

京津冀地区断陷盆地 含水层储气库评价体系及目标优选

金凤鸣^{1,2}, 贾善坡³, 张 辉¹, 林建品¹, 尚翠娟¹,
刘 静¹, 刘团辉¹, 赵政嘉¹, 席增强¹

(1. 中国石油华北油田公司, 河北 任丘 062552; 2. 中国石油大港油田公司, 天津 300280;
3. 长江大学岩土力学与工程研究中心, 湖北 荆州 434023)

摘要: 中国京津冀地区对利用含水层建设储气库有重大需求, 但是利用含水层建设储气库投资大、风险高, 在中国尚无先例, 特别是在京津冀所处的断陷盆地中, 由于地质构造复杂, 建库风险更大。以京津冀地区断陷盆地含水层构造为研究对象, 系统分析了圈闭、储层、盖层、断层等不同地质参数对含水层储气库的影响, 选取了否定性、能力型、控制型、经济性等4个关键因素, 对照法国等国外建设含水层储气库的成功经验, 建立了京津冀断陷盆地建设含水层储气库圈闭目标优选的多层次、多指标综合评价体系, 并运用层析分析法确定了不同指标的权重, 对京津冀地区断陷盆地11个初选圈闭目标进行评价排序, 优选出了大5石盒子组、孙虎孔店组、大参2奥陶系潜山等3个适宜改建地下储气库的含水层构造。文章是在国内首次开展的水层目标勘探生产实施评价基础上形成的, 对于复杂地质条件下的含水层储气库选址具有一定的指导意义。

关键词: 含水层构造; 地下储气库; 圈闭; 评价标准; 优选

中图分类号: TE822

文献标志码: A

文章编号: 1672-1926(2017)09-1433-13

引用格式: 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): 1433-1445. [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): 1433-1445.]

0 引言

地下储气库作为天然气储运的重要环节, 城市应急调峰供气的重要手段, 对保障用气安全至关重要, 日益受到国家重视。根据市场天然气需求量和消费结构, 需求最大的省份为北京、天津、山东、河北和江苏等地区, 特别是京津冀地区, 随着经济快速发展, 对天然气的需求量持续增长, 对地下储气库的需求也日益紧迫。京津冀地区已建枯竭气藏储气库设计年度工作气量仅为 $63 \times 10^8 \text{ m}^3$, 按照储气库工作

气量在天然气消费中所占比例, 预计京津冀地区需求量数据与目前储气库工作气量对比, 远不能满足需求, 而剩下的油气藏经过多轮次的筛选, 再无新的合适建库目标。含水层储气库是第二大类型的地下储气库, 在京津冀地区乃至中国开展水层储气库建设尚无先例, 如何在中国寻找到合适的含水层圈闭并进行改建储气库评价, 或者说构建适合中国地质特点的含水层构造优选评价体系和方法在当前显得尤为重要。

国外在含水层储气库库址筛选方面, 已从盖层

收稿日期: 2017-02-26; 修回日期: 2017-07-15.

基金项目: 中国石油科技重大专项(编号: 2015E-4002); 中国石油科技创新基金(编号: 2017D-5007-0604)联合资助。

作者简介: 金凤鸣(1964-), 男, 河北冀县人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事油气勘探地质综合研究及含水层储气库目标评价工作。

E-mail: yjy_jfm@petrochina.com.cn.

通信作者: 贾善坡(1980-), 男, 安徽萧县人, 教授, 博士后, 主要从事油气地下储备与地质力学研究. E-mail: jiasanporsm@163.com.

密封性、储层储集性能、圈闭完整性以及注采气能力等4个方面建立了相应的评估标准^[1-4],而针对库址技术指标体系、指标权重等方面的研究较少。国内对含水层储气库运营期的注采运行参数优化、气体渗漏控制、多场耦合模拟等理论方面的研究较多^[5,6],而对具体的含水层储气库候选目标评价方面的研究很少,采用系统科学理论建立的多层次、多指标选址综合评价体系研究尚未见报道。杨帆^[7]研究了含水层地下储气库的圈闭选择、储气库参数设计及优化,并将其实现了软件化。丁国生等^[8]对含水层储气库选址和储气库形成机理等关键技术问题进行了分析研究。阳小平等^[9]从库址类型、圈闭、断层封闭性、储层物性、埋深等方面,提出了孔隙型储气库库址的优选指标。贾善坡等^[10]对从选址技术、地质安全、社会环境以及经济性4个角度出发,构建了区域级别的含水层构造改建储气库的可行性评价体系。

华北油田地处京津冀地区,开展油气勘探开发30余年,具有在京津冀地区建设含水层储气库的区位和技术优势。自2013年以来,华北油田对陕京管线沿线或冀宁联络线附近的廊固、霸县、饶阳凹陷的含水层圈闭进行了全面筛选,落实了含水层圈闭有效性及储层、盖层条件。基于此,参考国内外已有研究成果,笔者在已有研究的基础上,选取合理的地质参数建立含水层储气库圈闭级别的评价指标体系,运用层次分析法和模糊综合评价方法,对京津冀地区的大5、葛2、大参2、大5南、高8、孙虎东、高6、赵皇庄背斜等8个区块的11个含水层圈闭进行量化评价研究,并进行了排序优选。

1 含水层储气库影响因素分析

枯竭气藏储气库和含水层储气库因储层特征相似,统称为“孔隙型”地下储气库。国内在枯竭气藏储气库选址技术方面已基本成熟,10余座已建储气库实践证明了现有储气库选址的合理性。综合国外研究成果和国内储气库建设的成功经验,枯竭气藏储气库选址影响因素为^[11-15]:老井封堵条件、盖层密封性、断层封堵性、储层物性、储气规模、气藏埋深、注采气能力、地理位置、投资费用、储气压力以及流体边界封闭性等。

建造地下储气库一般要实现如下3个目标:①预防储气库泄漏;②提高储气压力以达到设计的库容量;③加强储气库供气和调峰能力。在选址阶段,不同于枯竭气藏型储气库,含水层构造勘探程度较

低,其地质构造、断层封堵以及盖层密封性并不清楚,因此,含水层储气库选址对圈闭构造完整性、密封性、流体边界以及储层物性有着更严格的要求。对比枯竭气藏储气库,含水层储气库选址主要考虑如下3大类因素。

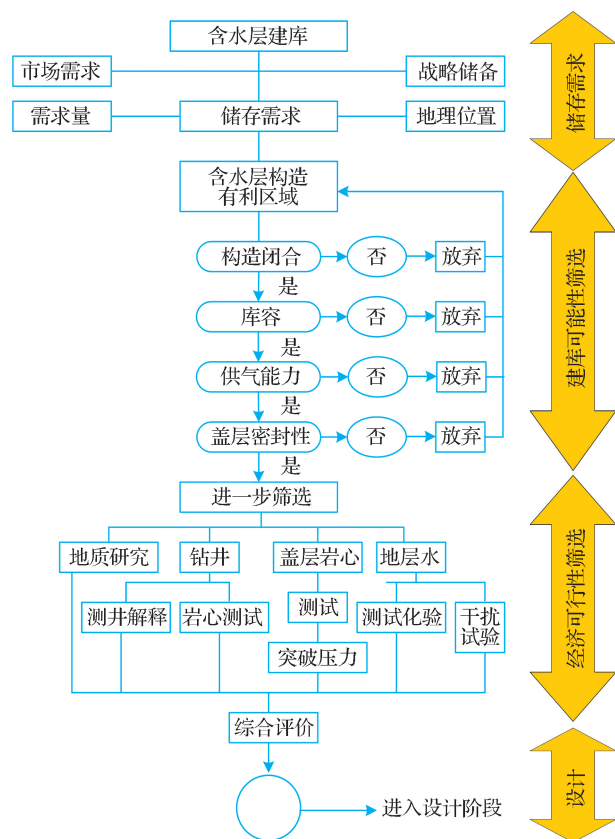


图1 国外含水层储气库选址技术流程

Fig.1 Site selection flow for foreign aquifer gas storage

1.1 圈闭的密封性

含水层构造钻井数量少,且多是新井,选址时较少涉及对井筒完整性进行评估,重点关注的是盖层质量,即突破压力、裂隙发育以及断层封堵性。

含水层构造盖层的密封性是未知的,一般多通过室内突破压力测试和渗透率测试进行评估。考虑到室内岩心测试的局限性,许多学者采用间接法进行评估,即盖层上覆岩层和含水层的压力水头和水化学特性可以间接反映盖层密封性^[16]。评价盖层密封性的另一个重要因素为其连续性(断层或裂缝的存在),一般通过地质、地球物理以及岩心分析评价,盖层的厚度与其连续性有关,可间接进行评价。评价圈闭密封性最有效的方法是干扰试井试验^[17,18],但选址阶段一般缺少这类现场资料。

1.2 库容

含水层圈闭必须具备构造高点和溢出点,即具

有一定的构造闭合度。库容主要是根据圈闭面积及其闭合度来估算圈闭岩石体积,然后再根据有效孔隙度、含气饱和度以及上限压力等参数来估算库容量。

含水层的储气空间主要是通过压缩水体和驱替水体来实现,但储层岩石及其内部的地层水压缩性较低,因此,溢出点之外的流体边界条件对于改建储气库十分重要。若水体运移受到限制,高压注气致使地层压力迅速升高,对盖层不利,需要在圈闭边部布置较多的排水井腾出空间来实现。

储层的均匀性对库容有重要的影响。气体在含水层的运移前缘并不是均匀的,主要由非均匀性和重力效应引起,气体倾向于沿着高渗透性的薄岩层运移,当气体横向运移到溢出点后就会向圈闭外溢出,此时圈闭内的气量并不高。

工作气量是反映建库经济性的重要参数,在不破坏储气库圈闭封闭性的原则下,上限压力越大,工作气量越大。从安全角度考虑,盖层所能承受的最大压力要远大于设计上限压力才能保证盖层的完整性。

1.3 注采气能力

为了满足调峰需求,储气库应能满足强注强采的要求。影响含水层储气库注采气能力的参数主要为储层渗透率、孔隙度、有效厚度等参数。储层砂层分布稳定、物性好、具有较高的连通性,单井具有较高的产能以满足配注或配产的要求。

2 京津冀地区含水层储气库的评价体系建立

含水层构造的选址即是在需要建设储气库的区域范围内,对已有的地下资料进行分析,并开展相关地质调查研究,初步确定含水层构造的有利区块或目标后,开展库址筛选评价,优选有利含水层储气库目标。Tek^[19]首次提出了含水层储气库的选址评价流程,将含水层储气库选址评价分为3个阶段:第一阶段为含水层构造有利区域或目标初选;第二阶段为建库可能性评估;第三阶段为经济可行性研究。国外含水层储气库选址技术流程如图1所示。

京津冀地区两市及周边城市对天然气季节调峰有迫切需求,建设含水层储气库的区位优势更加显著,但京津冀地区地质条件复杂,断陷盆地构造背景致使含水层圈闭特征复杂,含水层构造受断层切割和影响,圈闭类型多为断背斜和断鼻构造。国外已

建含水层储气库埋深基本在1 000m以内,筛选的含水层目标多为理想的背斜构造圈闭,较少涉及对断层封堵性、上限压力、水动力条件及水藏边界等因素的评价,Tek^[19]提出的选址流程对京津冀断陷盆地含水层目标评价并不适合,无法进行有效筛选和优选,因此,建立适合于京津冀地区含水层储气库评价体系进行有利尤为重要。

针对京津冀地区对地下储气库的重大需求,为了更客观反映含水层构造实际地质条件的优劣,本文在对含水层储气库和枯竭气藏储气库选址影响因素的差异性分析基础上,从否定性因素、能力型因素、控制型因素和经济性因素4个方面综合构建京津冀地区含水层储气库选址评价体系。

2.1 评价指标优选

2.1.1 否定性因素

否定性因素是指决定含水层圈闭能否进行实际勘探和建库的关键参数,一旦满足某一排除标准(Ⅳ级),基本不具有勘探价值。选取构造完整性、盖层密封性及断层封堵性作为否定性因素的二级评价指标。

含水层储气库圈闭的选址要避开地震活跃带,储盖组合完整,储库工作压力达到高于原始地层压力的40%~80%,对圈闭条件有极高的要求。理想圈闭类型是构造范围大、形态陡,形态完整的背斜构造,其次为古潜山圈闭、断鼻圈闭或砂岩透镜体岩性圈闭。对于断块构造,如果断层具有较强的封堵能力,也可以改建成含水层储气库。

储气库的盖层一般应满足如下3个条件:①盖层岩性单一、均匀,较理想的盖层为盐岩、膏岩,含水层构造盖层多为泥质岩,泥质含量是反映泥岩盖层质量的重要参数,常规气藏盖层评价多将泥质含量下限值定为25%^[20]。②盖层分布稳定,要具有一定的厚度,国外储气库实践经验表明,优质泥岩盖层厚3~10m可满足密封性要求^[12,21]。③盖层要具有一定的封气能力,一般通过盖层的突破压力和渗透率值进行综合评价。盖层封气能力可分为4级^[22]: $P_d > 10\text{MPa}$ 且 $k < 0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为优,5~10MPa且 $(0.001 \sim 0.01) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为良,1~5MPa且 $(0.01 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为中, $P_d < 1\text{MPa}$ 且 $k > 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为差。考虑到含水层构造泥岩盖层成岩作用较弱、非均质性较强以及断层对盖层连续性的破坏作用,将盖层的厚度下限定为50m,并且还应包含单纯厚度至少10m的优质泥岩层以满足密封性要求。

断层封闭性主要表现在 2 个方面：一是断层对盖层的穿透能力，实际上就是盖层的有效性；二是断层对含水层的侧向封堵能力。泥岩涂抹系数大小可以反映泥岩涂抹层空间分布的连续性及其断层侧向

封闭性的好坏，大量实践证明，泥岩涂抹系数为 4 可
作为断层侧向封闭性的判别标准^[23,24]。

综合上述分析，提出含水层储气库选址否定性
因素的分级标准，见表 1。

表 1 含水层储气库否定性因素评价标准
Table 1 Evaluation standards of negativity factor for aquifer gas storage

分级	构造完整性	盖层密封性			断层封堵性	
		岩性	厚度/m	连续性		封气能力
I	构造完整、闭合度>50m， 背斜构造	盐岩、膏岩 或泥质， 泥质含量>75%	>300	连续、稳定	$k<0.001\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 且 $P_d>10\text{MPa}$	—
II	构造完整、闭合度>50m， 古潜山或断陷构造	泥岩 50%<泥质含量≤ 75%	150~300	较连续、稳定	$(0.001\sim0.01)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ $5\text{MPa}<P_d\leq10\text{MPa}$	侧向大套泥岩封堵， 泥岩涂抹系数≤ 2
III	构造完整、闭合度>50m， 断块构造	含砂泥岩 25%<泥质含量≤ 50%	50~150	有一定的连续 性、较稳定	$(0.01\sim0.1)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ $1\text{MPa}<P_d\leq5\text{MPa}$	泥岩涂抹断面封堵， 2<泥岩涂抹系数≤4
IV	构造不完整或闭合度<50m 或断层活跃	泥质粉砂岩、泥质砂岩 泥质含量≤25%	0~50	厚薄变化大、 连续性差	$k>0.1\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ $0<P_d<1\text{MPa}$	封堵能力一般， 泥岩涂抹系数≥4

2.1.2 能力型因素

能力型因素是含水层构造建库可行性的重要论证指标，是关系到储气库指标设计的重要参数，也是衡量含水层储气库气藏优劣的重要因素。选取含水层储集条件、水动力条件作为能力型因素的二级评价指标。

储气库储层一般为砂岩、碳酸盐岩、火成岩等具有孔、缝或洞等储集空间的地层，适宜建设含水层储气库的储层应具备岩性单一、相带稳定、孔渗性能高、分布范围广、厚度大，具有较强的积聚气体的能力。储层具有较高的孔隙度可以储存更多的气体，国内在枯竭气藏储气库选址评价时多将孔隙度下限范围定义为 10%~15%，渗透率下限范围定义为 $(10\sim100)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，有效厚度下限为 4m^[7,9]，但国外已建的储气库中也有储层渗透率仅为 $<10\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的成功案例。通过统计全球已建含水层储气库数据库可知^[25]：储层孔隙度多分布在 15%~35%之间，仅 1 个储气库的储层孔隙度小于 5%；储层渗透率大于 $100\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的约占 80%，储层最小渗透率约为 $2.6\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ；储层净厚度大于 10m 的约占 55%，净厚度小于 5m 的约占 20%。考虑到京津冀地区对地下储气库的迫切需求，结合该地区含水层有利目标的实际物性特性，将含水层的孔隙度下限定义为 5%，渗透率下限定为 $10\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，有效厚度下限定为 10m。

深部含水层多为承压含水层，如果地层压力过高，对储气库提高库容不利，导致注气技术要求提高

的同时增加了安全的风险性^[26]。含水层原始地层压力应不大于静液压力，考虑到储气压力要高于静液压力的 40%~80%才能达到储气的目的，将含水层原始地层压力系数的下限值定义为 1.15。

地层水化学特征主要是指地层水矿化度、水型及其变化分布规律，在一定程度上可以反映圈闭的保存条件。如果地层透水性不佳或含水层没有泄水区，水不能泄出，地层水便具有较高的矿化度^[27]。地下淡水是指总矿化度小于 2.0g/L 的地下水，定义为矿化度指标的下限值。

综合国内外研究成果，在储集层条件和地层水特征 2 个方面共 6 个评价指标进行了分级，如表 2 所示。

2.1.3 经济性因素

经济性因素直接关系着含水层储气库的勘探开发成本，选取圈闭埋深、闭合度、闭合面积及地理位置作为其二级评价指标。

通过统计全球已建含水层储气库数据库^[25]，储气库埋深（地面至库顶）在 1 000m 以内的约占 90%，最大埋深约为 2 100m，最浅埋深约为 390m。目前，已建枯竭油气藏储气库最大深度约为 3 500m，综合考虑储气库关键技术指标（单井产能、库容量、工作气量）等因素，将 3 500m 和 390m 定义为深度界限值。

构造闭合度的大小对于圈闭密封性勘探评价及注气过程中气水前缘的运移和控制都会产生重要的影响。如果闭合度较小，则对圈闭密封性的勘探工

作量将显著增加,同时注气过程中地层非均匀性和气水流速差异会引起气体黏性指进而极易发生气体从构造溢出点溢出,使得建库难度加大。STORENGY 公司认为闭合度临界值取决于储层物性及其非均质性,优质储层的构造闭合度可以比差储层小^[25]。若储层质量优良,水平含水层也能改建储气库,如俄罗斯 Gatchinskoe 储气库。考虑到京津冀地区含水层构造有利区埋深较大(>1 600m),

将构造闭合度的下限值定为 50m。
国内已建枯竭气藏型储气库的圈闭面积多在 1.78~18.1km²、闭合幅度在 140~277m 之间,高点埋深在 800~3 000m 范围内^[9]。李玥洋等^[28]统计了国外多个储气库地层参数,圈闭面积分布在 9~64 km²之间。考虑到含水层储气库的建设成本较高,从经济性的较大出发,将含水层有效圈闭面积下限定义为 5km²。

表 2 含水层储气库能力型因素评价标准
Table 2 Evaluation standards of capability factor for aquifer gas storage

分级	储集层条件				地层水特征	
	孔隙度/%	渗透率/(×10 ⁻³ μm ²)	厚度/m	均匀性	地层水压力系数	地层水化学特征
I	>25	>100	>80	好	<0.95	CaCl ₂ 型,矿化度 >10 g/L
II	15~25	50~100	30~80	较好	0.95~1.05	CaCl ₂ 型或 NaHCO ₃ 型,5g/L<矿化度≤10g/L
III	5~15	10~50	10~30	一般	1.05~1.15	NaHCO ₃ 型,2g/L<矿化度≤5g/L
IV	0~5	0~10	0~10	差	>1.15	NaCl 型,矿化度 ≤ 2 g/L

储气库应远离人口稠密区、重要工商业区,避免泄漏威胁其安全,距离人口集中区 30km 以外为宜。含水层储气库多作为调峰型储气库,考虑输送及管道建设成本,距离长输管道距离不宜超过 150km^[10]。

综合上述分析,提出了含水层储气库经济性因素的等级划分标准,如表 3 所示。

表 3 含水层储气库经济性因素评价标准
Table 3 Evaluation standards of economyfactor for aquifer gas storage

分级	埋深/m	闭合度/m	闭合面积/km ²	地理位置/km
I	390~1 000	>150	>20	30~50
II	1 000~2 100	100~150	10~20	50~100
III	2 100~3 500	50~100	5~10	100~150
IV	>3 500 或<390	<50	<5	>150

2.1.1.4 控制性因素

控制性因素是指影响含水层圈闭是否进行勘探与改建储气库的外部约束因素,选取储库压力、工作气量及圈闭水动力条件作为选址优选参数。

储气库上限压力取决于断层的封堵性、盖层的可靠程度、固井质量、注采气设备的适用性以及储气过程中的工艺要求,一般用上限压力系数表示,即储气库最大工作压力与静水柱压力的比值。已建含水层储气库中^[10,25],上限压力系数小于 1.2 的储气库比例约为 15%,最大上限压力系数约为 1.8,如前苏联的波托拉茨储气库。根据上述统计分析,结合有利目标区块的实际原始地层压力水平,将上限压力

系数的下限值定为 1.2。
通过统计欧洲 30 余座已建含水层储气库,储库工作气量分布在(0.3~90)×10⁸ m³之间,储库工作气量大于 10×10⁸ m³的储气库比例约为 30%,工作气量小于 2×10⁸ m³的储气库比例约为 23.2%,工作气量小于 1×10⁸ m³的约占 6.7%。为了客观反映建库实际的地质条件优劣,避免人为地提高一些地质条件一般、储气库规模较大的含水层构造的优先等级,将有效工作气量的下限值定义为 1×10⁸ m³。

对于含水层目标优选而言,宜选择边部开启型水藏且水体规模相当大的圈闭,不宜选择定容封闭水藏。将含水层圈闭有效半径定义为预注气形成气泡区对应的半径,水体大小可以采用含水层半径与圈闭有效半径之比来表示,水体半径比值越大,含水层圈闭越易形成库容规模较大的储气库。STORENGY 公司以大 5 二叠系储层物性参数进行数值模拟发现,当水体半径比值大于 8 时,水体大小对地下储气库效能影响很小^[25]。考虑到京津冀地区含水层有利目标埋深相对较深(≥1 650m),将水体半径比值为 2 定义为水体大小的下限值。另外,对于开启型水藏,应避免与其它地下储气库或在产油气田之间的压力干扰,如果储气库选址在一个在产油气田或另一个地下储气库附近,则可能会因为压力平衡失效导致气体溢出,以及压力干扰导致地下储气库的性能受到影响。

根据上述分析,提出了含水层储气库控制型因素等级划分标准,如表 4 所示。

表 4 含水层储气库控制型因素评价标准

Table 4 Evaluation standards of control factor for aquifer gas storage

分级	上限压力系数	工作气量/($\times 10^8 \text{ m}^3$)	水动力条件
I	>1.50	>10	开启型水藏,水体规模大,水体可控,水体倍数 ≥ 8
II	$1.35\sim 1.50$	$5\sim 10$	开启型水藏,水体基本可控, $5\leq$ 水体倍数 <8
III	$1.20\sim 1.35$	$1\sim 5$	$2\leq$ 水体倍数 <5
IV	<1.20	<1	水体规模较小的封闭性水藏或水体不可控的开启型水藏

2.2 评价体系与指标权重

通过对上述各因素的分析,共确定了 4 个一级指标(准则层)、19 个三级指标(指标层和子指标层)用于对含水层储气库圈闭进行优选评价,如图 2 所示。

通过含水层储气库领域专家咨询和打分,按图 2 所示的层次结构关系进行比较、判别,形成判别矩阵后采用层次分析法确定了各指标相对权重,计算结果见表 5。权重超过 5%的依次为:构造完整性、

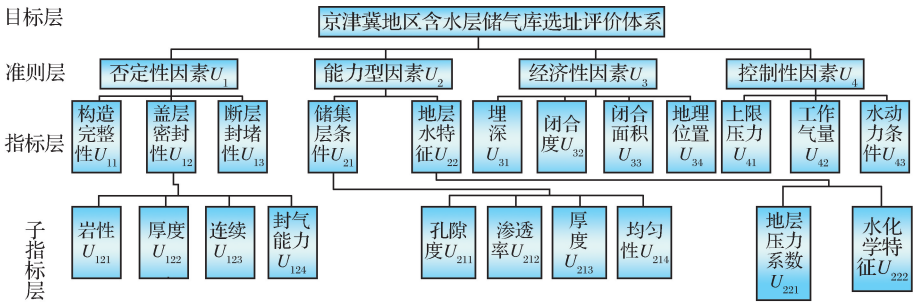


图 2 京津冀地区含水层储气库选址评价体系

Fig.2 Layer structural diagram of evaluation system for aquifer gas storage in the Beijing, Tianjin and Hebei districts

表 5 含水层储气库评价指标相对权重值

Table 5 Weight values of evaluation indexes for aquifer gas storage

同级同类指标组内指标相对权重						三级指标 权重
一级指标	一级指标 组内权重	二级指标	二级指标 组内权重	三级指标	三级指标 组内权重	
否定性因素 U_1	0.363 6	构造完整性 U_{11}	0.493 4	岩性 U_{111}	1	0.179 4
				岩性 U_{121}	0.071 3	0.005 1
		盖层密封性 U_{12}	0.195 8	厚度 U_{122}	0.313 2	0.022 3
				连续性 U_{123}	0.152 2	0.010 9
				封气能力 U_{124}	0.463 3	0.033 1
能力型因素 U_2	0.279 5	断层封堵性 U_{13}	0.310 8	断层封堵性 U_{131}	1	0.113 0
		储集层条件 U_{21}	0.666 7	孔隙度 U_{211}	0.371 8	0.069 3
				渗透率 U_{212}	0.241 4	0.045 0
				厚度 U_{213}	0.233 5	0.043 5
				均匀性 U_{214}	0.153 4	0.028 6
		地层水特征 U_{22}	0.333 3	地层压力系数 U_{221}	0.750 0	0.069 8
				水化学特征 U_{222}	0.250 0	0.023 3
经济性因素 U_3	0.185 9	埋深 U_{31}	0.239 0	埋深 U_{311}	1	0.044 4
		闭合度 U_{32}	0.339 7	闭合度 U_{321}	1	0.063 1
		闭合面积 U_{33}	0.280 8	闭合面积 U_{331}	1	0.052 2
		地理位置 U_{34}	0.140 4	地理位置 U_{341}	1	0.026 1
控制性因素 U_4	0.170 9	上限压力 U_{41}	0.310 8	上限压力 U_{411}	1	0.053 1
		工作气量 U_{42}	0.195 8	工作气量 U_{421}	1	0.033 5
		水动力条件 U_{43}	0.493 4	水动力条件 U_{431}	1	0.084 3

断层封堵性、水动力条件、地层压力系数、储层孔隙度、闭合度、上限压力、圈闭面积。

3 初步筛选结果和应用

按照上述选取的评价指标,对京津冀地区断陷盆地的大5、葛2、大参2、大5南、高8、孙虎东、高6、赵皇庄背斜等11个含水层圈闭进行了评价。

根据京津冀地区以往的地质勘探和开发研究成果,对11个含水层构造的地质特征和勘探现状进行了分析,圈闭关键地质数据如表6和表7所示。

表 6 京津冀地区含水层储气库目标圈闭条件						
Table 6 Trap conditions of aquifer target in the Beijing,Tianjin and Hebei districts						
筛选目标	埋深/m	圈闭类型	闭合度/m	圈闭面积/km ²	储气规模/(×10 ⁸ m ³)	破坏程度
大 5	2 275	断背斜	225	11.9	10.5	被 2 组较小规模断层切割
大 5 南	2 050	断背斜	250	20	15.3	被多条断层贯穿
大参 2	1 700	断背斜	600	32.8	46.2	被多条断层切割
葛 2 K	1 650	断鼻	150	22	26.6	被 2 条反向断层控制
葛 2 P _{1x}	2 700	断鼻	150	21	54	被 2 条反向断层控制
高 6	3 300	断鼻	300	25	14.7	被 1 条反向正断层控制
高 8	1 875~1 950	断鼻	50~125	25.5	32.4	被 1 条反向正断层控制
孙虎 Ek ₂	1 700	断背斜	600	30	72.4	被多条断层切割
孙虎 J _{xw}	3 000~3 400	断鼻	200~500	13.8	10.5	被 2 条断层控制
赵黄庄 I	1 870	背斜	20	10.8	5.7	—
赵黄庄 II	2 220	背斜	30	12.9	3.3	—

注:储气规模指在现有资料基础上的工作气量估算值

表 7 京津冀地区含水层储气库目标储盖层条件							
Table 7 Reservoir andcaprock conditions of aquifer target in the Beijing,Tianjin and Hebei districts							
筛选目标	储层孔隙度/%	储层渗透率/(×10 ⁻³ μm ²)	储层厚度/m	盖层岩性	盖层厚度/m	盖层封闭性	侧向遮挡条件
大 5	6.7~9.2	3.74~11.9	143	泥岩,夹泥质砂岩	125	渗透率 1×10 ⁻⁷ μm ² , 突破压力大于 10MPa	大套泥岩遮挡
大 5 南	12	18	111	泥岩,夹泥质砂岩	125~247.5	渗透率 1×10 ⁻⁷ μm ² , 突破压力大于 10MPa	遮挡性一般,风险大
大参 2	11	25.5~74.2	20~150	铝土质泥岩	80~150	直接盖层 15m,封气能力较强	泥岩涂抹遮挡
葛 2 K	15.1	29.1~46.35	188	泥岩	40	泥岩盖层较薄,封气能力一般	泥岩涂抹遮挡
葛 2 P _{1x}	10.6~13	1.6~17.12	387	泥质岩	269	CaCl ₂ 水型,矿化度高,封气能力较强	泥岩涂抹遮挡
高 6	6	250	75	致密砂砾岩	57.5	砂砾岩为直接盖层,封气能力一般	泥岩涂抹遮挡
高 8	16.9	46.8	99~356	泥页岩	160	有油气显示,封气能力较强	泥岩涂抹遮挡
孙虎 Ek ₂	26.6	158.9	202~264	泥岩	250~581	泥岩集中发育,封气能力较强	大套泥岩遮挡
孙虎 J _{xw}	6	250	101	泥质岩	370	CaCl ₂ 水型,矿化度高,封气能力较强	泥岩涂抹遮挡
赵黄庄 I	20.9	44.8	82.4	泥质岩	70	最大单层厚度较薄,封气能力一般	—
赵黄庄 II	24.4	113.8	81.5	泥质岩	22	最大单层厚度较薄,封气能力一般	—

依据表 1—表 4 所示的分级标准,对各项指标进行打分:Ⅰ级(优)[100,90],Ⅱ级(良)(90,80],Ⅲ级(中)(80,60],Ⅳ级(差)(60,0]。定量指标可通过现场相关测试资料获得,以已建储气库中单项指标最优值作为参考标准,采用分段线性函数构建隶属函数的方法^[29],计算隶属函数值;定性指标采取专家打分方式进行评价,将该指标获得的平均值

作为模糊隶属度指标。11 个储气库目标的模糊评价矩阵 R 如表 8 所示。

将通过层次分析法获得的权重 W 与评价矩阵 R 进行分层模糊计算,即 $Q_i = W_i \times R_i \times 100$,即获得模糊综合评判的最后得分结果,11 个储气库目标综合评判结果如表 9 所示。

在 11 个储气库候选目标中,无Ⅰ类有利目标,

Ⅱ类较有利目标为大 5 石盒子组、孙虎孔店组、大参 2 奥陶系潜山,具备进一步勘探评价的条件,其余为 Ⅲ类,可作为后备候选目标。

4 有利含水层储气库目标

综合分析认为,大 5 二叠系目标为相对完整型背斜、砂岩储层,成功概率最高,但储层物性相对较差,埋深较大,估算工作气量相对较小;孙虎孔店组目标为复杂化断背斜、砂岩储层,埋深浅,储层物性

好,估算工作气量最大,但圈闭被多条断层复杂化,建库风险为断层的封闭性,需要开展干扰试井试验,对断层的封堵性能做出精确判断,最终才能确定是否建设储气库;大参 2 奥陶系潜山目标为断背斜、碳酸盐岩储层,埋深浅,储层物性好,估算工作气量较大,但直接盖层相对较薄,又被断层切割,封闭条件存在较大风险。但是,3 个目标代表着背斜、断背斜和潜山 3 种不同类型的目标,都值得开展进一步的勘探评价。

表 8 京津冀地区含水层储气库目标模糊隶属度矩阵

Table 8 Fuzzy membership matrix of aquifer target in the Beijing, Tianjin and Hebei districts											
评价指标	大 5	大 5 南	大参 2	葛 2 K	葛 2 P _{1x}	高 6	高 8	孙虎 Ek ₂	孙虎 J _{xrw}	赵黄庄 I 砂组	赵黄庄 II 砂组
构造完整性 U ₁₁₁	0.85	0.65	0.80	0.65	0.70	0.70	0.65	0.75	0.80	0.50	0.55
盖层岩性 U ₁₂₁	0.80	0.80	0.85	0.80	0.80	0.60	0.85	0.80	0.80	0.70	0.70
盖层厚度 U ₁₂₂	0.75	0.75	0.66	0.48	0.88	0.62	0.81	0.87	1.00	0.64	0.26
盖层连续性 U ₁₂₃	0.90	0.90	0.65	0.60	0.90	0.70	0.70	0.90	0.90	0.65	0.60
盖层封气能力 U ₁₂₄	0.90	0.90	0.85	0.70	0.80	0.55	0.80	0.80	0.80	0.55	0.55
断层封堵性 U ₁₃₁	0.90	0.55	0.65	0.60	0.65	0.60	0.70	0.60	0.60	0.95	0.95
储层孔隙度 U ₂₁₁	0.66	0.74	0.70	0.80	0.74	0.62	0.82	1.00	0.62	0.86	0.89
储层渗透率 U ₂₁₂	0.47	0.64	0.85	0.82	0.50	1.00	0.78	1.00	1.00	0.77	1.00
储层厚度 U ₂₁₃	1.00	1.00	0.85	1.00	1.00	0.89	1.00	1.00	1.00	0.92	0.91
储层均匀性 U ₂₁₄	0.90	0.90	0.70	0.70	0.80	0.80	0.90	0.90	0.80	0.80	0.80
地层压力系数 U ₂₂₁	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
水化学特征 U ₂₂₂	0.80	0.80	0.70	0.80	0.95	0.80	0.80	0.80	1.00	0.80	0.80
埋深 U ₃₁₁	0.77	0.80	0.84	0.84	0.71	0.63	0.82	0.84	0.64	0.82	0.79
闭合度 U ₃₂₁	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.68	1.00	1.00	0.27	0.36
闭合面积 U ₃₃₁	0.82	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.84	0.81	0.83
地理位置 U ₃₄₁	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
上限压力 U ₄₁₁	0.80	0.70	0.70	0.65	0.70	0.55	0.70	0.70	0.70	0.55	0.55
工作气量 U ₄₂₁	0.90	0.90	1.00	0.95	1.00	0.9	1.00	1.00	0.90	0.80	0.65
水动力条件 U ₄₃₁	0.65	0.60	0.70	0.70	0.60	0.60	0.60	0.70	0.50	0.60	0.60

表 9 各候选目标评价结果

Table 9 Evaluation results of different aquifer target											
评价指标	大 5	大 5 南	大参 2	葛 2 K	葛 2 P _{1x}	高 6	高 8	孙虎 Ek ₂	孙虎 J _{xrw}	赵黄庄 I 砂组	赵黄庄 II 砂组
评价结果	82.32	75.69	80.03	76.76	77.57	74.38	77.11	83.29	78.27	70.45	71.69
库址等级	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
排序	2	8	3	7	5	9	6	1	4	11	10

4.1 大 5 石盒子组目标

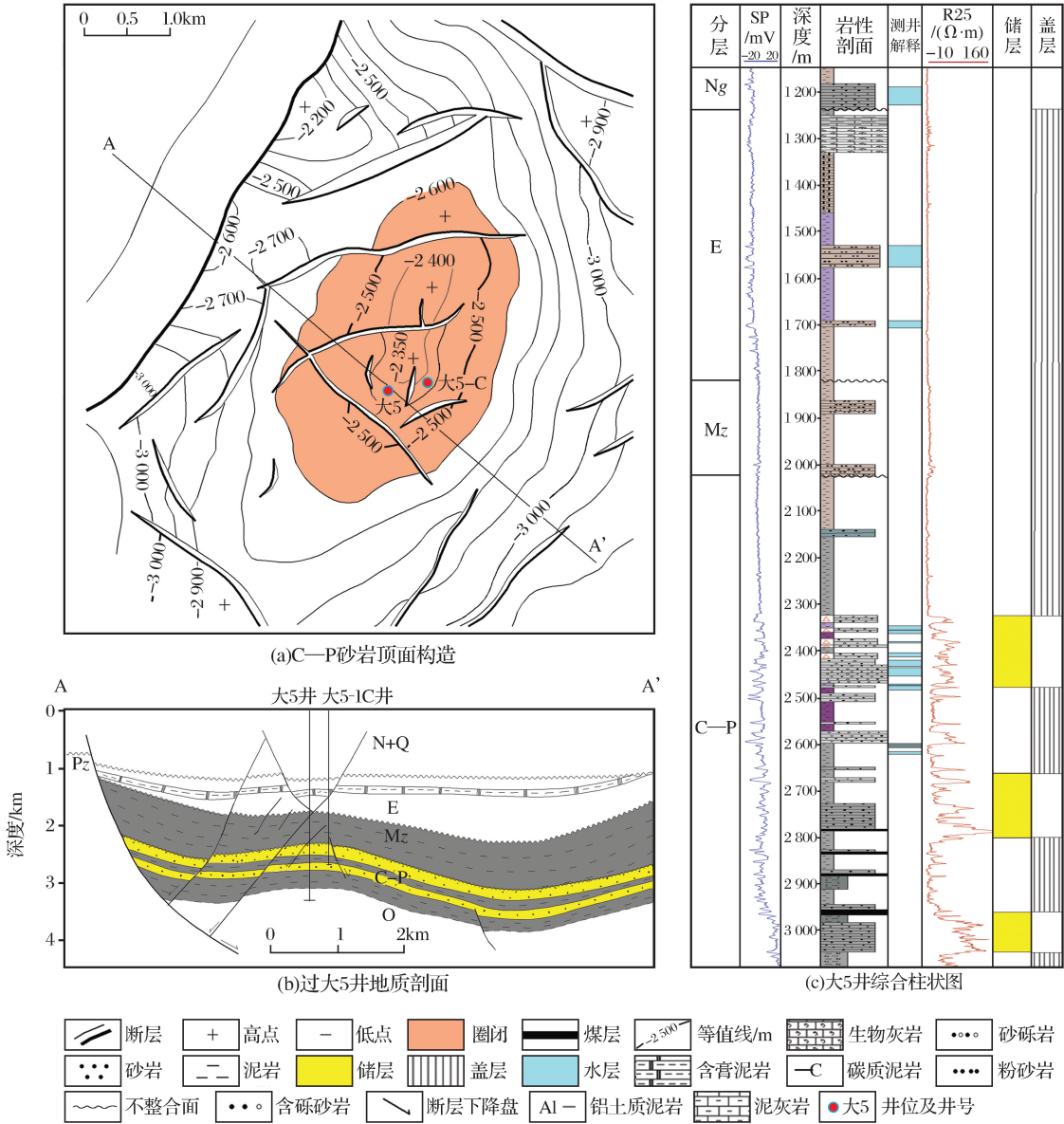
目的层为二叠系石盒子组砂岩类储层集中发育段。构造上为一北东向展布的背斜,被北西向和北东向 2 组小断层切割,背斜形态总体完整,高点埋深为 2 275m,闭合幅度为 225m,面积为 11.9km²(图 3)。

储集层特征,构造上已钻探大 5 井和大 5-1 井 2 口井,大 5 井石盒子组储层集中发育段 2 325.8~

2 626.4m测井解释水层 12 层 141.6m,平均孔隙度为 9.2%,平均渗透率为 $5.52 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;大 5-1 井石盒子组储层集中发育段 2 342.53~2 485.2m 测井解释水层 11 层 81.3m,孔隙度平均为 6.7%,渗透率平均值为 $3.74 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。室内岩心测试分析表明:储层孔隙度平均值为 8.5%,渗透率平均值为 $7.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。盖层为灰色和紫红色泥岩,夹少量

灰色泥质砂岩, 横向分布稳定, 渗透率量级为 $10^{-7} \mu\text{m}^2$, 突破压力大于 10MPa。对大 5-1 井盖层段中的 2 个砂岩层段进行地层测试, 日产水只有 0.006m^3 、 0.026m^3 , 折算渗透率仅为 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、

$0.004 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 盖层封闭条件良好。控制圈闭的断层断距约为 50m, 垂向断距小于盖层厚度, 石盒子组储层对接其上部泥岩段, 侧向封堵条件较好。工作气量按库容的 30% 估算为 $10.5 \times 10^8 \text{m}^3$ 。



4.2 孙虎孔店组目标

目的层为孔店组二段的砂岩集中发育段。构造整体为一北东向展布的长轴背斜, 又被北东向和北西向 2 组多条断层切割, 形成了多个断鼻、断块, 高点埋深为 1 700m, 闭合幅度为 600m, 面积为 30km²(图 4)。

储集层特征, 据圈闭高部位已钻探的虎 1 井及邻区钻探的虎 15 井资料, 砂岩集中段地层厚度介于 202.5~264m 之间, 其中虎 15 井砂岩储层集中段

1 892.5~2 095m 测井解释水层 10 层 114m, 单层最大厚度为 22.8m, 孔隙度平均为 26.6%、渗透率平均为 $158.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 储集性能好。直接盖层为集中发育的泥岩、膏泥岩、膏岩互层段, 厚度为 250~581m, 其中单层最大厚度为 25m, 盖层条件良好。工作气量按库容的 30% 估算为 $72.4 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

4.3 大参 2 奥陶系潜山目标

大参 2 奥陶系潜山构造为一西翼较平缓、东翼

陡倾的短轴背斜,又被南北向和北东向 2 条主断层切割成 3 个断鼻、断块,圈闭整体为一断背斜构造,面积为 32.8km²,高点埋深为 1 700m,闭合幅度为 600m(图 5)。

储集层特征,构造上已钻探井大参 2 井,潜山圈

闭储层厚度介于 20~150m 之间,由顶部向周围逐渐变厚。测井解释 1 669.0~1 736.2m 水层 7 层 26.4m,孔隙度平均为 11%、渗透率平均为 25×10⁻³μm²,储层较发育。大参 2 井潜山地层测试,自溢,日产清水 1 000m³,储层物性较好。室内岩心测

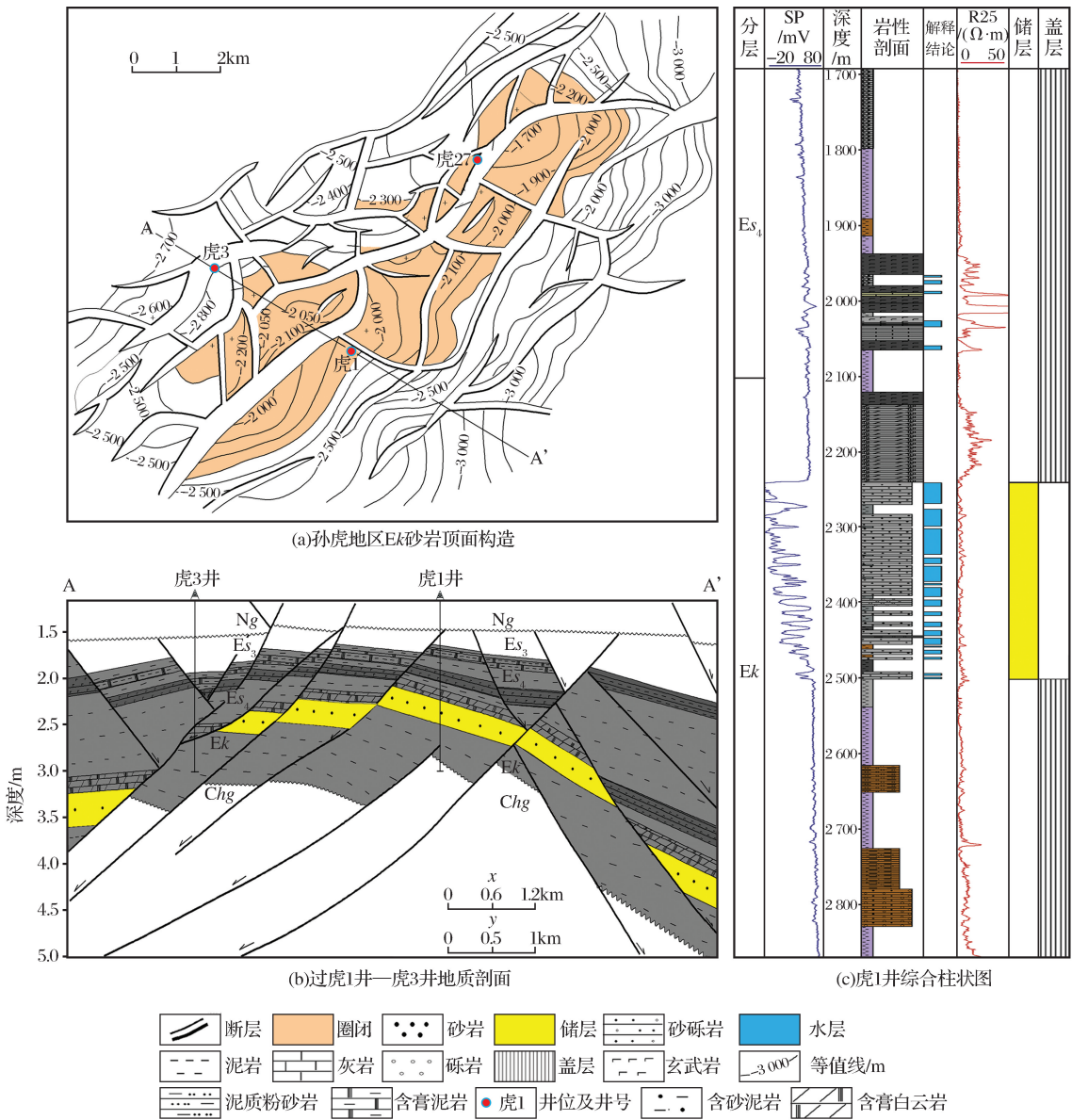


图 4 孙虎目标综合评价
Fig.4 Regional geological map of Sunhu

试分析表明:储层平均孔隙度为 10.1%,渗透率平均值为 74.2×10⁻³μm²。盖层条件,奥陶系上覆石炭系—二叠系的泥岩及煤系地层,泥岩厚度为 80~150m,泥岩占地层厚度的 60%~70%,由顶部向周围逐渐变厚,直接盖层为区域分布的风化壳铝土质泥岩,大参 2 井钻遇厚度 15m。潜山圈闭被断层切割,地层水总矿化度偏低,封闭性存在一定风险。工

作气量按库容的 30%估算为 46.2×10⁸m³。

5 结论

(1)中国含水层储气库研究程度低,京津冀地区地质条件复杂(断陷盆地构造背景),含水层储气库目标优选尤为重要。综合考虑影响含水层构造改建地下储气库的多方面因素,从影响圈闭质量的否定

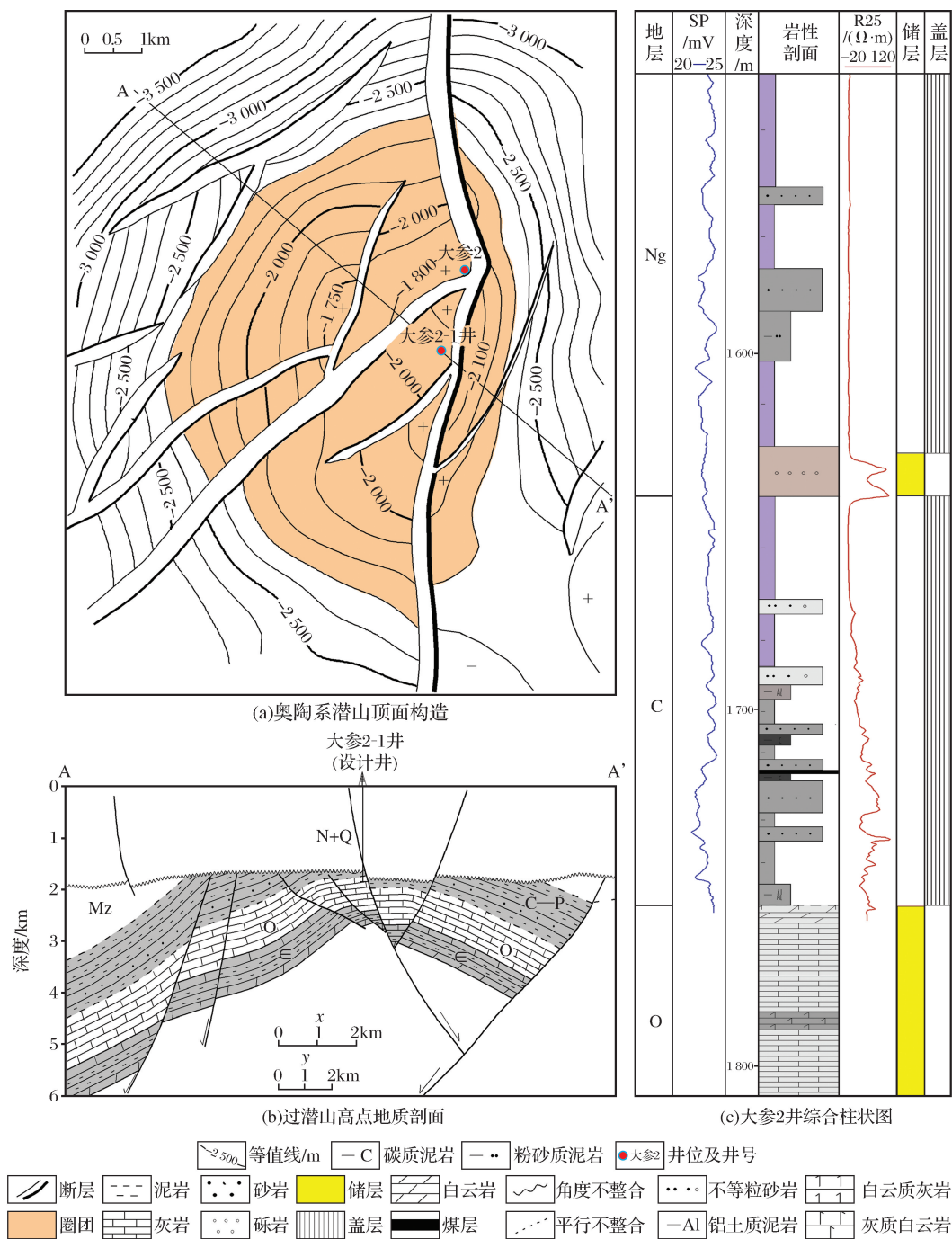


图 5 大参 2 目标综合评价
Fig.5 Regional geological map of Dacan 2

性因素、能力型因素、控制型因素、经济性因素等 4 个方面,提出了 19 个评价指标,构建了含水层储气库圈闭质量的分级评价标准,体现了目标评价的全面性、系统性。

(2)结合国外的建库经验和京津冀地区的地质条件分析,运用专家实际调查结果和层次分析法,确定了各评价指标的权重;采用综合模糊评判方法对

候选目标进行优选排序。通过对京津冀地区 11 个候选含水层构造进行地质参数分析,将该方法应用于含水层储气库建设目标优选,优选出了大 5 石盒子组、孙虎孔店组、大参 2 奥陶系潜山等 3 个适宜改建地下储气库的含水层构造。

(3)含水层储气库选址涉及的因素众多,且选址阶段资料相对匮乏,很多指标的评价标准难以准确

量化,应用本方法时需要以大量的实地调研和案例样本为基础,才能获得较准确的优选结果。

参考文献(References)

- [1] Allen R D, Trapp J S, Jensen T E. Site characterization for injection of compressed air into an aquifer[C]//Proc. 22nd US Symposium on Rock Mechanics, Cambridge, Mass, 1981: 417-421.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Behrouz T, Basirat M, Askari A, *et al.* Fast screening method to prioritize underground gas storage structures for site Selection[C]//International Gas Union Research Conference, Copenhagen, Denmark, 2014: 2378-2386.
- [5] Li Jingcui, Shen Ruichen, Yuan Guangjie, *et al.* Research of relative construction technology about aquifer gas storage[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2009, 28(8): 9-12. [李景翠, 申瑞臣, 袁光杰, 等. 含水层储气库建设相关技术研究[J]. 油气储运, 2009, 28(8): 9-12.]
- [6] Guo Ping, Du Yuhong, Du Jianfen. Seepage Mechanism Research of High Water-cut Reservoir and Underground Gas Storage[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012: 1-14. [郭平, 杜玉洪, 杜建芬. 高含水油藏及含水层构造改建储气库渗流机理研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012: 1-14.]
- [7] Yang Fan. The Analysis and Software of Aquifer Gas Storage Field Site Selection and Parameters Design[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2000: 19-53. [杨帆. 含水层地下储气库筛选和参数设计优化研究及软件研制[D]. 北京: 中国石油大学, 2005: 19-53.]
- [8] Ding Guosheng, Wang Jieming, Zheng Dewen. Aquifer Underground Gas Storage[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014: 1-49. [丁国生, 王皆明, 郑得文. 含水层地下储气库[M]. 北京: 石油工业出版社, 2014: 1-49.]
- [9] Yang Xiaoping, Cheng Linsong, Zheng Xianbin, *et al.* Site preference of underground gas storage constructed in pore reservoirs[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(8): 581-584. [阳小平, 程林松, 郑贤斌, 等. 孔隙型储层建设地下储气库库址优选[J]. 油气储运, 2012, 31(8): 581-584.]
- [10] Jia Shanpo, Jin Fengming, Zheng Dewen, *et al.* Research on evaluation indexes and classification criterion of site selection technology for aquifer gas storage with the extension judgement method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1628-1640. [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.]
- [11] Knepper G A. Underground storage operations[J]. Journal of petroleum technology, 1997, 49(10): 1112-1114.
- [12] Bennion D B, Thomas F B, Ma T, *et al.* Detailed protocol for the screening and selection of gas storage reservoirs[C]//SPE Gas Technology Symposium, Society of Petroleum Engineers, 2000.
- [13] Azin R, Nasiri A, Jodeyri Entezari A. Underground gas storage in a partially depleted gas reservoir[J]. Oil & Gas Science and Technology, 2008, 63(6): 691-703.
- [14] Ding Guosheng, Wang Jieming. Several key issues on the construction of gas storage in depleted gas reservoir[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(5): 87-89. [丁国生, 王皆明. 枯竭气藏改建储气库需要关注的几个关键问题[J]. 天然气工业, 2011, 31(5): 87-89.]
- [15] Yang Yi, Pu Xiaolin, Wang Xianguang. Research on optimum site of underground gas storage of depleted oil-gas reservoir[J]. Petroleum Engineering Construction, 2005, 31(3): 1-7. [杨毅, 蒲晓林, 王霞光. 枯竭油气藏型地下储气库库址优选研究[J]. 石油工程建设, 2005, 31(3): 1-7.]
- [16] Katz D L, Lee R L. Natural Gas Engineering: Production and Storage[M]. New York: Mc Graw-Hill Publishing Company, 1990: 493-560.
- [17] Witherspoon P A, Mueller T D. Evaluation of underground gas-storage conditions in aquifers through investigations of groundwater hydrology[C]//SPE Annual Fall Meeting, Society of Petroleum Engineers, 1961.
- [18] Knepper G A, Cuthbert J F. Gas storage problems and detection methods[C]//SPE Annual Fall Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 1979.
- [19] Tek M R. Underground Storage of Natural Gas[M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1987: 300-383.
- [20] Fu Guang, Chen Zhangming, Jiang Zhenxue. Evaluation of the sealing ability of caprock and its application[J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(3): 46-30. [傅广, 陈章明, 姜振学. 盖层封堵能力评价方法及其应用[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(3): 46-30.]
- [21] Miao Chengwu, Yin Kaiping. Technology Design of Aquifer Underground Gas Storage[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 1-17. [苗承武, 尹凯平. 含水层地下储气库工艺设计[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 1-17.]
- [22] Ma Xiaoming, Zhao Pingqi. Practical Design Technology for Underground gas Storage[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 22-44. [马小明, 赵平起. 地下储气库设计实用技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 22-44.]
- [23] Yielding G, Freeman B, Needham D T. Quantitative Fault Seal Prediction[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(6): 897-917.
- [24] Gao Xianzhi, Du Yumin, Zhang Baoshou. The sealing of Xiakou fault and its model of controlling on the petroleum accu-

- mulation[J].Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3):76-78.[高先志,杜玉民,张宝收.夏口断层封闭性及对油气成藏的控制作用模式[J].石油勘探与开发, 2003, 30(3):76-78.]
- [25] Bontemps C, Cariou L, Galibert S, *et al.* Assessment of Four Prospective Sites for the Realization of Underground Gas Storages in Aquifer Reservoirs[R]. Courbevoie: GDF Suez, 2013.
- [26] Bruno M S, Dewolf G, Foh S. Geomechanical analysis and decision analysis for delta pressure operations in gas storage reservoirs[C]//The American Gas Association Operations Conference, Denver, CO, 2000: 1-14.
- [27] Liu Shizhong. Research on Preserving Conditions of Gas in Deep Interval of Jiyang Basin[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2008: 92-105.[刘士忠. 济阳坳陷深层天然气保存条件研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2008: 92-105.]
- [28] Li Yueyang, Tian Yuanyuan, Cao Peng, *et al.* Construction of underground gas storage conditions for screening and optimization[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2013, 35(5): 123-128.[李玥洋, 田园媛, 曹鹏, 等. 储气库建设条件筛选与优化[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2013, 35(5): 123-128.]
- [29] Tang Qingbao. Local hydrocarbon trap evaluation based on fuzzy comprehensive method[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1985, 20(5): 490-495.[唐庆宝. 应用模糊数学方法评价局部圈闭[J]. 石油地球物理勘探, 1985, 20(5): 490-495.]

Evaluation system and optimization of aquifer exploration targets for gas storage in the Beijing, Tianjin and Hebei faulted basins

Jin Feng-ming^{1,2}, Jia Shan-po³, Zhang Hui¹, Lin Jian-pin¹,
Shang Cui-juan¹, Liu Jing¹, Liu Tuan-hui¹, Zhao Zheng-jia¹, Xi Zeng-qiang¹

(1. PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, China;

2. PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China;

3. Research Center of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: Beijing, Tianjin and Hebei districts have a great demand of the use of aquifer gas storage and the optimization of aquifer targets is a premise of gas storage construction and development. There is no precedent in China for the construction of aquifer gas storage because of large investment and high risk. There is a great risk to construct the aquifer gas storage with complex geological structure for Beijing, Tianjin and Hebei districts in the faulted basin. It is important to screen out the applicable, economically viable, and environmentally friendly site for aquifer gas storage using scientific method. This paper aims to rank the exploration potential of 11 aquifer trap targets in the Beijing, Tianjin and Hebei districts, which are taken as case studies. Through a systematic analysis of different geological parameters on trap, reservoir, caprock and fault, and their impacts on the construction of aquifer gas storage, four types of key factors were selected including negativity, capability, economy and control standards. Based on the successful construction experience of aquifer gas storage by France and other foreign countries, the aquifer gas storage optimization evaluation system was established with multilevel and multi-index. The weights of the evaluation index for the site screening were worked out through investigation by experts in this field using analytic hierarchy process (AHP). Then, the aquifer targets were optimized and ranked with the fuzzy comprehensive evaluation method. The results show that the Shihezi Formation of Da 5, Kongdian Formation of Sunhu and Ordovician buried-hill of Dacan 2 are feasible for construct the aquifer gas storage.

Key words: Aquifer; Underground gas storage; Trap configuration; Evaluation standards; Optimization