

引文: 石孝明, 武志德, 刘旭正, 等. 废弃煤矿储气库库址评价方法[J]. 油气储运, 2023, 42(12): 1390-1398.

SHI Xiaoming, WU Zhide, LIU Xuzheng, et al. Evaluation method for abandoned coal mine gas storage reservoir sites[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(12): 1390-1398.

废弃煤矿储气库库址评价方法

石孝明^{1,2} 武志德² 刘旭正^{1,2} 刘冰冰² 邓雪杰¹

1. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院;

2. 中国石油勘探开发研究院·中国石油天然气集团公司油气地下储库工程重点实验室

摘要: 地下储气库在天然气战略储备和调峰保供中起到重要作用, 中国地质条件复杂, 储气库库址匮乏, 利用资源丰富的废弃煤矿建库是一很好的选择, 因此建立废弃煤矿储气库评价方法尤为重要。在国内外储气库选址研究成果的基础上, 从水文地质、盖层密封性、地质构造、矿井特征、安全与经济 5 个方面对影响废弃煤矿改建储气库的因素进行归纳分析, 建立基于层次分析法的模糊综合评价模型和库址综合评价表, 对废弃煤矿进行选址评价。将该评价模型应用于陕西某煤矿的选址评价中, 结果表明: 该煤矿改建储气库等级为良好, 具备改建储气库的潜力。该评价方法对中国废弃煤矿型储气库建设具有一定的指导意义。(图 3, 表 9, 参 27)

关键词: 废弃煤矿; 地下储气库; 库址评价; 模糊综合评判法

中图分类号: TE822

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2023)12-1390-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.12.009

Evaluation method for abandoned coal mine gas storage reservoir sites

SHI Xiaoming^{1,2}, WU Zhide², LIU Xuzheng^{1,2}, LIU Bingbing², DENG Xuejie¹

1. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing);

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development (RIPE)/CNPC Key Laboratory of Oil & Gas Underground Storage

Abstract: Underground gas storage plays an important role in the strategic reserve, peak shaving and stable supply of natural gas. Due to the complex geological conditions in China, very limited sites are available for the construction of gas storage. Thus, it is a good choice to build gas storage in the abandoned coal mine with rich resources. For this purpose, it is particularly important to establish an evaluation method for abandoned coal mine type gas storage. Hence, the factors affecting the conversion of abandoned coal mines into gas storage were summarized and analyzed based on the research results of gas storage site selection at home and abroad from the five aspects of hydrogeology, caprock tightness, geologic structure, influencing factors of abandoned coal mine, and other safe and economic factors. Then, a fuzzy comprehensive evaluation model based on hierarchical analysis was established and a comprehensive evaluation table of storage sites was prepared to evaluate the sites of abandoned coal mines. Besides, the evaluation model was applied to the site evaluation of a coal mine in Shaanxi. The evaluation results show that the coal mine is at an excellent grade and has the potential to be transformed into gas storage. Generally, the evaluation method has certain guiding implications for China to develop abandoned coal mine type gas storage. (3 Figures, 9 Tables, 27 References)

Key words: abandoned coal mine, underground gas storage, site evaluation, fuzzy comprehensive evaluation method

地下储气库作为天然气战略储备与调峰保供的重要手段, 是天然气大规模存储利用的最主要方式^[1]。截至 2021 年底, 中国已建成地下储气库 29 座, 储气库工作气量 $170 \times 10^8 \text{ m}^3$, 不足天然气年度消费量的 5%, 低于国际平均水平 12%^[2]。当前中国枯竭油气藏型与盐穴型储气库库址资源不足, 急需开辟新的建库领

域^[3]。中国废弃煤矿地下空间资源丰富, 近 20 年来关闭废弃煤矿数千座, 其中以小型煤矿为主, 主要集中在山西、安徽、黑龙江、云南、贵州、四川及新疆等省份^[4]。据《我国煤炭资源高效回收及节能战略》的研究结果预测: 2030 年地下废弃空间将达到 $90 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[5-6]。

目前, 对于储气库的相关研究主要集中在工艺技

术、风险评估、地质评价等方面^[7-11],常采用物理模拟与数值模拟方法对改建地下储气库进行优化分析^[12],而针对库址技术指标体系、指标权重方面的研究较少。2005年,杨毅等^[13]率先采用模糊综合评价法对气藏型储气库进行优选。展长虹等^[14-16]从定性的角度分别对含水层、盐穴及废弃煤矿提出改建储气库的选址原则。井文君等^[17]基于层次分析法确定了18个基本指标对盐穴储气库选址进行评价。金鸣凤等^[18]从多个关键因素展开对复杂地质条件下含水层储气库的评价优选。由此,储气库选址评价研究开始建立系统科学、多层次、多指标的综合评价体系。可见,众多学者对储气库选址评价进行了研究,但针对废弃煤矿库址选址评价的研究较少。为此,对影响废弃煤矿改建储气库的因素进行归纳分析,建立模糊综合评价模型对废弃煤矿储气库进行选址评价,以期为中国改建废弃煤矿储气库库址的评价与选择提供借鉴。

1 废弃煤矿改建储气库关键因素

废弃煤矿储气库与盐穴储气库均属于“洞穴型”地下储气库,库址资源特征相似。目前国内外盐穴储气库选址技术趋于成熟,结合国内外盐穴储气库选址的成功经验与废弃煤矿自身特征^[17-19],根据储气库建设目的进行废弃煤矿初选,在满足决定性要素与技术分析的基础上对废弃煤矿储气库开展综合评价,其中关键影响因素主要包括矿井特征、地质构造、盖层密封性、水文地质、安全与经济因素5大类(图1)。

1.1 矿井特征

废弃煤矿改建储气库的影响因素主要包括埋深、库容、顶板岩性及采矿方法。煤层埋藏过深,建库投资成本偏高;埋藏过浅,覆岩密封性难以保证,导致设计

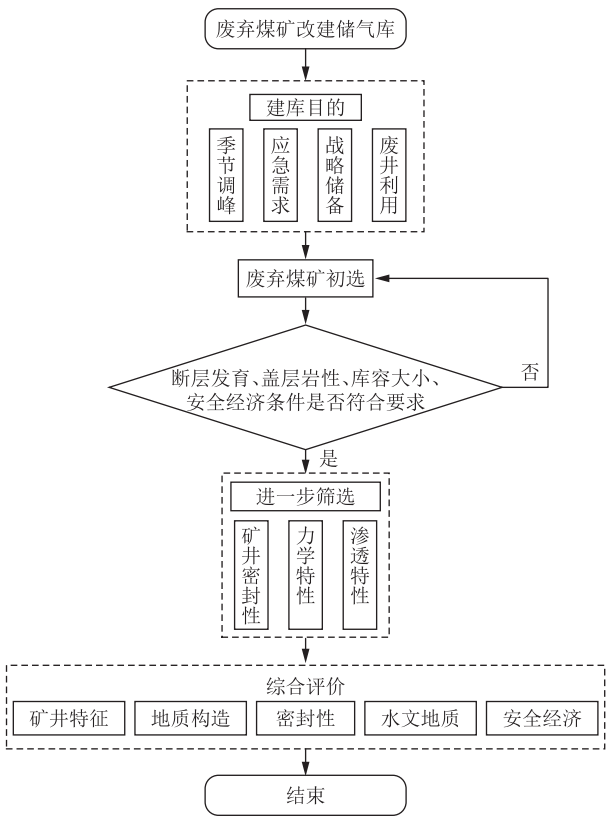


图1 废弃煤矿储气库选址技术流程图
Fig. 1 Technical process of site selection for abandoned coal mine type gas storage

运行压力较低,经济成本偏高。综合考虑,推荐煤层埋深300~600 m。

改造废弃煤矿的经济指标涉及封堵矿井、钻孔,监测断层、裂隙及运行维护等方面。储气空间越大,边界成本越小,经济效益越高。结合项目工程背景要求,推荐地下采出空间应在 $5\times10^5\text{ m}^3$ 以上^[20-21]。

由《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》煤层开采导水裂缝带高度计算公式(表1)可知:覆岩岩性越坚硬,其导水裂缝带越发育,气密性越差,因此,顶板推荐选择岩性软弱的岩石。

表1 煤层开采的导水裂缝带高度计算公式表
Table 1 Calculation formula for height of water flowing fractured zone formed by coal mining

覆岩岩性	单向抗压强度/MPa	主要岩石	导水裂缝带高度/m
坚硬	[40, 80]	石英砂岩、石灰岩、砾岩	$H_L = \frac{100 \sum M}{1.2 \sum M + 2} \pm 8.9$
中硬	[20, 40)	砂岩、泥质灰岩、砂质泥岩、页岩	$H_L = \frac{100 \sum M}{1.6 \sum M + 3.6} \pm 5.6$
软弱	[10, 20)	泥岩、泥质砂岩	$H_L = \frac{100 \sum M}{3.1 \sum M + 5.0} \pm 4.0$
极软弱	小于10	铝土岩、风化泥岩、黏土、砂质黏土	$H_L = \frac{100 \sum M}{5.0 \sum M + 8.0} \pm 3.0$

注: $\sum M$ 为累计采厚, m; H_L 为导水裂缝带发育高度, m。

煤矿地下开采按采场地压管理方法的不同可分为自然垮落法、充填法及房柱法(图2)。由于自然垮落法不采取特殊支护措施,会严重破坏覆岩上部结构,裂隙发育可达近百米^[22],因此不适合改建储气库。充填法采用充填材料对采空区进行充填,但采空区的充填率为65%~95%,导致剩余空间不足,难以满足作为储气库的条件。房柱法利用留设煤柱的方式保护顶板,可维持顶板的稳定性,同时也满足库容的条件,可作为改建储气库的选择^[5]。因此,在选择控制顶板的采矿方法时,常以房柱式开采形成的空间为主。若煤层上方有条件较好的盖层时,也可将自然垮落法开采形成的空间纳入储气库选择的范围中。

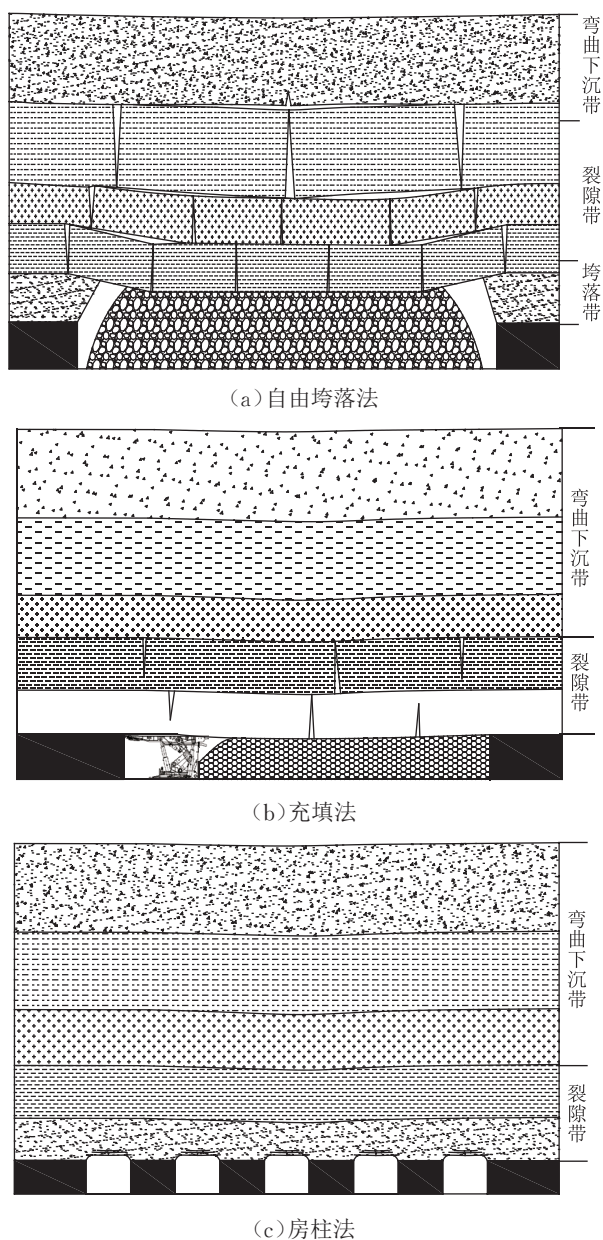


图2 煤矿地下开采方法示意图
Fig. 2 Underground coal mining method

1.2 地质构造

地质构造主要包括煤层倾角、褶曲及断层发育等。煤层倾角过大会导致部分煤柱与围岩应力集中,造成煤柱与围岩过度变形,影响储气库的稳定性。为保障围岩与覆岩的稳定性和密闭性,应选择水平或缓倾斜的煤层。

由于地壳、火山等运动,原本平坦压实的岩层易出现褶曲现象,导致原本密实岩层的气密性受到影响。为保证储气库密封性,应选择布展稳定、不含或含少量小型褶皱的岩层构造。

断层会破坏覆岩的连续性与完整性,使岩层构造变得相对复杂,这不仅增加了储气库的建库与运行成本,还极有可能形成渗气通道,是影响储气库密封性的重要因素。

1.3 盖层密封性

储气库盖层通常为强度高、渗透率低的致密岩石,具有隔绝地下水系、阻止裂隙发育贯通的性质。废弃煤矿储气库的密封性影响因素主要包括:盖层岩性、盖层连续性、盖层厚度及渗透性。

根据储气库选址经验,盖层岩石通常为第四系黏土层或黏土类基岩岩层,其结构致密、坚硬、裂隙少,在厚度较小的情况下也具有良好的密封性。优质泥岩盖层厚度仅需达到5 m,即可基本满足储气密封性的要求^[3]。储气库运行时,盖层尖灭处会优先成为裂隙发育的突破口。岩性单一、均匀、分布稳定及厚薄连续性好的盖层有利于储气库气密性的控制。岩层的渗透性是衡量储气库气密性的主要参数之一,其渗透性与上覆岩层的岩性、裂隙的发育情况有关。一般而言,岩层的渗透率越低,气体逸散的可能性越低,储气库的密闭性则越好,反之亦然。

1.4 水文地质

水文地质与工程地质紧密相连,若考虑不周易引发工程地质灾害。煤柱与围岩若长期暴露在潮湿、酸性土壤等腐蚀环境中,易导致煤柱强度弱化失稳,影响储气库的稳定性。盖层中若存在水且与地表相连,其连接通道将成为气体逸散通道,严重影响储气库密封性,甚至造成地面灾害。应优先选择无老空积水或老空积水较轻的采空区;若采空区已存在水淹情况,需确认其是否有逸气的可能。

1.5 安全与经济

地下储气库是长输管道的配套工程,其安全与经

济因素分析需结合天然气长输管道论证。输气规模应高于临界运输规模,项目内部收益率高于行业基准收益率,项目才具有经济性。

假设天然气管道项目每年都能取得相等的净收益,内部收益率公式为:

$$\frac{(1+i)^t-1}{i(1+i)^t}=C_0/C_F$$

(1)

式中: i 为内部收益率; t 为工作年限,年; C_0 为项目初始投资, 10^4 元; C_F 为项目每年的净收益, 10^4 元。

管道建设投资为:

$$C_0=(0.196q^{3/4}L^{3/8}+3.44q^{3/8}L^{3/16}+125)L$$

(2)

式中: q 为每日输气量, $10^4\text{ m}^3/\text{d}$; L 为管道总长度,km。

年净收益为:

$$C_F=365q\cdot\Delta W-0.05C_0$$

(3)

式中: ΔW 为每立方天然气购销价格差,元/ m^3 。

根据国家发改委2016年发布的《天然气管道运输定价成本监审办法(暂行)》^[23],管道运输准许收益率固定为8%、管道负荷率不低于75%,天然气管道寿命周期为30年。因此,运输临界距离关系为:

$$806=\frac{(0.196q^{3/4}L^{3/8}+3.44q^{3/8}L^{3/16}+125)L}{365q\cdot\Delta W-0.05(0.196q^{3/4}L^{3/8}+3.44q^{3/8}L^{3/16}+125)L}$$

(4)

由式(4)可知,输气规模越大,输气距离越短,经济性越好^[24]。若 $\Delta W=0.5$ 元/ m^3 ,根据国外相关经验,平均调峰供给 $q=284.5\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ^[18],可得运输临界距离 $L=132\text{ km}$ 。考虑改建、运行、维护等成本,储气库距离用户集中区的长输管道100 km左右为宜^[25]。

地下储气库作为天然气储存相对安全、经济的方式,操作不当易发生灾害事故。为保障居民的生命财产安全,建议废弃煤矿储气库选址避开人口、建筑物密集区,距离城市30 km以外为宜。

2 废弃煤矿储气库选址评价体系建设

采用层次分析法,对废弃煤矿储气库进行选址评价,以废弃煤矿储气库选址评价体系作为目标层,确定5个准则层指标、15个指标层指标进行选址评价(图3)。

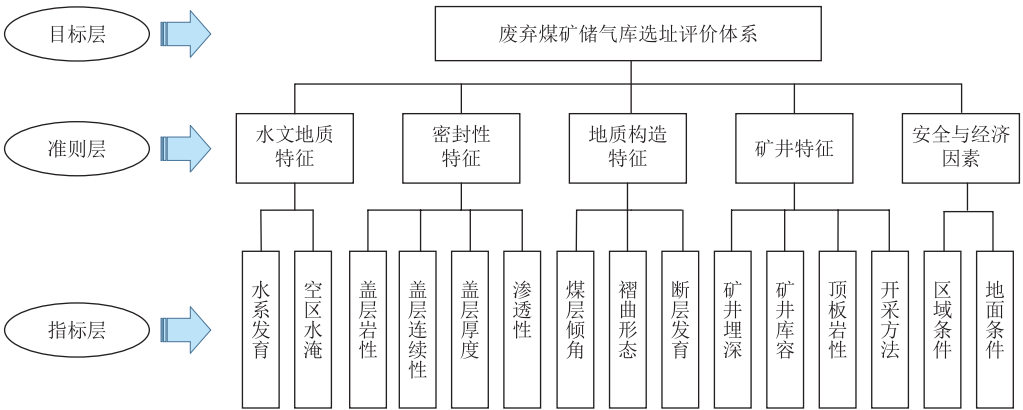


图3 废弃煤矿改建储气库选址评价体系图

Fig. 3 Site evaluation system for converting abandoned coal mine to gas storage

准则层与指标层中两两因素相互比较,将比较结果以数字形式写入矩阵表来构成比较判断矩阵。为量化比较结果,采用1~9标度,按其重要性程度构成矩阵(表2)。采用特征向量和积法计算权重值,判断准则层与指标层各因素对目标层的相对重要度,即权重分布。

对判断矩阵按列进行归一化处理:

$$\bar{b}_{ij}=\frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^nb_{ij}},i,j=1,2,\cdots,n$$

(5)

式中: n 为判断矩阵元素数; b_{ij} 为判断矩阵中各元素的评价标度值。

表2 判断矩阵元素标度取值表

Table 2 Scaling of judgment matrix element

量化值	两目标比较
1	i 因素与 j 因素同等重要
3	i 因素与 j 因素稍微重要
5	i 因素与 j 因素明显重要
7	i 因素与 j 因素非常重要
9	i 因素与 j 因素绝对重要
2,4,6,8	两相邻判断的中间值
$b_{ij}=1/b_{ji}$	两目标反过来比较

计算判断矩阵特征向量(权重分布)为:

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij}}{n}, i, j = 1, 2, \dots, n \tag{6}$$

$$W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T \tag{7}$$

式中: W 为判断矩阵的特征向量。

计算矩阵最大特征值:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \tag{8}$$

式中: A 为 n 阶矩阵的唯一非零特征根; λ_{\max} 为 n 阶矩阵的最大特征值。

计算一致性指标 C_1 。若 $C_1=0$, 则完全一致; C_1 越大, 则不一致越严重。

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{9}$$

计算随机一致性比率 C_R 。当 $C_R < 0.1$ 时, 则认为该矩阵通过一致性检验。随机一致性指标 R_1 值的大小仅与矩阵的阶数有关, 即为固定值, 其值可通过查表获得^[25](表 3)。

表 3 平均随机一致性指标 R_1 标准值表
Table 3 Standard value of average random consistency index R_1

n	R_1
1	0
2	0
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45
10	1.49

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \tag{10}$$

经课题组内反复讨论, 认为废弃煤矿能否成功改建为储气库, 主要受围岩稳定性和覆岩气密性影响。结合废弃煤矿改建储气库关键因素, 按照废弃煤矿储气库气密性、稳定性、技术性、经济性的重要程度与影响程度, 确定各评价指标相对量化值, 基于层次分析法计算, 得到各层指标的权重(表 4)。

表 4 废弃煤矿储气库评价指标相对权重值表
Table 4 Relative weight of evaluation indicators for abandoned coal mine type gas storage

准则层	准则层权重	指标层	指标层权重	相对权重
水文地质特征	0.06	水系发育	0.60	0.036
		空区水淹	0.40	0.024
地质构造特征	0.16	煤层倾角	0.17	0.027
		褶曲形态	0.17	0.027
		断层发育	0.66	0.106
密封性特征	0.32	盖层岩性	0.48	0.154
		盖层厚度	0.07	0.022
		盖层连续性	0.28	0.090
		渗透性	0.17	0.054
矿井特征	0.30	矿井埋深	0.08	0.024
		矿井库容	0.17	0.051
		顶板岩性	0.33	0.099
		开采方法	0.42	0.126
安全与经济因素	0.16	区域条件	0.67	0.107
		地面条件	0.33	0.053

3 废弃煤矿储气库评价方法

3.1 建立综合评价评价集

评价集是对评价对象做出多种结果组成的集合, 常用 V 表示。根据评价对象条件的好坏给予评分, 条件越好, 则得分越高。废弃煤矿储气库的评价集 $V = (V_I,$

$V_{II}, V_{III}, V_{IV})$, 其中 $V_I, V_{II}, V_{III}, V_{IV}$ 分别表示得分在 90~100、80~89、70~79 及 50~69 共 4 个等级。

3.2 建立隶属度得分表

隶属度是根据模糊数学方法, 制约评价对象的各定性指标、确定对应隶属度值的一种模糊评价方法。基于煤矿选址因素分析, 结合中国其他类型储气库建

库经验及选址理论研究^[18,24-25,27],建立废弃煤矿储气库库址隶属度得分表(表5~表8)。

表5 废弃煤矿储气库库址地质构造特征隶属度得分表
Table 5 Scores of the degree of affiliation of the site of abandoned coal mine gas storage (Characteristics of geological structure)

等级	分值	煤层倾角	构造形态	断层发育
I级	[90,100]	水平,小于8°	覆岩不存在褶皱或存在少许平缓小型褶皱	矿区1 km范围内无活动断层
II级	[80,89]	缓倾斜,[8°,25°]	覆岩存在开阔小型褶皱	矿区300~1 000 m范围内无活动断层
III级	[70,79]	倾斜,(25°,45°]	覆岩存在中型褶皱	矿区100~300 m范围内有活动断层
IV级	[50,69]	急倾斜,大于45°	覆岩存在大型褶皱	矿区100 m范围内有活动断层

表6 废弃煤矿储气库库址密封性特征隶属度得分表
Table 6 Scores of the degree of affiliation of the site of abandoned coal mine gas storage (Tightness)

等级	分值	盖层岩性	盖层厚度/m	连续性	渗透性/ μm^2
I级	[90,100]	盐岩、膏岩为主,泥质含量大于75%	不小于50	裂隙不发育	小于10
II级	[80,89]	泥岩为主,泥质含量区间为(50%,75%]	(30,50)	裂隙少量发育	[10,100]
III级	[70,79]	含砂泥岩为主,泥质含量区间为(25%,50]	[20,30]	裂隙发育,但未形成贯通裂隙	(100,1 000]
IV级	[50,69]	泥质粉砂岩为主,泥质含量不高于25%	小于20	裂隙发育并形成贯通裂隙	(1 000,10 000)

表7 废弃煤矿储气库库址矿井特征隶属度得分表
Table 7 Scores of the degree of affiliation of the site of abandoned coal mine gas storage (Characteristics of abandoned mine)

等级	分值	矿井埋深/m	库容/(10^4 m^3)	顶板岩性	采矿方法
I级	[90,100]	[600,900]	大于300	岩性软弱,(10,20]MPa	房柱法
II级	[80,89]	(400,600)或(900,1 200)	(100,300]	岩性中硬,(20,40]MPa	房柱法为主,崩落法为辅
III级	[70,79]	[200,400]	[50,100]	岩性坚硬,(40,60]MPa	自由崩落法
IV级	[50,69]	小于200	小于50	岩性坚硬,(60,80]MPa	充填法

表8 废弃煤矿储气库库址水文地质特征、安全与经济因素隶属度得分表

Table 8 Scores of the degree of affiliation of the site of abandoned coal mine gas storage (Hydrogeological characteristics, and the safe and economic factors)

等级	分值	水系分布	采空区含水量	区域条件/km	地面条件
I级	[90,100]	岩层无水系分布	无老空积水	(30,50)	附近无大型建筑物和重大建筑物
II级	[80,89]	岩层有不发育的水系,不与盖层相连	存在少量老空积水	(20,30)或[50,80]	附近无重大建筑物
III级	[70,79]	盖层内有不发育的水系分布,不与地面相连	存在少量老空积水,位置、范围不清楚	[10,20]或[80,100]	附近有大型建筑物
IV级	[50,69]	盖层内有水系且与地面相连	存在大量老空积水	其他	附近有重大建筑物

3.3 库址评价分析

按隶属度得分表建立隶属度行向量 U ,与废弃煤矿储气库评价指标相对权重值列向量 B 进行加权计算,即 $F=U\cdot B$,得到的分数 F 即为评价对象的总得分。将所得分数与库址改建储气库综合评价表(表9)进行对比,可知该库址改建储气库的优先级及建库建议措施。

表9 库址改建储气库综合评价表
Table 9 Comprehensive site evaluation table for gas storage construction

分数等级划分	改建级别	建议措施
90~100分	优秀库址	适宜改建储气库
80~89分	良好库址	适宜改建储气库,但需加强安全监控和经济投资
70~79分	中等库址	可以改建储气库,需加强监控并进行周期性全面设施检查
60~69分	及格库址	不推荐改建储气库,但附近若无合适储气库,且迫切需要,可以进行改建,但需加强监控并进行周期性全面设施检查
小于60分	不及格库址	不适宜改建储气库

4 工程实例

根据上述废弃煤矿改建储气库评价指标,以陕西某煤矿为例进行储气库改建评价。该矿距离市区约16 km,矿井工业场地附近2 km内有集装站、等大型建筑物,矿区正常涌水量 $90\text{ m}^3/\text{h}$,岩层水系不与盖层

相连。煤层采用房柱法开采,平均煤厚 4.34 m,平均埋深 124 m,煤层结构简单,属于稳定性煤层。其直接顶为 6.2 m 厚的泥质砂岩,老顶为 27 m 厚的厚层状长石砂岩,属半坚硬-坚硬岩石,抗压、抗张、抗剪强度大,属 II 级中等冒落顶板。盖层为 4.35 m 的泥岩,岩石空间分布连续性好,裂隙不发育,富水性及渗透性低。矿井井田可采储量约 $2\,856.2 \times 10^4$ t,预计可利用空间在 500×10^4 m³ 以上。煤层产状平缓,为近似水平的单斜构造,无较大褶皱及断层,构造简单。

参照废弃煤矿储气库库址隶属度得分表(表 5~表 8),15 项指标层因素得分依次为:95、95、86、74、78、92、85、63、94、81、93、74、87、76、74。将各指标因素得分乘以对应的废弃煤矿储气库评价指标相对权重值,得到该废弃煤矿的总得分 $F=83.03$,对照表 9 分析认为该库址为良好库址,可改建储气库。该矿井本身地质条件简单,具有较好的密封条件,加之库容和覆岩裂隙发育情况均达到改建储气库的要求,但埋深过浅及附近有大型建筑物导致得分降低,需加强储气库监控、进行周期性全面检查并充分调研附近大型建筑物对库区的影响。

5 结论

(1)从矿井特征、地质构造、盖层密封性、水文地质、安全与经济 5 个关键因素对改建储气库影响进行分析,提出 15 个评价指标,构建了废弃煤矿储气库的分级评价标准。

(2)在矿坑选址因素分析的基础上,结合国内外盐穴储气库选址理论研究和国外废弃煤矿改建储气库的建库经验,采用层次分析法确定各评价指标的权重,运用综合模糊评价方法确定各指标的隶属度值,建立废弃煤矿储气库库址隶属度得分表。选址阶段资料相对匮乏,指标的评价标准难以准确量化。虽经过多名专家反复讨论,仍难以避免存在主观评价。

(3)以陕西某煤矿为例进行储气库改建评价,评价结果表明该矿井为良好库址,可改建储气库,但需加强储气库监控、进行周期性全面检查并充分调研附近大型建筑物对库区的影响。

(4)废弃煤矿改建储气库潜力巨大,但整体建库技术尚属空白,可通过后续力学试验和理论分析进一步研究废弃煤矿改建储气库的可行性。

参考文献:

- [1] 马新华,丁国生,等.中国天然气地下储气库[M].北京:石油工业出版社,2018:1-22.
MA X H, DING G S, et al. China's underground natural gas storage[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018: 1-22.
- [2] 丁国生,丁一宸,李洋,唐立根,武志德,完颜祺琪,等.碳中和战略下的中国地下储气库发展前景[J].油气储运,2022,41(1):1-9. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.01.001.
DING G S, DING Y C, LI Y, TANG L G, WU Z D, WANYAN Q Q, et al. Prospects of underground gas storage in China under the strategy of carbon neutrality[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(1): 1-9.
- [3] 武志德,郑得文,李东旭,邓雪杰.我国利用废弃矿井建设地下储气库可行性研究及建议[J].煤炭经济研究,2019,39(5):15-19. DOI: 10.13202/j.cnki.cer.2019.05.004.
WU Z D, ZHENG D W, LI D X, DENG X J. Feasibility study and suggestions on constructing underground gas storage in abandoned mines in China[J]. Coal Economic Research, 2019, 39(5): 15-19.
- [4] 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. DOI: 10.13202/j.cnki.cer.2019.05.002.
ZHANG N, KAN J G, WANG P. Study on resources and distribution of abandoned mines in China[J]. Coal Economic Research, 2019, 39(5): 4-8.
- [5] 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. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.0911.
LIU F, LI S Z. 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.
- [6] 王双明,申艳军,孙强,刘浪,师庆民,朱梦博,等.“双碳”目标下煤炭开采扰动空间 CO₂ 地下封存途径与技术难题探索[J].煤炭学报,2022,47(1):45-60. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YG21.1872.
WANG S M, SHEN Y J, SUN Q, LIU L, SHI Q M, ZHU M B, et al. Underground CO₂ storage and technical problems in coal mining area under the “dual carbon” target[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 45-60.
- [7] TABARI K, TABARI M, TABARI O. Investigation of gas storage feasibility in Yortshah aquifer in the central of Iran[J].

- Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2011, 5(12): 1669-1673.
- [8] MUONAGOR C M, ANYADIEGWU C I C. Development and conversion of aquifer for underground natural gas storage in Nigeria[J]. Petroleum & Coal, 2014, 56(1): 1-12.
- [9] BEHOUZ T, BASIRAT M, ASKARI A. Fast screening method to prioritize underground gas storage structures for site Selection[C]. Copenhagen: Internation Gas Union Research Conference, 2014: 2378-2386.
- [10] 马新华,郑得文,魏国齐,丁国生,郑少婧. 中国天然气地下储气库重大科学理论技术发展方向[J]. 天然气工业, 2022, 42(5): 93-99. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2022.05.010.
- MA X H, ZHENG D W, WEI G Q, DING G S, ZHENG S J. Development directions of major scientific theories and technologies for underground gas storage[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(5): 93-99.
- [11] 刘先珊,李涛,张立君,潘玉华,李满,曾南豆. 储层页岩直剪破坏特性及微观演化机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(5): 141-152. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2022.05.016.
- LIU X S, LI T, ZHANG L J, PAN Y H, LI M, ZENG N D. Characteristics of shear fracturing and corresponding evolution mechanism at micro-scale in direct shear tests for reservoir shale[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(5): 141-152.
- [12] 王皆明,王丽娟,耿晶. 含水层储气库建库注气驱机理数值模拟研究[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(5): 673-676. DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2005.05.673.
- WANG J M, WANG L J, GENG J. The numerical simulation study on the gas-drive mechanism of aquifer gas storages[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(5): 673-676.
- [13] 杨毅,李长俊,张红兵,刘恩斌. 模糊综合评判法优选地下储气库方案设计研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(8): 112-114. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0976.2005.08.036.
- YANG Y, LI C J, ZHANG H B, LIU E B. Design program of underground gas storages optimized by fuzzy integrated evaluation method[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(8): 112-114.
- [14] 展长虹,焦文玲,廉乐明,严铭卿. 利用含水层建造地下储气库[J]. 天然气工业, 2001, 21(4): 88-90. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0976.2001.04.026.
- ZHAN C H, JIAO W L, LIAN L M, YAN M Q. Underground gas storage reservoir constructed in water-bearing formation[J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(4): 88-90.
- [15] 丁国生,冉莉娜,董颖. 西气东输二线平顶山盐穴储气库建设可行性[J]. 油气储运, 2010, 29(4): 255-257. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2010.04.004.
- DING G S, RAN L N, DONG Y. Feasibility of Pingdingshan salt cavern gas storage for the 2nd West-East Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29(4): 255-257.
- [16] 杜俊生,陈结,姜德义,范金洋,张传玖,陈紫阳. 中国废弃煤矿压气蓄能潜力与初步可行性研究[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(1): 253-264. DOI: 10.15961/j.jsuese.202200622.
- DU J S, CHEN J, JIANG D Y, FAN J Y, ZHANG C J, CHEN Z Y. Study on the potential and pre-feasibility of compressed air energy storage of abandoned coal mines in China[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(1): 253-264.
- [17] 井文君,杨春和,李银平,杨长来. 基于层次分析法的盐穴储气库选址评价方法研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2683-2690. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.09.022.
- JING W J, YANG C H, LI Y P, YANG C L. Research on site selection evaluation method of salt cavern gas storage with analytic hierarchy process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2683-2690.
- [18] 金凤鸣,贾善坡,张辉,林建品,尚翠娟,刘静,等. 京津冀地区断陷盆地含水层储气库评价体系及目标优选[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(9): 1433-1445. DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2017.07.009.
- JIN F M, JIA S P, ZHANG H, LIN J P, SHANG C J, LIU J, et al. Evaluation system and optimization of aquifer exploration targets for gas storage in the Beijing, Tianjin and Hebei faulted basins[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(9): 1433-1445.
- [19] 郑雅丽,完颜祺琪,邱小松,垢艳侠,冉莉娜,赖欣,等. 盐穴地下储气库选址与评价新技术[J]. 天然气工业, 2019, 39(6): 123-130. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2019.06.014.
- ZHENG Y L, WANYAN Q Q, QIU X S, GOU Y X, RAN L N, LAI X, et al. New technologies for site selection and evaluation of salt-cavern underground gas storages[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(6): 123-130.
- [20] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000: 225-245.
- State Bureau of Coal Industry. Regulations for the retention and mining of coal pillars in buildings, water bodies, railways, and main shafts and tunnels[M]. Beijing: China

- Coal Industry Publishing House, 2000: 225-245.
- [21] ABUAISHA M, BILLIOTTE J. A discussion on hydrogen migration in rock salt for tight underground storage with an insight into a laboratory setup[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 38: 102589. DOI: 10.1016/j.est.2021.102589.
- [22] 何秋德, 陈宁, 罗萍嘉. 基于压缩空气蓄能技术的煤矿废弃巷道再利用研究[J]. 矿业研究与开发, 2013, 33(4): 37-39, 65. DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.2013.04.005.
- HE Q D, CHEN N, LUO P J. Research on reuse of abandoned roadway in coal mine based on the compressed air energy storage technology[J]. Mining Research and Development, 2013, 33(4): 37-39, 65.
- [23] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委印发《天然气管道运输 价格管理办法(试行)》和《天然气管道运输定价成本监审办法(试行)》[EB/OL]. (2016-10-12) [2019-11-10]. https://www.gov.cn/xinwen/2016-10/12/content_5117959.htm.
- National Development and Reform Commission. Circular of the National Development and Reform Commission on printing and distributing the measures for the administration of the price of natural gas pipeline transportation (for trial implementation) and the measures for the supervision and examination of the pricing cost of natural gas pipeline transportation (for trial implementation)[EB/OL]. (2016-10-12)[2019-11-10]. https://www.gov.cn/xinwen/2016-10/12/content_5117959.htm.
- [24] 黄定国, 杨小林, 余永强, 梁为民. CO₂地质封存技术进展与废弃矿井采空区封存 CO₂[J]. 洁净煤技术, 2011, 17(5): 93-96. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6772.2011.05.028.
- HUANG D G, YANG X L, YU Y Q, LIANG W M. Technical progress of CO₂ geological sequestration and CO₂ sequestration by antiquated mine goaf[J]. Clean Coal Technology, 2011, 17(5): 93-96.
- [25] 贾善坡, 金凤鸣, 郑得文, 孟庆春, 张辉, 林建品, 等. 含水层储气库的选址评价指标和分级标准及可拓综合判别方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1628-1640. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.1197.
- JIA S P, JIN F M, ZHENG D W, MENG Q C, ZHANG H, LIN J P, et al. Evaluation indices and classification criterion of aquifer site for gas storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1628-1640.
- [26] 刘威, 董婉琪. 基于 AHP-熵权法组合赋权的排水管网风险评估方法研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(3): 949-956. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2019.1400.
- LIU W, DONG W Q. Risk assessment on the drainage pipe network based on the AHP-entropy weight method[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(3): 949-956.
- [27] 马新华, 郑得文, 申瑞臣, 王春燕, 罗金恒, 孙军昌. 中国复杂地质条件气藏型储气库建库关键技术与实践[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 489-499. DOI: 10.11698/PED.2018.03.14.
- MA X H, ZHENG D W, SHEN R C, WANG C Y, LUO J H, SUN J C. Key technologies and practice for gas field storage facility construction of complex geological conditions in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 489-499.
- (收稿日期: 2022-11-11; 修回日期: 2023-01-10; 编辑: 吴珮璐)
-
- 基金项目:** 中国石油天然气股份有限公司直属院所基础研究和战略储备技术研究基金资助项目“废弃煤矿改建地下储气库技术研究”, 2019D-500811。
- 作者简介:** 石孝明, 男, 1995 年生, 在读博士生, 2023 年硕士毕业于中国矿业大学(北京)矿业工程专业, 现主要从事废弃煤矿改建储气库方向的研究工作。地址: 北京市海淀区学院路丁 11 号, 100083。电话: 18096217660。Email: shixiaoming_cumtb@163.com
- 通信作者:** 武志德, 男, 1982 年生, 高级工程师, 2011 年毕业于中国矿业大学(北京)采矿工程专业, 现主要从事岩石力学实验及地下储气库稳定性评价方向的研究工作。地址: 北京市海淀区学院路 20 号, 100083。电话: 15081687045。Email: wuzhide69@petrochina.com.cn



开放科学(资源服务)标识码(OSID):