

文章编号: 1000-7598-(2012) 09-2683-08

基于层次分析法的盐穴储气库选址评价方法研究

井文君¹, 杨春和^{1,2}, 李银平¹, 杨长来³

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2.重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;

3.中国石油化工股份有限公司 天然气分公司, 北京 100120)

摘 要: 随着我国盐岩地下储气库大规模兴建的开始, 如何对各目标盐矿区进行储气库库址的评价和优选已成为国内储气库建设面临的首要问题。在对盐穴储气库选址的影响因素进行详细归类和分析的基础上, 应用层次分析法建立盐穴储气库选址综合评价体系的目标层次结构模型, 并结合专家调查法, 确定了该模型中 18 项基本指标在整个选址评价体系中占的权重。综合本领域专家的意见和相关的理论研究成果, 提出了选址体系中各基本指标的适宜度等级划分标准, 以及库址综合适宜度等级评价标准, 综合各指标的权重计算结果, 建立了目标库址综合建库适宜值 P 的计算公式, 为我国盐穴储气库库址的评价和优选提供了可行方法和理论依据。将该方法应用于湖北云应盐矿的盐穴储气库库址评价中, 评价结果与专家论证意见一致, 表明了该方法的合理性。

关 键 词: 选址评价; 盐穴储气库; 层析分析法

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Research on site selection evaluation method of salt cavern gas storage with analytic hierarchy process

JING Wen-jun¹, YANG Chun-he^{1,2}, LI Yin-ping¹, YANG Chang-lai³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Natural Gas Branch Company, China Petroleum Chemical Industry Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: The problem of site selection evaluation for salt cavern gas storage arises along with the rapid development of salt cavern gas storages. Based on the classification of the influence factors and the analysis of site selection for salt cavern gas storage, Analytic hierarchy process is used to build a layer structural model. Using expert investigation method, the importance weights of 18 influence factors are obtained. Then taking the advices of the experts on salt cavern gas storage building and the related research results into consideration, index suitability standards and synthetical evaluation standards of site selection evaluation for salt cavern gas storage are put forward. Combined with the importance weights of 18 influence factors, a formula is developed to calculate the synthetical appropriate value P of site selection. The results provide a feasible method and theory for the construction of salt cavern gas storage in China. Finally, this method is used to evaluate the suitability of building salt cavern in Yunying salt mine. The result is consistent with the expert opinions, which shows that this method is reasonable.

Key words: site selection evaluation; salt cavern gas storage; analytic hierarchy process

1 引 言

盐穴地下储气库是主要的储气库类型之一, 具有注采率高、短期吞吐量大、垫气层量低并可完全回收的优点, 在发达国家的能源储备中, 利用盐穴

储存占很大比重, 因此, 我国也考虑利用盐穴实施天然气储备。

我国的地下盐岩资源丰富, 分布范围广, 埋藏于地下数十米至几千米, 最深为 4 000 m, 具有建设地下石油和天然气储备库的地质条件。在经济发

收稿日期: 2011-05-07

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973 计划) (No. 2009CB724602, No. 2009CB724603); 国家自然科学基金资助项目 (No. 41272391)。

第一作者简介: 井文君, 女, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程的风险分析方面的研究工作。E-mail: sdujwj@163.com

达的华东地区,苏北、苏南、安徽淮南、山东等地均发现大型盐矿,在湖北、河南、四川、云南、陕西等地也均有大型盐矿存在。这些丰富的盐矿资源为我国建设盐穴储气库提供了可供选择的目标库址。

建设盐穴天然气储气库是一个综合复杂的系统工程,库址的选择受很多因素的制约,不仅要考虑到矿区地质条件,而且还要考虑到资源、交通运输、环境保护、区域发展、国家战略部署等因素的影响;同时,库址的选择对拟建库群在建设、运营期的安全性和经济性有非常重要的影响。因此,研究如何科学、合理、有效地对目标库址建设储气库的适宜性进行评价具有重要的工程意义。

目前国内外关于盐穴储气库的研究主要集中在储气库的建造工艺^[1-2]、盐腔的稳定性^[3-7]、盐岩的力学性质^[3,8]等方面,而在储气库的选址研究方面,尽管很多文献中有所涉及^[1-3,9],但专门针对它的研究较少。现在选址作为工程项目建设的第一关,已经越来越引起投资方和建设方的重视,很多工程项目已有了专门针对工程选址的研究^[10-15],其中,从风险领域引入的层次分析法和灰色理论是最常用的评价方法。

基于上述研究现状,本文采用层次分析法确定选址基本指标重要性权重,并建立了基本指标的适宜度等级划分标准及库址综合适宜度等级评价标准,在此基础上提出了一种合理、适用的盐穴储气库选址评价方法,并应用该方法对湖北云应盐矿进行了选址评价。计算结果表明,云应盐矿为盐穴储气库建库的适宜库址。该结论与专家论证意见一致,表明本文提出的方法是合理有效的,为我国盐穴储气库库址的评价和优选提供了理论依据。

2 盐穴储气库选址的原则

(1) 安全性原则

盐穴地下天然气储存是一种相对安全的能源存储方式,但不是绝对安全。从 20 世纪 50 年代起,国外的天然气储备库不断有气体泄露导致的火灾或爆炸、地表沉陷导致的建筑物开裂及环境破坏等事故发生^[14],给附近居民的生命财产、区域经济、生态环境造成了严重损失。我国的天然气储备库目标库址均靠近人口和建筑较稠密的地区,因此,安全性原则是地下储气库选址的首要原则。

(2) 经济性原则

盐穴地下储气库是一次性投资很大、投资回收期较长的项目。库址的区域地质特征、盐矿地质特征、区域水文地质特征将会大大影响造腔费用,而

库址距用户集中地的距离将直接影响配套输气管道的建设费用及运营期的天然气输送费用。因此,在保证储气库安全性的同时,应尽量减少建设投资。

(3) 就近性原则

根据国家天然气管网的分布,盐穴储气库的库址应选在距离天然气长输管道或目标城市较近的盐矿区,以便于天然气的存储和输送,达到季节性调峰的目的。

(4) 战略性原则

盐穴地下储气库的建设属于国家能源战略储备的配套设施建设,建设选址需考虑国内经济发展和天然气需求,与其他国家能源项目相协调,符合国家宏观战略要求。

3 盐穴储气库选址的影响因素分析

基于盐穴储气库选址的安全性和经济性原则,参考国内层状盐岩的地质特征^[3,9,17]和基本力学特性^[3,8]、盐腔的稳定性^[3-7]以及储气库的造腔工艺^[1-2]要求,从盐矿区域地质特征、盐矿基本地质特征、建腔目的盐层特性、盐岩层顶底板特性、矿区水文地质特征和矿区地面考虑因素 6 个方面对储气库选址的影响因素进行了详细分析。

3.1 盐矿区域地质特征

(1) 矿区沉积特性(安全性、经济性)

通过了解含盐系地层的沉积时代、沉积环境和物质来源,分析该盐矿属于海相沉积盐岩矿床还是陆相沉积盐岩矿床。

海相沉积盐矿具有规模大、埋藏深、品位高、组分单一、单矿层厚度大、成矿面积大、储量丰富的特点,是建造盐穴储备库的理想矿区;但由于其埋藏较深而使盐岩受温度和压力作用具有一定的流动性和可塑性,导致盐腔稳定性相对较差,造腔成本也较高。

陆相沉积盐矿埋藏较浅,矿床规模和分布面积相对海相盐矿而言一般较小,盐岩品位相对较低,矿层层数多,单层厚度小,且含有少量不溶夹层,因此,在陆相盐矿中建设储气库时需对其密闭性和稳定性进行分析。此外,由于盐岩品位较低以及不溶夹层的存在,造腔过程中会产生大量的不溶沉积存在盐穴底部,减少了腔体的有效体积,影响其经济效益。

(2) 区域构造特征(安全性)

盐岩矿区所在的区域构造特征对储气库库址的筛选、储气库盐腔的建设以及储气库日后的平稳安全运行均有重要影响。

若盐岩沉积区域的地质构造活动相对较弱、构造平缓、历史地震很小、断层不发育,则整个区域的沉积就平稳,对盐层平面展布特征也较容易预测,较易实现储气库的形态控制,有利于腔体的稳定性和密闭性。

相反,若盐岩矿区处在区域构造相对复杂的区域,如断层发育带上,或历史地震及其他构造活动较强的区域内,沉积地层就相对复杂,不仅可能导致成腔形状不规则,而且对腔体的稳定性和密闭性也有不利影响。一般来说,若库址区域附近有活动断层则应考虑放弃该库址。

3.2 盐矿基本地质特征(经济性)

(1) 盐岩分布范围

盐矿分布范围越大,储气库建设可选择范围越大,可建设规模越大,单位投资越小。

(2) 盐岩埋藏深度

盐层埋藏过深,会相应增加钻井费用和建库投资,并且地层深部的压力和温度都比较大,进而影响了盐岩的力学特性,使盐岩的可塑性和流动性较强,腔体稳定性较差。但埋藏越深,盐穴储气库的运行压力也较大,可以说,相同体积的储气库,埋深越大,储量越大。

相反,埋藏过浅,则限制储气库的运行压力,进而影响储气量。但埋藏浅盐岩的流变性相对较差,在相同偏应力下,盐岩的蠕变率较低,体积收缩率较低,且钻井投资和建库费用也相应较少。

因此,兼顾经济性原则和盐穴的储气量,盐穴储气库的埋深最好在 500~1 500 m 以内,最深不宜超过 2 000 m,理想埋藏深度为 800~1 200 m。

(3) 盐岩矿体厚度

盐岩矿体的厚度越大,可建储气库的体积越大,在相同埋深条件下库容量越大。一般情况下,盐穴储气库地层的可连续水溶开采盐层厚度至少在 100 m 以上。

(4) 矿体品位及不溶物含量

盐岩矿体的品位越高、盐岩内部夹层越少、不溶物含量越少,储气库的造腔速度越快,所形成的腔体越大,盐腔形态越容易控制,储气库的安全性越好。一般认为,建设盐穴技术所能接受的矿层最低品位是 60%。

此外,由于不能溶解的不溶物残渣沉积在盐穴的底部不能排出,占据了盐穴的可用体积,因此,不溶物含量还影响了最后所形成盐穴的有效体积。相同的盐层厚度条件下,矿体品位越高,不溶物含量越小,所得到的盐穴有效体积越大。

3.3 建腔目的盐层特性(安全性、经济性)

(1) 建腔目的层盐岩层可溶物含量

可溶物不仅是指 NaCl,还包括 Na_2SO_4 、KCl 等矿物。建腔目的盐层的可溶物含量越高,不溶物质越少,越有利于腔体形状的控制,有利于腔体稳定性和造腔速度,且造腔完成后不溶物沉渣越少,腔体有效体积越大。

(2) 夹层的厚度和频度

盐岩层内夹层是指 NaCl 含量低于 25% 的含盐泥岩、砂泥岩、膏盐等不溶或难溶的盐层。夹层的厚度和频度(单位长度的层数)会影响造腔形状的控制和造腔速率。

夹层的厚度和频度越小,夹层的体积比越小,越有利于提高造腔速率和控制腔体形状,并且不容易形成大面积夹层垮塌和造成套管变形损伤。

(3) 夹层的性质

夹层的性质主要是指其可溶性和渗透性。一般来说,夹层溶解度越高,造腔速率越快,且造腔完成后不溶残渣含量越小,腔体可用体积越大;夹层渗透性越低,越有利于盐穴储气库的密闭性。

3.4 盐岩层顶、底板性质(安全性)

(1) 盐层顶、底板性质

盐岩顶、底板性质主要包括其岩性和厚度。若盖层坚硬、致密、裂隙少,即使厚度较小也能有良好的密封性;若岩性较软弱、风化程度高、节理裂隙分布密集,就需要有较大的厚度。盖层较厚,可以有效地消减由于构造运动造成的不利影响,且大厚度盖层中的裂隙、孔洞等不宜贯通,可以阻止或减缓天然气通过盖层的扩散和渗漏,并且盖层越厚,横向上越稳定,越有利于盐穴的稳定性和密闭性。

(2) 盖层的渗透率和突破压力

盖层岩石的渗透率和突破压力是衡量其封盖能力的主要参数。渗透率越小、突破压力越大,越有利于盖层封闭。由于不同品质的盖层在垂向上突破压力的叠加性,不同深度点突破压力不同,突破压力高的盖层可以阻挡通过较低突破压力盖层逸散上来的天然气。

可根据盖层中裂隙的发育情况来定性衡量其渗透率和突破压力。一般来讲,裂隙发育程度越弱,盖层的渗透率越低,突破压力越大,反之亦然。

3.5 盐矿区水文地质特征

(1) 地下水系分布(安全性)

通过了解地下水的水质、含水层和隔水层的分布以及地下水的补给、径流、排泄条件等,从而分

析盐矿顶、底板的稳定性。此外,若盖层中有水与地面水系连通,则容易形成气体泄漏的通道,导致盐穴腔体的密闭性失效。

(2) 地表水源分布 (经济性)

了解盐矿区内的水资源情况,水源中的新鲜水或微咸水是否充足,以保证在储气库建设中的造腔用水,一般造腔所需淡水为盐穴体积的 7~10 倍。若距离水源较远,则增加造腔成本。

3.6 矿区地面考虑因素

(1) 地表人口密度、地表建筑密度 (安全性)

储气库选址应避免人口、建筑物密集区,以免发生油气泄漏、地面沉降等事故给群众生命健康和正常生活带来危害。

(2) 地表构筑物类型 (安全性)

储气库的选址应避免有重大构筑物的地区,以免由于腔体收缩引起的地表沉陷影响构筑物的稳定性和安全运行,造成巨大的区域经济损失和社会影响。

(3) 与用户集中地或长输管道的距离 (经济性)

一般安全储气库地理位置以调峰半径 150 km 左右为宜,故储气库建腔选址一般应距离用户集中地 100 km 左右为宜,以降低输运成本。而对于调峰储气库,其距离长输管道的距离也不宜超过 100 km。

4 评价体系的建立及指标权重的确定

4.1 层次分析法简介

层次分析法 (analytical hierarchy process, AHP) 是美国匹兹堡大学 Saaty 教授于 20 世纪 70 年代中期提出的一种定性与定量相结合的系统分析方法^[18]。近年来,该方法在岩土工程的稳定性评价^[19-20]和风险分析^[21]中得到了初步应用。AHP 的基本原理是把复杂的问题分解为各个组成因素,将这些因素按支配关系分组形成有序的递阶层次结构,通过两两比较的方式确定层次中诸因素的相对重要性,然后综合人的判断以决定决策诸因素相对重要性的顺序,具有思路清晰、方法简便、系统性强的特点^[18]。

4.2 建立评价体系的层次结构模型

本文采用层次分析法进行盐穴地下储气库选址评价。首先将复杂的选址条件分解成若干个层次,再逐层分析,逐个比较,建立一个树状结构,将人的主观判断加以量化,获得各指标的权重。根据盐穴地下储气库的建设要求,将盐穴储气库选址综合评价体系作为目标层,盐矿区域地质特征、盐矿基本地质特征、目的盐层特性、盐岩层顶、底板性质、盐矿区水文地质特征、矿区地面考虑因素作为准则层,再将细化得到的 18 项基本指标作为评价层,建立层次分析法的层次结构模型,见图 1。

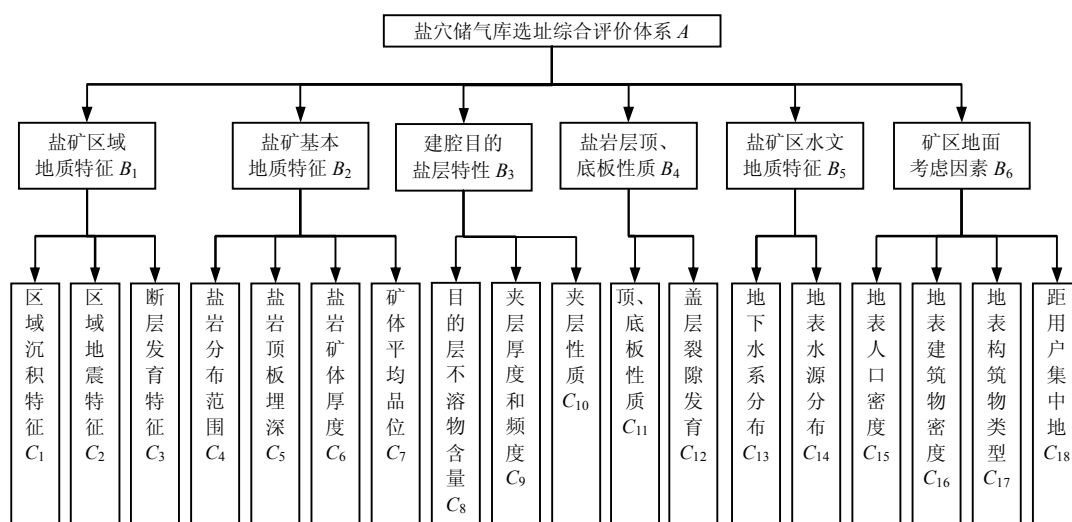


图 1 盐穴储气库选址综合评价体系目标层次结构模型

Fig.1 Layer structural model of site selection evaluation for salt cavern gas storage

4.3 模型中各指标权重的计算

根据上述盐穴储气库选址综合评价体系目标层次结构模型,结合 20 位有盐穴储气库选址相关研究经验的专家和工程师的调查结果,利用 1~5 比较尺度的两两比较法给出各层的判断矩阵。1~5 比较尺

度即对每一层的元素进行两两比较时,比较分值采取 5 分制,如甲与乙比较,甲很重要得 5 分,相对重要得 3 分,一样重要得 1 分,相对不重要得 1/3 分 (相对重要的倒数),很不重要得 1/5 分 (很重要的倒数)。

表1以某位专家对盐矿区域地质特征的评价为例说明了某一准则下基本指标两两对比调查表的形式,以盐矿基本地质特征、目的盐层特性、盐岩层顶底板特性、矿区水文地质特征、矿区地面考虑因素及盐穴储气库选址综合评价为准则的因素两两对比调查表与表1类似。

表1 盐矿区域地质特征因素两两对比表
Table 1 Correlation table of salt mine geologic features

特征因素	区域沉积特征	区域地震特征	断层发育特征
区域沉积特征	1	3	1
区域地震特征	1/3	1	1/3
断层发育特征	1	3	1

由表1可得到某位专家对某一准则下的基本指标的判断矩阵 $B_{n \times n}$,然后采用和积法计算该判断矩阵 $B_{n \times n}$ 的特征向量,具体计算步骤如下^[12]。

(1) 判断矩阵每列归一化

$$\bar{b}_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{k=1}^n b_{kj}}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

(2) 每一列经归一化后的矩阵按行相加

$$\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

(3) 对向量归一化

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中: W_i 为第*i*个因素在某一准则下的相对重要性权重。

所得到的 $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T$,即为所求特征向量。

类似地,按照以上步骤计算其他单一准则下各元素的相对权重并作相应的一致性检验,再进行准则层相对权重计算及其一致性检验计算,最后获得所有元素对于目标层的相对重要性排序权重值,即为该专家意识里的各因素相对重要性权重值。

考虑每个专家在盐穴储气库选址研究方面的资历,根据专家的职称、专业、学历、工龄给不同专家的意见赋予相应的权重,将专家的判断结果进行加权综合,得到各指标的实际权重值。计算采用如下公式:

$$W_i^* = \left(\sum_{k=1}^{20} W_{ik} P_k \right) / \sum_{k=1}^{20} P_k \quad (4)$$

式中: W_{ik} 为采用上述和积法计算得到的第*k*位专家确定的指标*i*的重要性权重值; P_k 为第*k*位专家的资历权重; W_i^* 为指标*i*的最终重要性权重值。计算结果见表2。

表2 权重值计算汇总表
Table 2 Summary table of weight values

准则层	准则层权重值分配	指标层	指标层权重值分配	相对于目标层的权重值 W_i^* (准则层权重×指标层权重)
盐矿区域地质特征 B_1	0.250 0	区域沉积特征 C_1	0.428 6	0.107 2
		区域地震特征 C_2	0.142 9	0.035 7
		断层发育特征 C_3	0.428 6	0.107 2
盐矿基本地质特征 B_2	0.250 0	盐岩分布范围 C_4	0.375 0	0.093 8
		盐岩顶板埋深 C_5	0.125 0	0.031 2
		盐岩矿体厚度 C_6	0.375 0	0.093 8
		矿体平均品位 C_7	0.125 0	0.031 2
建腔目的盐层特性 B_3	0.250 0	目的层不溶物含量 C_8	0.200 0	0.050 0
		夹层厚度和频度 C_9	0.600 0	0.150 0
		夹层性质 C_{10}	0.200 0	0.050 0
盐岩层顶底板特性 B_4	0.083 3	顶、底板性质 C_{11}	0.500 0	0.041 7
		盖层裂隙分布 C_{12}	0.500 0	0.041 7
矿区水文地质特征 B_5	0.083 3	地下水系分布 C_{13}	0.750 0	0.062 5
		地表水源分布 C_{14}	0.250 0	0.020 8
矿区地面考虑因素 B_6	0.083 3	地表人口密度 C_{15}	0.519 3	0.043 3
		地表建筑密度 C_{16}	0.200 9	0.016 7
		地表构筑物类型 C_{17}	0.200 9	0.016 7
		与用户集中地距离 C_{18}	0.078 9	0.006 6

5 库址适宜度评价分析

5.1 基本指标适宜度等级划分

由于国外大型盐丘中地下储气库的选址经验不完全适用于我国层状盐岩中储气库的建设,且我国盐穴储气库的选址建设才刚起步,目前尚不能建成由一定数量的成功案例组成的选址指标数据库以供借鉴分析,因此,本文在第3节盐穴储气库选址因素分析的基础上,主要通过本领域咨询专家的意见并参考相关的理论研究成果^[1-9, 17]及建库经验,初步提出如下储气库选址指标适宜度等级划分标准,见表3和表4,以便于对具体库址的相关指标进行定量化分析。

5.2 库址综合适宜度等级评价

根据表3、4的库址各指标适宜度等级划分,得到某目标库址的各指标评价价值 $P_i(i=1,2,\dots,18)$ 。结合4.3节采用层次分析法得到的各指标在整个盐穴储气库选址评价系统中所占的权重值 $W_i^*(i=1,2,\dots,18)$,则该目标库址的综合建库适宜值 P 由下式计算得到:

$$P = \sum_{i=1}^{18} W_i^* P_i \quad (5)$$

将根据式(5)计算得到的目标库址综合建库适宜值 P 代入表5进行对比,即可得出该库址的适宜度等级,并根据相应的应对措施建议考虑建库项目的可行性。

表3 盐穴储气库选址指标适宜度等级表(1)

Table 3 Index suitability standards of site selecting evaluation for salt cavern gas storage (1)

适宜度 分级	得分	盐矿区域地质特征			盐矿基本地质特征				建库目的盐层特性		
		区域沉积特征	区域地震特征	断层发育特征	盐岩分布范围/ km^2	盐岩顶板埋深/ m	盐岩矿体厚度/ m	矿体平均品位	目的盐层不溶物含量	夹层厚度和频度	夹层性质
最佳库址	10	盐丘状海相沉积	记载历史地震活动很弱	库区周围1 km内无活动断层	≥ 100	800~1 200	≥ 400	≥ 85	< 10	夹层所占厚度比很小	可溶物含量在15%以上,且孔隙度很小
适宜库址	8	极少夹层陆相沉积	记载历史地震活动较弱	库区周围300~1 000 m内无活动断层	50~100	500~800	200~400	70~85	10~25	夹层所占厚度比较小	可溶物含量在5%~15%之间,且孔隙度较小
较适宜库址	6	少量夹层陆相沉积	近期无大的历史地震	库区周围300~1 000 m内无活动断层	20~50	1 200~1 500	100~200	50~70	25~40	夹层所占厚度比在40%以内	可溶物含量在5%~15%之间,且孔隙度较小
不适宜库址	4	大量夹层陆相沉积	近期有大的历史地震	库区周围300 m内有活动断层	< 20	其它	< 100	< 50	≥ 40	夹层所占厚度比超过40%	可溶物含量小于5%,或孔隙度很大

表4 盐穴储气库选址指标适宜度等级表(2)

Table 4 Index suitability standards of site selecting evaluation for salt cavern gas storage (2)

适宜度 分级	得分	盐岩层顶、底板特性		矿水文地质特征		矿区地表考虑因素			
		顶、底板性质	盖层裂隙发育	地下水系分布	地表水源分布	地表人口密度/(人/ km^2)	地表建筑物密度/%	地表构筑物类型	距用户集中地(保安气库)/距长输管道(调峰气库)/km
最佳库址	10	坚硬岩石,厚度 ≥ 100 m	裂隙不发育	盐矿层与地下水系隔离	淡水源充足,且距库址近	< 10	< 5	附近无大型构筑物	≤ 30
适宜库址	8	坚硬岩石,厚度50~100 m	裂隙少量发育		淡水源基本充足,且距库址近	10~50	5~15	附近有大型构筑物,但无重大构筑物	30~100
较适宜库址	6	中坚硬岩石,厚度30~50 m	裂隙有发育,但未形成贯通性裂隙		淡水源基本充足,距库址有一定距离	50~100	15~30	附近有大型构筑物,但无重大构筑物	30~100
不适宜库址	4	软弱岩石或厚度 < 30 m	有贯通性裂隙存在	盐矿层与地下水系联通	淡水源不足,或距库址很远	≥ 100	≥ 30	附近有重大构筑物	> 100

表5 库址综合适宜度等级评价表

Table 5 Synthetical evaluation of site selection for salt cavern gas storage

库址适宜度	指标综合值	应对措施建议
最佳库址	$9 < P \leq 10$	很适宜建库,且安全性高,经济性好。
适宜库址	$7 < P \leq 9$	比较适宜建库,但须在建设期和运营期加强安全投资和监管。
基本适宜库址	$5 < P \leq 7$	基本适宜建库,但建设期和运营期需预留专门款项用以维护库的安全性。
不适宜库址	$P \leq 5$	不适宜建库,应该考虑放弃该项目,另选其他库址。

6 工程应用

以湖北云应盐矿的 04—15 盐群为目的盐层,应用本文所述方法对其进行建库选址综合评价。

云应盐矿位于湖北省云应盆地中部,属于陆相沉积盐矿,预测地质储量为 3.6×10^{10} t。石盐矿体呈薄层状、似层状、透镜状产出。矿床面积约为 188 km²,矿床平均埋深为 300~850 m,倾角为 3°~4°。04 盐群顶板埋深为 349.88~743.87 m,由北向南、由西向东逐步加深。矿区内共有大小盐层 500~600 层,单层厚度为数厘米至 4.84 m,一般厚度为 0.2~0.4 m,累计矿层总厚为 30~90 m,最厚达 180 m。04—15 盐群厚度为 155.14~194.46 m,平均厚度为 186.48 m,边部向中心加厚。其中盐层厚度为 104.50~150.14 m,平均厚度为 100.36 m。各盐群的 NaCl 平均品位为 70%~80%,低者为 65%,高者为 88.65%。04—15 盐群含矿率为 62.94%~77.21%,整个可溶段含 NaCl 为 65%~70%。该盐群含夹层约 20%~30%,夹层主要为硬石膏岩、钙芒硝岩,平均含易溶 NaCl 为 25%左右。盐群向上依次为中层弱可溶较软钙芒硝岩组、中厚层状较弱~较硬硬石膏岩组、厚层状较软钙质泥岩、砂岩组、厚层软弱泥灰岩及钙质泥砂岩组和松散土体工程地质岩类。该区域有文字记载的 4.75 级(烈度为 VI 度)以上的地震有 26 次,一般震级较低,属弱震区。矿区地表人口较为稠密,村镇居民区面积约 9%。管道运输方面,规划建设的西气东输二线距本区 40 km 左右。

参照表 3、4,得出云应盐矿各指标的适宜度分级,18 项基本指标的得分依次为:6、8、8、10、8、6、8、6、8、10、8、8、10、8、6、8、8、8。将各指标得分及对应的表 2 中计算得到的权重值代入式(1)中,得到该备选库址的综合建库适宜值 $P = 7.824$,对照表 5 分析认为,该库址属于适宜库址,这表明该盐矿区域有着适合建设盐穴地下储气库的条件,应作为国家地下储气库建设的较优备选库址。该评价结果与专家论证意见一致。

7 结 论

(1) 分别从盐矿区域地质特征、盐矿基本地质特征、建腔目的盐层特性、盐岩层顶底板特性、矿区水文地质特征和矿区地面考虑因素 6 个大的方面详细分析了盐穴储气库选址的主要影响因素,即选址的基本指标,并主要依据专家意见及相关理论研究成果,初步提出了各基本指标的适宜度等级划分

标准。

(2) 采用层次分析法和专家调查相结合的方法计算得出盐穴储气库选址评价体系中 18 个基本指标的重要性权重值大小排序,比较重要的指标依次为:夹层厚度和频度、区域沉积特征、断层发育特征、盐层分布范围、盐岩矿体厚度、地下水系分布、目的层不溶物含量、夹层性质,其余 10 项指标的重要性权重均小于 0.05。

(3) 参照表 2 的权重值计算结果、表 3、4 的基本指标适宜度分级和式(5),可对某目标库址进行综合建库适宜值计算,将计算结果对照表 5,便可得到该库址的建库适宜度和相应的建设应对措施,为盐穴储气库的选址评价提供了简单有效的方法。

(4) 以湖北云应盐矿为例,应用上述方法对该目标库址进行评价,得到该矿区的综合建库适宜值 $P = 7.824$,属于适宜库址,表明该盐矿区域有着适合建设盐穴地下储气库的条件,应作为国家地下储气库建设的较优备选库址。该评价结果与专家论证意见一致,验证了该方法的合理性。

参 考 文 献

- [1] 丁国生, 张昱文. 盐穴地下储气库[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- [2] 丁国生, 谢萍. 利用地下盐穴实施战略石油储备[J]. 油气储运, 2006, 25(12): 16—19.
DING Guo-sheng, XIE Ping. Oil strategic reserve using salt cavern gas storage[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2006, 25(12): 16—19.
- [3] 李建中. 利用岩盐层建设盐穴地下储气库[J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 119—121.
LI Jian-zhong. Build underground gas storage in bedded salt rock[J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(9): 119—121.
- [4] 尹雪英, 杨春和, 李银平. 泥岩夹层对层状盐岩体中储库稳定性影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊): 344—348.
YIN Xue-ying, YANG Chun-he, LI Yin-ping. Influence of mudstone interlayer on stability of oil storage in laminated salt rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(Supp.): 344—348.
- [5] 尹雪英, 杨春和, 陈剑文. 金坛盐矿老腔储气库长期稳定型分析数值模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 869—874.
YIN Xue-ying, YANG Chun-he, CHEN Jian-wen. Numerical simulation research on long-term stability of gas storage in Jintan salt mine[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(6): 869—874.

- [6] 吴文, 侯正猛, 杨春和. 盐岩中能源(石油和天然气)地下储存库稳定性评价标准研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2497—2505.
WU Wen, HOU Zheng-meng, YANG Chun-he. Investigation on evaluating criteria of stabilities for energy (petroleum and natural gas) storage caverns in rock salt[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(14): 2497—2505.
- [7] 任松, 李小勇, 姜德义, 等. 盐岩储气库运营期稳定性评价研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1465—1472.
REN Song, LI Xiao-yong, JIANG De-yi, et al. Evaluating stability of salt rock gas storage during operation period[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1465—1472.
- [8] 郭印同, 杨春和, 付建军. 盐岩三轴卸荷力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 725—730, 738.
GUO Yin-tong, YANG Chun-he, FU Jian-jun. Experimental research on mechanical characteristics of rock under triaxial unloading text[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(3): 725—730, 738.
- [9] 杨春和, 李银平, 陈锋. 层状盐岩力学理论与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [10] 朱坚鹏. 基于层次分析法的会展中心选址评价体系[J]. 福建建筑, 2008, (7): 19—21.
ZHU Jian-peng. The evaluation system of site selection for the exhibition center based on AHP[J]. **Fujian Architecture & Construction**, 2008, (7): 19—21.
- [11] 年廷凯, 郑德凤, 栾茂田. 城市固体废弃物卫生填埋场选址评价的模糊集方法[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 574—578.
NIAN Ting-kai, ZHENG De-feng, LUAN Mao-tian. Fuzzy sets theory for multi-objective system and its application to site selection of municipal solid wastes landfill[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(4): 574—578.
- [12] 李渝生, 黄润秋. 5.12 汶川大地震损毁城镇的震害效应与重建选址问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1370—1376.
LI Yu-sheng, HUANG Run-qiu. Earthquake damage effects of towns and reconstruction site selection in Wenchuan earthquake on May 12, 2008[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(7): 1370—1376.
- [13] 邓纯净, 谢正亮. 基于层次分析法的高速铁路车站选址评价[J]. 交通科技与经济, 2010, 5(12): 53—55, 58.
DENG Chun-jing, XIE Zheng-liang. High-speed railroad station selected location appraisal based on analytic hierarchy process[J]. **Technology & Economy in Areas of Communications**, 2010, 5(12): 53—55, 58.
- [14] 任改娟, 贡长青. 基于层次分析法的秦皇岛市垃圾填埋场选址评价[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2009, 19(2): 31—34.
REN Gai-juan, GONG Chang-qing. Evaluation of landfill site selection with analytical hierarchy process in Qinhuangdao city[J]. **Journal of Environmental Management College of China**, 2009, 19(2): 31—34.
- [15] 张云, 刘长礼, 叶浩, 等. 岩溶地区垃圾填埋场的选址评价探讨[J]. 中国地质, 2008, 35(1): 163—181.
ZHANG Yun, LIU Chang-li, YE Hao, et al. Research on site selecting evaluation for garbage landfill in karst region[J]. **Geology in China**, 2008, 35(1): 163—181.
- [16] BEREST P, BROUARD B. Safety of salt caverns used for underground storage[J]. **Oil & Gas Science and Technology**, 2003, 58(3): 361—384.
- [17] 王清明. 石盐矿床与勘查[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [18] 郭波, 龚时雨, 谭云涛, 等. 项目风险管理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [19] 丁丽宏. 基于改进的灰关联分析和层次分析法的边坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3437—3441.
DING Li-hong. Research on estimation of slope stability based on improved grey correlation analysis and analytic hierarchy process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(11): 3437—3441.
- [20] 翟友成, 曹文贵, 王江营, 等. 基于不确定型层次分析法的边坡稳定模糊评判方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 539—543.
ZHAI You-cheng, CAO Wen-gui, WANG Jiang-ying, et al. Fuzzy evaluation method of slope stability based on uncertain analytic hierarchy process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.2): 539—543.
- [21] 许振浩, 李术才, 李利平, 等. 基于层次分析法的岩溶隧道突水突泥风险评估[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1757—1766.
XU Zhen-hao, LI Shu-cai, LI Li-ping, et al. Risk assessment of water or mud inrush of karst tunnels based on analytic hierarchy process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(6): 1757—1766.