利用模式,构建基于生态效益、经济效益、社会效益的矿山转型综合效益评估指标体系,采用层次分析法评估关闭矿山地下空间不同转型方案的综合效益。在此基础上,通过比较分析得出关闭矿山地下空间资源最优转型利用路径。③ 以渭河流域某矿为例,估算得到某矿地下空间为 1.18×10^5 m^3,残余资源量为 5 600 万 t,地下转型方式按照效益由大到小依次为地下矿山博物馆、地下度假村和地下物资储备库。综合关闭矿山地上/下空间资源,根据资源特点与层次结构模型,确定该矿区最优转型利用方案为“地上矿山公园+地下矿山博物馆”。主要给出了关闭矿山地下空间资源划分标准,提出了关闭矿山资源定量评估方法,为关闭矿山企业提供转型脱困和可持续发展的新思路,为我国关闭/废弃矿山转型利用提供理论参考和实践范例,并对我国贯彻落实“双碳”战略目标具有重要意义。

关键词:关闭矿山;地下空间;资源评估;再利用路径;效益评价
中图分类号:TDT42 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2022)05-0281-09

Quantitative evaluation and reuse path of underground space resources in closed mines

JI Li[1,2],LIU Feng[3],SHANG Jianxuan[4],DONG Jihong[1,2],HUNAG Yanli[5]
(1.*School of Public Policy and Management, China University of Mining and Technology,Xuzhou* 221116,*China*;2.*School of Environment and Spatial Informatics,China University of Mining and Technology,Xuzhou* 221116,*China*;3.*China Coal Industry Association,Beijing* 100013,*China*; 4.*Shaanxi Coal and Chemical Industry Group Co.,Ltd.,Xi'an* 710065,*China*; 5.*School of Mining Engineering,China University of Mining and Technology, Xuzhou* 221116,*China*)

Abstract:With the long-term mining of coal resources,more and more coal mines are facing closure or have been closed. In the long-term exploitation of these mines,a large amount of underground space has been formed,and the traditional well sealing measures will cause a huge waste of underground space resources. Under the background of increasing number of closed mines and green development at home and abroad,the use of mathematical models to quantitatively evaluate the underground space resources of closed mines and the ways to reuse these resources are not only important issues in the field of energy and environment,but also hot spots of social concern. It is also the

收稿日期:2021-05-31 **责任编辑**:黄小雨 **DOI**:10.13199/j.cnki.cst.2021-0581
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874306);陕煤集团企业自选课题资助项目(2019100039)
作者简介:吉 莉(1994—),女,江苏泰州人,博士研究生。E-mail:jessie201708@163.com
通讯作者:董霁红(1967—),女,山西芮城人,教授,博士生导师。E-mail:dongjihong@cumt.edu.cn

urgent need of mining enterprises to solve the development dilemma. The contents of this article consists of three main parts:① Dividing the types of underground space resources in closed mines, and proposing the methods for calculating the space of different types of roadways and working face goafs, and estimating residual coal resources. ② The transformation and utilization modes of mines in the world were analyzed. Based on the ecological benefit, economic benefit and social benefit, the evaluation index system of comprehensive benefit of mine transformation was built. The analytic hierarchy process was used to evaluate comprehensive benefit of different transformation scheme in the underground space of closed mines. On the basis, the optimal transformation path was obtained through comparative analysis. ③ Taking a mine in Weihe River Basin of China as an example, the underground space of the mine was 1.18×10^5 m^3, the total residual resources were 56 million tons. The underground transformation mode in descending order of benefit were underground mine museums, underground resorts, and underground material storages. According to the characteristics of resources and the hierarchical structure model, the optimal transformation and utilization scheme of the mine was aboveground mine park + underground mine museum based on the comprehensive space resources of the closed mine. This paper mainly gives the division standard of underground space resources of closed mines, and puts forward the quantitative evaluation method of closed mine resources. It provides a new idea of transformation and sustainable development for mining enterprises, and also provides theoretical reference and practical examples for the transformation and utilization of closed/abandoned mines, which is of great significance for the implementation of the "carbon peaking and carbon neutrality" strategic goals in China.

Key words: closed mine; underground space; resource assessment; reuse path; benefit evaluation

0 引　　言

矿产资源是人类赖以生存的重要物质基础,开发利用矿产资源对人类社会的进步起到巨大推动作用[1-2]。但同时矿产开采导致的地质扰动及灾害、地形地貌、自然景观、生态环境、土质水系、人居安全健康等方面的负面效应已在经济及工业发达国家、地区受到高度重视[3-4],大量低效、污染的矿山企业被迫淘汰并引发关闭矿山转型理念、机制、规范与实践创新[5]。

据统计,2018 年世界范围内关闭/废弃矿山的数量超过 100 多万座[6],主要分布在北美、欧洲、南非、澳洲和东亚等地区。仅以加拿大安大略省为例,约有 6 000 座报废矿井和近 7 000 座采空采石场和露天矿井[7]。自 20 世纪中叶开始,美国、加拿大、英国、德国等采矿业发达或地下空间开发技术相对先进的国家率先开展了矿山关闭研究与实践热潮[8],有效地降低了矿山关闭带来的不利影响和冲击。进入 21 世纪,在全球关闭矿山数量急剧增加的现实压力以及可持续发展与绿色经济理念推动下,国际组织和相关学者针对废弃矿山与资源能源再生利用研究与实践逐步拓展,积累了大量废弃矿山转型模式案例、理论体系和法律规范。针对矿山关闭造成一定程度的资源浪费、资源转型利用率低、生态环境受损等突出问题,如何科学开发利用关闭矿山资源,促进资源枯竭型矿区转型,已成为当今世界能源环境领域的重要议题[9]。

中国是世界采矿大国之一,矿产资源丰富,已探明储量的矿产多达 148 种,各类大中型矿山企业 8 万余个[10]。随着我国经济社会的发展和煤炭资源的持续开发,部分矿井已到达其生命周期终点,也有部分落后产能矿井因开采成本高、亏损严重,面临关闭或废弃。据不完全统计,仅"十二五"期间就已在全国范围内淘汰落后煤矿 7 100 处,淘汰落后产能达 5.5 亿 t/a[11],预计到 2030 年,我国废弃矿井数量将达到 1.5 万处[12]。以山西省为例,2005—2017 年,累计关闭退出矿山约 3 375 座[13]。这些矿井在过去数十年的开采中,形成大体量的地下空间,传统的封井措施必然会造成巨大的地下空间资源浪费,致使井下上百亿固定资产骤变为零[14]。

然而针对关闭后的矿山应如何发展,如何采用有效的模型方法与技术手段科学评估与管理剩余资源,国内仍缺乏统一的理论框架与参考范例。因此,本文阐述了关闭矿山地下空间资源类型,针对不同资源类型给出可用空间估算方法,并从生态效益、经济效益和社会效益 3 方面选取指标构建矿山转型效益综合评价指标体系,得到矿山转型综合效益最大化。研究可为量化关闭矿山地下空间资源提供理论基础与方法参考,并为其他关闭/废弃矿井企业实现转型脱困和可持续发展提供切实可行的转型蓝本和参考范例。

1 关闭/废弃矿山转型相关研究

1.1 关闭/废弃矿山涵义

国内一般将"关闭矿山"定义为资源枯竭、地质条件复杂、宏观调控、市场影响、经营状况等造成的永久性停产矿山企业[15-16]。此外,也有部分学者将"关闭矿山"与"废弃矿山"、"关停矿山"概念等同,并将其定义为"因采矿活动而导致的原地貌被破坏或者被占用,而产生的露天采矿场、塌陷区、排土场

及尾矿库等无经济价值的土地"[17]。国外对"关闭矿山"这一概念有数个术语来解释,简称闭矿,通常被译为"closed mine、mine closure、abandoned mine、disused mine、disused mine、shut-down mine"以及"discarded mine"等,查阅相关文献资料,以"mine closure[18-19]"和"abandoned mine[20-21]"释义最为普遍。

1.2　关闭矿山理论方法与技术体系

国外矿山多为露天矿,相应的矿山关闭主要涉及环境保护、土地复垦和社会公众等问题,其中矿区土地恢复是核心内容,另外,社会公众磋商和参与问题也需要给予足够重视。美国、英国、加拿大、澳大利亚、德国等国已经历煤矿大规模开发和关闭的过程,这些国家非常重视关闭煤矿理论研究和管理模式的创新,已形成相对完善的关闭矿山修复理论框架和技术体系[22],包括闭矿计划、利益相关方参与、财经保障、闭坑方法及标准、采后监测及维护、责任交接等核心要素,且矿山关闭理念贯穿于矿业项目全生命周期过程,如图 1 所示。

国内针对关闭矿山理论与技术体系研究起步较晚,但发展迅速,涉及内容主要包括废水治理规划、固体废弃物治理规划、排土场治理规划、气体灾害和粉尘防治规划、采矿塌陷防治规划、矿区土地复垦规划、闭矿景观生态规划等。在长期探索过程中,国内科研机构和相关学者针对关闭矿山地上/下空间资源化利用理论框架和技术体系也进行了初步探索和研究,如图 2 所示。在此基础上,明确了关闭矿山资源化利用关键技术,包括关闭矿山长期安全评价与监测、长期环境评价与监测、开拓巷道空间利用技术等。

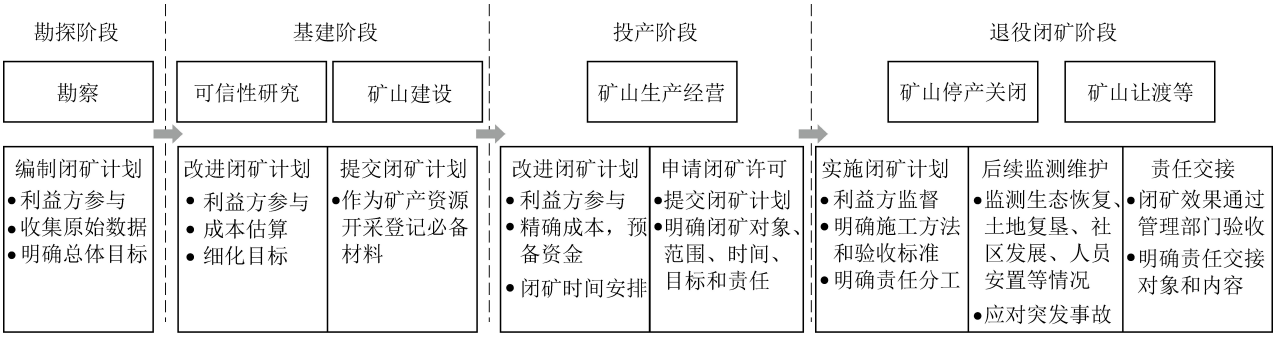


图 1　全生命周期的关闭矿山框架体系

Fig.1　Framework system of closed mines for whole life cycle

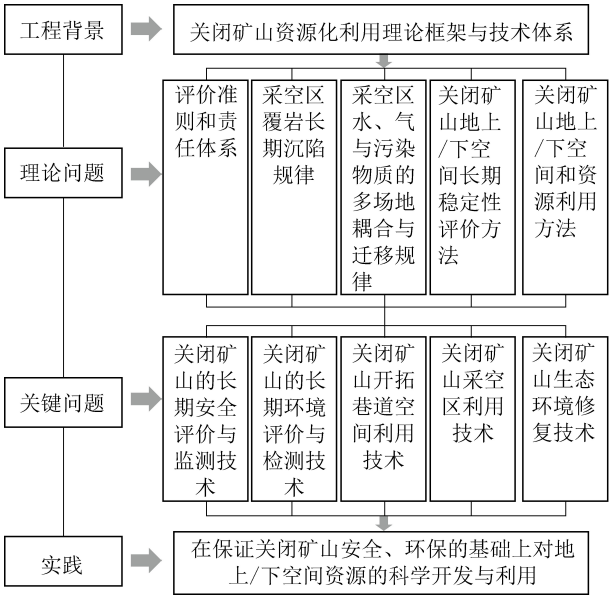


图 2　国内关闭矿山资源利用理论框架与技术体系

Fig.2　Theoretical framework and technical system of resource utilization of closed mines in China

2　关闭矿山地下空间资源定量评估

2.1　关闭矿山地下资源类型特征

2.1.1　关闭矿井地下资源类型

关闭矿山地下资源种类众多,主要包括空间资源、井下设备、残留煤炭资源等,见表 1。井下空间主要有井筒、巷道、硐室及采空区等空间资源。井下设备主要包括井下采掘设备、运输设备、排水设备、通风设备等。我国 90%以上矿井为井工矿,煤炭资源的开采导致覆岩含水层破坏,为保证安全生产,矿井水必须大量排出,若这些矿井水不加处理直接排出,会污染地表湖泊、河流、水库、池塘等,导致地表生态环境恶化。同时关闭煤矿还有因开采需要而残留的煤炭资源。因此,随着关闭矿井数量的大幅度增加,解决关闭矿井资源的转型利用问题迫在眉睫。

2.1.2　关闭矿山地下空间类型

煤矿闭井后通常会形成各类地下空间,这些地下空间包括工作面原有生产系统形成的各类井巷及煤炭开采形成的各种采空区。

①井筒:是矿井通往地面的主要进出口,其断面大小决定了矿井用途、井型、服务年限,在煤矿建设和生产中为井下提供各种动力支持和生命保障[23]。②巷道:是地表与矿体间钻凿出的各通路,用来运煤、通风、排水、行人及为设备采出煤炭开凿的各种必要准备工程[24]。③硐室:在设计之初通常会采用高强度的支撑材料和特殊的结构形式,因此服务年限较长,矿井关停后,未来空间利用率较高。④采空区:由人为挖掘产生的"空洞",采空区的存在使矿山安全生产面临很大的安全问题[25]。

表 1　关闭矿井地下资源类型

Table 1　Types of underground resources in closed mines

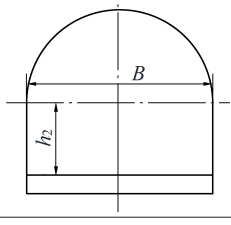
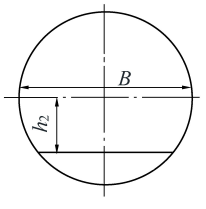
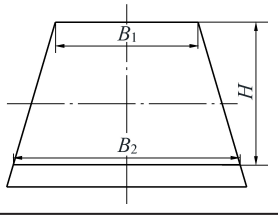
分类	项目
空间资源	井筒、硐室、巷道及采空区
井下设备	采掘设备、运输设备、排水设备、通风设备
水资源	含水层水、井底水仓水、老空区水、巷道积水
残留煤炭资源	大巷、井筒、工作面、断层、井田边界等位置的保护煤柱

2.2　井下巷道可利用空间估算

巷道断面形状主要包括半圆拱形、圆形拱形和梯形,形状规则见表 2[26],井下不同类型巷道可利用空间可根据式(1)计算:

表 2　不同类型巷道规格及断面计算

Table 2　Different types of roadway specifications and section calculatiuon

巷道类型	断面形状	净断面面积计算公式
半圆拱形巷道		$S = B(0.39B + h_2)$
圆形拱形巷道		$S = B(0.24B + h_2)$
梯形巷道		$S = 0.5(B_1 + B_2)H$

注:S 为净断面面积;B 为巷道净宽;h_2 为碴面起巷道壁高;B_1 为巷道顶梁处净宽度;B_2 为巷道底板处净宽度;H 为碴面起巷道沉实后净高。

$$V = \sum_{i=1}^{n} SL \quad (i = 1,2,3,\cdots\cdots) \tag{1}$$

式中:V 为巷道可利用空间;S 为巷道净断面积;L 为巷道长度;i 为巷道条数。

2.3　煤矿采空区可利用空间估算

1)煤炭采出体积 V。煤炭采出体积 V、地表沉陷体积 V_1、岩石卸压膨胀体积 V_2及工作面采空区地下空间体积 V_3存在如式(2)的关系[27]:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \tag{2}$$

煤炭采出体积 V 可根据每年煤炭产量除以平均密度计算。

2)地表沉陷体积 V_1。地表沉陷体积 V_1与地表下沉系数 η 相关[28],如式(3)所示:

$$V_1 = V\eta \tag{3}$$

3)岩石卸压膨胀体积 V_2。岩石卸压膨胀体积 V_2可根据地下空间总量与膨胀系数 K 计算[29],如式(4)所示:

$$V_2 = V_3K \tag{4}$$

4)工作面采空区地下空间体积 V_3。

$$V_3 = V - V_1 - V_2 = V - V\eta - V_3K = \frac{V(1-\eta)}{1+K} \tag{5}$$

2.4　井下残留煤炭资源估算

根据垂直剖面法计算保安煤柱,继而计算残余煤炭资源量[30],具体计算如式(6)所示。

$$M = \sum_{i'=1}^{n} DLH'\lambda \quad (i' = 1,2,3,\cdots\cdots) \tag{6}$$

式中:M 为估算煤柱资源量;D 为煤柱宽度;L 为估算煤柱长度;H'为煤层厚度;λ 为煤的容重;i'为煤柱数量。

3　关闭矿山地下空间转型利用路径

3.1　不同资源利用模式

国内外学者对矿山转型研究较多,通过分析总结,矿山地下转型主要有 3 个模式,包括地下资源再利用模式、生态发展模式和经济开发利用模式。地下资源再利用模式包括矿产资源再利用模式、水资源再利用模式、可再生能源利用模式、可再生能源储存模式、地热资源利用模式;生态发展模式包括地下特种养殖、地下农业、生态景观模式;经济开发利用模式包括矿业旅游开发模式、地下仓储模式、地下实验室、地下疗养中心、地下工业模式。矿山地下空间利用模式具体内容见表 3[31-33]。每一种利用模式需要矿山满足不同的条件,如德国巴特-克劳伊次纳赫小城利用一个汞矿的天然放射性氡气建立了世界

上第一条地下氡气通道,使用氡气给游客治病。同时隧道内还设有不同温度的疗养区,游客可尝试“放射性蒸汽浴”。

3.2　关闭矿山地上/下综合转型方案选择依据

根据矿井地下工程情况、地质风险、地表变形、地下空间体积、关闭矿山年限、采掘方式、区域发展排名、闭矿后维持人数、区域特色,选择转型方案,使转型后的发展更加符合当地实际。如地下观光旅游开发对矿山地质条件有一定要求,需要矿山围岩稳定,支护条件好,适合具有一定规模,地质构造稳定且安全系数较高,区位条件较为便捷的关闭矿山试行;地下存储对矿井深度、矿区及周围地质构造有较高要求,如果利用矿井的巷道、硐室等井下空间,其稳定性和使用寿命也是必须考虑的因素,存放放射性废物等工业废物时,还需考虑放射性废物与周围岩层环境是否会产生理化反应、废物存放环境可能发生的变化等因素;地下能源及伴生能源的开发除了要考虑矿山自身资源禀赋、地质条件外,还要考虑市场导向。矿区内环境质量较好、交通便利、基础设施完善且附近有成熟景区的关闭矿山应以休闲度假模式为转型利用方向;采煤塌陷区容易造成积水的废弃矿区应以湿地恢复为主;地理区位差、复垦对土地资源数量改善有限、开采面无特殊景观价值、新景观资源也无法拓展的废弃矿区应首选植被恢复模式。关闭矿山可选择的转型方案并不单一,综合效益最大化是方案选择的标准。

表 3　关闭矿山地下空间利用模式

Table 3　Utilization mode of underground space in closed mines

转型模式	可选方案	典型案例
地下资源再利用模式	矿产资源再利用模式	荷兰海尔伦废弃煤矿地热发电站
	水资源利用模式	德国萨克森州废弃矿井抽水蓄能发电
	可再生能源储存模式	山西寺河矿井下瓦斯抽取利用
	地热资源利用模式	加拿大萨塞克斯郡利用废弃矿井水开发地热能
生态发展模式	地下特种养殖	加拿大萨德伯里地下矿井鱼苗养殖
	地下农业模式	安徽淮北市高新技术示范园、美国匹兹堡市郊区矿道蘑菇种植基地
	生态景观模式	日本“煤都”夕张多元化产业区
经济利用开发模式	矿业旅游开发模式	南威尔士布莱纳文镇附近布莱纳文工业遗产景观
	地下仓储模式	比利时 Andelrues 和 Peronnes 废弃矿井地下储气库
	地下实验室	萨德伯里中微子实验室、日本神岗地下实验室
	地下疗养中心	巴特-克劳伊次纳赫汞矿
	房地产开发模式	挪威奥斯陆地下手球运动场

矿山转型综合效益是指矿山企业为了寻求可持续发展,将废弃矿井资源充分利用,再因地制宜转型为其他发展模式过程后产生的多种效益,具体可划分为生态效益、经济效益和社会效益[34]。

生态效益是指关闭矿井通过开发利用带来生态环境质量的改善,主要表现在涵养水源、保持水土、净化环境等方面[35]。经济效益是最易获取的数据和进行量化的效益,主要来自于工业文化旅游,衡量指标为矿山转型投产初期政府的补贴、发展工业旅游后各景点门票收入及旅游业带动当地餐饮业发展的餐饮收入。社会效益是某种社会活动所产生的社会效果和影响,是一种间接效益。社会效益需要借助社会活动才能反馈于社会,衡量指标主要为扩大就业、提升城市形象、提高发展水平这 3 方面。

3.3　关闭矿山转型综合效益评估指标体系构建

关闭矿山转型综合效益评估需要依赖合理的评价指标体系,科学设置评估指标是客观评价与反映矿山转型综合效益高低的重要基础。这些评估指标可反映矿区转型过程中产生的经济效益、生态效益和社会效益,还可以反映矿区在转型时的多目标特征,如追求综合效益最大化。

3.3.1　指标体系的构成

合理的关闭矿山转型综合效益评估指标体系是基于关闭/废弃矿山转型发展的基础理论,运用全面的评价方法与手段,从多维度、多方面选取能够反映矿山转型带来综合效益的相关指标。首先,按经济效益、生态效益和社会效益 3 个划分标准,并根据科学、可行的原则选择合适指标,最后构建详细的评价指标体系。指标选取时需坚持指标体系构建原则,广泛参考国内外各研究机构及学者的相关研究,结合矿山转型应用实践,选择具有代表性的典型矿山转型项目,挑选并逐步细分指标。

3.3.2　指标体系的权重确定

评估指标体系中每一个指标的权重赋值对准确

评价关闭矿山转型综合效益尤为重要。层次分析法是一种定性与定量相结合的决策方法,该方法与综合效益评估指标体系特点相吻合,能够对评估指标进行合理赋权,因此采用层次分析法计算各类指标权重[36]。两两比较每一层次中各元素来判断元素的相对重要性,构造判断矩阵。通过计算,确定评价指标相对重要性的总体排序。

3.3.3 矿山转型综合效益评价模型

1)分析综合效益评价指标系统中各因素间的相互关系,构造层次分析结构模型。评估指标体系包括 3 部分,第 1 部分是目标层(D),只有一个因素,反映矿山转型综合效益的水平;第 2 部分是准则层(P),是实现目标层的中间环节,包含生态效益指标 P_1、社会效益指标 P_2、经济效益指标 P_3;第 3 部分是指标层(A),包含涵养水土 a_{11}、净化水源 a_{12}、净化环境 a_{13}、扩大就业 a_{21}、提升城市形象 a_{22}、提高发展水平 a_{23}、政府补贴 a_{31}、门票收入 a_{32}和餐饮业发展 a_{33}在内的 9 个描述性和评估性指标。矿山转型综合效益评价指标体系层次结构如图 3 所示。

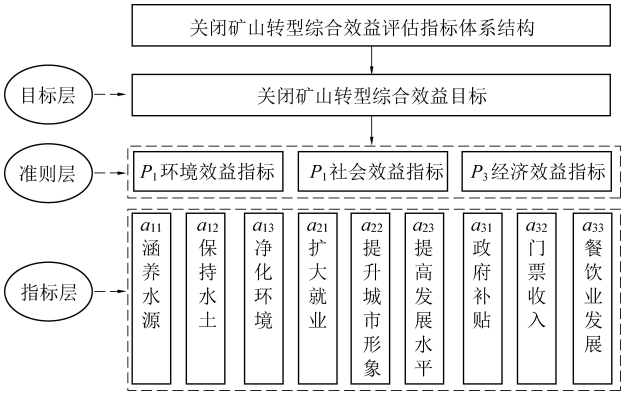


图 3　矿山转型综合效益评价指标体系层次结构

Fig.3　Hierarchical structure chart of comprehensive benefit of evaluation index system for mine transformation

2)两两比较同一层次中要素与上一层次中某一准则的重要性,形成矩阵进行判断。n 个因素对准则 P 的相对权重 C,并通过一致性检验。

3)被比较的因素对某一准则的相对权重采用判断矩阵计算。通过调查问卷获得各指标值,将指标权重与指标值相乘,得到转型方案的综合效益值,选择综合效益最大值的方案作为矿区转型的最佳路径。

4　渭河流域某矿地下资源评估与再利用途径

4.1　渭河流域某矿地下空间资源概况

渭河流域某矿井关闭后,井下资源种类众多,其中,井下可用空间主要包括主副斜井井筒,一水平运输大巷和回风大巷,井底车场、中央水泵房和通道、材料库等硐室,以及井下残留煤炭资源。

矿井主斜井净宽 4.0 m,净高 3.2 m,净断面积 11.1 m^2,斜长 820 m。副斜井净宽 4.4 m,净高 3.25 m,净断面积 12.2 m^2,斜长 561 m。根据计算可得该

矿山井下可利用空间为 1.18×10^5 m^3。包括:①矿井井筒可利用空间约为 1.6×10^4 m^3。②一水平运输大巷和回风大巷可利用空间约为 8.1×10^4 m^3。③井底车场及主要硐室可利用空间约为 2.1×10^4 m^3。

此外,该矿区遗留煤炭资源主要包括井田内铁路和河流、水库、工业广场及村庄保护煤柱、工作面保护煤柱,经计算总残留煤炭资源量达 5 600 万 t。矿区地表无明显变形,地下工程完全停滞,地质风险属于低易发区,地表水系和地下水较为丰沛,采掘方式为斜井开拓,距离县城 145.5 km,关闭矿山年限 3.8 a。基于矿区地下资源概况,该矿区地下资源转型可选方案为地下仓储和井下旅游。

4.2　渭河流域某矿转型综合效益评价

4.2.1 层次结构模型

根据该矿井的资源特点,参考国内外有关指标选取,设计目标层、准则层和指标层。

4.2.2 建立判断矩阵并确定权重

根据综合效益评价层次结构模型,建立判断矩阵;利用层次分析法得到各指标的权重分配,见表 4。

表 4　矿山转型综合效益评价指标权重汇总

Table 4　Weight of evaluation index of comprehensive benefit for mine transformation

目标层 D	准则层 P	权重	指标层 A	权重	综合权重
矿山转型利用综合效益	生态效益(P_1)	0.193 6	涵养水源(a_{11})	0.051 6	0.010 0
			保持水土(a_{12})	0.051 6	0.010 0
			净化环境(a_{13})	0.062 7	0.012 1
	社会效益(P_2)	0.394 3	扩大就业(a_{21})	0.136 0	0.053 6
			提升城市形象(a_{22})	0.099 6	0.039 3
			提高发展水平(a_{23})	0.130 3	0.051 4
	经济效益(P_3)	0.412 1	政府补贴(a_{31})	0.106 6	0.043 9
			门票收入(a_{32})	0.199 4	0.082 2
			餐饮业发展(a_{33})	0.162 2	0.066 8

4.2.3 确定评价因素

根据废弃矿山转型综合效益评价指标体系,设:

$Z=(P_1,P_2,P_3)=$(生态效益指标,社会效益指标,经济效益指标),其中,Z 为转型综合效益。

$P_1=(a_{11},a_{12},a_{13})=$(涵养水源,保持水土,净化环境),$P_2=(a_{21},a_{22},a_{23})=$(扩大就业,提升城市形象,提高发展水平),$P_3=(a_{31},a_{32},a_{33})=$(政府补贴,门票收入,餐饮业发展)。

4.3　地上/下综合转型方案效益

4.3.1　矿山转型方案

根据该矿的区域位置和资源特征,提出 3 种地上+地下的转型方案。

1)矿山公园+度假村模式。矿区内部配套设施完善,地理位置优越,交通便利,周边拥有配套设施景区,根据这些特点将矿区打造成矿山公园或者旅游度假村进行旅游资源开发。该转型方案不仅可以体现矿业发展史内涵,还可以保护工业遗迹。

2)矿山公园+矿山博物馆。矿区经长期开采,形成了丰富的工业遗迹和人文历史,矿区内设备保存完备,将矿区转型成集矿山公园和矿山博物馆为一体的模式,具备研究价值和教育功能。从矿业遗迹展示、公园综合服务、科教互动体验等功能出发,建立国家矿山公园和矿山博物馆。

3)矿山博物馆+地下物资储备。矿区地下空间资源丰富,利用矿井的特殊性质,可将矿井地下空间打造成地下温室,用来储存和保鲜蔬菜水果、养殖和种植特种动植物(如适合在阴暗潮湿的环境中生长的动植物)、或者储藏特种物质;也可进行地下水库建设和矿井地下水储存利用,解决西部地区实际难题。同时发展矿山博物馆模式,将地上和地下空间进行有机结合,有效推动矿区转型。

4.3.2　矿山转型综合效益

根据该矿的资源概况分析可知,其转型利用符合矿业旅游开发要求,依托周边旅游景区,该矿既可以做矿山公园,也可以利用矿区闲置建筑改建为休闲度假场所。不同开发利用模式带来的综合效益不同,综合效益最大化是具体利用方案选择的关键。利用层次分析法分析 3 种转型模式带来的综合效益,寻求该矿最佳转型方案。各指标效益值如图 4 所示。

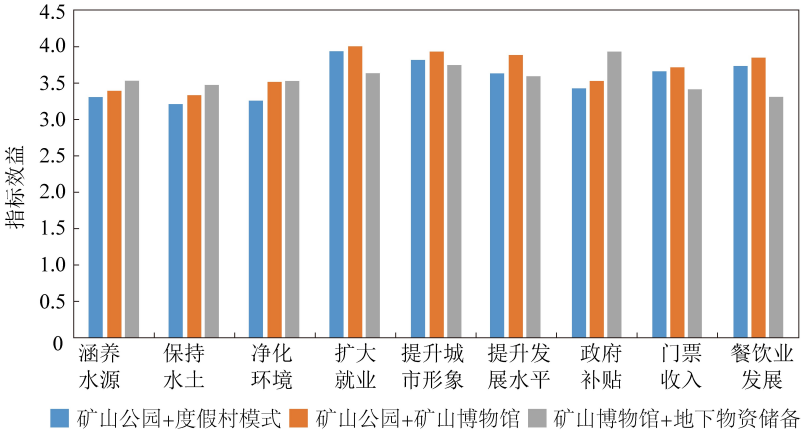


图 4　渭河流域某矿不同转型方案指标效益数据

Fig.4　Benefit under different transformation schemes of mine in Weihe River Basin

由图 4 可知,3 种转型方案中,矿山博物馆+地下物资储备带来的环境效益最高;矿山公园+矿山博物馆带来的经济效益最高。采用平均值描述各效益指标值,见表 5。根据表 5 得到各个指标效益值及权重,据此计算不同方案下的综合效益。经计算,矿山公园+度假村模式的综合效益 $Z_1=3.623$,矿山公园+矿山博物馆的综合效益 $Z_2=3.748$,矿山博物馆+地下物资储备库的综合效益 $Z_3=3.551$。通过比较,矿山公园+矿山博物馆的综合效益最大,因此,渭河流域某关闭矿山的最佳转型方案为矿山公园+矿山博物馆。

表 5　不同转型方案效益

Table 5　Benefit of different transformation schemes

指标	不同转型方案下综合效益		
	矿山公园+度假村模式	矿山公园+矿山博物馆	矿山博物馆+地下物资储备
涵养水源	3.31	3.39	3.52
保持水土	3.20	3.33	3.47
净化环境	3.25	3.50	3.52
扩大就业	3.92	4.01	3.63
提升城市形象	3.81	3.92	3.75
提高发展水平	3.63	3.88	3.59
政府补贴	3.42	3.53	3.92
门票收入	3.65	3.71	3.41
餐饮业发展	3.73	3.85	3.31

5 结　　语

关闭/废弃矿山地下空间转型利用是矿井资源变废为宝的关键措施,对我国实施绿色低碳循环发展具有重大意义。研究划分了关闭矿山地下资源类型,提出不同类型井下空间计算方法和残留煤炭资源估算方法,从经济、环境和社会 3 方面选取评价指标,利用层次分析法确定指标权重,建立矿山转型综合效益评价模型,并以渭河流域某关闭矿山为例,定量评估该矿山地下空间资源,给出了矿山最佳转型方案。研究响应了国家 2030 年碳达峰的政策纲领,基于“增汇减源”的转型路径解决了关闭矿山企业的现实需求,有效提高了矿山资源全生命周期利用效率,引领关闭矿山转型发展新方向,为贯彻落实“双碳”战略目标提供新思路。

我国关闭矿山成功转型数量比例较低,部分转型产业如地下医疗、地下国防利用等尚待突破,打造关闭矿山生态系统的关键科技尚待研究,关闭矿山转型在空间、数量、新科技运用上均有继续探索的空间。在碳达峰和碳中和背景下,我国应积极发展多元化关闭矿山转型利用方向,将科技创新与制度保障相结合,加快关闭矿山绿色可持续转型。

参考文献(References):

[1] 邹才能,熊　波,薛华庆,等. 新能源在碳中和中的地位与作用[J]. 石油勘探与开发,2021,48(2):411-420.
ZOU Caineng,XIONG Bo,XUE Huaqing,*et al*. The role of new energy in carbon neutral[J]. Petroleum Exploration and Development,2021,48(2):411-420.

[2] BAINTON N,HOLCOMBE S. A critical review of the social aspects of mine closure[J]. Resources Policy,2018,59:468-478.

[3] 张进德,郗富瑞. 我国废弃矿山生态修复研究[J]. 生态学报,2020,40(21):7921-7930.
ZHANG Jinde,XI Furui. Study on ecological restoration of abandoned mines in China[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(21):7921-7930.

[4] 孟召平,李国富,田永东,等.晋城矿区废弃矿井采空区煤层气地面抽采研究进展[J].煤炭科学技术,2022,50(1):204-211.
MENG Zhaoping,LI Guofu,TIAN Yongdong,et al. Research progress on surface drainage of coalbed methanein abandoned mine gobs of Jincheng mining area[J].Coal Science and Technology,2022,50(1):204-211.

[5] GETTY R,MORRISOn-Saunders A. Evaluating the effectiveness of integrating the environmental impact assessment and mine closure planning processes[J]. Environmental Impact Assessment Review,2020,82:106366.

[6] 霍　冉,徐向阳,姜耀东. 国外废弃矿井可再生能源开发利用现状及展望[J]. 煤炭科学技术,2019,47(10):267-273.
HUO Ran,XU Xiangyang,JIANG Yaodong. Status and prospect on development and utilization of renewable energy in abandoned mines abroad[J]. Coal Science and Technology,2019,47(10):267-273.

[7] 袁　亮,姜耀东,王　凯,等. 我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J]. 煤炭学报,2018,43(1):14-20.
YUAN Liang,JIANG Yaodong,WANG Kai,*et al*. Precision exploitation and utilization of closed/abandoned mine resources in China[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(1):14-20.

[8] 何　皓,郭二民,路　平,等. 国外关闭矿山环境管理策略研究与启示[J]. 环境保护,2018,46(19):71-73.
HE Hao,GUO Erming,LU Ping,*et al*. Review on overseas closed mine environmental management strategies[J]. Environmental Protection,2018,46(19):71-73.

[9] 常春勤,邹友峰. 国内外废弃矿井资源化开发模式述评[J]. 资源开发与市场,2014,30(4):425-429.
CHANG Chunqin,ZOU Youfeng. Review on resource development mode of abandoned underground space of mine[J]. Resource Development and Market,2014,30(4):425-429.

[10] 孟鹏飞. 废弃矿井资源二次利用的研究[J]. 中国矿业,2011,20(7):62-65.
MENG Pengfei.Study on the recycling of the discarded mine resources[J]. China Mining Magazine,2011,20(7):62-65.

[11] 国家发改委. 煤炭工业发展“十三五”规划[R]. 2016.

[12] 袁　亮. 我国煤炭资源高效回收及节能战略研究[J]. 中国矿业大学学报(社会科学版),2018,20(1):3-12.
YUAN Liang. Strategic studies of high-efficient and energy-effective coal extractions in China[J]. Journal of China University of Mining and Technology(Social Sciences),2018,20(1):3-12.

[13] 张　农,阚甲广,王　朋. 我国废弃煤矿资源现状与分布特征[J]. 煤炭经济研究,2019,39(5):4-8.
ZHANG Nong,KAN Jiaguang,WANG Peng. Study on resources and distribution of abandoned mines in China[J]. Coal Economic Research,2019,39(5):4-8.

[14] 袁　亮,杨　科. 再论废弃矿井利用面临的科学问题与对策[J]. 煤炭学报,2021,46(1):16-24.
YUAN Liang,YANG Ke. Further discussion on the scientific problems and countermeasures in the utilization of abandoned mines[J]. Journal of China Coal Society,2021,46(1):16-24.

[15] 史箫笛,康小兵,罗向奎,等. 闭坑煤矿井下空间资源开发利用评价[J]. 煤炭科学技术,2020,48(3):112-119.
SHI Xiaodi,KANG Xiaobing,LUO Xiangkui,et al. Development and utilization evaluation of underground space resources in closed pit coal mine[J]. Coal Science and Technology,2020,48(3):112-119.

[16] 朱　琳,卞正富,曹海涛. 资源型城市矿山关闭对社会、经济和环境的影响—以徐州市贾汪区为例[J]. 城市问题,2013(3):16-19.
ZHU Zhenglin,BIAN Zhengfu,CAO Haitao.Influence on society,economy and environment by mining closure of resource-based cities:taking Jiawang District of Xuzhou City for example[J]. Urban Problems,2013(3):16-19.

[17] 莫　爱,周耀治,杨建军. 矿山废弃地土壤基质改良研究的现

状、问题及对策[J]. 地球环境学报,2014,5(4):292-300.
MO Ai,ZHOU Yaoyi,YANG Jianjun. Existing situation,problems and countermeasures on amelioration of soil matrix in mining wasteland[J]. Journal of Earth Environment, 2014, 5(4): 292-300.

[18] MAITI S K. Ecorestoration of the coalmine degraded lands[M]. Springer,Berlin:2013.

[19] PARICHEH M, OSANLOO M. A simulation-based framework for estimating probable open-pit mine closure time and cost[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 167: 337-345.

[20] CHERRY D S,CURRIE R J,SOUCEK D J,*et al*. An integrative assessment of watershed impacted by abandoned mine land discharges[J].Environmental Pollution,2001,111(3):377-388.

[21] HIGGINS P J. An environmental forensic chemistry experiment involving abandoned mine drainage remediation[J]. Journal of Chemical Education,2020,97(4):1083-1086.

[22] DEBNATH A K,SHEKHAR S,Ranjan R. Mine closure-World Bank approach visù-vis Indian context[J]. Journal of Mines, Metals and Fuels,2011,59(9):274-278.

[23] 刘德军,左建平,刘海雁,等. 我国煤矿巷道支护理论及技术的现状与发展趋势[J]. 矿业科学学报,2020,5(1):22-33.
LIU Dejun,ZUO Jianping,LIU Haiyan,*et al*. Development and present situation of support theory and technology in coal mine roadway in China[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2020,5(1):22-33.

[24] 侯朝炯,勾攀峰. 巷道锚杆支护围岩强度强化机理研究[J]. 岩石力学与工程学报,2000(3):342-345.
HOU Chaojiong,GOU Panfeng. Mechanism study on strength enhancement for the rocks surrounding roadway supported by bolt [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000(3):342-345.

[25] 李广尚,邓　丁,李榕楠,等. 下层采空区跨度对采空区顶板稳定性影响分析[J]. 中国矿业,2020,29(6):104-109.
LI Guangshang,DENG Ding,LI Rongnan,*et al*. Analysis of influence of lower goaf span on goaf roof stability[J] China Mining Magazine,2020,29(6):104-109.

[26] 唐淑民. 经济巷道断面形状设计初探[J]. 煤矿设计,1996(9):15-18.
TANG Shumin. Study on section shape design of economic roadway[J]. Coal Engineering,1996(9):15-18.

[27] 谢和平,高明忠,刘见中,等. 煤矿地下空间容量估算及开发利用研究[J]. 煤炭学报,2018,43(6):1487-1503.
XIE Heping, Gao Mingzhong, Liu Jianzhong, *et al*. Research on exploitation and volume estimation of underground space in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1487-1503.

[28] 瞿群迪,姚强岭,李学华. 充填开采控制地表沉陷的空隙量守恒理论及应用研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2010,25(1):8-12.
QU Qundi, YAO Qiangling, LI Xuehua. Research on theory of space conversation for subsidence control in backfilling mining and its application[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology(Natural Science Edition),2010,25(1):8-12.

[29] 谢和平,张泽天,高　峰,等.不同开采方式下煤岩应力场-裂隙场-渗流场行为研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(10): 2405-2417.
XIE Heping,ZHANG Zetian,GAO Feng,*et al*. Stress-fracture-seepage field behavior of coal under different mining layouts[J]. Journal of China Coal Society,2016,41(10):2405-2417.

[30] 徐忠和,高红波,高　鲁,等. 沿采空区掘进煤层巷道合理保安煤柱留设计算[J]. 煤矿安全,2015,46(6):196-199.
XU Zhonghe, GAO Hongbo, GAO Lu, *et al*. Calculation for leaving reasonabe safety coal pillar in seam excavation roadway along goaf[J]. Safety in Coal Mines,2015,46(6):196-199.

[31] 谢和平,高明忠,高　峰,等. 关停矿井转型升级战略构想与关键技术[J]. 煤炭学报,2017,42(6):1355-1365.
XIE Heping,GAO Mingzhong,GAO Feng,*et al*. Strategic conceptualization and key technology for the transformation and upgrading of shut-down coal mines[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(6):1355-1365.

[32] 肖静蕾. 矿山公园景观规划设计研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2012.
Xiao Jinglei. A study on the planning and design of mine park landscape-a case study of Huangshi national mine park[D].Wuhan:Hubei University of Technology,2012.

[33] 王　燕. 矿业型工业遗存的景观重构研究[D]. 长沙:湖南科技大学,2016.
WANG Yan. Type mining industrial heritage landscape reconstruction research[D]. Changsha: Hunan University of Science and Technology,2016.

[34] 周富春,金　旺,孙　阳. 矿山环境治理效益评价方法及实证分析[J]. 环境工程,2013,31(1):85-88.
ZHOU Fuchun, JIN Wang, SUN Yang. Analysis of evaluation method and case to the mine environmental management[J]. Environmental Engineering,2013,31(1):85-88.

[35] 陈　晶,余振国,孙晓玲,等. 基于山水林田湖草统筹视角的矿山生态损害及生态修复指标研究[J]. 环境保护,2020,48(12):58-63.
CHEN Jin,YU Zhenguo,SUN Xiaoling,*et al*. Study on ecological damage of mine and the ecological remediation indexes in view of the holistic approach to conserving mountains,rivers,forests,farmlands,lakes,and grasslands[J]. Environmental Protection,2020, 48(12):58-63.

[36] KULAKOWSKI K. Understanding the analytic hierarchy process [M]. Florida:CRC Press,2020.