引用：邱小松，郑雅丽，叶颖，等．含水层储气库库址筛选及关键指标评价方法：以苏北盆地白驹含水层为例 [J]. 中国石油勘探，2021,26(5):140-148.
Qiu Xiaosong, Zheng Yali, Ye Ying, *et al*. Aquifer site selection for natural gas storage and key indices evaluation method: a case study of Baiju aquifer in Subei Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(5):140-148.

含水层储气库库址筛选及关键指标评价方法
——以苏北盆地白驹含水层为例

邱小松[1,2]　郑雅丽[1,2]　叶　颖[3]　赖　欣[1,2]　刘满仓[1,2]　徐淑娟[1,2]　姚秋昌[4]　皇甫晓红[1,2]

（1 中国石油天然气集团有限公司油气地下储库工程重点实验室；2 中国石油勘探开发研究院；
3 中国石油华北油田公司第四采油厂；4 中国石油浙江油田公司）

摘　要：我国中东部经济发达地区天然气管道和 LNG 已经不能满足调峰保供的需求，建设储气库成为唯一现实选择。目前我国中东部地区气藏、盐穴两类库址目标也不能满足储气库建设需求，含水层目标构造复杂、勘探程度低，筛选出优质含水层建库目标开展前期评价工作难度较大。结合国内外含水层储气库建库条件分析和我国含水层目标埋藏深、构造复杂、物性差等特点，提出了适合我国含水层库址筛选评价标准和评价方法，筛选出中东部地区建库条件相对较好的白驹含水层作为目标开展评价。研究结果表明：（1）含水层能够承受最大流体压力为 15.0MPa，提压系数为 1.2；（2）有效建库空间体积为 $3864\times10^4m^3$，含气饱和度为 64.7%，库容量为 $17.5\times10^8m^3$；（3）构造顶部两口裸眼井封堵处理不确定因素多，建库风险大。建议将我国中东部地区盐岩层下伏埋深浅、物性好、水体规模大的含水层作为重点勘探方向库址目标。

关键词：地下储气库；含水层；选址；前期评价；白驹构造
中图分类号：TE722　　**文献标识码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.1672-7703.2021.05.013

Aquifer site selection for natural gas storage and key indices evaluation method: a case study of Baiju aquifer in Subei Basin

Qiu Xiaosong[1,2], Zheng Yali[1,2], Ye Ying[3], Lai Xin[1,2], Liu Mancang[1,2], Xu Shujuan[1,2], Yao Qiuchang[4], Huangfu Xiaohong[1,2]

(*1 CNPC Key Laboratory of Underground Oil/Gas Storage; 2 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development; 3 The Fourth Oil Production Plant, PetroChina Huabei Oilfield Company; 4 PetroChina Zhejiang Oilfield Company*)

Abstract: The construction of gas storage is now the only practical solution in economically developed areas of central and eastern China since the natural gas pipeline and LNG can no longer satisfy the peak demand modulation and supply guarantee. In addition, another two types of targets, depleted gas reservoir and salt cavern in central and eastern China are not sufficient to construct gas storage. The aquifer target has complex structure and low level of exploration, which is challenging to select favorable site and carry out preliminary evaluation. By analyzing the aquifer conditions for gas storage construction at home and abroad and the characteristics of aquifer target in China, such as great burial depth, complex structure and poor physical properties, evaluation criteria and methods for aquifer sites selection are put forward. As a result, Baiju aquifer structure with relatively good conditions for gas storage construction is selected as the study object in the central and eastern China. The results show that: (1) The maximum flow pressure that the aquifer can withstand is 15.0 MPa and the enhanced pressure factor is 1.2; (2) The effective space volume of gas storage is $3864\times10^4m^3$, gas saturation is 64.7% and total gas storage capacity is $17.5\times10^8m^3$; (3) There are many uncertain factors in the plugging treatment of the two open hole wells at the top of the aquifer structure, and the risk of gas storage construction is high. It is suggested that the subsalt aquifer with shallow burial depth, good physical properties and large-scale water body in the central and eastern China should be selected for gas storage target.

Key words：underground gas storage, aquifer, site selection, preliminary study, Baiju structure

基金项目：中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“地下储气库关键技术与应用研究”（2015E-40）。
第一作者简介：邱小松（1986-），男，湖北黄冈人，博士，2015 年毕业于长江大学，工程师，现主要从事储气库选址评价相关研究工作。
地址：河北省廊坊市广阳区 44 号信箱石油分院地下储库研究中心，邮政编码：065007。E-mail：qiuxiaos69@petrochina.com.cn
收稿日期：2021-02-08；修改日期：2021-08-06

0 引言

我国经济社会快速发展对天然气的需求量不断增加，天然气对外依存度不断攀升[1−7]，政府出台相关政策要求加快储气设施能力建设保障国家能源安全。从安全性和经济性考虑，建设地下储气库满足国家储气、供气需求成为重要战略措施[8−9]。地下储气库包括气藏、盐穴、含水层和矿坑等 4 种类型，根据 2020 年国际天然气联盟（IGU）数据统计[10]，目前全球运行地下储气库共计 689 座，总工作气量为 $4165\times10^8m^3$，其中含水层储气库 80 座，占总数量的 12%，工作气量为 $471\times10^8m^3$，占总工作气量的 11%。不同类型储气库日高峰采气量为 $97\times10^8m^3$，其中含水层储气库日高峰采气量为 $16\times10^8m^3$，约占总日高峰采气量的 16%。含水层储气库主要建设于美国、欧洲、独联体等国家和地区，工作气量分别占其总工作气量的 7%、15%、16%，说明含水层储气库在调峰保供过程中发挥了重要的作用。

截至 2019 年年底，我国已建成 15 座地下储气库群 29 座储气库，主要分布在环渤海、东北、西北、西南和中西部地区[11]，长江三角洲（简称长三角）、中南地区等天然气主要消费区油气资源匮乏，气藏建库目标缺乏[12]。借鉴国外经验，建设含水层储气库是满足这些地区调峰需求的首选。我国目前没有建设含水层储气库，选址评价没有标准可依，若按照国外含水层储气库选址评价标准几乎无库可选、无库可建。国内学者在渤海湾、长三角、中南等地区开展了含水层前期评价工作，康永尚等[13]综合考虑含水层地层埋深、圈闭规模、钻井费用等因素，优选最经济的含水层建库目标；贾善坡等[14−15]通过建立选址技术、地质安全、社会环境、经济性等四方面因素的层次分析法，定量评价潜在建库目标优劣程度；金凤鸣等[16]通过建立否决性、能力型、控制型、经济性等四方面因素的多层次、多指标目标优选的综合评价体系，定量评价潜在建库目标并排序；贾善坡等[17]、孟祥杰等[18]、刘团辉等[19]分别提出了含水层改建储气库盖层密封性、储气能力等评价方法。上述研究虽考虑不同因素初步建立库址筛选原则与评价方法，但针对含水层储气库是利用具有良好储渗条件的储层，通过高压注气形成人工气顶的建库特点所需要地质密封性、井筒密封性等方面研究不够深入；高压注采、有效储气空间方面研究基本没有；筛选原则还需进一步完善，评价内容尚需进一步明确。本文在总结国外含水层建库经验和我国气藏型储气库运行效率的基础上，提出了适合我国含水层库址筛选评价的基本原则，明确含水层储气库前期评价关键参数和技术内容，用以指导我国中东部地区有利含水层目标前期评价，以及勘探该区域潜在优质含水层库址的领域，对我国含水层储气库建设具有重要的推动作用。

1 含水层库址筛选标准

1.1 国外含水层建库基本情况

国外含水层储气库历经 70 余年的发展，积累了选址、评价、建设阶段技术经验，总结这些经验有利于我国含水层储气库选址建设。

（1）论证含水层是否适合改建储气库所需时间很长，可以划分为老井修复、纵向密封性论证、侧向密封性论证、工业废水回注论证等 4 个阶段开展地质勘查工作，其中任一阶段成果表明不适合建库将停止后续地质勘查工作并转入其他区块勘探，一般 4～5 个含水层中最终只有 1 个适合改建储气库。

（2）工业性试注是含水层改建储气库必经阶段，一般在含水层构造顶部进行，是形成次生气顶的重要途径。通过工业性试注，一方面可以证实地质勘探与评价研究成果，加深对含水层圈闭地质特征的认识；另一方面可以评估地层的吸收能力，为注采气能力评价和建库方案设计提供重要的基础数据。

（3）含水层改建储气库需要通过注气形成次生气顶，注气压力高于原始静水压力，一般运行压力为原始地层压力的 1.1～1.5 倍，最大可达 1.7 倍[20]，存在注入的天然气泄漏或运移至周边的风险，需要布置大量的监测井。一般监测井数量达总井数的 1/3～1/2，主要监测气泡形成过程、气水界面变化、流体运移、圈闭有效性等信息，确保含水层储气库安全运行。

（4）含水层储气库建设需要经历漫长的过程，如俄罗斯 Kasimovskoe 储气库建设历时 43 年，分为 5 个阶段。1977 年 Kasimovskoe 储气库开始注气试运行，第一次注气量为 $800\times10^4m^3$，一期建设完成注采井 10 口，集气站 1 座；1983 年开始扩建，二期建设新钻注采井 70 口，集气站 2 座；1998 年以后开始钻大井眼井和增加建设压缩机；2019 年按照计划执行五期扩建工作，现有注采井 287 口，日最大供气量为 $1.3\times10^8m^3$，目前工作气量为 $111.0\times10^8m^3$，库容量为 $211.0\times10^8m^3$。

根据2020年IGU数据统计[10]，全球运行中的含水层储气库埋深最浅的为美国Doe Run Upper储气库（为137.2m），埋深最大的为西班牙Yale储气库（为2300m），主体埋深小于1000m，其中埋深小于500m和500～1000m的含水层储气库分别占总数量的32.9%和51.9%（图1a）；储层岩性以砂岩为主，占比为71.4%，白云岩次之（图1b）；储层孔隙度为8%～32%，以大于15%为主（图1c）；储层渗透率为10～10000mD，以大于50mD为主（图1d）；库容量为（0.2～211.0）×10^8m^3，工作气量为（0.1～111.0）×10^8m^3，均以小于10×10^8m^3为主（图1e、f）。总体而言，目前运行中的含水层储气库具有构造埋深相对较浅，储层岩性简单，储层孔隙度、渗透率高，工作气量、库容量相对小的特点。

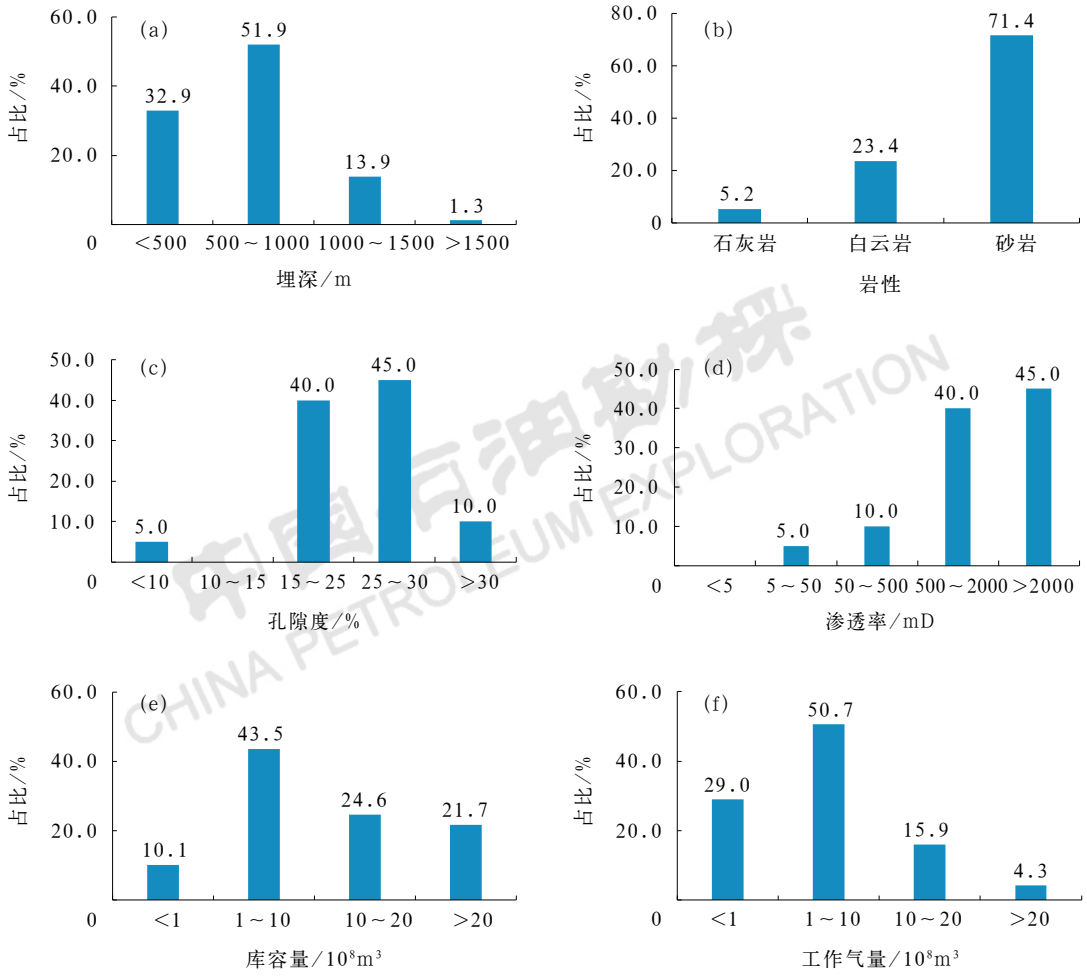


图1 全球含水层储气库地质参数统计图

Fig.1 Statistics of geological parameters of global aquifer gas storage

1.2 国内含水层库址筛选关键指标

我国气藏型储气库建设（投资）、运行（效率）显示，碎屑岩储层为含水层储气库首选的储层类型，应以中—高孔、中—高渗储层为主，埋藏深度小于2500m，老井数量少且井况简单为优。在国外含水层储气库调研成果分析基础上，结合我国气藏型储气库运行经验和地质背景等，提出我国含水层库址选择必须满足地面条件、资料条件、地质条件三方面要求。

1.2.1 地面条件

地面条件是含水层储气库建设首要考虑因素，主要涉及含水层的地理位置、地面建设可行性两方面。地理位置：主要通过踏勘调研了解含水层目标与天然气消费市场或主要管道之间的距离，明确周边是否有调峰需求，一般储气库距离主要天然气消费市场或可接入的管网不超过100km。地面建设可行性：主要为避免安全问题，储气库选址一般需要避开工厂、大型建筑物、生活居民区及环保特区等，建库范围内

存在需要拆迁的建筑或公共设施必须按照相关法规处理。

1.2.2 资料条件

资料条件是含水层储气库评价的重要基础，国内含水层目标一般是油气勘探过程中发现的没有油气成藏的构造，其录井、地震、分析化验资料相对较少，对建库条件评价带来巨大挑战。因此，一般选择资料相对齐全的目标开展筛选评价工作，包括地震、钻井、分析化验等相关资料。其中地震资料方面需要具有二维／三维地震资料，能够落实含水层圈闭、埋深、密封性特征；钻井资料方面需要具有钻遇目的层老井，能够验证盖层、储层的存在；分析化验资料方面需要具有岩石储层、流体相关分析化验参数，能够支撑圈闭有效性、储气空间、储气规模等特征评价。

1.2.3 地质条件

根据地面条件、资料条件筛选出适合改建储气库的含水层目标，进一步从圈闭有效性、储气性能、动态密封性、水体及储气规模、工程条件等 5 个方面开展研究论证，筛选出相对有利的含水层目标，筛选原则如下。

（1）圈闭有效性：圈闭形态为背斜、断背斜、断鼻构造，构造幅度大，内部断层少，埋藏深度小于 2500m，构造幅度大于 150m，盖层、断层封闭性相对较好，保证圈闭内气体不会渗漏。

（2）储气性能：砂岩储层，储层孔隙度大于 10%，渗透率大于 50mD，单层厚度大于 5m，保证有足够的储气空间和较好的注采气能力。

（3）动态密封性：储气库运行压力区间为静水压力的 1.1～1.7 倍时含水层圈闭盖层和断层依然保持密封。

（4）水体及储气规模：原始水体具备一定规模，库容量大于 $2\times10^8m^3$，连通水体规模约为原始水体规模的 10 倍才可能形成次生气顶。

（5）工程条件：无特殊易漏、易塌层段，降低钻井事故风险；老井井数较少、井况简单，无裸眼井的含水层优先。

2 含水层库址筛选评价

我国中东部经济发达地区天然气消费需求巨大，调峰需求也大[21−22]。为满足调峰需求，中国石油在华北、长三角、中南地区（河南、湖北、湖南、安徽）及长输管网沿途开展含水层库址筛选及建库前期评价工作，根据地面条件、资料条件在以上区域初步筛选出适合开展建库条件评价的目标，进行圈闭有效性、储气性能、水体及储气规模等方面的评价工作，初步得出分区建库条件优劣的排序（表 1）。

表 1　我国中东部地区含水层目标筛选评价参数表

Table 1 Geological parameters for aquifer site screening and evaluation in eastern China

分区	构造名称	地面条件		资料条件		地质条件									分区排序
		管线距离／km	地表情况	地震资料	钻井数／口	圈闭有效性			储气性能		动态密封性		储气规模	工程条件	
						埋深／m	面积／km^2	幅度／m	孔隙度／%	渗透率／mD	盖层	断层	库容量／10^8m^3	老井井况	
华北	梅厂	50	农田	二维	1	1700	32.8	600	11	26～74	较好	良好	46.2	套管	1
	葛 2	33	农田	二维	1	1650	21	150	11～13	29～71	良好	良好	26.6	套管	2
	大 5	70	农田	二维	2	2275	11.9	225	7～12	4～18	良好	良好	10.5	套管	不适合
	赵黄庄	—	农田	二维	7	1870	10.8	30	24.4	113.8	较差	良好	5.7	套管	
长三角	白驹	60	农田	三维	2	1170	13.4	290	3.2～30	6～137	良好	良好	79.1	裸眼井	1
	殷庄	43	—	三维	4	1940	13.60	450	24～26	50～200	良好	良好	54.8	裸眼井	2
	曹桥	60	农田	二维	1	900	4.99	300	6～18	0.05～7	较好	良好	14.8	裸眼井	不适合
	长河	—	农田	二维	1	1550	9.31	200	9.8	—	良好	中等	4.1	裸眼井	
中南	潜江	60	农田	三维	7	750	4.17	150	12～26	17～1522	好	好	8.1	裸眼井	1
	麻丘	15	高新区	二维	1	1600	36.5	350	9.0	—	良好	良好	11.9	裸眼井	不适合
	李宗村	40	—	三维	1	1400	9.59	175	10	—	良好	良好	6.8	裸眼井	
	沅江	—	湖泊	二维	0	1700	4.93	500	4～12	1～6	良好	较差	13.0	裸眼井	

中国石油勘探 CHINA PETROLEUM EXPLORATION

白驹含水层位于长三角江苏省兴化市合陈镇三河乡，调峰需求巨大；地表以农田为主，村庄分散，人口密度小，周边有多条省道及高速公路，地面条件满足工程建设需求；区域已部署完成三维地震勘探，背斜圈闭构造落实；在油气藏勘探阶段已完钻两口探井（裸眼完井），钻遇泰州组二段（泰二段）泥岩，以及泰州组一段（泰一段）和赤山组细砂岩，具有岩石物性和地层水分析数据，满足含水层库址筛选评价所需的资料条件。因此，认为白驹构造是长三角地区相对较好的含水层库址目标。

3 白驹含水层建库关键指标评价

3.1 圈闭有效性

圈闭有效性是根据客观存在含水构造的形态、幅度及静态封闭能力，给出储气库圈闭的有效范围、高度、压力等，从而判断含水层圈闭是否能“存得住”天然气。通常利用钻井、测井、地震、测试、生产动态等资料精细刻画断层组合及空间配置关系，落实含水层圈闭构造类型、形态、溢出点、闭合高度、闭合面积，以及断裂发育的类型、要素、组合形式、分布等特点，根据圈闭埋深、闭合高度、溢出点深度等相关研究结果，确定溢出点能够承受的最大地层流体压力。

结合钻井、测井资料对三维地震工区精细构造解释表明，白驹含水层为断层—构造圈闭，形态为长宽比小于3的背斜构造，圈闭高点埋深为1170m，溢出点位于构造西北部，埋藏深度为1460m，圈闭闭合面积为13.4km^2，构造幅度为290m。圈闭范围内断层极为发育，主要可以划分为两期次断层，其中第一期断层发育于拉张断陷成盆期，断层规模较大，继承性较强，控制了泰州组、阜宁组的沉积和构造演化，形成了洼隆相间的构造格局[23-25]。该期断层主要为近东西向正断层，断层延伸长度为1000～7500m，绝大多数延伸2000～5000m，断距一般为80～150m。第二期断层发育于阜宁组—盐城组沉积期，断层规模较小，其使得三级构造复杂化，形成多个独立的断鼻和断块构造。该期断层主要为近北西—南东向、北东—南西向正断层，断层延伸长度为100～5000m，绝大多数为2000～4000m，断距一般为50～100m。两期断层在剖面上的组合形式多样，主要为“Y”形、阶梯状或平行排列，多个断层面相交，部分为复杂的树枝状或花状断层。浅层以“Y”形为主，深层以平行排列为主，且浅层的多条断层至深层交会成一条断层（图2）。

白驹含水层构造溢出点深度为1460m，根据F502井、FT6井压力测试资料计算出目的层段压力梯度约为1.05MPa/100m，估算圈闭能承受的最大地层流体压力为15.0MPa。

3.2 储气性能

储气性能评价是含水层建库地质条件评价的核心内容之一，一般从储层宏观展布、储气空间特征两方面开展研究。其中储层宏观展布分析与油气藏分析相同，储气空间特征评价需要建立储气地质体三维模型[8]。含水层储气库多周期注采会引起储层物性及含气饱和度的变化，储层物性变化可通过应力敏感性实验获取；含气饱和度变化是由岩石微观孔隙渗流中的膨胀携液和气水互锁现象引起的，通过长岩心多周期气水互驱实验可获取含气饱和度大小。根据应力敏感性和含气饱和度实验测试数据对原始三维地质模型孔隙度、渗透率及含气饱和度进行校正。

研究区钻井、录井、测井资料分析显示：白驹含水层位于白驹凹陷边缘斜坡高部位，赤山组为一套沙漠沉积地层，区内钻遇的多为赤山组上部的沙丘沉积，岩性为厚层状砂岩夹薄层泥岩，砂岩厚度大于300m；泰一段底部发育盆地初始裂陷期的辫状河三角洲沉积，砂体主要为水下分流河道、河口坝和远沙坝等三角洲前缘沉积，砂体厚度为8～36m，平均厚度约为15m；泰一段中部主要发育滨浅湖相泥质沉积，间夹薄层粉砂岩；泰一段上部以曲流河三角洲前缘砂体为主，砂体厚度最大可达29m，平均厚度约为12m。

通过统计区内测井解释获取的孔隙度和渗透率可知，赤山组孔隙度为8.5%～30%，平均为15.3%，渗透率为10～80mD，中值为53mD；泰一段底部砂岩孔隙度为5.8%～29%，平均为14.9%，渗透率为8～78mD，中值为38mD；泰一段顶部砂岩孔隙度为3.2%～25%，平均为13.1%，渗透率为6～137mD，中值为28mD。总体表现为赤山组砂岩储层厚度、物性优于泰一段底部砂岩和顶部砂岩。

3.3 动态密封性

动态密封性是指在储气库多周期注采运行环境下，地质体盖层及断层的密封能力，是含水层储气库能否建库的关键参数。盖层的动态密封能力评价包括：（1）实验室模拟地层温度、压力和地应力周期扰动

中国石油勘探 CHINA PETROLEUM EXPLORATION

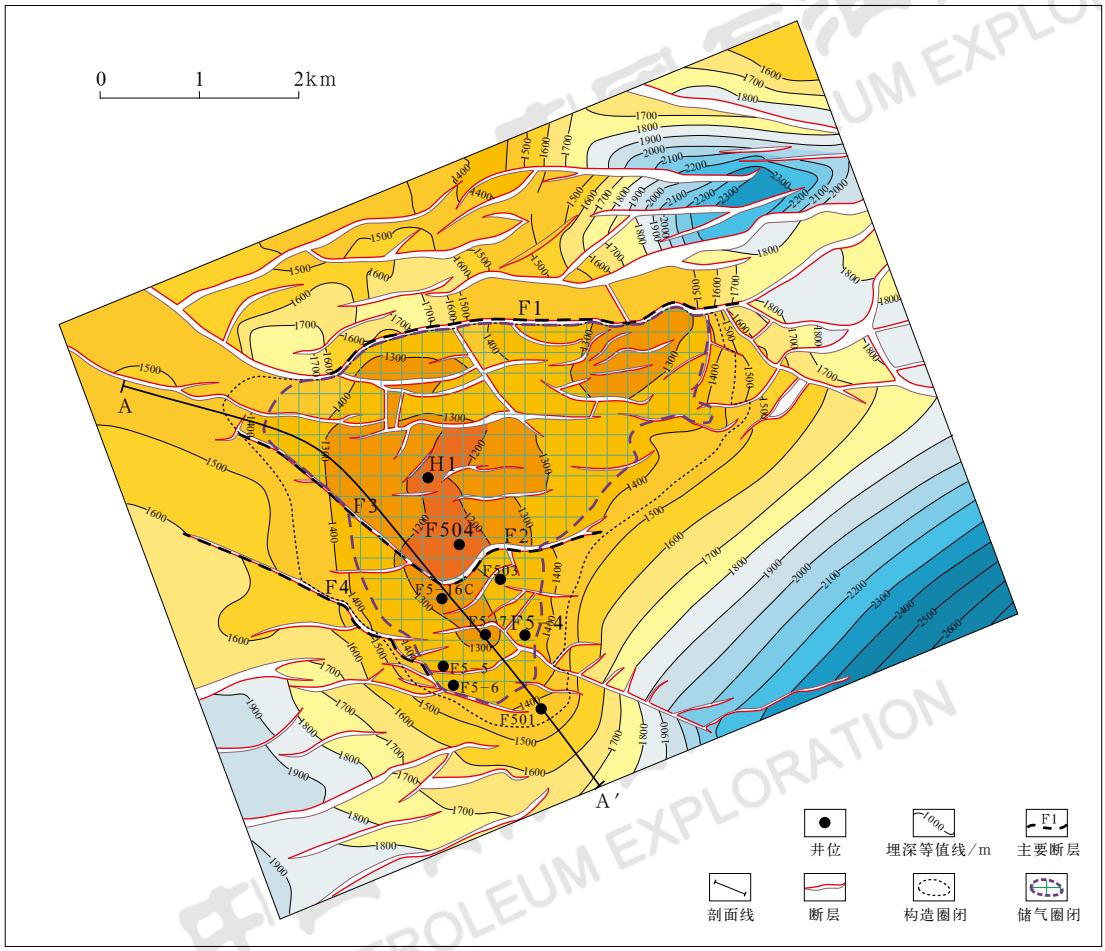


图 2　苏北盆地白驹含水层泰一段顶面断层及圈闭展布图

Fig.2 Fault and trap distribution on top of 1st member of Eocene Taishan Formation of Baiju aquifer, Subei Basin

条件，测试突破压力随注采周期变化规律；（2）以盖层岩石力学实验参数和地应力场模拟为基础，根据摩尔库仑准则计算盖层岩石发生剪切破坏和拉张破坏的极限流体压力。综合二者分析数据，最终确定盖层动态密封能力。断层动态密封性评价需要首先通过断层空间展布、岩性对接关系、流体分布、压力分布、干扰试井响应等定性判断断层连通关系，然后采用断层泥岩涂抹定量评价断层封堵能力，包括泥岩涂抹因子（SSF）、泥岩涂抹潜力（CSP）、泥岩断层泥比（SGR）3 种方法，其中 SGR 法应用效果最好，也是目前最常用的断层侧向密封性定量评价方法。通过地应力—渗流耦合模型模拟获取储气库注采过程中断层两侧动态地应力场，计算出任一流体压力下沿断层面的剪应力和有效正应力，引入滑移趋势（*ST*）和张破裂趋势（*DT*）两项参数表征断层稳定性，滑移趋势、张破裂趋势越大，断层稳定性风险越高[26]。最后结合盖层和断层动态密封能力，综合评价储气地质体动态密封性，作为含水层储气库运行压力设计的重要参考依据。

白驹含水层盖层为泰二段浅湖相泥岩、泥质灰岩沉积，区域上沉积厚度大于 100m，岩石孔隙度和渗透率均很低，是很好的区域盖层，邻区相同盖层突破压力达到 5.3MPa；地层水分析测试表明，泰一段地层水类型为 $CaCl_2$ 型，属于相对封闭的地层水环境，可以判断其与上覆盐城组开放地层水不连通，说明泰二段盖层密封条件相对很好。

白驹含水层为背斜构造圈闭，其断层密封性决定了圈闭密封性。根据研究区地震、钻井、测井、压力等资料分析，采用 SGR 法定量计算断层侧向密封能力，采用断层稳定性评价方法定量计算断层垂向密封能力。侧向密封能力计算结果表明，研究区断层带支撑最大压力差为 0.2～0.6MPa，在储气库注气阶段断层两侧压力差远大于 0.6MPa，天然气能够侧向运移，认为断层带不具备密封条件，但是考虑将背斜构造整体建库，则不用担心侧向密封问题，因此，认为研究区断层带侧向密封性不存在问题。研究区岩石样品单轴抗压强度为 22.92～40.78MPa，平均为

34.6MPa，三轴抗压强度为77.41～91.44MPa，平均为84.4MPa（表2）。根据单轴、三轴岩石力学实验建立岩石力学参数模型，结合现今应力场计算储层流体压力达到23.8MPa时，滑移趋势（*ST*）达到0.8，断层带可能失稳，引起垂向渗漏。

综合白驹含水层盖层密封性、断层密封性评价认为，白驹含水层能够承受的最大地层流体压力为15.0MPa。

表2 岩石力学实验参数测试表

Table 2 Lab test results of rock mechanical parameters

序号	样品编号	埋深/m	岩性	样品尺寸		围压/MPa	抗压强度/MPa
				直径/mm	长度/mm		
1	FT1-1	1630.35	细砂岩	49.3	98.9	0	40.78
2	FT1-2	1990.11	细砂岩	49.6	100.8	0	37.13
3	F503	1308.15	细—粉砂岩	49.2	100.8	0	22.92
4	FT6	1426.50	细砂岩	49.2	81.9	0	37.43
5	FT9	2776.30	细砂岩	49.6	101.7	16	91.44
6	FC1	2832.79	细砂岩	49.5	98.7	16	77.41

3.4 水体及储气规模

含水层建库过程是通过顶部注气驱替地层水，依靠注气增压驱替力和重力的共同作用，将地层水驱替至构造溢出点之外，在构造顶部形成一定规模的次生气顶。水体及储气规模评价是含水层储气库前期评价的重要内容，水体规模大小直接决定了储气规模的大小。由于水体和岩石骨架压缩性很小，通常选择开放水体作为含水层建库的目标。

对于开放水体，天然气通过高于原始地层压力注入含水层圈闭后，原始水体被挤压至低势区，最可靠的计算储气空间的方法是储气地质体三维模型计算方法，其计算公式为

$$Q=N_e S_g K \tag{1}$$

式中 Q——储气规模，m^3；

N_e——圈闭有效孔隙体积（地质体三维模型获取数据），m^3；

S_g——含气饱和度（实验室多轮次气水互驱获取数据）；

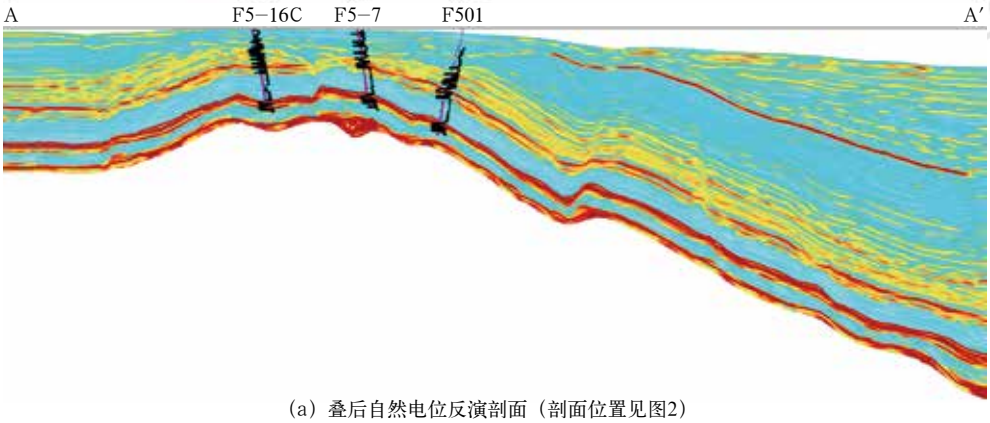
K——圈闭利用系数（根据储气层物性条件折算取值，一般为0.4～0.6）。

白驹含水层为发育断层的完整背斜构造，溢出点位于圈闭构造的西北部，同时采用叠前反演和叠后反演预测储层空间展布，叠前反演得到纵横波阻抗、密度、速度比、泊松比等数据，叠后反演得到电阻率、自然电位、自然伽马等数据体，其中叠前泊松比和叠后自然电位反演结果与已钻井符合率高，纵向分辨率较高，井间也有一定连续性，能较好地刻画沉积砂体展布。叠后自然电位反演剖面显示构造圈闭内部赤山组、泰一段砂岩储层与溢出点外储层连通（图3a），溢出点之外储层上倾方向连通广大水体；叠前泊松比（图3b）和叠后自然电位（图3c）反演平面属性图显示构造圈闭内部砂体与溢出点之外砂体连通，表明构造圈闭内水体与广大水体连通。综上所述，白驹含水层为开放水体，建库形成次生气顶时，水体可向工区外挤压排放，有利于含水层储气库建设。

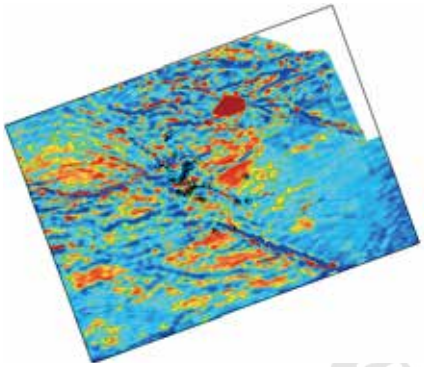
圈闭、储层、密封性、水体研究结果表明，白驹含水层为断层—构造圈闭，主要储气层位为泰州组一段和赤山组砂岩储层，构造高点埋深为1170m，总有效孔隙体积为$3864\times10^4m^3$；多周期驱替实验结果表明，该区含气饱和度为64.7%，圈闭利用率为50%，计算含气孔隙体积为$1250\times10^4m^3$。白驹含水层最高上限压力临界值按照密封性评价结果15.0MPa计算，初步估算库容量为$17.5\times10^8m^3$。

3.5 工程条件

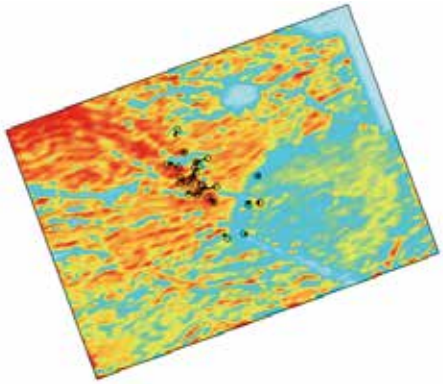
白驹含水层构造高部位H1井和F504井为两口钻遇目的层的老井，均为20世纪90年代的钻井，井眼轨迹数据完整，裸眼完井，封井难度相对较大。初步设计的封堵方案是根据井眼轨迹数据采用水力喷射冲洗寻找老井眼，如果一切顺利将按照储气库完井要求改造和封堵老井。由于老井修复工作难度大，目前



（a）叠后自然电位反演剖面（剖面位置见图2）



（b）叠前泊松比反演平面属性图



（c）叠后自然电位反演平面属性图

图 3　苏北盆地白驹含水层泰一段储层反演结果示意图

Fig.3 Reservoir inversion of 1st member of Eocene Taishan Formation in Baiju aquifer, Subei Basin

还没有计划开展修井工程作业。

4 结论与建议

长三角、中南、东南沿海地区经济发达，天然气消费需求和调峰需求巨大，仅靠 LNG 和管道已无法满足，且气藏、盐穴库址资源匮乏，建设含水层储气库是相对现实的选择。通过国内外含水层储气库基本特征调研和国内含水层条件分析，提出我国含水层建库目标必须满足地面条件、资料条件、地质条件三方面基本要求；通过对含水构造的圈闭有效性、储气性能、水体及储气规模、动态密封性等进行详细评价，最终结合工程条件确定含水层建库可行性。目前我国华北、长三角、中南地区已开展含水层库址目标的前期评价工作，其中华北地区的河北孙虎、长三角地区的江苏白驹、中南地区湖北潜江含水层是相对较好的库址目标，其中江苏白驹为相对最好的含水层；评价结果显示白驹含水层安全运行的上限压力为 15.0MPa，容积法计算建库孔隙体积为 $3864\times10^4m^3$，库容量为 $17.5\times10^8m^3$。

国外含水层建库经验表明，我国寻找埋深浅、物性好、构造简单的含水层目标可以考虑浅层盐岩层下伏含水层。如苏北盆地古近系阜宁组广泛分布盐岩层，埋深相对较浅、下伏发育砂岩储层、封闭能力强、水体规模大，倘若在该区筛选出优质含水层目标开展储气库建设，将掀开我国含水层建设储气库的新篇章，指导我国含水层储气库库址筛选和评价建设运行，满足广大南方油气资源匮乏地区的调峰需求。

参考文献

[1] 邹才能，潘松圻，赵群．论中国“能源独立”战略的内涵、挑战及意义[J]．石油勘探与开发，2020,47(2):416-426.
Zou Caineng, Pan Songqi, Zhao Qun. On the connotation,challenge and significance of China's “energy independence” strategy[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020,47(2):416-426.

[2] 李剑，佘源琦，高阳，等．中国陆上深层—超深层天然气勘探领域及潜力[J]．中国石油勘探，2019,24(4):403-417.
Li Jian, She Yuanqi, Gao Yang, *et al*. Onshore deep and ultra-deep natural gas exploration fields and potentials in China[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(4):403-417.

[3] 李国欣，朱如凯．中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J]．中国石油勘探，2020,25(2):1-13.
Li Guoxin, Zhu Rukai. Progress, challenges and key issues in the unconventional oil and gas development of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(2):1-13.

[4] 李鹭光，何海清，范土芝，等．中国石油油气勘探进展与上游业务发

展战略[J]. 中国石油勘探，2020,25(1):1-10.
Li Luguang, He Haiqing, Fan Tuzhi, *et al*. Oil and gas exploration progress and upstream development strategy of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(1):1-10.

[5] 谢玉洪，高阳东. 中国海油近期国内勘探进展与勘探方向[J]. 中国石油勘探，2020,25(1):20-30.
Xie Yuhong, Gao Yangdong. Recent domestic exploration progress and direction of CNOOC[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(1):20-30.

[6] 张国生，王小林，朱世佳. "十四五"我国油气发展路径选择[J]. 石油科技论坛，2020，39(6):7-12.
Zhang Guosheng, Wang Xiaolin, Zhu Shijia. China's option for oil and gas development path in 14th Five-Year Plan period[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2020, 39(6):7-12.

[7] 党录瑞，辜穗，姚莉. 新形势下油气产业科技创新体系建设路径思考[J]. 石油科技论坛，2019,38(2):33-38.
Dang Lurui, Gu Sui, Yao Li. Reflections on construction path of oil and gas industrial technological innovation system[J]. Oil Forum, 2019,38(2):33-38

[8] 魏国齐，郑雅丽，邱小松，等. 中国地下储气库地质理论与应用[J]. 石油学报，2019,40(12):1519-1530.
Wei Guoqi, Zheng Yali, Qiu Xiaosong, *et al*. Geological theory and application of underground gas storage in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019,40(12):1519-1530.

[9] 粟科华，李伟，辛静，等. 管网独立后我国储气库公司的经营策略探讨[J]. 天然气工业，2019,39(9):132-139.
Su Kehua, Li Wei, Xin Jing, *et al*. Discussion on the management strategies of China's gas storage companies after pipeline network independence[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(9):132-139.

[10] International Gas Union.Triennium work reports [R]. 2020.

[11] 丁国生，李春，王皆明，等. 中国地下储气库现状及技术发展方向[J]. 天然气工业，2015,35(11):107-112.
Ding Guosheng, Li Chun, Wang Jieming, *et al*. The status quo and technical development direction of underground gas storages in China [J]. Natural Gas Industry, 2015,35(11):107-112.

[12] 郑雅丽，完颜祺琪，邱小松，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.
Zheng Yali, Wanyan Qiqi, Qiu Xiaosong, *et al*. Technology of site selection and evaluation of salt-cavern gas storages [J]. Natural Gas Industry, 2019,39(6):123-130.

[13] 康永尚，杨帆，刘树杰. 调峰地下含水层储气库库址优选定量决策方法[J]. 地球科学——中国地质大学学报，2007,32(2):235-240.
Kang Yongshang, Yang Fan, Liu Shujie. Method of quantified optimization selection of aquifer traps as underground natural gas storages for peak demand modulation[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2007,32(2):235-240.

[14] 贾善坡，金凤鸣，郑得文，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.
Jia Shanpo, Jin Fengming, Zheng Dewen, *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.

[15] 贾善坡，郑得文，金凤鸣，等. 含水层构造改建地下储气库评价体系[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2017,47(3):857-867.
Jia Shanpo, Zheng Dewen, Jin Fengming, *et al*. Evaluation system of selected target sites for aquifer underground gas storage[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017,47(3):857-867.

[16] 金凤鸣，贾善坡，张辉，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):857-867.
Jin Fengming, Jia Shanpo, Zhang Hui, *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):857-867.

[17] 贾善坡，张辉，林建品，等. 含水层储气库泥质岩盖层封气能力定量评价研究：以里坦凹陷D5区二叠系含水层构造为例[J]. 水文地质工程地质，2016,43(3):70-86.
Jia Shanpo, Zhang Hui, Lin Jianpin, *et al*. Quantitative assessment of the gas-sealing capacity of the Permian claystone caprock for the D5 aquifer gas storage in the Litan Sag[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016,43(3):70-86.

[18] 孟祥杰，郭发军，陈洪，等. 含水层构造改建地下储气库盖层封闭能力评价研究：以冀中坳陷大5目标为例[J]. 长江大学学报(自科版)，2016,13(32):32-39.
Meng Xiangjie, Guo Fajun, Chen Hong, *et al*. Evaluation of sealing ability of aquifer caprock for reconstructing underground gas stroages-by taking Da5 caprock in Jizhong Depression for example[J]. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition), 2016,13(32):32-39.

[19] 刘团辉，郭发军，张辉，等. 含水层构造改建地下储气库储层评价研究：以冀中坳陷大5井区二叠系砂岩为例[J]. 油气藏评价与开发，2017,7(2):13-22.
Liu Tuanhui, Guo Fajun, Zhang Hui, *et al*. Evaluation of subsurface gas reservoir reconstruction by aquifer structure: taking Permian water-cut sandstone in central Hebei Depression as an example[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017,7(2):13-22.

[20] 丁国生. 含水层地下储气库[M]. 北京：石油工业出版社，2014.
Ding Guosheng. Aquifer underground gas storage [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014.

[21] 张涛，杨娇敏. 我国区域天然气消费量的趋势预测[J]. 天然气工业，2016,36(9):135-140.
Zhang Tao, Yang Jiaomin. Trend prediction of natural gas consumption in different regions of China[J]. Natural Gas Industry, 2016,36(9):135-140.

[22] 胡小夫，易梓仪，肖克勤. 我国天然气市场消费量预测与发展趋势研究[J]. 天然气技术与经济，2016,10(2):57-60.
Hu Xiaofu, Yi Ziyi, Xiao Keqin. Consumption prediction and development trend research of Chinese natural gas market[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2016,10(2):57-60.

[23] 魏祥峰，张廷山，梁兴，等. 白驹凹陷泰州组层序地层及沉积特征[J]. 中国地质，2012,39(2):400-413.
Wei Xiangfeng, Zhang Tingshan, Liang Xing, *et al*. Sequence stratigraphy and sedimentary characteristics of Taizhou Formation in Baiju Sag[J]. Geology in China, 2012,39(2):400-413.

[24] 郝军，苏雪波，鲁改欣，等. 苏北盆地白驹凹陷洋心次凹泰一段孔隙演化特征分析[J]. 中国地质，2011,38(4):1094-1101.
Hao Jun, Sun Xuebo, Lu Gaixin, *et al*. An analysis of porosity evolution in 1st member of Taizhou Formation within Yangxin sub-depression, Baiju Sag, Subei Basin[J]. Geology in China, 2011,38(4):1094-1101.

[25] 魏祥峰，张廷山，魏祥华，等. 苏北盆地白驹凹陷古近系层序地层及生储盖组合分析[J]. 天然气地球科学，2011,22(4):674-683.
Wei Xiangfeng, Zhang Tingshan, Wei Xianghua, *et al*. Paleogene sequence stratigraphy and source-reservoir-cap rock assemblage in Baiju Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2011,22(4):674-683.

[26] 孙军昌，胥洪成，王皆明，等. 气藏型地下储气库建库注采机理与评价关键技术[J]. 天然气工业，2018,38(4):138-144.
Sun Junchang, Xu Hongcheng, Wang Jieming, *et al*. Injection-production mechanisms and key evaluation technologies for underground gas storages rebuilt from gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2018,38(4):138-144.