

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.04.012

基于模糊数学理论的煤矿地下空间开发利用适宜性评价 ——以白源煤矿为例

王红杰^{1,2,3}, 卞孝东^{1,2,3*}, 邓晓伟⁴, 冯乃琦^{1,2,3}, 卢邦稳^{1,2,3}

(1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006; 2. 自然资源部多金属矿综合利用评价
重点实验室, 河南 郑州 450006; 3. 西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710054;
4. 河南省资源环境调查四院, 河南 郑州 450016)

摘 要:针对煤矿地下空间开发利用适宜性评价进行了研究,提出了基于模糊数学理论的煤矿地下空间开发利用适宜性评价方法,为煤矿企业转型脱困焕发新生和资源枯竭型城市的转型发展提供新思路。首先建立评价指标体系,包括空间资源量、稳定性因素、安全性因素、空间环境因素、经济性因素等5大类以及相应的20小项评价指标,同时确定了体系中各个指标的评定等级标准;其次利用层次分析法确定评价指标权重;最后运用模糊数学理论进行综合评判。并以萍乡市白源煤矿为例开展煤矿地下空间开发利用适宜性评价,结果为较适宜。

关键词:煤矿地下空间;模糊数学理论;白源煤矿

中图分类号:P618.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-6248(2021)04-0156-15

Suitability Evaluation of Underground Space Development and Utilization of Coal Mine Based on Fuzzy Mathematics Theory ——Taking Baiyuan Coal Mine as an Example

WANG Hongjie^{1,2,3}, BIAN Xiaodong^{1,2,3}, DENG Xiaowei⁴, FENG Naiqi^{1,2,3}, LU Bangwen^{1,2,3}

(1. Zhengzhou Institutes of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, China Academy of Geological Sciences, Zhengzhou 450006, Henan, China; 2. Key Laboratory for Ploy-metallic Ores' Evaluation and Utilization of Ministry of Natural Resources, Zhengzhou 450006, Henan, China; 3. Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. The Fourth Institute of Resource and Environment Investigation of Henan Province, Zhengzhou 450016, Henan, China)

Abstract: This paper studied the suitability evaluation of the underground space development and utilization of coal mine and put forward the evaluation method based on fuzzy mathematics, which provided fresh ideas for coal mine enterprises and resource-exhausted cities. An evaluation index system, including 5 categories (space resources, stability factors, safety factors, space environ-

收稿日期:2021-01-20;**修回日期:**2021-05-23

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“长江中游黄石-萍乡-德兴矿山集中区综合地质调查”(DD20190269),“东天山昌吉-双沟山地区区域地质调查(中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所)”(DD20190067)。

作者简介:王红杰(1990-),男,河南南阳人,助理研究员,主要从事区域地质、生态环境地质等领域的科研工作。E-mail: cug-bhongjie@163.com。

*** 通讯作者:**卞孝东(1963-),男,河南民权人,高级工程师,主要从事煤田地质科研工作。E-mail: 406449404@qq.com。

mental factors, and economic factors) and 20 small evaluation indexes, was established. Then determine the rating standards for each index in the system and the weight of the evaluation index. Finally use the fuzzy mathematics theory for comprehensive evaluation. The study took Baiyuan coal mine in Pingxiang city as an example to evaluate the suitability and got a suitable evaluating result.

Keywords: underground space of coal mine; fuzzy mathematics theory; Baiyuan coal mine

随着煤炭绿色资源量的不断开采利用,位于全周期末端的废弃矿井问题逐步引起人们的重视,预计到2030年,中国废弃矿井将达到1.5万处,直接关闭或废弃不仅造成资源的巨大浪费和国有资产流失,还有可能诱发后续安全、环境及社会问题。

煤矿关闭后,由于矿山开发过程中,出于安全或环境方面考虑,在矿井内还有剩余的大量资源。例如,保护煤柱的煤炭资源、煤层气、矿井水、地热、地下空间与地表土地等资源。这些资源包含地质资源和空间资源,对这些资源的继续合理开发利用能够避免资源的浪费和破坏,从而继续创造经济价值。

同时,煤矿矿山关闭后由于电力、排水、通风等设施的关闭,一是井下的水位抬升扰动破坏了矿区不同充水含水层原有的地下水补、径、排条件;二是煤矿井下瓦斯聚集,浓度逐步增高,对附近生产矿山形成透水或瓦斯突出爆炸等安全风险,对矿井周围水生态环境形成威胁;三是大面积的采空区使上覆岩层发生移动,在垂向上“三带”发育,随着时间的推移有可能出现地面沉陷及地裂缝,影响地表形态、地面构建筑物、公路、土地资源及水体。对煤矿地下空间开发利用可以减少矿井废弃后对环境的污染和生态的破坏。

针对废弃矿井开发利用,可以变废为宝,产生经济价值。例如,国内外有以旅游和科普教育为目的的开发模式,利用矿井工业遗迹进行研究,使其观赏与科普教育价值得到体现;有以地下储库为目的的地下空间开发模式,这种模式具有节约占地、降低环境污染等优点;还有把废弃矿井地下空间开发成放射性、危险性废弃物固体的储存和处置场地的模式等(王小耿等,2018)。这些开发模式可以安排大量的就业人员,降低了社会失业率,从而创造出可观的社会效益。

国内针对煤矿地下空间开发利用研究还不是很多,广大学者多从二次开发利用角度进行探讨,对于煤矿地下空间开发利用适宜性评价工作开展较少

(谢和平等,2018;孟鹏飞等,2011;段忠诚等,2017;贺小龙等,2019;秦荣军等,2017;刘长武等,2006;姜素等,2018;常春勤等,2014;刘峰等,2017;姜玉松等,2003)。谢和平等(2018)系统调研分析了中国煤矿地下空间容量,绘制了全国生产煤矿井下可利用空间分布,探讨了煤矿地下空间开发利用的六大设计原则和四大设计理念,并以京西煤矿地下空间开发利用为例进行探讨。孟鹏飞等(2011)针对废弃矿井资源二次利用进行研究,分析了中国废弃矿井分布情况,针对国内外废弃矿井利用方法、治理原则进行探讨,提出了废弃矿井地下空间二次利用的建议。

笔者以江西省萍乡市白源煤矿为例,基于模糊数学理论方法,在对煤矿地下空间资源的地质、水文、地形及地下空间开发利用现状、安全、经济等条件进行分析和研究的基础上,总体判断煤矿地下空间开发利用工程难度,为煤矿地下空间开发利用总体规划 and 详细规划的编制提供依据,探索煤矿地下空间开发利用适宜性评价方法,为煤矿企业转型脱困焕发新生和资源枯竭型城市的转型发展提供新思路。

1 评价指标

煤矿地下空间资源开发利用受多种因素制约,开展煤矿地下空间开发适宜性评价工作需要根据实际情况和已掌握的资料和数据,将空间资源量、稳定性因素和安全性因素、空间环境因素和经济性因素等这5大类因素作为评价因素。

(1)空间资源量。煤矿地下空间的空间资源量决定了其开发利用的规模、效益周期,影响着开发的潜力。

(2)稳定性因素。只有达到稳定状态的煤矿地下空间才适宜开发。对于围岩的性质,一般情况下,塑性围岩对巷道围岩的稳定性最为不利;脆性岩石的强度主要取决于岩石结构,其结构状态通常用破

碎程度或完整状态来表示。相同的岩性下,岩体愈破碎,围岩的稳定性愈差。地质构造对煤矿地下工程建设有重要影响,一是容易引发崩塌等次生灾害,导致地基失稳;二是断裂破碎带周围岩体强度较低,是地下水富集地带,容易引发冒顶和突涌等现象。巷道支护能够缓和及减少围岩的移动,使巷道断面不致过度缩小,同时防止已散离和破坏的围岩冒落。不同煤矿巷道条件不同,其支护类型也需因地制宜选择合适的。对于立井开拓的煤矿,巷道的埋深决定了巷道顶部收到的地应力的大小,也很大程度上影响着提升运输的难易程度和成本的大小。地面沉降会造成巷道承受的地下应力的改变,可能造成井下巷道稳定性降低。

(3)安全性因素。作为影响煤矿地下空间开发的首要考虑因素,这些因素和影响煤矿开发的安全因素具有一定的相同性。煤矿井下的瓦斯、煤尘一起在井下巷道的空间中影响正常的安全作业,甚至会造成严重的安全事故,产生巨大的损失。查明矿井水文地质状况可以使煤矿地下空间的开发利用从源头上减少水害的发生。煤矿的煤层不可能完全采掘,对于剩余的煤炭,考虑煤层的自燃倾向性可以有针对性的制定出相应的防火安全措施。了解巷道的完好情况可以减少甚至杜绝开发期间的利用安全结构性问题。

(4)空间环境因素。空间环境因素涉及到温度、湿度、风速及水质等。从物品贮藏的角度来看,每种物品都有其各自的保存温度、湿度范围,但一般而言,须要在高温、高湿环境保存的物品较少,而须要保存的物品一般都在湿度 60%RH 以下及相应的温度范围之内较为适合,否则易受潮而发霉、生锈、变质。但对于某些动植物来说,正好与物品的贮存温度、湿度是负相关关系。井下风速过低会造成供氧不足,影响井下作业,过高的话会使井内气压升高。当地下水中的 SO_4^{2-} 、 H^+ 等介质浓度较高时,水就具有腐蚀性,对钢筋和混凝土结构的破坏性较强,因此,需要对地下水的水质进行评价。

(5)经济性因素。经济性因素是煤矿地下空间开发的最终落脚点。影响后期开发的这类因素涉及到煤矿所在的区位、煤矿的提升运输方式、煤矿现在的基本费用。不同的煤矿所处的区位不同,相应的开发资金投入与开发后产生的经济效益是不同的。有些矿井采用的是斜井甚至是立井开拓,靠提升机

提升,当开采深度较大时,提升运输能力受到限制。一般来说,平硐开拓的矿井可利用性最佳,其用途也最广泛,斜井开拓次之,立井最差。煤矿的基本费用包含通风排水、巷道维护、设备维修等。

2 建立工程实例评价指标体系

2.1 研究区概况

江西煤业集团有限责任公司白源煤矿(以下简称“白源煤矿”)始建于 1982 年,1990 年 12 月建成投产,核定生产能力为 33 万 t/a,位于江西省萍乡市安源区白源镇白源村境内,于 2020 年关停。矿区中心点地理坐标为东经 $113^{\circ}51'45''$,北纬 $27^{\circ}38'43''$;区域地形为低山-丘陵,区域总体地势为东南高、西北低,地形起伏小,自然斜坡坡度一般为 $8^{\circ}\sim 15^{\circ}$;该区域为萍乡市中心城区,人口集中,人类工程活动较多,原始地形地貌改造强烈。

萍乡市作为百年江南煤都,早在 2008 年被国务院列为首批资源枯竭型城市。到十四五规划末(即 2025 年),萍乡市计划将所有生产煤矿关停,届时,萍乡将会出现大量废弃矿井,如何妥善处理废弃矿井问题对于萍乡的发展至关重要。

2.2 建立评价指标体系

在选定评价指标之后,针对要建立的评价指标体系要反映该煤矿地下空间资源开发利用适宜性评价的目标和具体要求,这就需要遵守一定的构建原则,即建立的评价指标体系要有系统性和普遍性,要有可比性,要有阶段性和精度适用性,要有简明性和可操作性。基于以上内容,2019 年在白源煤矿关停前,对白源煤矿地下空间开发适宜性评价指标参数进行调查,并建立白源煤矿评价指标体系(表 1)。

表 1 中的白源煤矿地下空间开发适宜性评价因素共分为 5 大类 20 个小项,同时为了评价的有效进行,在参考大量文献及查阅有关书籍资料和相关行业标准的基础上,确定了体系中各个指标(容积、底面积、长度、地质构造、围岩性质、巷道支护形式、埋深、地面沉降、瓦斯、煤尘爆炸性、煤层自燃倾向性、水文地质类型、巷道完好状况、相对湿度、水质、温度、风速、区位、提升运输、基本费用)的评定等级标准。这些因素间有一定的联系,但也有一定程度的独立性,相应模型层次结构的适当建立适合这种情况,所以选用模糊数学法把定性的因素定量化,用模

糊综合评价模型分析,可以把复杂问题简单化,有效地对白源煤矿地下空间开发适宜性进行评价。

根据建立的指标体系,对白源煤矿地下空间开发适宜性评价指标参数进行汇总(表 2)。

表 1 白源煤矿地下空间开发适宜性评价指标表

Tab. 1 Evaluation index of suitability for underground space development of Baiyuan coal mine

影响因素	评价指标	指标分级		
		适宜	较适宜	不适宜
空间资源量	长度(m)	>30 000	5 000~30 000	<5 000
	底面积(m ²)	>100 000	20 000~100 000	<20 000
	容积(m ³)	>250 000	40 000~250 000	<40 000
稳定性因素	围岩性质	坚硬岩石:石英岩、花岗岩、石灰岩等;岩石硬度系数/ <i>f</i> :8~20	中等坚硬岩石:砾岩、砂岩、砂质页岩、致密泥岩等;岩石硬度系数/ <i>f</i> :4~7	不坚硬岩石:页岩、破碎砂岩、泥岩等;岩石硬度系数/ <i>f</i> :0.8~3
	地质构造	简单、中等	复杂	极复杂
	巷道支护形式	强支护:锚网锚索喷浆+架棚复合支护、锚网锚索喷浆+混凝土复合支护等	中等支护:锚网喷浆支护、架棚支护、砌碛支护等	弱支护:毛喷、木支护、点杆支护、裸体巷道
	埋深(m)	<200	200~800	>800
	地面沉降速率(mm/year)	<30	30~50	>50
安全性因素	瓦斯等级(%)	低瓦斯矿井,CH ₄ <0.05	高瓦斯矿井,CH ₄ <0.5	煤与瓦斯突出矿井,CH ₄ <1
	煤尘	无爆炸性、煤尘浓度不超标	有爆炸性、未发生过煤尘爆炸、煤尘浓度不超标	有爆炸性、发生过煤尘爆炸事故、煤尘有超标现象
	煤层自燃	不易自燃、自燃等级Ⅲ级、未曾发火	自燃、自燃等级Ⅱ级、自燃发火现象少	容易自燃、自燃等级Ⅰ级、自燃发火现象较严重
	水文地质类型	简单、中等	复杂	极复杂
	巷道完好状况	整体完好,无巷道变形、顶邦破碎、喷层脱落等现象	基本完好,个别地段有巷道变形、顶邦破碎、喷层脱落等现象	完好程度差,部分地段巷道变形较严重,局部顶邦破碎严重,出现片帮冒顶等现象
空间环境因素	温度(℃)	15~20	2~15,20~30	<2,>30
	相对湿度(%)	50~60	30~50,60~80	<30,>80
	风速(m/s)	1.50~2.00	0.15~1.50,2.00~8.00	<0.15,>8.00
	水质	中性,6.5<pH<8.0	偏酸性水,5.5<pH<6.5	酸性水,pH<5.5
经济性因素	区位	位置优越,交通便利	位置较优越,交通较便利	位置偏僻,交通不便
	提升运输	平硐开拓,巷道空间分布集中,巷宽>4.0 m,巷高>3.0 m,平巷率>80%	斜井开拓及非深立井(深度小于800 m)开拓,巷道空间分布较集中,巷宽2.0~4.0 m,巷高2.0~3.0 m,平巷率>50%	深井开拓(深度大于800 m)开拓,巷道空间分布不集中,巷宽<2.0 m,巷高<2.0 m,平巷率<50%
	基本费用	正常涌水量 Q ₁ ≤180 m ³ /h,排水费用低,主通风机选型合理,主、副井提升费用低	正常涌水量 180 m ³ /h≤Q ₁ ≤600 m ³ /h,排水费用较高,主通风机选型较合理(有一定的富裕风量),主、副井提升费用较高	正常涌水量 600 m ³ /h≤Q ₁ ,排水费用高,主通风机选型不合理(富裕风量过大),主、副井提升费用高

表 2 白源煤矿地下空间开发适宜性评价指标表

Tab. 2 Evaluation index of suitability for underground space development of Baiyuan coal mine

指标名称	指 标 参 数
长度(m)	21 920
底面积(m ²)	62 034
容积(m ³)	154 546
围岩性质	岩性:砾岩、细砂岩、粉砂岩;岩石硬度系数/ <i>f</i> :4.6
地质构造	复杂
巷道支护形式	井底车场为砌碛支护、其他均为锚网喷支护、个别地段为锚网喷+架棚支护
埋深(m)	全矿井:272~815;全矿井集中区:403~648;平均 514.8
地面沉降速率(mm/year)	36.61
瓦斯等级(%)	低瓦斯矿井,未发生过瓦斯爆炸和瓦斯超限,瓦斯浓度:0.001 4~0.010 9,一般 0.004~0.007
煤尘	有爆炸性、未发生过煤尘爆炸事故、煤尘浓度不超标
煤层自燃	有自燃倾向性、自燃等级Ⅱ级、开采史中有过两次自燃发火现象
水文地质类型	中等,正常涌水量 172 m ³ /h、最大涌水量 205 m ³ /h
巷道完好状况	巷道整体基本完好,锚喷巷道个别地点出现喷层裂缝、脱落,砌碛巷道个别地点出现裂缝、墙体微倾斜现象
温度(℃)	20.8~24.2,平均 22.4
相对湿度(%)	70
风速(m/s)	1.50~5.67,集中区域 4.13~5.17
水质	pH=7.31,中性水
区位	位置优越,交通便利,距城市近
提升运输	立井开拓,主副立井深度均为 442 m,主井直径 5.0 m,副井直径 6.0 m,巷宽 2.4~3.2 m,平均 2.8 m;巷高 2.4~3.0 m,平巷率 60.8%,巷道空间分布较集中,最远端距副井底直线距离 3 178 m,垂向高程差 543 m,集中巷道去高程差 245 m
基本费用	正常涌水量 Q ₁ =172 m ³ /h,排水费用 7 770 元/日,排水费用低;主通风机选型较合理(有一定的富裕风量);主井提升往返费用 15 元/次,费用低,副井提升往返费用 96 元/次,费用较高

3 评价指标权重的确立

3.1 建立层次分析结构模型

目前,用于确定评价指标权重的方法很多,通常有调查统计法、层次分析法、专家直接经验法、因子分析法和数理统计法等,笔者采用层次分析法。

层次分析法(Antalytic Hierarchy Process)简称 AHP,为 20 世纪 70 年代中期西方学者提出。该方法是通过分析复杂问题包含的因素及其相互联系,将实际问题分解为不同的因素,并将这些因素进一步划分为多个级别的层次,因而建立起一个多层次结构模型;然后对每一层次内的各个因素再按照一种提前确定的原则进行两两相比,构成不同的比较判断矩阵。计算每一个比较判断矩阵的最大特征值

以及对应的归一化特征向量,得到这一层次因素相对这一准则的权重,在这个基础上进一步计算出各个层次要素对于总体目标的组合权重,从而得出不同设定因素的权重,为选择最优方案提供依据。

运用这种方法确定评标指标的权重可以很好的避免个人主观性因素在评价过程中起到的作用,是评价的结果更加客观,从而具有一定的科学性。笔者采用这种方法,并结合白源煤矿有关资料和实际情况来确定该矿地下空间开发适宜性评价指标的权重。

对需要解决的问题建立一个合理的层次结构,通常情况下,将针对问题分解的不同因素按照他们之间的关系分为目标层、准则层和方案层。其中目标层是指决策的目的、要解决的问题;准则层是考虑的因素、决策的准则;方案层是决策时的备选方案(图 1)。

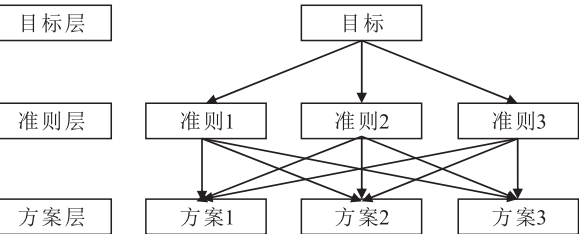


图 1 层次结构示意图
Fig. 1 Hierarchy diagram

对于白源煤矿地下空间开发适宜性评价,影响因素很多且相互影响。本次研究将白源煤矿地下空间开发适宜性评价的主要因素归结为:空间资源量、稳定性因素、安全性因素、空间环境因素、经济性因素等 5 大因素,又进一步把这些因素具体分为 20 个评价指标,建立的层次结构见图 2,图 2 中 A 为目标层,B 为准则层,C 为方案层。

3.2 构造比较判断矩阵

选取一个上层的因素,然后把对其有影响的下层因素两两作对比以判断出各个下层因素的重要程度的相对大小,最后构成判断矩阵的是上述比较的判断结果,这是层次分析法运用过程中的关键步骤。对于作为根据的标度法,综合目前国外和国内所常见的标度法,1~9 标度法对不需要较精确权值计算但需要对各比较因素进行排序计算的问题更加适合。1~9 标度法就是利用 1~9 之间的 9 个数(还有倒数)作为评价元素,来标度各功能之间的相对重要性大小,即:要比较某一层的 n 个因素 $a_1, a_2, \dots, a_n$ (杜栋,2001;罗正清等,2004)。

针对上一层的同一个因素 A 的影响力,可以从 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 中取任意 a_i 和 a_j ,并对它们对于 A 的重要性大小进行比较(表 3)。最后比较的结果形成判断矩阵。

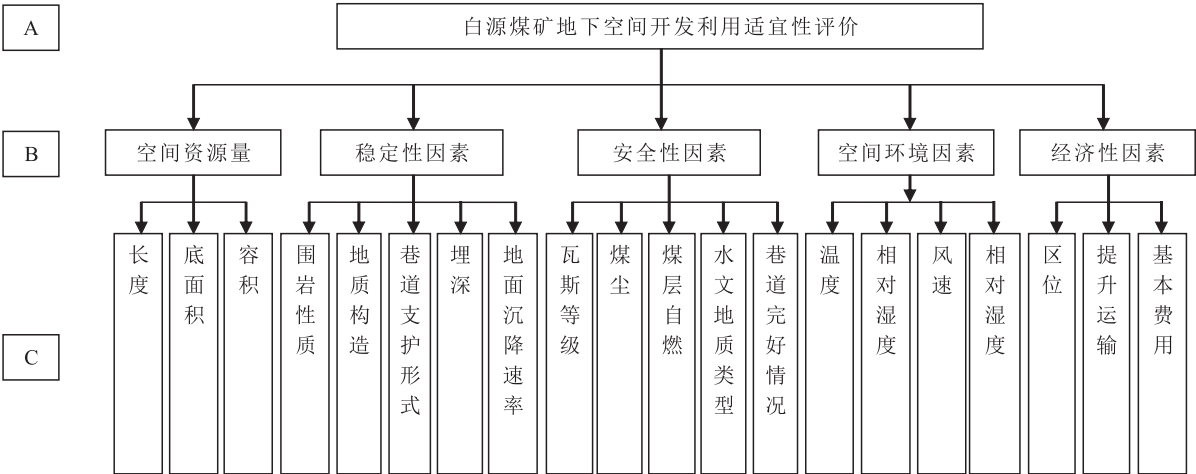


图 2 白源煤矿地下空间开发适宜性评价层次结构模型图

Fig. 2 Hierarchical structure model for suitability evaluation of underground space development in Baiyuan coal mine

表 3 1-9 标度法中的标度值含义表

标度	含义
1	两个元素相比,同样重要
3	两个元素相比,前者比后者稍重要
5	两个元素相比,前者比后者明显重要
7	两个元素相比,前者比后者强烈重要
9	两个元素相比,前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若元素 a_i 与元素 a_j 的重要性之比为 a_{ij} ,那么元素 a_j 与 a_i 元素的重要性之比为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

根据上述所建立的层次结构模型并结合专家的经验评判,相对于 A 层因素由 B 层因素两两比较得到判断矩阵,相对于 B 层各指标 B_i ,由 C 层元素两两比较得到判断矩阵(表 4)。

3.3 计算权重值并检验一致性

用来计算权重的方法发展到当今时代已经有很多种等。其中,运用方根法求权重值是 AHP 中较为简便且被广为应用的一种方法。该方法涉及到一致性检验。一致性检验是尽可能地以客观描述来代替人们利用 AHP 中的主观性,这要求客观成分必须足够合理。

表 4 各层次的判断矩阵表
Tab. 4 Judgment matrix of each layer

B 层对 A 层	A(白源煤矿地下 空间适宜性开发评价)	B ₁ (安全性因素)	B ₂ (稳定性因素)	B ₃ (空间资源量)	B ₄ (空间环境因素)	B ₅ (经济性因素)	权重
	B ₁ (安全性因素)	1	3	3	4	5	0.423 1
	B ₂ (稳定性因素)	1/3	1	1	2	3	0.172
	B ₃ (空间资源量)	1/3	1	1	2	3	0.172
	B ₄ (空间环境因素)	1/4	1/2	1/2	1	2	0.172
	B ₅ (经济性因素)	1/5	1/3	1/3	1/2	1	0.060 9
	C 层对 B ₁ 层	B ₁ (安全性因素)	C ₁₁ (瓦 斯 等 级)	C ₁₂ (煤 尘)	C ₁₃ (煤层自燃)	C ₁₄ (水文地质类型)	C ₁₅ (巷道完好情况)
C ₁₁ (瓦斯等级)		1	1	1	1/5	1/4	0.082 4
C ₁₂ (煤尘)		1	1	1	1/5	1/4	0.082 4
C ₁₃ (煤层自燃)		1	1	1	1/5	1/4	0.082 4
C ₁₄ (水文地质类型)		5	5	5	1	2	0.452 7
C ₁₅ (巷道完好情况)		4	4	4	1/2	1	0.300 1
C 层对 B ₂ 层		B ₂ (稳定性因素)	C ₂₁ (地质构造)	C ₂₂ (围岩性质)	C ₂₃ (巷道支护形式)	C ₂₄ (埋深)	C ₂₅ (地面沉降)
	C ₂₁ (地质构造)	1	3	4	5	6	0.487 5
	C ₂₂ (围岩性质)	1/3	1	2	3	4	0.227 7
	C ₂₃ (巷道支护形式)	1/4	1/2	1	2	3	0.141 8
	C ₂₄ (埋深)	1/5	1/3	1/2	1	2	0.087 4
	C ₂₅ (地面沉降速率)	1/6	1/4	1/3	1/2	1	0.055 6
	C 层对 B ₃ 层	B ₃ (空间资源量)	C ₃₁ (容积)	C ₃₂ (底面积)	C ₃₃ (长度)	权重	
C ₃₁ (容积)		1	3	4	0.625		
C ₃₂ (底面积)		1/3	1	2	0.238 5		
C ₃₃ (长度)		1/4	1/2	1	0.136 5		
C 层对 B ₄ 层	B ₄ (空间环境因素)	C ₄₁ (相对湿度)	C ₄₂ (水质)	C ₄₃ (温度)	C ₄₄ (风速)	权重	
	C ₄₁ (相对湿度)	1	2	5	6	0.503 1	
	C ₄₂ (水质)	1/2	1	4	5	0.321 4	
	C ₄₃ (温度)	1/5	1/4	1	4	0.120 9	
	C ₄₄ (风速)	1/6	1/5	1/4	1	0.054 6	
	C 层对 B ₅ 层	B ₅ (经济性因素)	C ₅₁ (区位)	C ₅₂ (提升运输)	C ₅₃ (基本费用)	权重	
C ₅₁ (区位)		1	3	5	0.637		
C ₅₂ (提升运输)		1/3	1	3	0.258 3		
C ₅₃ (基本费用)		1/5	1/3	1	0.104 7		

一致性检验有以下 3 个步骤:首先,计算一致性指标 $CI=(\lambda_{\max}-n)/(n-1)$;其次,找出相应的平均随机一致性指标 RI ;最后,计算一致性比例 $CR=CI/RI$ 。式中: CR 为一致性比率; CI 为一致性指标; RI 为平均一致性指标,平均随机一致性指

标值往往要通过查表获得,笔者采用了平均随机一致性指标表(表 5)。在一般情况下,如果 $Cr<0.1$,就认为判断矩阵符合一致性;若 $CR\geqslant 0.1$ 时,就认为判断矩阵不符合一致性,需要进行调整和修正。

表 5 1 阶~15 阶平均随机一致性指标表
Tab.5 Mean random consistency index of order 1~15

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>RI</i>	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59

根据上述内容通过计算结果如下。
(1) B 层对 A 层所构建的判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}=5.888$, $CI=0.097\ 2$,经一致性检验, $CR=0.086\ 8<0.1$,则 B 层对 A 层所构建的判断矩阵是一致性矩阵,所以得出的特征向量是权向量,从而得到各项因素的权重值(表 4)。

(2) C 层对 B_1 因素所构建的判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}=5.042\ 6$, $CI=0.010\ 6$,经一致性检验, $CR=0.009\ 5<0.1$,则 C 层对 B_1 因素所构建的判断矩阵是一致性矩阵,所以得出的特征向量是权向量,从而得到各项因素的权重值(表 4)。

(3) C 层对 B_2 因素所构建的判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}=5.113\ 6$, $CI=0.028\ 4$,经一致性检验, $CR=0.025\ 3<0.1$,则 C 层对 B_2 因素所构建的判断矩阵是一致性矩阵,所以得出的特征向量是权向量,从而得到各项因素的权重值(表 4)。

(4) C 层对 B_3 因素所构建的判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}=3.018\ 3$, $CI=0.009\ 2$,经一致性检验, $CR=0.017\ 7<0.1$,则 C 层对 B_3 因素所构建的判断矩阵是一致性矩阵,所以得出的特征向量是权向量,从而得到各项因素的权重值(表 4)。

(5) C 层对 B_4 因素所构建的判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}=4.160\ 8$, $CI=0.053\ 6$,经一致性检验, $CR=0.060\ 2<0.1$,则 C 层对 B_4 因素所构建的判断矩阵是一致性矩阵,所以得出的特征向量是权向量,从而得到各项因素的权重值(表 4)。

(6) C 层对 B_5 因素所构建的判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}=3.083$, $CI=0.019\ 2$,经一致性检验,

$CR=0.036\ 9<0.1$,则 C 层对 B_5 因素所构建的判断矩阵是一致性矩阵,所以得出的特征向量是权向量,从而得到各项因素的权重值(表 4)。

接下来进行总体的一致性检验,需要完成的工作就是对于 C 层元素的权重进行总排序(表 6)。

$$\begin{aligned} C_1 &: b_1c_{11} + b_2c_{12} + b_3c_{13} + \cdots b_m c_{1m}; \\ C_2 &: b_1c_{21} + b_2c_{22} + b_3c_{23} + \cdots b_m c_{2m}; \\ &\cdots \\ C_n &: b_1c_{n1} + b_2c_{n2} + b_3c_{n3} + \cdots b_m c_{nm}。 \end{aligned}$$

表 6 层次 C 总排序权重值表
Tab.6 Total ranking weight values of level C

项目	$B_1, B_1, \cdots, B_1$ $b_1, b_1, \cdots, b_n$			C 层的总排序
C_1	c_{11}	c_{12}	c_{1m}	$\sum_{j=1}^m b_j c_{1j} = c_1$
C_2	c_{21}	b_{22}	c_{2m}	$\sum_{j=1}^m b_j c_{2j} = c_2$
$\cdots$	$\cdots$			
C_n	c_{n1}	c_{n1}		$\sum_{j=1}^m b_j c_{nj} = c_n$

根据层次总排序随机一致性比率 $CR=(b_1CI_1+b_2CI_2+\cdots+b_nCI_n)/(b_1RI_1+b_2RI_2+\cdots+b_nRI_n)$,若 $CR<0.1$,就认为判断矩阵通过总排序一致性检验。

根据以上内容,可得开发权重值(表 7)。
对于总排序一致性的检验,代入数值: $CR=0.023<0.1$,所以整个层次的判断比较矩阵通过总一致性检验。

表 7 白源煤矿地下空间开发适宜性评价指标权重表
Tab. 7 Weight table of suitability evaluation index for underground space development of Baiyuan coal mine

准则层		指标层		对目标权重	排序
名称	权重	名称	权重		
空间资源量	0.172	长度	0.136 5	0.023 5	12
		底面积	0.238 5	0.041	7
		容积	0.625	0.107 5	3
稳定性因素	0.172	围岩性质	0.227 7	0.039 2	8
		地质构造	0.487 5	0.083 9	5
		巷道支护形式	0.141 8	0.024 4	11
		埋深	0.087 4	0.015	15
		地面沉降速率	0.055 6	0.009 6	16
安全性因素	0.423 1	瓦斯等级	0.082 4	0.034 9	10
		煤尘	0.082 4	0.034 9	10
		煤层自燃	0.082 4	0.034 9	10
		水文地质类型	0.452 7	0.191 5	1
		巷道完好状况	0.300 1	0.127	2
空间环境因素	0.172	温度	0.120 9	0.020 8	13
		相对湿度	0.503 1	0.086 5	4
		风速	0.054 6	0.009 4	17
		水质	0.321 4	0.055 3	6
经济性因素	0.060 9	区位	0.637	0.038 8	9
		提升运输	0.258 3	0.015 7	14
		基本费用	0.104 7	0.006 4	18

4 模糊综合评价

4.1 多级模糊综合评价模型

煤矿地下空间资源开发利用适宜性评价受到多重因素的影响,可以运用模糊综合评判,这种方法对于诸如此类问题进行评判时,需要把考虑的因素划分为不同的层次,这时最好是运用多级评判解决该问题。为简便计,以二级评判为例,其基本的方式与步骤如下。

4.1.1 确定评价对象的因素集合

因素集 U 分因素 m 个子集的 $U_i, i=1, 2, \dots, m$, 将因素集 U 分成 m 个因素子集 $U_i, i=1, 2, \dots, m, U=(U_1, U_2, \dots, U_m)$ 。其中, 每个 U_i 又有 n_i 个因素, 即: $U_i=\{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in_i}\}, i=1, 2, \dots, m$ 。其中: u_{ij} 表示第 i 类的第 j 个因素, $j=1, 2, \dots, n_i, i=1, 2, \dots, m$ 。

4.1.2 建立权重集

由于是二级评判,且把所有因素分成了 2 个层次,这就要求建立 2 种权重集。第一类:根据每一类因素的重要程度,赋予各个因素类相应的权数: $A=a_1/U_1+a_2/U_2+\dots+a_m/U_m \rightarrow (a_1, a_2, \dots, a_m)$; 第二类:对于每一类因素中的各个因素的重要程度,赋予适合的权数。假设第 i 类因素 U_i 的第 j 个因素 u_{ij} 的权数为 $a_{ij}, j=1, 2, \dots, n_i, i=1, 2, \dots, m$, 则得到 m 个权重集合: $A_i=a_{i1}/u_{i1}+a_{i2}/u_{i2}+\dots+a_{in_i}/u_{in_i} \rightarrow (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in_i}), i=1, 2, \dots, m$ 。

4.1.3 建立备择集

备择集是对各种因素评价结果的集合,而人们的意见集合只能有一个。假设总的评判的可能结果一共有 p 个,则备择集通常情况下克表示为: $V=\{v_1, v_1, \dots, v_p\}$ 。

4.1.4 一级模糊综合评判

此处对每一类因素中的各个因素进行综合评

判。假设按第 i 类 U_i 中的第 j 个因素 u_{ij} 评判,则评判对象是备择集中的第 k 个元素 v_k 的隶属度为 r_{ijk} , $i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n_i; k=1,2,\dots,p$ 。就能得到 m 个一级评判矩阵 R_i 。

$$R_i = \begin{pmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \cdots & r_{i1p} \\ r_{i21} & r_{i22} & \cdots & r_{i2p} \\ r_{i31} & r_{i32} & \cdots & r_{i3p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{ini1} & r_{ini2} & \cdots & r_{inip} \end{pmatrix}, i=1,2,\dots,m。$$

接下来运用一定的算法对第 i 类因素进行模糊综合评判,即可得该类因素评判集 B_i 。

4.1.5 二级模糊综合评判

这一级评判就是在因素类别之间进行一次评判,即在一级评判的基础上再做一次评判。在这个时候,一级评判的结果 B_i 就单因素评价矩阵 R 。

$$R = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ \vdots \\ B_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \cdot R_1 \\ A_2 \cdot R_2 \\ A_3 \cdot R_3 \\ \vdots \\ A_m \cdot R_m \end{pmatrix}。$$

再考虑到因素类别之间权重 A ,就可以得到二级模糊综合评判 D 。

$$D = A \cdot R = A \cdot \begin{pmatrix} A_1 \cdot R_1 \\ A_2 \cdot R_2 \\ A_3 \cdot R_3 \\ \vdots \\ A_m \cdot R_m \end{pmatrix} \rightarrow (d_1, d_2, \dots, d_p)。$$

其中: $d_k = \sum_{i=1}^m a_i \times b_{ik}$, $k=1,2,\dots,p$ 。此处 d_k

代表所评判的目标依照所有种类因素进行评判时对备择集中的第 k 个要素的隶属度。

与此类似,可按照以上步骤进行三级甚至更多级的模糊综合评判

4.2 白源煤矿地下空间开发适宜性评价

4.2.1 煤矿地下空间开发适宜性进行多层次模糊评价过程

根据上述,对白源煤矿地下空间开发适宜性进行多层次模糊评价,具体过程如下。

(1)确定评价对象的集合。针对评价的目标,把因素集合 U 分成 5 个因素集合,即: $U = (U_1, U_2, U_3, U_4, U_5)$ 。其中, U_1 代表安全性因素集合, U_2 代表稳定性因素集合, U_3 代表空间资源量集合, U_4 代

表空间环境因素集合, U_5 代表经济性因素集合。

对于每一个因素子集合,又都有相应的若干因素,即:

$$U_1 = (u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{15});$$

$$U_2 = (u_{21}, u_{22}, u_{23}, u_{24}, u_{25});$$

$$U_3 = (u_{31}, u_{32}, u_{33});$$

$$U_4 = (u_{41}, u_{42}, u_{43}, u_{44}, u_{45});$$

$$U_5 = (u_{51}, u_{52}, u_{53})。$$

其中: u_1 代表瓦斯等级; u_{12} 代表煤尘爆炸性; u_{13} 代表煤层自燃倾向性; u_{14} 代表水文地质类型; u_{15} 代表巷道完好状况; u_{21} 代表地质构造; u_{22} 代表围岩性质; u_{23} 代表巷道支护形式; u_{24} 代表巷道埋深; u_{25} 代表地面沉降; u_{31} 代表容积; u_{32} 代表底面积; u_{33} 代表长度; u_{41} 代表相对湿度; u_{42} 代表水质; u_{43} 代表温度; u_{44} 代表风速; u_{51} 代表区位; u_{52} 代表提升运输; u_{53} 代表基本费用。

(2)建立权重集。所建立的权重集应包含各类因素的权重和每一类因素中各因素的权重,而各个因素权重的值已经得出,则建立的权重集如下。

$$A = (A_1, A_2, A_3, A_4, A_5) \rightarrow A = (0.423\ 1, 0.172, 0.172, 0.172, 0.060\ 9);$$

$$A_1 = (a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{15}) \rightarrow A_1 = (0.082\ 4, 0.082\ 4, 0.082\ 4, 0.452\ 7, 0.300\ 1);$$

$$A_2 = (a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{24}, a_{25}) \rightarrow A_2 = (0.487\ 5, 0.227\ 7, 0.141\ 8, 0.087\ 4, 0.055\ 6);$$

$$A_3 = (a_{31}, a_{32}, a_{33}) \rightarrow A_3 = (0.625, 0.238\ 5, 0.136\ 5);$$

$$A_4 = (a_{41}, a_{42}, a_{43}, a_{44}) \rightarrow A_4 = (0.503\ 1, 0.321\ 4, 0.120\ 9, 0.054\ 6);$$

$$A_5 = (a_{51}, a_{52}, a_{53}) \rightarrow A_5 = (0.637, 0.258\ 3, 0.104\ 7)。$$

(3)建立评价等级集合。建立的评价等级集合就是备择集,笔者建立的白源煤矿地下空间开发适宜性评价指标的评判集合 $V = (v_1, v_2, v_3) = (\text{适宜}, \text{较适宜}, \text{不适宜})$ 3 个级别。

(4)进行模糊综合评判。该步骤就是按某一类因素中的各个因素进行综合评价,首先应确定出各个因素对评价等级集合(即备择集)的隶属程度,这需要通过建立每一项指标的隶属函数来加以确定。这些评价指标根据其自身属性可分为可定量指标和可定性指标 2 类。报告中把 2 类指标结合在一起全面考虑,从而有理有据地确定指标

的隶属度。

对定量指标隶属度的确定,通常采用分段线性函数的方法。这种分段线性函数在定义域分成段,然后隶属度函数和线性拟合。经常使用的隶属函数分布是多种多样的。本报告根据白源煤矿地下空间开发适宜性评价的参数实际情况,选用三角形及梯形的混合隶属度函数来确定指标的隶属度。

这样的函数常用的有 2 种:第一种是正向隶属函数曲线(即评价指标值与评语集成正相关关系)(图 3)。

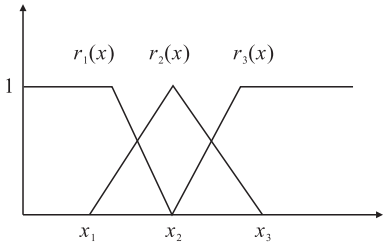


图 3 正向隶属函数曲线图

Fig. 3 Forward membership function curve

正向隶属函数的数学表达式如下。

$$\begin{aligned} r_1(x) &= \begin{cases} 1 & x \leq x_1 \\ \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} & x_1 < x < x_2 ; \\ 0 & x \geq x_2 \end{cases} \\ r_2(x) &= \begin{cases} 0 & x \leq x_1 \text{ 或 } x \geq x_3 \\ \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} & x_1 < x < x_2 \\ \frac{x_3 - x}{x_3 - x_2} & x_2 < x < x_3 \end{cases} ; \\ r_3(x) &= \begin{cases} 0 & x \leq x_2 \\ \frac{x - x_2}{x_3 - x_2} & x_2 < x < x_3 。 \\ 1 & x \geq x_3 \end{cases} \end{aligned}$$

第二种是逆向隶属函数曲线(即评价指标值与评语集成反向相关关系)(图 4)。

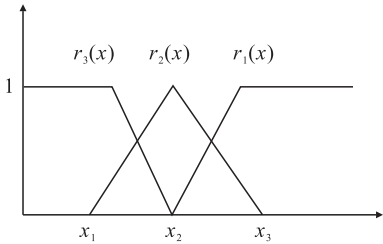


图 4 逆向隶属函数曲线图

Fig. 4 curve of inverse membership function

逆向隶属函数的数学表达式如下。

$$\begin{aligned} r_3(x) &= \begin{cases} 1 & x \leq x_1 \\ \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} & x_1 < x < x_2 ; \\ 0 & x \geq x_2 \end{cases} \\ r_2(x) &= \begin{cases} 0 & x \leq x_1 \text{ 或 } x \geq x_3 \\ \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} & x_1 < x < x_2 \\ \frac{x_3 - x}{x_3 - x_2} & x_2 < x < x_3 \end{cases} ; \\ r_1(x) &= \begin{cases} 0 & x \leq x_2 \\ \frac{x - x_2}{x_3 - x_2} & x_2 < x < x_3 。 \\ 1 & x \geq x_3 \end{cases} \end{aligned}$$

式中: x_1 、 x_2 、 x_3 为将定义域划分为若干模糊子集而确定的临界值; $r_1(x)$ 、 $r_2(x)$ 、 $r_3(x)$ 为隶属度函数。

对定性指标隶属度的确定,则是在依据实际情况构建的评价指标隶属度表中取合适的隶属度值,进而构建评判矩阵。而对其处置是根据实际需要把等级分为多个层次,以区分属性。

4.2.2 白源煤矿地下空间开发适宜性评价判断矩阵的构建

(1)安全性因素。结合前人经验所建立的定性评价因素的隶属度表(表 8),把瓦斯等级、煤尘爆炸性、煤层自燃倾向性、水文地质类型、巷道完好状况等 5 个指标相对于备择集划分为 3 个级别,在确定了白源煤矿对应的指标的级别后,再确定该因素隶属度。

按上述定性确定隶属度的方法并结合白源煤矿的评价指标的参数,建立隶属度矩阵,即一级评判矩阵,如下所示。

$$R_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 \\ 0.15 & 0.7 & 0.15 \\ 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 \end{pmatrix}。$$

(2)稳定性因素。结合前人经验所建立的稳定性因素定性评价因素的隶属度表(表 9),把地质构造、围岩性质、巷道支护形式等 3 个指标相对于备择集划分为 3 个级别,在确定了白源煤矿对应的指标的级别后,再确定该因素隶属度。而巷道埋深、地面沉降采用逆向隶属函数计算。

表 8 安全性因素定性评价隶属度表

Tab. 8 Membership degree of qualitative evaluation of of safety factors

	瓦斯等级分级	指标分级对各等级隶属度		
		v_1	v_2	v_3
瓦斯等级 定性评价	低瓦斯矿井	1. 0	0	0
	高瓦斯矿井	0. 15	0. 7	0. 15
	煤与瓦斯突出矿井	0	0. 2	0. 8
煤尘爆炸性 定性评价	煤尘爆炸性分级	指标分级对各等级隶属度		
		v_1	v_2	v_3
	无爆炸性、煤尘浓度不超标	0. 8	0. 2	0
	有爆炸性、未发生过煤尘爆炸、煤尘浓度不超标	0. 1	0. 8	0. 1
煤层自燃 倾向性 定性评价	有爆炸性、发生过煤尘爆炸事故、煤尘有超标现象	0. 2	0. 2	0. 6
	煤层自燃倾向性分级	指标分级对各等级隶属度		
		v_1	v_2	v_3
	不易自燃、自燃等级Ⅲ级、未曾发火	1. 0	0	0
	自燃、自燃等级Ⅱ级、自燃发火现象少	0. 15	0. 7	0. 15
	容易自燃、自燃等级Ⅰ级、自燃发火现象较严重	0. 2	0. 2	0. 6
水文地质 类型定性 评价	水文地质类型分级	指标分级对各等级隶属度		
		v_1	v_2	v_3
	简单、中等	0. 8	0. 2	0
	复杂	0. 1	0. 8	0. 1
巷道完好 情况定性 评价	极复杂	0	0. 2	0. 8
	巷道完好情况分级	指标分级对各等级隶属度		
		v_1	v_2	v_3
	整体完好,无巷道变形、顶邦破碎、喷层脱落等现象	0. 8	0. 2	0
	基本完好,个别地段有巷道变形、顶邦破碎、喷层脱落等现象	0. 2	0. 6	0. 2
	完好程度差,部分地段巷道变形较严重, 局部顶邦破碎严重,出现片邦冒顶等现象	0	0. 3	0. 7

表 9 稳定性因素定性评价隶属度表

Tab. 9 Membership degree of qualitative evaluation of stability factors

	地质构造分级	指标分级对各等级隶属度		
		v_1	v_2	v_3
地质构造 定性评价	简单、中等	0. 7	0. 15	0. 15
	复杂	0. 2	0. 8	0
	极复杂	0	0. 2	0. 8
围岩性质 定性评价	围岩性质分级	指标分级对各等级隶属度		
		v_1	v_2	v_3
	坚硬岩石:石英岩、花岗岩、石灰岩等;岩石硬度系数(f):8-20	0. 8	0. 1	0. 1
	中等坚硬岩石:砾岩、砂岩、砂质页岩、致密泥岩等;岩石硬度系数(f):4-7	0. 2	0. 6	0. 2
	不坚硬岩石:页岩、破碎砂岩、泥岩等;岩石硬度系数(f):0.8-3	0. 15	0. 15	0. 7

续表

巷道支护形式 定性评价	巷道支护形式分级	指标分级对各等级隶属度		
		v_1	v_2	v_3
	强支护:锚网锚索喷浆+架棚复合支护、 锚网锚索喷浆+混凝土复合支护等	1.0	0	0
	中等支护:锚网喷浆支护、架棚支护、砌碇支护等	0.15	0.7	0.15
	弱支护:毛喷、木支护、点杆支护、裸体巷道	0.2	0.2	0.6

按上述定性的确定隶属度的方法并结合白源煤矿的评价指标的参数,建立隶属度矩阵,即一级评判矩阵,如下所示。

$$R_2 = \begin{pmatrix} 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 \\ 0.15 & 0.7 & 0.15 \\ 0.524\ 7 & 0.475\ 3 & 0 \\ 0.669\ 5 & 0.330\ 5 & 0 \end{pmatrix}。$$

(3)空间资源量。对白源煤矿空间资源量因素,其二级指标(容积、底面积、长度)采用正向隶属函数计算,最终隶属度矩阵,即一级评判矩阵,如下所示。

$$R_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0.454\ 5 & 0.545\ 5 \\ 0 & 0.474\ 6 & 0.525\ 4 \\ 0 & 0.323\ 2 & 0.676\ 8 \end{pmatrix}。$$

(4)空间环境因素。结合前人经验所建立的空

间环境因素定性评价因素的隶属度表(表 10),把相对湿度、水质、温度、风速等 4 个指标相对于备择集划分为 3 个级别,在确定了白源煤矿对应的指标的级别后,再确定该因素隶属度。

按上述定性的确定隶属度的方法并结合白源煤矿的评价指标的参数,建立隶属度矩阵,即一级评判矩阵,如下所示。

$$R_4 = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.4 & 0.3 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 \\ 0.15 & 0.7 & 0.15 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 \end{pmatrix}。$$

(5)经济性因素。结合前人经验所建立的经济性因素定性评价因素的隶属度表(表 11),把区位、提升运输、基本费用等 3 个指标相对于备择集划分为 3 个级别,在确定了白源煤矿对应的指标的级别后,再确定该因素隶属度。

表 10 空间环境因素定性评价隶属度
Tab. 10 Membership degree of qualitative evaluation of spatial environmental factors

相对湿度定性评价	相对湿度分级	指标分级对各等级隶属度		
		v_1	v_2	v_3
	50~60	0.6	0.3	0.1
	30~50,60~80	0.3	0.4	0.3
	<30,>80	0	0.2	0.8
水质定性评价	水质分级	指标分级对各等级隶属度		
		v_1	v_2	v_1
	中性	0.8	中性	0.8
	偏酸性水	0.2	偏酸性水	0.2
	酸性水	0	酸性水	0
温度定性评价	温度分级	指标分级对各等级隶属度		
		v_1	v_2	v_3
	15~20	0.8	0.1	0.1
	2~15,20~30	0.15	0.7	0.15
	<2,>30	0.2	0.2	0.6

续表 10

风速定性评价	风速分级	指标分级对各等级隶属度		
		v_1	v_2	v_3
	1.50~2.00	0.8	0.2	0
	0.15~1.50,2.00~8.00	0.1	0.8	0.1
	<0.15,>8.00	0.15	0.15	0.7

表 11 经济性因素评价隶属度
Tab. 11 Membership degree of qualitative evaluation of economic factors

区位定性评价	区位分级	指标分级对各等级隶属度		
		v_1	v_2	v_3
区位定性评价	位置优越,交通便利	0.8	0.2	0
	位置较优越,交通较便利	0.2	0.8	0
	位置偏僻,交通不便	0	0.2	0.8
提升运输定性评价	提升运输分级	指标分级对各等级隶属度		
		v_1	v_2	v_3
	平硐开拓,巷道空间分布集中,巷宽>4.0 m,巷高>3.0 m	0.8	0.2	0
	斜井开拓及非深立井(深度小于 800 m)开拓,巷道空间分布较集中,巷宽 2.0~4.0 m,巷高 2.0~3.0 m	0	0.6	0.4
	深井开拓(深度大于 800 m)开拓,巷道空间分布不集中,巷宽<2.0 m,巷高<2.0 m	0.2	0.2	0.6
基本费用定性评价	基本费用分级	指标分级对各等级隶属度		
		v_1	v_2	v_3
	正常涌水量 $Q_1 \leq 180 \text{ m}^3/\text{h}$,排水费用低,主通风机选型合理,主、副井提升费用低	0.6	0.3	0.1
	正常涌水量 $180 \text{ m}^3/\text{h} \leq Q_1 \leq 600 \text{ m}^3/\text{h}$,排水费用较高,主通风机选型较合理(有一定的富裕风量),主、副井提升费用较高	0.3	0.4	0.3
	正常涌水量 $600 \text{ m}^3/\text{h} \leq Q_1$,排水费用高,主通风机选型不合理(富裕风量过大),主、副井提升费用高	0.2	0.2	0.6

对白源煤矿经济性因素,其二级指标(区位、提升运输、基本费用)采用正向隶属函数计算,最终隶属度矩阵,即一级评判矩阵,如下所示。

$$R_5 = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 \end{bmatrix}。$$

4.2.3 白源煤矿地下空间开发适宜性评价一级模糊综合评判

对各因素类进行一级模糊综合评判,即可得到评判集 B_i 。由上述的评判集与判断矩阵的关系式: $B_i = A_i \cdot R_i$,以及计算得出的因素类中各因素的权重,经计算可得各因素类的评判集合如下。

$$B_1 = (0.525\ 2 \quad 0.394\ 2 \quad 0.080\ 6);$$
$$B_2 = (0.539\ 9 \quad 0.393\ 3 \quad 0.068\ 8);$$
$$B_3 = (0 \quad 0.441\ 4 \quad 0.558\ 6);$$
$$B_4 = (0.238\ 8 \quad 0.522\ 4 \quad 0.238\ 8);$$

$$B_5 = (0.541 \quad 0.324\ 3 \quad 0.134\ 7)。$$

4.2.4 白源煤矿地下空间开发适宜性评价二级模糊综合评判

根据上述所述理论,单因素一级评判的结果 B_i 可构成矩阵 R ,而因素类之间的权重值为 A ,则由 $D = A \cdot R$,可得如下。

$$D = (0.423\ 1, 0.172, 0.172, 0.172, 0.060\ 9) \cdot$$
$$\begin{bmatrix} 0.525\ 2 & 0.394\ 2 & 0.080\ 6 \\ 0.539\ 9 & 0.393\ 3 & 0.068\ 8 \\ 0 & 0.441\ 4 & 0.558\ 6 \\ 0.238\ 8 & 0.522\ 4 & 0.238\ 8 \\ 0.541 & 0.324\ 3 & 0.134\ 7 \end{bmatrix}$$
$$= (0.389\ 1 \quad 0.419\ 9 \quad 0.191)。$$

结果表明,白源煤矿地下空间开发适宜性评价结果对适宜等级的隶属度为 0.389 1,对较适宜等级的隶属度为 0.419 9,对不适宜等级的隶属度为 0.191。

根据最大隶属度原则,白源煤矿地下空间开发适宜性评价对较适宜等级的隶属度最大,即 $d_{\max}=0.419\ 9$,所以白源煤矿地下空间开发适宜性评价的结果是较适宜。

5 结论

(1)基于模糊数学理论的煤矿地下空间开发利用适宜性评价方法应当先建立评价指标体系,确定了体系中各个指标的评定等级标准,然后利用层次分析法确定评价指标权重,最后运用模糊数学理论进行综合评判。

(2)以白源煤矿为例,利用模糊数学理论中的层次分析法首先建立评价指标体系,包括空间资源量、稳定性因素、安全性因素、空间环境因素、经济性因素等5大类以及20小项评价指标,确定出评价指标在煤矿地下空间开发适宜性评价中的权重,然后建立用于白源煤矿地下空间开发利用适宜性评价的多层次模糊综合评判模型,再用多层次模糊综合评价法对煤矿地下空间开发适宜性进行有效评估。白源煤矿地下空间开发利用适宜性评价对较适宜等级的隶属度最大,即 $d_{\max}=0.419\ 9$,白源煤矿地下空间开发适宜性评价的结果是较适宜。

参考文献(References):

王小耿,李飞,陈湘. 浅谈国内外地下空间的发展与应用[J]. 四川建材,2018,04(4):26-27.

WANG Xiaogeng,LI Fei,CHEN Xiang, et al. The development and application of underground space at home and abroad[J]. Sichuan Building Material,2018,04(4):26-27.

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.

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.

段忠诚,李佳珺,姚刚. 徐州市权台废弃矿区地下空间开发策略研究[J]. 工业建筑,2017,47(6):49-52.

DUAN Zhongcheng,LI Jiajun,YAO Gang. Research on the exploitation strategies of the underground space in quantai abandoned mining area in Xuzhou[J]. Industrial Construction,2017,47(6):49-52.

贺小龙,吴国强,朱士飞,等. 我国废弃煤矿井地质工作重点方向研究与思考[J]. 中国矿业,2019,28(1):80-84.

HE Xiaolong,WU Guoqiang,ZHU Shifei, et al. The key directions research and consideration of abandoned coal mines geological work in China[J]. China Mining Magazine,2019,28(1):80-84.

秦容军,任世华,陈茜,等. 我国关闭(废弃)矿井开发利用途径研究[J]. 煤炭经济研究,2017,37(7):31-35.

QIN Rongjun,REN Shihua,CHEN Qian, et al. Study on development and utilization path of closed (abandoned) coal mines in China[J]. Coal Economic Research,2017,37(7):31-35.

刘长武,沈荣喜,潘树华. 矿山废弃地下空间的危害与利用研究[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(8):1374-1378.

LIU Changwu,SHEN Rongxi,PAN Shuhua. Research on Harm and Utilization of Abandoned Underground Space in Mine[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2006,2(8):1374-1378.

姜素,黄敬军,徐智敏,等. 徐州煤矿采空区地下水库建库可行性研究[J]. 水文地质工程地质,2018,45(5):17-23.

JIANG Su,HUANG Jingjun,XU Zhimin, et al. Feasibility study of the construction of groundwater reservoir in the goaf of the Xuzhou Coal Mines[J]. Hydrogeology and Engineering Geology,2018,45(5):17-23.

常春勤,邹友峰. 国内外废弃矿井资源化开发模式述评[J]. 资源与环境,2014,30(4):425-429.

CHANG Chunqin,ZOU Youfeng. Review on Resource Development Mode of Abandoned Underground Space of Mine[J]. Resource Development & Market,2014,30(4):425-429.

刘峰,李树志. 我国转型煤矿井下空间资源开发利用新方向探讨[J]. 煤炭学报,2017,42(9):2205-2213.

LIU Feng,LI Shuzhi. Discussion on the new development and utilization of underground space resources of transitional coal mines[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(9):2205-2213.

姜玉松. 矿业城市废弃矿井地下工程二次利用[J]. 中国矿业,2003,12(2):59-62.

JIANG Yusong. Study on the recycling of underground heading in discarded mine of mining gity[J]. China Mining Magazine,2003,12(2):59-62.

杜栋. 基于01-09标度的AHP再研究[J]. 系统工程与电子技术,2001,23(5):36-38.

DU Dong. Study on 0.1~0.9 Scale in AHP[J]. Systems Engineering and Electronics,2001,23(5):36-38.

骆正清,杨善林. 层次分析法中几种标度的比较[J]. 系统工程理论与实践,2004,24(9):51-60.

LUO Zhengqing,YANG Shanlin. Comparative Study on Several Scales in AHP[J]. Systems Engineering-theory & Practice,2004,24(9):51-60.