doi:10.3799/dqkx.2013.000

# 松辽盆地南部保康体系上白垩统 CO<sub>2</sub> 埋存条件与潜力

金 超1,2,曾荣树1,田兴有1

1. 中国科学院地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室,北京 100029

2. 中国科学院大学,北京 100049

摘要: CO<sub>2</sub> 地下埋存是一项缓解全球气候变暖的措施.采用沉积地质学的研究方法,首次对松辽盆地南部长岭凹陷的保康沉积体系沿水流方向进行连井剖面分析,结合室内显微镜薄片鉴定和岩心观察等手段,对保康体系的沉积相类型及其时空分布规律、储盖层沉积特征、水文地质及构造特征等进行了研究.结果表明,研究区青山口组一嫩江组是 CO<sub>2</sub> 地下埋存的良好储盖组合,同时计算研究区 CO<sub>2</sub> 埋存量为 7.43×10<sup>9</sup> t,大约相当于 2002 年中国 CO<sub>2</sub> 排放量的 2 倍、2009 年中国的全年排放量. 关键词: CO<sub>2</sub> 埋存潜力;保康沉积体系;沉积学;松辽盆地;覆盖层.

**中图分类号:** P535 **文章编号:** 1000-2383(2013)06-1229-11

# CO<sub>2</sub> Storage Conditions and Capacity of Upper Cretaceous Series in Baokang Sedimentary System in the Southwest of Songliao Basin

JIN Chao<sup>1,2</sup>, ZENG Rong-shu<sup>1</sup>, TIAN Xing-you<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The CO<sub>2</sub> geological storage is an effective approach to mitigate global warming. The Baokang sedimentary system of Changling depression in the south part of Songliao Basin, choosen as the study area for CO<sub>2</sub> storage capacity, is explored with sedimentary geology approach. A connected-well's profile map along the flow direction of Baokang System is investigated for the first time. The sedimentary facies, temporal and spatial distribution, sedimentary features, hydrogeology feature and tectonic characteristics of Baokang sedimentary system are studied based on observing cores and identifying rock thin sections under microscope. The results show that Qingshankou to Nenjiang Formation is favorable reservoir-caprock pair for underground CO<sub>2</sub> storage and the total amount of potential CO<sub>2</sub> storage capacity is estimated as 7.  $43 \times 10^9$  t, which is about two times the total volume of CO<sub>2</sub> emission in China in 2002, or the total volume of CO<sub>2</sub> emission in China in 2009.

Key words: CO2 storage capacity; Baokang sedimentary system; sedimentology; Songliao Basin; coatings.

全球气候变暖是当今社会面临的重大环境问题,而这一问题的根源是由于人类活动特别是化石燃料的燃烧,向空气中排放了大量以 CO<sub>2</sub> 为主的温室气体(Hitoshi et al., 1995; Bachu, 2000; IPCC, 2001; Bachu, 2002; White et al., 2003; Ghanbari et al., 2006).国际社会认为采取 CO<sub>2</sub> 地质埋存的方式是应对气候变化最有效途径之一(Holloway, 1997; 刘延锋等, 2005, 2006; Xu et al., 2006; Ba-

chu *et al*., 2007a; Bradshaw *et al*., 2007; Bachu, 2008; 张亮等, 2010), 在 CO<sub>2</sub> 埋存的几种地质储存体中, 咸水层的勘探开发研究程度较低, 但其分布面积广、厚度大, 储量可观. 因此, 开展对咸水层埋存CO<sub>2</sub> 研究具有重大科学意义和应用前景(Holloway, 1997; Shafeen *et al*., 2004; Ghanbari *et al*., 2006).

收稿日期: 2013-03-18

松辽盆地是中国东部中新生代具有断坳双重结

基金项目:国家重点基础研究发展计划"973"项目(No. 2011CB707303). 作者简介:金超(1983-),女,博士研究生,从事沉积地质学与 CO2 地下埋存方面的研究. E-mail: baobei181920@126.com 构的大型复合型陆相沉积盆地(胡望水,2005;单衍 胜,2008;郭巍,2010),咸水层以白垩系的姚家组和 青山口组地层为主,两套地层各类型砂体十分发育 (王永春,2007),可以为 CO<sub>2</sub> 地下埋存提供广泛的 储集空间,且符合 CO<sub>2</sub> 地下埋存深度大于 800 m 的 要求(埋深大于 800 m,CO<sub>2</sub> 才能以临界状态形式存 在(Holloway, 1997; Shafeen *et al.*, 2004; 强薇 等,2006;巫润建等,2008).本文以松辽盆地西南部 早白垩世地层为主要研究对象,分析埋存 CO<sub>2</sub> 的基 本地质条件.

以往的学者对于松辽盆地的研究关注于构造演 化、地层沉积特征、沉积演化、油藏相关的储层描述、 油藏特征及成藏规律、生烃演化等方面,而对于 CO<sub>2</sub> 埋存的研究不多.许志刚等(2009)对吉林油田大情 字井区块 CO<sub>2</sub> 地下埋存试验区地质格架进行了研 究,但缺少定量计算;巫润建等(2008)对松辽盆地咸 水层 CO<sub>2</sub> 储存容量进行了初步估算,徐威等(2011) 对松辽盆地中央坳陷区深部咸水层 CO<sub>2</sub> 储存潜力 做了估算,但对于储盖层地质条件论述不够.因此, 作者在前人研究的基础上,运用沉积地质学与 CO<sub>2</sub> 地质埋存相结合的方法,对研究区的基本地质条件 进行了较为深入的研究和定量评价,减小了影响埋 存量参数的不确定性,力求使估算结果更接近真实 值,为政府部门政策制订和工业实施的选址提供科 学依据.

1 研究区地理位置与地质背景

松辽盆地南部位于中国东北部吉林省西部,属 于松辽平原中段(第二松花江下游及辽河平原北 段),包括吉林省白城地区及长春、四平两地区西部 及北部(石油志,1993).松辽盆地南部划分为4个一 级构造单元:西部斜坡区、中央坳陷区、东南隆起区 和西南隆起区(王永春等,2007).松辽盆地的白垩系 可分为上、下两统,其中下白垩统包括:登娄库组、泉 头组、青山口组、姚家组和嫩江组.上白垩统包括四 方台组和明水组(石油志,1993;葛荣峰等,2010).本 文主要研究青山口组一嫩江组的地层.

研究区保康沉积体系位于松辽盆地南部中央坳 陷区长岭凹陷(图1).保康体系根部在保康、边昭一 带,前缘最远可抵达扶余、新木附近,主要分布在乾 安次凹和黑帝庙次凹的鞍部,轴向为北东向,斜交 盆地主轴.保康体系主要为河流一三角洲相沉积,相 序完整,砂体分布随湖盆的演变而变化.作者以保康



图 1 研究区构造位置(据王永春修改,2007)

Fig. 1 The tectonic location of the study area

体系自青山口组至嫩江组时期发育的复合三角洲沉积区为研究对象展开工作.

## 2 研究区青山口组至嫩江组发育的主 要沉积相类型与沉积演化

#### 2.1 沉积相类型

通过钻井资料分析与岩心观察,在研究区识别 出的沉积相主要有:三角洲平原、三角洲前缘、前三 角洲、浅湖、半深湖和深湖相等.在不同时期,它们在 时空上的分布不一样,也正是各沉积相类型的时空 配置关系构成的储盖组合,是 CO<sub>2</sub> 地下埋存的最基 本条件.

### 2.2 沉积演化

作者统计了研究区 150 余口录井测井资料,并 选取其中 42 口运用层序地层学方法在研究区三角 洲前缘位置做了 6 条连井剖面图,连井剖面均以青 山口组一段时期最大湖泛面为等时界面,研究区部 分井位和连井剖面线位置见图 2. 其中,作者首次沿 保康体系水流方向进行了连井剖面分析(图 3). 根 据所做连井剖面分析得出,松辽盆地早白垩世泉头 组沉积中晚期一嫩江组沉积期,经历了大规模湖水 "扩张—萎缩—扩张—衰退"的演化过程,详细分 析如下.

青山口组形成于松辽盆地坳陷期的快速沉降阶段,青一段至青三段沉积时期,三角洲砂体逐渐向湖



图 2 连井剖面线位置及研究区部分井位 Fig. 2 The location of partial wells and the section lines in the study area

区进积,总的砂体展布方向呈西南一北东向,砂体面 积由 130×90 km<sup>2</sup> 增加至 150×125 km<sup>2</sup>(石油志, 1993),且各单砂体为西南厚、北东薄的变化趋势(见 图 3),并且于乾 110—乾 113 井一线尖灭(图 2,井 位图本文统一).砂体沉积微相类型主要包括分流河 道、水下分流河道、河口坝,其次是远砂坝和决口扇 微相,分流河道溢岸微相最少.

青一段时期距离西南保康物源较近,横向可分 为多个水道(张大伟等,2006a).青一段湖面相对稳 定,因此砂体发育规模亦相对稳定(图 3),一般厚 30~50 m,单层厚 2~10 m,由连井剖面图上看三 个砂体发育高值区为:黑 104—黑 59—黑 99 一线、 黑 50—黑 111—黑 97 —线和乾 111—黑 86—黑 117 一线,最远延伸至海 28、花 14、乾 162、乾深 10 等井 位附近.

青二段基本上继承了青一段的三角洲前缘沉积 格局(魏志平等,2002;杨明达等,2003;毛超林等, 2005;张玉等,2010a,2010b),由早一晚经历了湖盆 水体"退一进"的旋回变化,且进急退缓.平面上砂体 尖灭于乾安构造北部至孤西斜坡一线,有2个砂体 发育高值区,分别为本区西南偏西黑94—黑165— 黑103 一线附近,南部情2—情4—乾135 — 线附近.

青三段沉积时期,湖面萎缩,水体变浅,三角



图 3 以青一段最大湖泛面为基准沿保康体系水流方向的连井剖面图 Fig. 3 The connected-well's profile along the flow direction of Baokang system from Qingshankou to Nenjiang Formation

洲形态为"浅湖型"树枝状;砂岩体向湖内推进最远 (单玄龙等,2008;王建功等,2009;王安辉等,2010), 砂体发育高值区有:花16一黑108一黑120一线、黑 121一黑117—乾127一线及情5—情1—孤45一线 等,尖灭于海14、乾深5、乾119、乾166、孤6附近.

姚一段沉积时期,盆地东部、南部整体相对抬升,保康水系水动力减弱,形成了一套陆上辨状河 道一浅水三角洲相的过渡沉积(张鑫,2009).砂体只 发育1~3层,厚3~10m,方向SW-NE,面积80× 55 km<sup>2</sup>(石油志,1993;杨明达等,2003).

姚二段沉积时期,湖盆面积逐渐扩大,保康体系 主要发育退积式浅水三角洲沉积,砂体不太发育,主 要沉积浅湖相泥岩夹少量粉砂岩、细砂岩与紫红色 泥岩的等厚互层,相比姚一段,其氧化环境条件稍稍 变弱(席党鹏等,2009).

嫩江组沉积时期盆地演化过程可划分为初、早、 中和晚4个时期,分别对应嫩一段及二段、嫩三段、 嫩四段和嫩五段,经历了从(嫩一段、嫩二段)湖盆急 剧下降到(嫩三段至五段)缓慢抬升,沉积相从深湖 一半深湖到浅湖再到三角洲前缘的相变,总体呈现 出松辽盆地由极盛转为逐渐衰亡(邹才能等,2004; 张喜等,2011).初期和早期的嫩一至嫩三段,由于湖 区范围再次扩张,半深湖一深湖的面积大于 105 km<sup>2</sup>,整个松辽盆地均陷入湖水之中,沉积了平 均厚达236 m的暗色泥岩,是研究区非常重要的区 域性盖层.中、晚期由于湖盆抬升萎缩,充填加剧,保 康体系开始活跃,中期发育了三角洲前缘亚相和浅 湖亚相,晚期由于保康三角洲体系明显向盆地中央 推进,由浅湖相转为泛滥平原相.

纵观保康体系青山口组一嫩江组的沉积演化过 程可以看出,青山口组一姚一段,保康体系的沉积以 进积型河流三角洲砂体为主,是良好的 CO<sub>2</sub> 埋存储 层,而姚二、三段至嫩三段则以半深湖和深湖相暗色 块状泥岩为主,且厚度巨大,则是好的区域性盖层, 构成宜于 CO<sub>2</sub> 地下埋存的良好储盖组合.

### 3 储盖层地质特征

地下咸水层埋深必须大于 800 m 才能达到足够 的温压条件,使得 CO<sub>2</sub> 注入后以超临界状态被长期 储存.因此作者统计了研究区 98 口井的岩性柱状 图,结果显示所有井的嫩江组埋深均在 800 m 以下, 符合 CO<sub>2</sub> 地下埋存的最小深度要求.除了考虑温压 条件外,还要考虑 CO<sub>2</sub> 注入的成本. 若储层埋深大 于 2 500 m,则对 CO<sub>2</sub> 注入设备条件的要求很高,费 用昂贵.根据统计资料显示,研究区青山口组一段地 层底部的埋深均小于 2 500 m.而若要作为长期有效 埋存 CO<sub>2</sub> 的储层,除了要满足埋深要求以外,还必 须在咸水层上部有比较完整的隔水层或弱透水层, 作为目的储层的盖层,以保证 CO<sub>2</sub> 注入后不会扩散 到其他含水层或者泄露到地表,对人类赖以生存的 地球环境造成影响.

### 3.1 储层地质特征

3.1.1 储层的岩石学特征 研究区内的储层主要 由细碎屑岩组成,青山口组至姚一段储集层平均累 积厚度约 200 m,岩石的成分成熟度较低,结构成熟 度中等.据薄片资料统计得出,不论青山口组还是姚 家组,砂岩类型均以岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩 为主(图 4),且各段各小层碎屑成分相差不大.主要 由石英、长石、岩屑及少量重矿物组成.石英含量一 般为 28%~42%,长石含量最高,一般为 30%~ 45%,岩屑一般为20%~35%.分选一般为中等,磨 圆程度中等.含泥量小于20%,胶结类型以孔隙式、 孔隙-再生式胶结为主,基质与胶结物以泥质为主, 其次为方解石,含量一般为 5.2%~16.8%,平均 9.8%,再次为自生石英、自生粘土矿物、长石次生加 大等.成岩作用表现为压实、胶结、交代及溶蚀作用. 3.1.2 储层的沉积相特征 在本区青一段储层中 主要发育三角洲平原和三角洲前缘亚相,分流河道、 水下分流河道、河口坝和远砂坝等沉积微相类型砂



图 4 研究区储层砂岩类型(据路风香和桑隆康,2000) Fig. 4 The reservoirs' sandstone types in the study area Q. 石英; F. 长石; R. 岩屑; 1. 石英砂岩; 2. 长石石英砂岩; 3. 岩屑石英砂 岩; 4. 长石砂岩; 5. 岩屑长石砂岩; 6. 长石岩屑砂岩; 7. 岩屑砂岩 体. 青二段主要发育水退背景下的浅水三角洲沉积, 有三角洲前缘和前三角洲两个亚相,储层砂体主要 为水下分流河道、河口坝、远砂坝等微相砂体,且以 水下分流河道和河口坝砂为主. 青三段储层砂体以 分流河道微相最为发育,其次是决口扇微相,分流 河道溢岸砂体发育最少. 姚家组沉积时期,研究区 为陆上辨状河道向浅水三角洲的过渡沉积,储层砂 体以河道砂为主.

3.1.3 储层的物性特征 经过对研究区有效孔隙 度和水平渗透率的测试和分析发现,青山口组和姚 家组的有效孔隙度和水平渗透率都具有较好的线性 关系(图 5).研究区青山口组砂岩孔隙度的变化范 围为 3.40%~23.90%,一般为 10%~20%,渗透率 变化较大为 0.045×10<sup>-3</sup>~42.500×10<sup>-3</sup>  $\mu$ m<sup>2</sup>,— 般为 1.9×10<sup>-3</sup>~20.0×10<sup>-3</sup>  $\mu$ m<sup>2</sup>.姚家组砂岩孔 隙度的变化范围为 3.9%~29.5%,一般为 9%~ 22%,渗透率的变化亦很大,从 0.027×10<sup>-3</sup>~ 40.930×10<sup>-3</sup>  $\mu$ m<sup>2</sup>.因此,所有的目的层段主要为中 一低孔、中一低渗储层.本文测试的孔渗数据与前人 的研究结果大体相符(魏志平等,2002;郭军等, 2002;刘宝柱等,2004;张大伟等,2006b).

### 3.2 盖层地质特征

评价一个地区是否适合 CO<sub>2</sub> 埋存,储层是基础,盖层是关键,盖层的好坏直接影响 CO<sub>2</sub> 在储层中的埋存量和埋存时间.本文评价盖层的因素主要包括:盖层岩性、厚度、发育面积以及盖层中的断裂与裂缝发育特征.

3.2.1 盖层岩性、厚度及分布范围 从统计的百余 口录井资料及连井剖面得出,在研究区,位于青山口 组上方的姚家组和嫩江组(主要包括姚家组二、三段 和嫩一~三段)发育大套厚层泥岩,总厚度范围为 282~486 m,平均厚度为 358.39 m. 这套泥岩地层 的岩性主要包括块状泥岩、粉砂质泥岩、油页岩和泥 页岩4种岩性,其中块状泥岩以平均 318.21 m 的厚 度占本套泥岩层的 89.58%,每种岩性的厚度及所 占盖层总厚度的比例如下表 1.

对研究区盖层中占主要成分的块状泥岩进行压 汞实验,其孔隙度主要介于 3.8%~6.1%之间,渗 透率为 0.01×10<sup>-3</sup>~0.40×10<sup>-3</sup>  $\mu$ m<sup>2</sup>.块状泥岩完 整性好,力学强度大,渗透率极低,各向同性均一致 密,是比较理想的盖层.

另外,通过连井地层对比(图 3),嫩江组一、二段 时期,整个松辽盆地处于浅湖至深湖环境,沉积了以 暗色泥岩为主,夹少量油页岩、泥页岩的大套泥岩;



图 5 青山口组储层有效孔隙度与渗透率关系

Fig. 5 The relationship of porosity to permeability in sandstone reservoir of Qingshankou Formation a. 青一段储层孔渗关系; b. 青二、三段储层孔渗关系

#### 表1 研究区盖层各岩性厚度及所占比例

Table 1 The thickness and ratio of each kind of lithology of the cap rock in the study area

	最小厚 度(m)	最大厚 度(m)	平均厚 度(m)	最小比 例(%)	最大比 例(%)	平均比 例(%)
块状泥岩	214.5	442.5	318.21	46.910	96.970	89.580
粉砂质泥岩	4.0	138.0	28.50	1.154	34.620	7.382
油页岩	0	15.0	7.28	0	4.975	2.036
泥页岩	0	132.5	40.90	0	27.749	1.000

发育面积达22 600~35 100 km<sup>2</sup>(石油志,1993),且 横向连续性好,分布稳定.

3.2.2 盖层裂隙及断层发育特征 通过常规测井 资料和岩心观察得出,研究区裂缝主要以构造裂缝为 主,并且开启度很小,主要集中分布在储层青一段和 青二段,而在姚家组、嫩江组盖层中几乎不发育(李群 等,2003;王永春等,2007;许志刚等,2009),因此研究 区盖层完整性较好,能有效封盖注入的 CO<sub>2</sub>.

### 4 水文地质特征

根据研究区油田 60 口井、四个层段 126 个水样 全分析资料结果统计,除了黑 120 井、黑 89 井青二 段以及黑 98 井青三段等少数井的地层水水型为 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 外,本区其他井位和层位的水型均为 NaH-CO<sub>3</sub> 型,水型单一,说明整个研究区内青山口组和 姚家组地层水水型均为 NaHCO<sub>3</sub>,属于过渡型 的水型.

矿化度变化范围为 4 678. 2~21 550.3 mg/L (图 6),直接溶解盐类以 NaCl 和 NaHCO<sub>3</sub> 为主. 总 矿化度表示地下水中含盐量多少,是表征水矿化程 度的指标,按照章至杰等(1995)对地下水的分类,研 究区含水层属于目前不容易被利用的咸水一盐水 层,因此用来做 CO<sub>2</sub> 地质埋存的储层,不会对现今 利用的资源造成污染.

研究区长期处于沉降中心,物性差,砂岩孔隙连 通性不好,加之构造对本区影响较小,断层不发育, 从而封堵了上下、内外水动力联系,因此水型单一. 以研究区为中心向周围矿化度均逐渐降低,水矿化 度的高异常,亦能说明本区属于相对闭塞的地质环 境,正是这种相对闭塞的环境,成为安全有效埋存 CO<sub>2</sub>的又一有利因素.

### 5 构造特征

### 5.1 研究区构造演化及断裂发育特征

松辽盆地南部的构造演化可以概括为隆起、断 陷、坳陷和收缩4个演化阶段(石油志,1993;王永春 等,2007;许志刚,2009),盆地各阶段的构造运动及 应力场变化具体见表2.

坳陷期这种应力场由拉张一挤压的变化,使盆地 断裂由正转逆,由开启一封闭的转换,形成了一系列 断块封闭构造,为 CO<sub>2</sub> 埋存提供了良好的构造条件.

自断陷期过后,位于中央凹陷区长岭凹陷内的 断层主要发育在登娄库组至姚家组时期,而姚家组 二、三段和嫩江组中甚少发育(图7),形成了"断下 不断上"的特征,因此研究区盖层的完整性较好,能 有效地封存注入的 CO<sub>2</sub>.

### 5.2 研究区构造活动记录

历史上研究区附近发生的强震频率较小,仅有 1119年松原市前郭县发生了 6.75级地震,1902年 至今吉林省内共发生 5级以上破坏性地震 5次, 2006年 3月 31日,前郭县与乾安县交界处(北纬 44°36′,东经 124°03′)发生 5级地震,前郭县境内震 感明显(许志刚等,2009).根据《中国活动构造图》, 松辽盆地构造断裂活动属于微弱区,适合 CO<sub>2</sub> 埋存 的条件.





#### 表 2 研究区各阶段构造运动、断裂及应力场性质

 
 Table 2
 Tectonic movement, fracture property and the variation of stress field in every stage in the study area

盆地变化	构造运动	断裂性质	应力场变化
收缩阶段	燕山运动Ⅳ幕、 Ⅴ幕影响,其后 受喜山运动控 制	两次总体抬 升,形成大量 褶皱,断裂由 正转逆	拉张性转为 挤压性
坳陷阶段	盆地整体下降 统一沉积	基底断裂活动 减弱,断层不 再向上延伸	热沉降
断陷阶段	燕山运动Ⅱ幕、 Ⅲ幕	大规模正断裂 活动伴随火山 喷发	拉张性
隆起阶段	华力西运动	北东向或北北 东向正断裂为 主	拉张性

### 6 CO<sub>2</sub> 埋存潜力计算

最早的 CO<sub>2</sub> 地质埋存储量估算方法始于 1990 年,不同学者根据所研究的不同国家和区域,对这些 方法进行了改进和变换(Tanaka *et al.*, 1995; Shafeen *et al.*, 2004; Bachu *et al.*, 2007b).由于 复杂的地质条件以及不同的勘探水平,就有一系列 参数影响计算结果,并且每个参数都是单独的,同时 对结果的影响还有可能相反.根据前人研究结果知 道 CO<sub>2</sub> 被注入到地下之后,有不同的捕获机制(包 括:构造和地层捕获、残余气饱和度捕获、溶解捕获、 矿物捕获、水动力条件捕获等),不同的捕获机制依 赖于不同的时间尺度(Tore and John, 2004; Metz *et al.*, 2005; Ghanbari *et al.*, 2006; Bachu *et al.*, 2007b).本文则引用 2008 年 4 月在南非开普敦召开的会议上 USDOE(美国能源部)技术分组推荐的计算方法(Bachu, 2008),此方法与其他方法相比假设条件少,公式如下:

 $M_{\mathrm{CO}_2} = A imes h imes arphi imes 
ho_{\mathrm{CO}_2} imes E$ 

其中: $M_{CO_2}$ 为有效封存量;A为封存区区域面积;h为含水层平均厚度; $\varphi$ 为储层平均孔隙度; $\rho_{CO_2}$ 为储 层条件下 CO<sub>2</sub>的密度,临界条件下 CO<sub>2</sub>的密度为 600~750 kg/m<sup>3</sup>,本文取 700 kg/m<sup>3</sup>(Hitoshi *et al.*, 1995; Tanaka *et al.*, 1995; 江怀友等,2008); *E*为 埋存有效因子,在 Monte Carlo 模拟中 *E*的变化范 围为咸水层总体积的 1%~4%,本文取 2 %.

研究区目的储层埋存量计算参数见表 3. 计算 结果显示研究区咸水层储层总的 CO<sub>2</sub> 埋存量为 7.43×10<sup>9</sup> t,这大约相当于中国 2002 年排放量的 2.2 倍、中国 2009 年的全年排放量.

### 7 结论

(1)保康体系青一段一姚一段沉积的各种微相 类型的砂岩,是埋存 CO<sub>2</sub> 良好的储层;姚二、三段至 嫩三段期间,研究区沉积的暗色块状泥岩是埋存 CO<sub>2</sub> 的有效区域性盖层.他们在盆地演化过程中的 时空配置,形成了宜于埋存 CO<sub>2</sub> 的储盖组合.

(2)研究区储层岩性、物性条件较好,咸水层矿 化度4678.2~21550.3 mg/L,属于目前不容易被 利用的咸水一盐水;盖层平均厚度达358.39 m,致 密的块状泥岩约占总盖层的90%,且块状泥岩的孔



图 7 松辽盆地南部 568 测线地质剖面(据王永春修改,2007) Fig. 7 The geologic section of 568 survey line in South Songliao basin

#### 表 3 研究区青山口组计算参数及埋存量

Table 3 Capacity calculating parameters of target reservoirs in the study area

	青一段	青二段	青三段	姚一段
保康砂体面积(km <sup>2</sup> )	10 000	20 000	15 000	10 000
砂体平均厚度(km)	0.043	0.049	0.100	0.008
平均体积(km³)	430	980	1 500	80
平均有效孔隙度(%)	14.12	18.66	18.66	9.20
有效埋存量(t)	$0.85 \times 10^{9}$	2.56 $\times 10^{9}$	$3.92 \times 10^{9}$	$0.10 \times 10^9$
总埋存量(t)	7. $43 \times 10^{9}$			

隙度和渗透率极低,其孔隙度介于 3.8%~6.1%之 间,渗透率介于 0.01×10<sup>-3</sup>~0.40×10<sup>-3</sup>  $\mu$ m<sup>2</sup> 之 间.因此本研究区的储盖层条件适合埋存 CO<sub>2</sub>.

(3)研究区地震等活动构造发生几率较小,属于 构造稳定区;张性正断层和裂缝也主要发育在储层 中,有利于注入的 CO<sub>2</sub> 运移与分布,而盖层中却很少 发育,连续性好,构造稳定性好,利于 CO<sub>2</sub> 长期封存.

(4)本文引用 USDOE(美国能源部)技术分组 推荐的 CO<sub>2</sub> 埋存储量估算方法,得出研究区可埋存 CO<sub>2</sub> 量为 7.43×10<sup>9</sup> t,大约相当于中国 2002 年排 放量的 2.2 倍、中国 2009 年的全年排放量.

#### References

- Bachu, S., 2000. Sequestration of CO<sub>2</sub> in Geological Media: Criteria and Approach for Site Selection in Response to Climate Change. *Energy Conversion and Management*, 42:953 – 970. doi: org/10. 10 – 8904 (16/S019699) 00149-1
- Bachu, S. ,2002. Sequestration of  $CO_2$  in Geological Media in Response to Climate Change: Road Map for Site Selec-

tion Using the Transform of the Geological Space into the CO<sub>2</sub> Phase Space. *Energy Conversion and Management*, 43:87–102. doi: org/10. 1016/S0196–8904(01) 00009–7

- Bachu, S., 2008. Comparison between Methodologies Recommended for Estimation of CO<sub>2</sub> Storage Capacity in Geological Media by the CSLF Task Force on CO<sub>2</sub> Storage Capacity Estimation and the USDOE Capacity and Fairways Subgroup of the Regional Carbon Sequestration Partnerships Program. Phase III Report. Technical Group (TG) Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF), U. S., 1–21.
- Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., et al., 2007a. Estimation of CO<sub>2</sub> Storage Capacity in Geological Media. Phase II. Final Report from the Task Force for Review and Identification of Standards for CO<sub>2</sub> Storage Capacity Estimation. The Task Force on CO<sub>2</sub> Storage Capacity Estimation for the Technical Group (TG) of the Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF), U. S. .
- Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., et al., 2007b, CO<sub>2</sub> Storage Capacity Estimation: Methodology and Gaps. International Journal of Greenhouse Gas Control, 1(4): 430-443. doi: 10.1016/S1750-5836(07)00086-2
- Bradshaw, J., Bachu, S., Bonijoly, D., et al., 2007. CO<sub>2</sub> Storage Capacity Estimation: Issues and Development of Standards. *International Journal of Greenhouse Gas Control*,1(1):62-68. doi:10.1016/S1750-5836(07) 00027-8
- Ge, R. F., Zhang, Q. L., Wang, L. S., et al., 2010. Tectonic Evolution of Songliao Basin and the Prominent Tectonic Regime Transition in Eastern China. *Geological Re*view, 56(2): 180-195 (in Chinese with English ab-

stract).

- Ghanbari, S., Al-zaabi, Y., Pickup, G. E., et. al., 2006. Simulation of CO<sub>2</sub> Storage in Saline Aquifers. *Chemical Engineering Research and Design*, 84 (A9): 764 – 775. doi:10.1205/cherd06007
- Guo, J., Shan, X. L., Wan, C. B., et al., 2002. Characteristics of Cretaceous Sandstone Reservoirs in Songliao Basin. *World Geology*, 21(3):242-246 (in Chinese with English abstract).
- Guo, W., Liu, Z. J., Liu, Q., et al., 2010. Research on the Hydrocarbon Accumulation Dynamics of Gaotaizi Reservoir in the Southern Songliao Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 40(3): 482-490 (in Chinese with English abstract).
- Hitoshi, K., Manabu, T., Hitoshi, T., et al., 1995. Self-Trapping Mechanisms of Carbon Didxide in the Aquifer Disposal. Energy Conversion Management, 36(6-9):505-508. doi, org/10.1016/0196-8904(95)00054-H
- Holloway, S., 1997. An Overview of the Underground Disposal of Carbon Dioxide. *Energy Conversion and Management*, 38: S193 – S198. doi: org/10. 1016/S0196 – 8904(96)00268-3
- Hu, W. S., Lv, B. Q., Zhang, W. J., et al., 2005. An Approach to Tectonic Evolution and Dynamics of Songliao Basin. *Chinese Journal of Geology*, 40(1):16-31 (in Chinese with English abstract).
- IPCC,2001. The Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 588-589.
- Jiang, H. Y., Shen, P. P., Li, X. F., et al., 2008. Study into Technologies for Estimating Theoretical Volume of CO<sub>2</sub> Stored Underground Worldwide. *Sina-Global Energy*, 13(2):93-99 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q., Li, X. C., Mu, N. B., 2003. Sequence Stratigraphy Study and Subtle Oil and Gas Reservoir Prediction in the Daqingzijing Area of the South of Songliao Basin. *China Petroleum Exploration*, 8(3): 18-22 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B. Z., Wei, Z. P., Tang, Z. X., 2004. Genesis Study of Low Porosity, Low Permeability, Lithologic Reservoirs in Daqingzijing Area. Special Oil and Gas Reservoirs, 11(1):24-27 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. F., Li, X. C., Bai, B., 2005. Preliminary Estimation of CO<sub>2</sub> Storage Capacity of Coalbeds in China. *Chinese* Journal of Rock Mechanics and Engineering, 24(16): 2947-2952 (in Chinese with English abstract).

Liu, Y. F., Li, X. C., Fang, Z. M., et al., 2006. Preliminary

Estimation of  $CO_2$  Storage Capacity in Gas Fields in China. *Rock and Soil Mechanics*, 27(12); 2277 - 2281 (in Chinese with English abstract).

- Mao, C. L., Zhao, Z. Y., Ma, Y. T., et al., 2005. Features and Exploration Potential of Lithologic Oil Reservoirs in Southern Songliao Basin. *China Petroleum Exploration*, 6:1-6 (in Chinese).
- Metz, B., Davidson, O., Coninck, H. D., et al., 2005. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 442.
- Petroleum Geology of Jinlin Oilfield Editorial Group, 1993. Petroleum Geology of China. Vol. 2 (Rudin) Jilin Oilfield. Petroleum Industry Press, Beijing, 20 – 282 (in Chinese).
- Qiang, W., Li, Y. L., Wen, D. G., et al., 2006. Advances and Problems of Geological Disposal of Greenhouse Gases. *Geological Science and Technology Information*, 25 (2):83-88 (in Chinese with English abstract).
- Shafeen, A., Croiset, E., Douglas, P. L., et al., 2004. CO<sub>2</sub> Sequestration in Ontario, Canada. Part I: Storage Evaluation of Potential Reservoirs. *Energy Conversion and Management*, 45 (2004): 2645 – 2659. doi: 10. 1016/j. enconman. 2003. 12. 003
- Shan, X. L., Hu, J. X., Ren, L. J., et al., 2008. Characteristics of Sedimentary Facies for the Third Member of Qingshankou Formation in the Qian'an Area of the Songliao Basin. Acta Geologica Sinica, 82(1):65-71 (in Chinese with English abstract).
- Shan, Y. S., Zhang, L. Y., 2008. Reservoir Characteristics of Deep Volcanic Rocks and Prediction of Favorable Areas in Changshen Gas Field in the South of Songliao Basin. *Petroleum Geology and Engineering*, 22(5):33-36 (in Chinese with English abstract).
- Tanaka, S., Koide, H., Sasagawa, A., 1995. Possibility of Underground CO<sub>2</sub> Sequestartion in Japan. Energy Conversion Management, 36(6-9):527-530. doi:org/10. 1016/0196-8904(95)00059-M
- Tore, A. T. ,Gale, J. ,2004. Demonstrating Storage of CO<sub>2</sub> in Geological Reservoirs: The Sleipner and SACS Projects. *Energy*,29(2004):1361-1369. doi:10.1016/j.energy. 2004.03.104
- Wang, A. H., Zhao, Q. J., 2010. Study on Eq<sup>3</sup> Sedimentary Microfacies and Its Oil-Bearing Property in the South of Daqingzijing Oilfield. *Journal of Oil and Gas Technolo*gy, 32(6):41-44 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. G., Wang, T. Q., Wei, P. S., et al., 2009. Identifica-

tion of Unconformity Plane at the Bottom ( $K_2qn^3$ ) of Qingsan Member in the Songliao Basin and Its Implication for Petroleum Geology. *Acta Geologica Sinica*, 83 (1):78-88 (in Chinese with English abstract).

- Wang, Y. C., Kang, W. L., Mao, C. L., et al., 2007. Oil and Gas Exploration Theory and Practice of Jilin Exploratory Area. Petroleum Industry Press, Beijing, 4-135 (in Chinese).
- Wei, Z. P., Mao, C. L., Sun, Y., et al., 2002. Oil and Gas Accumulation Process in Daqingzi Region of Southern Songliao Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 29(3): 11–16 (in Chinese with English abstract).
- White, C. M., Strazisar, B. R., Granite, E. J., et al., 2003.
  Separation and Capture of CO<sub>2</sub> from Large Stationary Sources and Sequestration in Geological Formations— Coalbeds and Deep Saline Aquifers. *Journal of the Air* & Waste Management Association, 53: 645-715. doi: 10.1080/10473289.2003.10466206
- Wu, R. J., Li, G. M., Li, M., et al., 2008. Estimation of CO<sub>2</sub> Storage Capacity in Deep Saline Aquifer in Songliao Sedimentary Basin. *Journal of Engineering Geology*, 17(1):100-104 (in Chinese with English abstract).
- Xi, D. P., Li, G., Wang, X. Q., et al., 2009. Yaojia-Lower Nenjiang Formations and Lake Evolution of Southeastern Songliao Basin, NE China. Acta Palaeontologica Sinica, 48(3): 556-568 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W., Su, X. S., Du, S. H., et al., 2011. Capacity Assessment and Uncertainty Analysis of CO<sub>2</sub> Storage in Deep Saline Aquifer in the Central Depression of Songliao Basin. *Quaternary Sciences*, 31(3):483-485 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. F., Chen, S. Y., Zhang, D. X., 2006. Convective Stability Analysis of the Long-Term Storage of Carbon Dioxide in Deep Saline Aquifers. *Advances in Water Resources*, 29 (2006): 397 - 407. doi: 10. 1016/j. advwatres. 2005. 05. 008
- Xu, Z. G., 2009. Geological Storage Framework and Reservoir Modeling of CO<sub>2</sub> Subsurface Storage in the Daqingzijing Block, Southern Songliao Basin (Dissertation). Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 56-87 (in Chinese with English abstract).
- Xu,Z. G., Chen, D. Z., Zeng, R. S., et al., 2009. Geological Storage Framework of CO<sub>2</sub> Subsurface Burial Trial Area of Daqingzijing Block in the Jilin Oilfield. Acta Geologica Sinica, 83(6):875-884 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M. D., Yang, M. H., Tang, Z. X., et al., 2003. Analy-

sis of Hydrocarbon Distribution in Daqingzijing Area of the Southern Songliao Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 25(3):252-256 (in Chinese).

- Zhang, D. W., Chen, F. J., Cheng, G., 2006a. The Microscopic Features of Pore Structure in Gaotaizi Oil Layer of Daqingzijing Area. Oil & Gas Geology, 27(5):668-674 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. W., Jia, Q. S., 2006b. Distribution of Sedimentary Microfacies of First Section of Qingshankou Formation in Daqingzijing Area. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 13 (6):1-4 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Ren, S. R., Wang, R. H., et al., 2010. Estimation of CO<sub>2</sub> Storage Capacity in Saline Aquifers in West of South China Sea. *Rock and Soil Mechanics*, 31 (4): 1238-1242 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X., 2009. Sedimentary Evolution and Hydrocarbon Distribution in the Middle-Shallow Layer in the South of Songliao Basin (Dissertation). Ocean University of China, Qingdao, 75 - 79 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X., Huang, Y. X., Zhu, W. F., 2011. Characteristic of Sedimentary Evolution of Nenjiang Formation in Southern Songliao Basin. Journal of Yangtze University (Nat. Science Edit.),7(1):165-168 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Wang, Y. C., Guan, X. Q., et al., 2010a. Sedimentary Microfacies for IV and V Sand Groups of the Second Member of Qingshankou Formation in Daqingzijing Area. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 49 (1):68-78 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Wang, Y. C., Zhang, H., et al., 2010b. Characteristics of Sedimentary Microfacies and Sand Bodies in Qing 2 Formation of Daqingzijing Area, Songliao Basin. Special Oil and Gas Reservoirs, 17(1):54-56 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. J., Han, B. P., Zhang, Y. H., 1995. General Hydrogeology. China University of Mining and Technology Press, Beijing, 70 (in Chinese).
- Zou, C. N. , Xue, S. H. , Zhao, W. Z. , et al. , 2004. Depositional Sequences and Forming Conditions of the Cretaceous Stratigraphic-Lithologic Reservoirs in the Quantou-Nengjiang Formations, South Songliao Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 31(2):14-17 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

葛荣峰,张庆龙,王良书,等,2010. 松辽盆地构造演化与中国 东部构造体制转换. 地质论评,56(2):180-195.

- 郭军,单玄龙,万传彪,等,2002. 松辽盆地白垩系砂岩储集层 特征. 世界地质,21(3): 242-246.
- 郭巍,刘招君,刘群,等,2010. 松辽盆地南部高台子油层成藏
  动力学. 吉林大学学报(地球科学版),40(3):
  482-490.
- 胡望水,吕炳全,张文军,等,2005.松辽盆地构造演化及成盆 动力学探讨.地质科学,40(1):16-31.
- 吉林油田石油地质志编写组,1993.中国石油地质志.卷二 (下册)吉林油田.北京:石油工业出版社,20-282.
- 江怀友,沈平平,李相方,等,2008.世界地质储层二氧化碳理 论埋存量评价技术研究.中外能源,13(2):93-99.
- 李群,李小春,穆乃彬,2003. 松辽盆地南部大情字井地区层 序地层及隐蔽油气藏预测. 中国石油勘探,8(3): 18-22.
- 刘宝柱,魏志平,唐振兴,2004.大情字井地区低孔、低渗型岩 性油藏成因探讨.特种油气藏,11(1):24-27.
- 刘延锋,李小春,白冰,2005.中国 CO<sub>2</sub> 煤层储存容量初步评价. 岩石力学与工程学报,24(16): 2947-2952.
- 刘延锋,李小春,方志明,等,2006.中国天然气田 CO<sub>2</sub> 储存 容量初步评估.岩土力学,27(12):2277-2281.
- 路凤香,桑隆康,2000.岩石学.北京:地质出版社,217.
- 毛超林,赵占银,马玉天,等,2005.松辽盆地南部岩性油藏特 征及勘探潜力.中国石油勘探,6:1-6.
- 强薇,李义连,文冬光,等,2006. 温室性气体地质处置研究进 展及其问题. 地质科技情报,25(2): 83-88.
- 单玄龙,胡金祥,任利军,等,2008.松辽盆地乾安地区青山口 组三段沉积微相特征.地质学报,82(1):65-71.
- 单衍胜,张林炎,2008. 松辽盆地南部长深气田深层火山岩储 集层特征及有利区预测. 石油地质与工程,22(5): 33-36.
- 王安辉,赵全军,2010.大情字井油田南部青三段沉积微相及 其含油性研究.石油天然气学报(江汉石油学院学报), 32(6):41-44.
- 王建功,王天奇,卫平生,等,2009. 松辽盆地青山口组三段底 界不整合面的发现及石油地质学意义. 地质学报,83 (1):78-88.
- 王永春,康伟力,毛超林,2007. 吉林探区油气勘探理论与实 践. 北京:石油工业出版社,4-135.
- 魏志平,毛超林,孙岩,等,2002.松辽盆地南部大情字井地区

油气成藏过程分析.石油勘探与开发,29(3):11-16.

- 巫润建,李国敏,黎明,等,2008. 松辽盆地咸含水层埋存 CO<sub>2</sub> 储存容量初步估算. 工程地质学报,17(1): 100-104.
- 席党鹏,李罡,万晓樵,等,2009. 松辽盆地东南区姚家组一嫩 江组一段地层特征与湖泊演变. 古生物学报,48(3): 556-568.
- 许志刚,2009. 松辽盆地南部大情字井地区 CO<sub>2</sub> 地质埋存体 地质格架及储层建模(博士毕业论文). 北京:中国科学 院地质与地球物理研究所,56-87.
- 许志刚,陈代钊,曾荣树,等,2009.我国吉林油田大情字井区 块 CO<sub>2</sub> 地下埋存试验区地质埋存格架.地质学报,83 (6):875-884.
- 徐威,苏小四,杜尚海,等,2011. 松辽盆地中央坳陷区深部咸 水层二氧化碳储存潜力评价及其不确定性分析. 第四 纪研究,31(3):483-485.
- 杨明达,杨铭辉,唐振兴,等,2003. 松辽盆地南部大情字井地 区油气分布控制因素分析. 石油实验地质,25(3): 252-256.
- 张大伟,陈发景,程刚,2006b.松辽盆地大情字井地区高台子 油层储集层孔隙结构的微观特征.石油与天然气地质, 27(5):668-674.
- 张大伟,贾庆素,2006a.大情字井地区青一段沉积微相分布 特征.断块油气田,13(6):1-4.
- 张亮,任韶然,王瑞和,等,2010. 南海西部盐水层 CO₂ 埋存 潜力评估. 岩土力学,31(4): 1238−1242.
- 张鑫,2009. 松辽盆地南部中浅层沉积演化与油气分布(博士 学位论文).青岛:中国海洋大学,75-79.
- 张喜,黄玉欣,朱文方,2011. 松辽盆地南部嫩江组沉积演化 特征. 长江大学学报(自然科学版),7(1):165-168.
- 张玉,王雅春,关晓强,等,2010a.大情字井地区青山口组二 段Ⅳ砂组和Ⅴ砂组沉积微相研究.石油物探,49(1): 68-78.
- 张玉,王雅春,张辉,等,2010b. 松辽盆地大情字井地区青二 段沉积微相与砂体特征. 特种油气藏,17(1):54-56.
- 章至杰,韩宝平,张月华,1995.水文地质学基础.北京:中国 矿业大学出版社,70.
- 邹才能,薛叔浩,赵文智,等,2004. 松辽盆地南部白垩系泉头 组一嫩江组沉积层序特征与地层一岩性油藏形成条 件.石油勘探与开发,31(2):16-19.