



CO₂ 深部咸水层封存选址的地质评价

曹默雷^{1,2)}, 陈建平^{1,2)}

1) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京, 100083;

2) 北京市国土资源信息研究开发重点实验室, 北京, 100083

内容提要:深部咸水层封存是目前最具前景的 CO₂ 地质封存方式。本文通过调研 CO₂ 地质封存相关文献, 对 CO₂ 咸水层封存选址地质评价依据进行分类, 总结咸水层封存涉及的定量研究方法并探讨目前 CO₂ 地质封存中的不确定性问题。主要认识有: ① CO₂ 咸水层封存选址的地质依据可根据在评价中的作用分为两类, 第一类是用于可行性评价的通用依据, 第二类是用于进一步筛选优选靶区的封存适宜性和安全性指标, 其中封存适宜性评价针对的是更加细致的储层特征(相较于可行性评价), 而安全性评价则集中在盖层适宜性、场地地震安全性、水文地质条件、地面场地地质条件、储层盖层空间分布和构造六个方面; ② 封存潜力评价方面, 大范围的可行性评价可首选资料要求较低的面积法进行封存潜力评价, 对小范围的优选靶区采取精度更高的容积法和包含更多封存机制的容量系数法; ③ 目前 CO₂ 地质封存中的不确定性问题主要在于相同依据在不同评价方面产生的不同影响、CO₂-水-岩反应对储集物性的影响、研究发现的特殊现象、多场耦合模拟研究不系统以及封存潜力计算中参数不确定问题。

关键词: CO₂; 咸水层封存; 地质依据; 储层; 定量研究; 不确定性

为缓解生态压力, 响应国家“碳排放”要求开展的 CO₂ 地质封存研究已经成为近几年地质、矿产勘探研究的重要内容(郭建强等, 2011; 熊敏瑞等, 2014)。可用于 CO₂ 地下储存的场所主要有枯竭油气藏、咸水含水层和不可开采的煤层(郭建强等, 2011; 李志伟, 2012; 秦长文等, 2012)。其中咸水层是指“不可利用”的深部盐水层(矿化度 3~50 g/L), 层内水中溶解着高浓度的盐类(盐度高于 10 g/L), 不适用于农业及人类生产生活使用。深部盐水层分布广、面积大, 储存 CO₂ 时间可达上百万年, 具有巨大的封存潜力(刁玉杰等, 2011; 李志伟, 2012; 孙亮等, 2012; 李海燕等, 2013)。咸水层封存通常要求 CO₂ 以超临界状态储存于地下, 因为通常情况下到达地表以下 800 m (依照地表 15℃, 地温梯度 2.5℃/100 m、地层压力系数为 1.0 推算得出) 即 CO₂ 的超临界点(压力 7.38 MPa, 临界温度 31.1℃) 时, 才能保持 CO₂ 储存的稳定性和安全性(刁玉杰

等, 2011; 藏雅琼, 2013), 因此, 储存 CO₂ 的咸水层埋藏深度一般应该 ≥ 800 m。同时, 在存储点附近必须有可供进行大规模 CO₂ 存储的优质储层, 储层之上必须有稳定的、区域性的盖层(或隔水层), 以防止 CO₂ 的直接泄漏(李志伟, 2012; 秦长文等, 2012)。CO₂ 地质封存机理可以分为两大类: 物理封存和化学封存。其中, 物理封存包括构造地层静态封存、束缚气封存和水动力封存; 化学封存包括溶解封存和矿化封存(郭建强等, 2011)。CO₂ 注入初期, 构造和地层圈闭起到主要作用, 随着时间的推移, 构造和水动力圈闭中的游离态的 CO₂ 逐渐减少, 取而代之的形式是束缚气封存和溶解封存, 同时矿化封存机理也逐渐开始发挥作用(图 1b)。最终, 经过上百万年的储存, 各个封存机理所贡献的份额基本持平(图 1c)。此外, CO₂ 注入后在封存层中发生的化学反应会对最终的封存量以及封存的安全性产生重要影响, 因此, 在展开 CO₂ 地质封存项目之

注: 本文为核工业北京地质研究院项目基于地质大数据分析的矿产预测关键技术研究项目(编号 73952020006)资助的成果。

收稿日期: 2021-09-29; 改回日期: 2022-02-20; 网络发表日期: 2022-03-31; 责任编辑: 张永双; 责任编辑: 潘静。

作者简介: 曹默雷, 男, 1994 年生。博士研究生, 从事成矿预测、CO₂ 地质封存相关的研究工作。E-mail: 1064712996@qq.com。通讯作者: 陈建平, 男, 1959 年生。教授, 博士生导师, 主要从事矿产资源定量预测评价和“3S”技术集成应用的教学与研究工作。E-mail: 3s@cugb.edu.cn。

引用本文: 曹默雷, 陈建平. 2022. CO₂ 深部咸水层封存选址的地质评价. 地质学报, 96(5): 1868~1882, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022034.
Cao Molei, Chen Jianping. 2022. The site selection geological evaluation of the CO₂ storage of the deep saline aquifer. Acta Geologica Sinica, 96(5): 1868~1882.

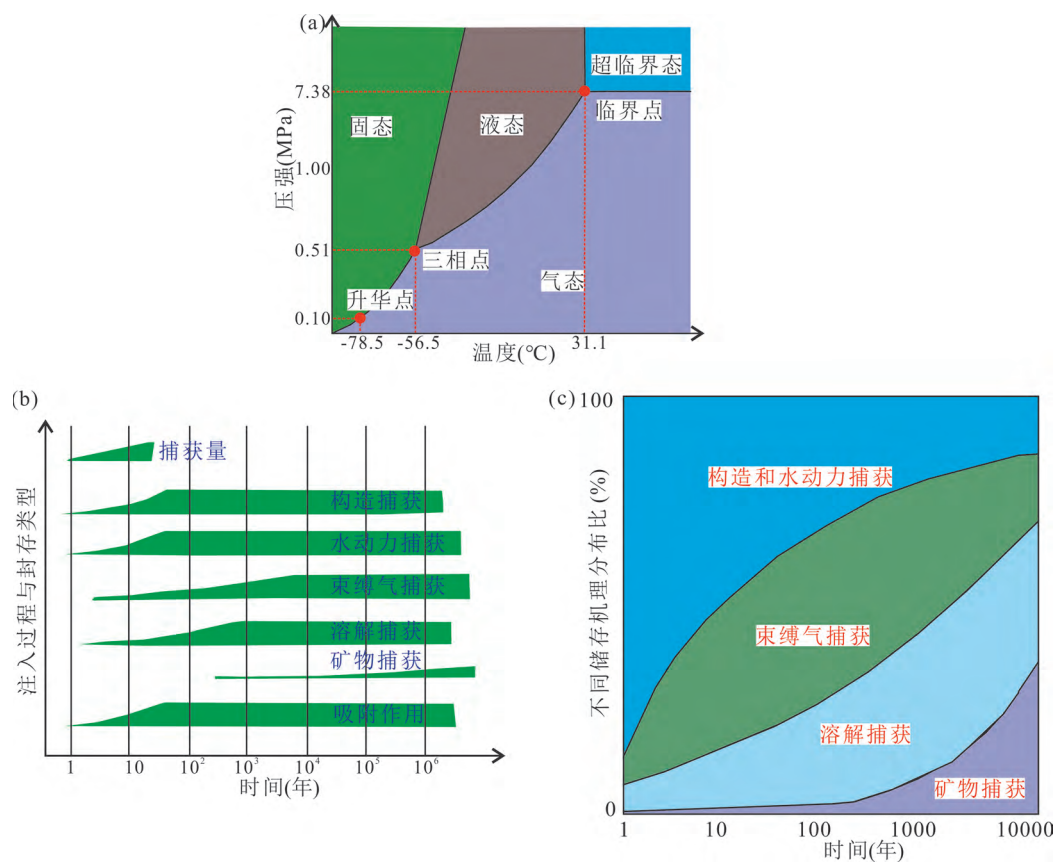


图 1 咸水层封存中 CO₂ 特点

Fig 1 Characteristics for CO₂ to do the storage of the saline aquifer

(a)—CO₂ 超临界状态;(b)—CO₂ 长期封存的不同方式;

(c)—各封存方式在 CO₂ 长期封存中的捕获贡献(据李志伟, 2012; 卜繁婷, 2015 修改)

(a)—The temperature and pressure of the supercritical CO₂; (b)—different capture ways of the long-term storage of the CO₂;

(c)—contributions of various capture ways in the long-term storage (modified from Li Zhiwei, 2012; Bu Fanting, 2015)

前,应进行 CO₂ 与水、岩石作用对岩层物性影响的实验研究,同时建立数值模拟方法,为部署大规模碳捕集、利用与封存(Carbon capture, utilization and storage, CCUS)项目提供基础(朱子涵等, 2011; 李义连等, 2012; 王广华等, 2013; 陈逸云等, 2020)。咸水层封存选址中的地质评价可分为大范围的可行性、选位和封存潜力初步评价以及通过更细致的封存适宜性和安全性评价实现的优质靶区评价两个步骤(陈昌照等, 2013; 孙腾民等, 2021)。前人在咸水层封存的选址评价方面已经开展了不少工作,张二勇等(2009)汇总了地下咸水层储存 CO₂ 的关键地质指标;孙亮等(2012)列出了 CO₂ 地质封存选址主要涉及到的地质特征及工程特性两大类的筛选标准;刁玉杰等(2011)参考 Bachu(2003)提出的深部咸水层 CO₂ 地质储存适宜性评价标准,初步建立了 CO₂ 地质储存安全性评价指标体系;刘妍(2014)和许文波(2017)运用目前已明确的选址条件

对靖边油田长 6 储层碳封存适宜性及盖层封闭性进行了评价。笔者认为目前的研究存在以下两个问题:一是缺少针对不同阶段评价依据的系统归纳,包括类别、概念、参数的实际数据等;二是在选址评价中加入对于 CO₂ 注入后长期封存效果的影响因素。近年来的 CO₂-水-岩反应研究(杨芳, 2010; 刘娜, 2011; 刁玉杰等, 2011; 杨国栋等, 2014; 陈逸云等, 2020)已经表明了储层、盖层初始矿物成分及岩石学特征对于注入后的溶解封存、矿物封存以及储层、盖层的物性变化都具有重要影响,而断层、地层力学性质的相关模拟(卜繁婷, 2015; 贺凯, 2019; 刘苗苗等, 2020)也反映了构造特征和机理对于 CO₂ 的运移和泄露影响,但目前的选址评价方案并没有充分吸收构造研究和 CO₂-水-岩反应研究中的认识。本文通过文献调研,在前人研究基础上系统地归纳了可行性评价所需的通用依据和进一步优质靶区筛选所

需的封存适宜性和安全性评价特征,列出了许多参数在目前研究中的量化标准,在封存适宜性评价中加入了会对 CO₂ 运移产生影响的构造特征以及会影响长期封存效果的初始矿物成分和岩石学特征,在安全性评价中补充了储层盖层空间分布和构造两个分类,之后根据封存量计算方法的特点确定了适合选址评价不同阶段的封存量计算方法,最后对目前 CO₂ 地质封存存在的不确定性问题进行了讨论,希望能够对 CO₂ 地质封存研究有所启示。

1 CO₂ 咸水层封存选址评价地质依据

1.1 用于可行性评价的通用依据

此类依据用于评价大范围研究区内进行 CO₂

咸水层封存的可行性,属于选址评价工作第一阶段(初步可行性评价)就应当考虑的评价依据。本文根据碳存储相关文献(李小春等,2006,2016;张森琦等,2010,2011;郭建强等,2011;秦长文等,2012;任韶然等,2012;霍传林,2014;刘志坚等,2017;喻英等,2017)以及碳存储选址评价、CO₂-水-岩反应模拟学位论文(刘群,2007;刘娜,2011;万玉玉,2012;赵锐锐,2012;刘妍,2014;吕苗,2014;田海龙,2014;贺凯,2019;郭兵,2020)对咸水层封存的可行性依据进行了汇总,包括大地构造、容积、储层、盖层、构造、区域稳定性和水文七个方面,具体条件及参数见表1。各因素都经过了许多实验的验证以及工程实践的检验,基本可以作为一个地区进行 CO₂ 咸水层封存的前提条件。

表 1 CO₂ 咸水层封存可行性评价依据

Table 1 General conditions for the feasibility evaluation of the CO₂ storage of the saline aquifer

依据	参数	有利于 CO ₂ 封存的要求
大地构造	无	稳定大陆板块内部或者近稳定大陆板块内部沉积盆地
容积条件	盆地面积 储层厚度	$\geq 2500 \text{ km}^2$ (霍传林, 2014) $\geq 20 \text{ m}$
构造特征	地层 褶皱 断层	产状平缓、稳定、具有侧向封闭性 背斜顶部 无断层、断层少或者断层封闭性强
储层条件	埋深	$> 800 \text{ m}$
	储集物性	孔隙度一般 $> 10\%$; 渗透率无绝对要求, 不同地区标准不同, 有些地区 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 已经算较好储层(刘妍, 2014; 许文波, 2017), 有些标准认为 $> 20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 可算作有利储层(霍传林, 2014), 也有比较高的标准认为理想储层应 $> 500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (张二勇等, 2009)
	储层压力	超过 CO ₂ 的临界值(7.5 MPa)
地热条件	地温梯度 现今热流	越低越有利
	地层温度	$\geq 35^\circ\text{C}$
区域稳定性	地震 火山 活动断层	地震、火山、活动断层不发育
上层覆盖不透气盖层 (渗透率 $< 10^{-5} \mu\text{m}^2$; 许文波, 2017)	盖层厚度	$> 150 \text{ m}$ (秦长文等, 2012)
水文地质条件	地层水类型 矿化度 水动力环境	NaHCO ₃ (赵锐锐, 2012); Cl-Ca-Na (卜繁婷, 2015); CaCl ₂ (许文波, 2017) 3~50 g/L (郭建强等, 2011) 稳定

1.2 优质靶区筛选中的封存适宜性和安全性评价指标

在确定一个地区 CO₂ 咸水层封存可行性之后,可以根据可行性评价的依据,初步圈定出适宜的存储区域,之后需要通过对封存适宜性和安全性的进一步评价筛选出优质靶区,其中封存适宜性的评价针对的是相较于可行性评价更加细致的储层特征,前者包括成岩作用、孔隙结构、初始矿物成分、水文、非均质程度、沉积环境、岩性、压力、构造及注入技术

要求等多方面,其中构造特征体现在储层内断层的位移、断层倾角、宽度、断层岩特征以及小断层发育程度对于流体运移的影响(卜繁婷, 2015; 贺凯, 2019);安全性评价则对应着盖层、水文、地震、场地地质安全、储层盖层分布和构造六个方面。封存适宜性评价具体要素由各文献中 CO₂ 封存应用实例以及相关数值模拟参数汇总得到,具体内容分类见表2,而安全性评价依据则是在刁玉杰等(2011)参考 Bachu(2003)深部咸水层 CO₂ 地质储存适宜性评

价标准建立的 CO₂ 地质储存安全性指标评价体系基础上,结合其他研究成果汇总而成,具体内容见表 3。刁玉杰等(2011)建立的评价体系分为盖层适宜性、场地地震安全性、水文地质条件、地面场地地质条件四个方面,本文在此基础上补充了几点认识,包括构造特征、储盖层空间分布对封存安全性造成的影响以及盖层适宜性评价中的盖层渗透率,构造特征产生的影响主要在于断层几何变化的地方(中继带、断层交叉处以及断层尖端)、褶皱曲率最大的区域和活动褶皱易形成裂缝以及断层封启性变化(不同时期、不同部位)造成的泄露风险(Caine et al., 1996; Childs et al., 2009; Eichhubl et al., 2009; Dockrill et al., 2010; 贺凯, 2019)。之前的评价体系中的盖层适宜性评价虽然已经涉及了断层和裂缝的发育程度,但并未

包括构造特征对于裂缝发育以及 CO₂ 运移的影响,本文补充构造特征一项也是为了弥补这一空缺;储盖层空间分布的影响主要体现在储集体展布和储层盖层组合形式两方面,储集体展布方向对于层状储集体封存安全性具有重要影响,CO₂ 会通过侧向运移至压力相对小的或构造高的位置,再通过渗透通道迁移至地表及大气中(许文波, 2017),储、盖层交界处有效应力变化及岩石变形最大,最易发生岩石断裂(刘苗苗等, 2020)。盖层-储层形式中,多层盖层-储层形式虽然会因为不易发现的小断层和裂缝加大泄漏风险,但也因为储层之上有多层盖层相隔减轻浮力与水动力对二氧化碳流动的影响,从而降低泄漏风险,单一盖层-储层形式盖层厚度大,但单一盖层一旦被二氧化碳突破,封存系统将完全失效(贺凯, 2019)。

表 2 砂岩 CO₂ 储层细致评价依据

Table 2 Conditions of sandstones reservoirs for the further evaluation mentioned in the literature and research case

依据	参数	当前认识
成岩作用	无	砂岩埋藏深度越大,成岩作用越强,物性越差(赵锐锐, 2012)
孔隙结构	类型 最大孔隙半径均值(μm)	中孔细喉适宜(吕苗, 2014) 优质储层 4.9;中等储层 0.9;较差储层 0.2(刘妍, 2014)
初始矿物成分	碎屑矿物	应占主要矿物含量;69%~82%(刘妍, 2014)
	黏土矿物	会降低储层孔隙度、渗透率
	矿物类型	石英砂岩中 CO ₂ 的矿物捕获潜力小,长石砂岩、岩屑砂岩和杂砂岩内 CO ₂ 的矿物捕获潜力大(刘娜, 2011)
	成分成熟度	成分成熟度相对高的砂岩矿物捕获潜力低于成分成熟度相对低的砂岩(刘娜, 2011)
	特征矿物	绿泥石含量(Moore et al., 2005;杨国栋等, 2014)、长石等非稳定矿物含量以及黏土类矿物(高岭石、伊利石、蒙脱石等)的沉淀作用均会对 CO ₂ 储存造成影响(Xu et al., 2004, 2005; Bachu, 2007; Bachu et al., 2007; Liu et al., 2011;朱子涵等, 2011; 万玉玉, 2012;王广华等, 2013;曲希玉等, 2015)
非均质程度(吕苗, 2014; 许文波, 2017)	层内非均质程度 层间非均质程度 平面非均质程度	渗透率变异系数高,非均质性强 泥岩夹层数多,非均质性强 孔隙度、渗透率平面分布
水文地质条件	盐度(质量分数)	10%(董建兴等, 2012);0.9%~6%(喻英等, 2017)
沉积环境	三角洲平原、滨湖相 (赵锐锐, 2012)	具体微相包括水下分流河道、分流尖湾、天然堤、决口扇等 (刘妍, 2014; 吕苗, 2014)
岩性	岩石类型 砂岩含量	粒度较粗、泥质、粉砂质含量低的碎屑岩更适合 不宜太低。64.5%(许文波, 2017);30%~70%(吕苗, 2014)
压力	压力梯度 排替压力	<12 kPa/m 较为适宜(许文波, 2017) 应低于 1 MPa(刘妍, 2014; 吕苗, 2014)
注入技术要求	沉积韵律	正韵律模型的注入量大于逆韵律模型(赵利昌等, 2012)
构造	断层的位移以及断层倾角、宽度 断层岩特征 小断层发育程度	会对流体运移造成影响(卜繁婷, 2015; 贺凯, 2019)

2 地质评价涉及的定量研究方法

CO₂ 咸水层封存评价中的定量研究主要包括

四个方面,分别是 CO₂ 封存量的计算、CO₂ 封存体三维地质建模、CO₂ 地质封存影响因素的数值模拟以及选址评价应用的数学方法。

表 3 封存安全性评价体系(据 Bachu, 2003; 刁玉杰等, 2011 修改)

Table 3 The evaluation system of the security of carbon geological storage (modified from Bachu, 2003; Diao Yujie et al., 2011)

分类	具体指标	评价标准/当前认识		
		好	中等	差
盖层适宜性	岩性	蒸发岩	泥质岩	页岩和致密灰岩
	单层厚度	>20 m	10~20 m	<10 m
	累计厚度	>300 m	150~300 m	<150 m
	分布连续性	好	一般	差
	力学稳定性	好	一般	差
	封气指数	>200	100~200	<100
	主力盖层之上的小盖层数量	多套	一套	无
地震安全性	断裂和裂缝的发育情况	有限的裂缝、断层	裂缝、断层发育中等	大裂缝、断层
	地震动峰值加速度	<0.1 g	0.1~0.15 g	>0.3 g
	场地地震安全性	高	中等	低
水文地质条件	25 km 范围内是否有活动断裂	否		是
	水动力作用	水力封闭作用	水力封堵作用	水力运移逸散作用
地面场地地质条件	崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的易发性	无	低易发	中-高易发
	是否在采矿塌陷区、岩溶塌陷区	否		是
	是否在地面沉降区	否		是
	是否在沙漠活动状况区	否		是
	是否在火山活动区	否		是
	是否低于江河湖泊、水库最高水位线或洪泛区	否		是
储盖层空间分布	储集体展布	CO ₂ 易运移至层状储集体压力相对小的或构造高的位置(许文波, 2017)		
		是否处于储、盖层交界处(有效应力变化及岩石变形最大,最易发生岩石断裂,增加泄露风险;刘苗苗等, 2020)	否	是
	盖层-储层组合形式	多层盖层-储层形式既可能加大泄漏风险,又可能降低泄漏风险(贺凯, 2019)		
		单一盖层-储层形式盖层厚度大,但单一盖层一旦被 CO ₂ 突破,封存系统将完全失效(贺凯, 2019)		
构造	是否位于断层几何变化的地方(中继带、断层交叉处以及断层尖端)	否		是
		否		是
		否		是
		否		是

2.1 CO₂ 封存量的计算

目前对于 CO₂ 封存量的计算方法主要有面积法、容积法、容量系数法、溶解度法等(唐蜜, 2014)。面积法是一种利用盆地面积、储存系数和覆盖系数来计算埋存量的方法,计算简单但准确性不是很高。相比之下,容积法以及在其基础之上形成的容量系数和溶解度法具有更高的精度,是目前广泛应用的计算方法。这三种方法的主要区别在于对 CO₂ 埋存机制的考虑。盐水层封存 CO₂ 的捕获机制可分为物理捕获和化学捕获 2 类。其中,物理捕获包括静态捕获(构造捕获和地层捕获)、束缚气捕获和水动力捕获;化学捕获包括溶解捕获和矿化捕获容积法主要考虑的是物理捕获中的静态捕获机制,容量系数法则充分考虑了束缚气、水动力以及化学捕获机制,溶解度法主要考虑溶解捕获机制,各方法计算公式见表 4。

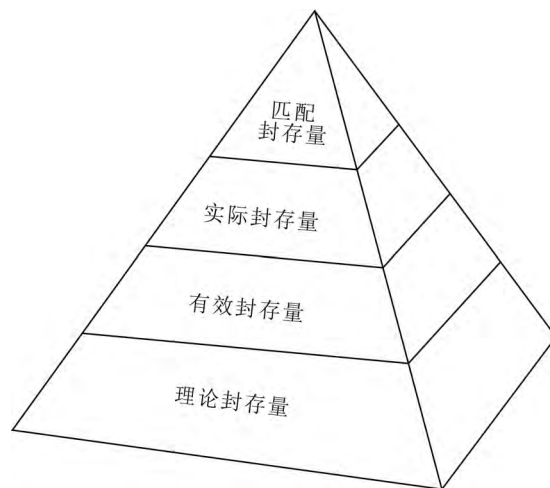
图 2 CO₂ 封存量层次类型(据吕苗, 2014 修改)Fig. 2 Different levels of CO₂ storage volume
(modified from Lü Miao, 2014)

表 4 咸水层 CO₂ 封存量计算公式(据刘延锋等, 2006; Bachu et al., 2007; 张炜等, 2008; 张亮等, 2010; 赵利昌等, 2012; 唐蜜, 2014 整理)

Table 4 Formulas for calculating CO₂ storage volumes of the saline aquifer (summarized according to Liu Yanfeng et al., 2006; Bachu et al., 2007; Zhang Wei et al., 2008; Zhang Liang et al., 2010; Zhao Lichang et al., 2012; Tang Mi, 2014)

方法	公式	符号含义
面积法	$V(\text{CO}_2) = A \times \text{ACF} \times \text{SF}$	A:盆地面积(m ²) ACF:盐水层覆盖系数 SF:储存系数(kg/m ²)
容积法	$V(\text{CO}_2) = A \times h \times \varphi \times (1 - S_{\text{wi}})$	S _{wi} :束缚水饱和度 A:盐水层面积(m ²) h:盐水层厚度(m) φ:孔隙度
容量系数法	$M(\text{CO}_2) = A \times D \times \varphi \times \rho_{\text{CO}_2} \times (C_{\text{eff}} + m) \times 10^{-3}$ $C_{\text{eff}} = (a + b) \times \left(S_{\text{g}}^{\text{struc}} + \frac{S_{\text{w}}^{\text{struc}} X_{\text{w}}^{\text{CO}_2} \rho_{\text{w}}}{\rho_{\text{CO}_2}} \right) + c X_{\text{w}}^{\text{CO}_2} \rho_{\text{w}} / \rho_{\text{CO}_2}$	C _{eff} :盐水层有效容量系数 S _g ^{struc} :构造圈闭控制的 CO ₂ 气体饱和度 S _w ^{struc} :构造圈闭控制的残余水饱和度 a:构造圈闭控制区内体积比例系数 b:残余饱和度圈闭控制区折算成构造圈闭控制区的体积比例系数 c:溶解圈闭所占体积比例系数 A:盐水层面积(m ²) D:盐水层厚度(m) m:矿物圈闭系数 X _w ^{CO₂} :CO ₂ 在盐水中的溶解度,质量分数 M(CO ₂):盐水层 CO ₂ 埋存容量(kg)
溶解度法	$M(\text{CO}_2) = A \times D \times \varphi \times \rho_{\text{CO}_2} \times X_{\text{w}}^{\text{CO}_2} \rho_{\text{w}} / \rho_{\text{CO}_2}$	同容量系数法

上述各公式计算的均为理论封存量,即假设储层中所有的孔隙都能够被自由相态的 CO₂ 占据用于封存,或者所有的地层水都以最大的饱和度溶解 CO₂ 情况下的封存量。若考虑实际情况,CO₂ 地质封存量可以分为四种层次类型(图 2),即理论封存量、有效封存量、实际封存量和匹配封存量,四项封存量中每一项都是其下部一项的子集,要在下部这一项基础上再增加新的要素进行计算(张炜等, 2008; 吕苗, 2014),其中除理论封存量之外的其余三项都要根据实际情况适当增加要素进行计算。

2.2 封存地质体三维建模与数值模拟

CO₂ 封存地质体的三维建模思路与油气储层建模类似,都是以井坐标、井轨迹、分层、地震解释剖面、地质特征(厚度、砂岩含量、孔隙度、渗透率等)等值线图等资料为基础,通常情况下是先通过确定性建模方法(各类插值方法)建立构造模型(地层顶底面、断层),之后再运用随机建模方法(分形、序贯高斯、序贯指示、截断高斯等),结合测井资料建立相模型(沉积相、岩石相),并在相模型基础上采用类似方法建立属性模型(孔隙度、渗透率、排替压力等)(图 3;曹龙, 2014; 杨艳林, 2014; 宫玉菲, 2020; 齐宁等, 2021)。上述三个步骤建立的模型对 CO₂ 地质

封存意义并不相同,构造模型决定了地质封存体地层格架与三维骨架特征;岩相模型不仅可以很好地指示地质封存体内砂体发育较好的区域,同时在纵向与侧向上也指明了储、盖层配置关系;属性模型除了定量地表征储层内非均质性,也指示了物性好的有利储存区(曹龙, 2014)。关于确定性建模中插值方法的选取以及随机建模中各类模拟方法的运用,应视具体地质特征以及实际操作效果而定,并无绝对标准。

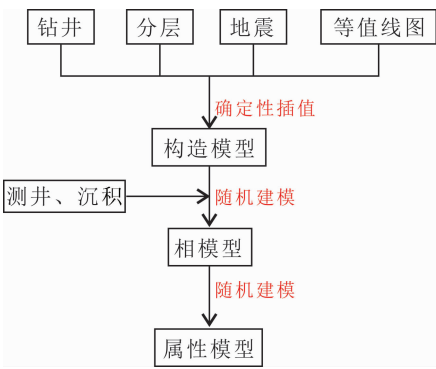


图 3 CO₂ 封存地质体三维建模普遍流程
Fig. 3 The process of 3D model construction of the CO₂ storage geological bodies

对 CO₂ 地质封存影响因素的数值模拟包括各因素对于 CO₂ 迁移、存储量造成的影响以及对各因素影响程度的比较,通过这些模拟产生的认识可以为咸水层封存的选址提供更多的参考依据。近年来通过对咸水层封存影响因素的模拟也发现了一些新的规律,比如地层倾角(靖晶, 2016)、储层内小断层(卜繁婷, 2015)、储层孔隙度、绿泥石含量(刘娜, 2011; 陈逸云等, 2020)等对于 CO₂ 迁移和封存的影响。此类数值模拟流程同其他类型的数值模拟类似,都是“数据准备-建模-调整变量、对照-分析结论”,有时也会在多组对照之后加入敏感性分析来专门研究某一因素产生的影响或者比较不同因素产生的影响程度(郑艳等, 2009; 杨芳, 2010)。数据准备阶段由于涉及影响因素较多,要求相对于其他类型模拟更高。

2.3 选址评价的数学方法

目前的 CO₂ 选址评价主体思路就是在对各个评价因素根据研究尺度分级之后,通过层次分析法确定权重,之后进行分级打分评价。对于各个评价因素的研究尺度分级其实已经有比较详细的标准(霍传林, 2014),此处不再详述。对于权重的确定,虽然以层次分析法为主,但有些研究中也与其他数学方法进行了结合,李伟等(2013a, 2013b)运用证据理论中的信息融合对碳存储选址方案进行了排序;王重卿(2012)通过三级模糊综合评价对三个目标区的安全风险指标进行了计算,得到其综合评价指数,之后根据最大隶属原则,筛选出了最合适目标区;罗伟等(2015)采用模糊综合评价法对松辽盆地中央坳陷区北部 5 个二级构造单元 CO₂ 埋存适宜性进行评价。

3 咸水层封存选址地质评价流程

根据之前章节总结的咸水层封存的地质评价依据和风险分析,对一个地区 CO₂ 咸水层封存的地质

评价可以分为两个步骤(图 4),第一步是大范围的可行性评价,即运用可行性评价依据在一个地区筛选出适宜咸水层封存的区块;第二步则是对于第一步筛选出的区块根据以封存适宜性和安全性为基准进行优劣比较,得到优质靶区,其中封存适宜性可通过更细致的储层特征(相对于可行性评价),安全性评价主要集中在在盖层、水文、地震、场地地质安全、储层盖层分布和构造六个方面。封存量的计算方面,应根据各地区资料的详细程度灵活选取计算方法,本文考虑到资料精度难与区域面积的匹配情况,认为第一步的可行性评价应采取面积法,而第二步的优选区封存量计算可以考虑精度更高的容积法,若是资料充足,可以考虑涵盖多种封存机制的容量系数法。

4 CO₂ 地质封存评价中的不确定性问题讨论

4.1 相同依据在多方面评价中产生的不确定性

CO₂ 封存是否成功取决于封存场所的特征描述,包括注入、封存量和封存的安全性(郭建强等, 2011; 李志伟, 2012; 秦长文等, 2012),研究发现有些地质依据对 CO₂ 注入、封存量和封存安全性会产生不同的影响,这就导致了选址评价中有些依据选择的不确定性。李志伟(2012)认为在盐水层总容积一定的条件下,深层盐水层的存储容量比浅层盐水层的存储容量小,且注入压力大,但是从长期封存的角度(尤其是安全性),深层盐水层比浅层盐水层更具价值(刘永忠等, 2010)。在实际选址评价中,往往只选一个最浅深度(一般为 800 m,有时也取 1000 m)作为可行性评价的指标,具体目标层位的选取还要参考具体的储层特征(刘妍, 2014; 吕苗, 2014; 许文波, 2017);渗透率变异系数是反映层内非均质性的指标之一,是评价储层宏观非均质性的最重要参数,表示围绕渗透率集中趋势的离散程度,

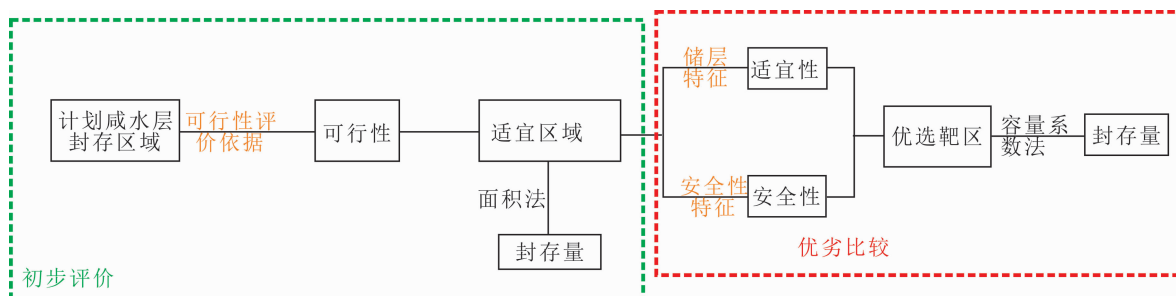


图 4 咸水层封存选址地质评价流程

Fig 4 The geological evaluation process of the site selection of the saline aquifer

变异系数越大,非均质程度越强。李志伟(2012)研究发现渗透率变异系数值较高时,地层属于低渗透较强非均质地层,CO₂ 在储层内部滞留时间较长,而不是很快地向上运移。这种情况下,CO₂ 存储量更多。渗透率变异系数值较低时,地层属于高渗透较强均质地层,CO₂ 更容易注入。层内非均质性在 CO₂ 封存的选址评价中虽然不是必须的可行性评价依据,但在资料充足的情况下也是重要的储层特征之一(吕苗, 2014; 许文波, 2017; 尚墨翰, 2021),其对注入和封存量产生的不同影响也会对选址评价造成困扰。

4.2 CO₂-水-岩反应对储集物性的影响

由数值模拟实验探究 CO₂-水-岩反应对于储层孔隙度、渗透率的影响是目前 CO₂ 地质封存研究的重要内容,当前较为普遍的认识是由长石等非稳定矿物、铁镁矿物的溶解以及黏土类矿物(高岭石、伊利石、蒙脱石等)的沉淀作用产生的方解石、白云石、铁白云石以及片钠铝石等固碳矿物的形成会降低储层渗透率(刘娜, 2011; 陈逸云等, 2020),但对于储层孔隙度的影响并不明确,或升高,或降低,许多研究认为随着时间的推移,矿物捕集逐渐增强,孔隙度会逐渐降低(刘娜, 2011)。由此可见,在具体某个时间段内 CO₂-水-岩反应对于储层孔隙度的影响其实并不明确,即使经历长时间反应后最终孔隙度与未注入 CO₂ 时相比会有所下降,其产生的原因可能也是多方面的(刘娜, 2011),未必就与储层中的形成固碳矿物的反应有关。因此,CO₂-水-岩反应对于储层孔隙度究竟会产生怎样的影响、造成孔隙度变化的原因有哪些,目前的研究尚未给出明确的结论。卜繁婷(2015)认为储层内部小断层既是重要的碳存储构造要素,也有可能增加泄露的风险,可见这也是一项双向性要素。

4.3 研究中存在的特殊现象

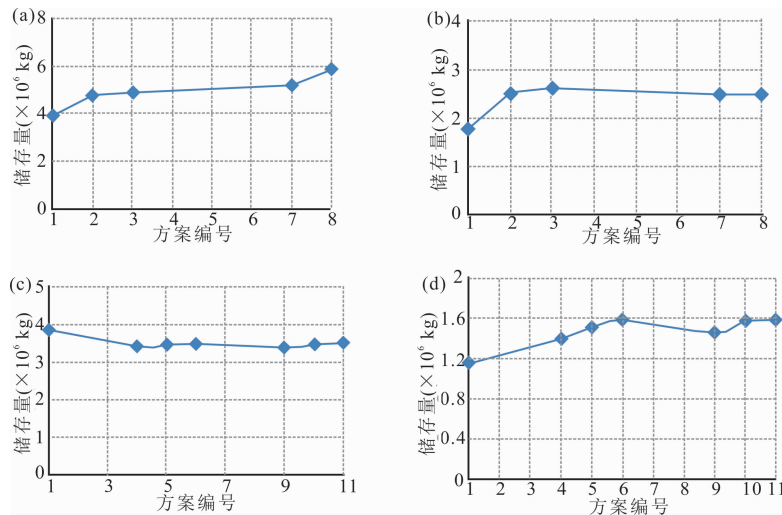
部分碳存储研究中产生认识虽然不具普遍性,还不能运用到具体的评价方案中,但其中发现的特殊现象仍然值得关注。储层内小断层断距一般在 10 m 左右、横向上延伸距离多半不超过 500 m 的断层,其在经过严格常规处理后的地震剖面上表现为微小错开或是同相轴扭曲、振幅突然变弱等形式(卜繁婷, 2015)。目前在深部咸水含水层 CO₂ 地质储存领域,断层研究多侧重于对其安全性的评价,储层内部的小断层一般不会造成 CO₂ 大规模泄漏,因此,关于储层内部小断层对 CO₂ 地质储存过程影响的研究较少。但这些断层其实也会对 CO₂ 封存的

存储量、安全性造成影响。卜繁婷(2015)通过对鄂尔多斯盆地石千峰组内部小型断层对 CO₂ 空间分布和存储量的模拟实验发现:当高渗透性断层区域的储量显著增加时,储层的整体储量也有显著增加的趋势。以注入后 100 a 时的超临界状态 CO₂ 存储量为例,高渗断层方案(表 5)相比于无断层方案存储量显著提升(图 5a)。此外,高渗透性断层也可促进储层内除断层以外其他区域的 CO₂ 储量增加(图 5b);低渗透性断层阻碍 CO₂ 迁移,会造成总储量减少和储存位置集中在断层前缘。低渗透性断层方案(表 5)与无断层方案相比,存储量明显降低(图 5c)。低渗透性断层方案前缘拦截的 CO₂ 量也更大(图 5d)。

表 5 不同实验方案对应的断层类型
Table 5 Fault types of different experimental schemes

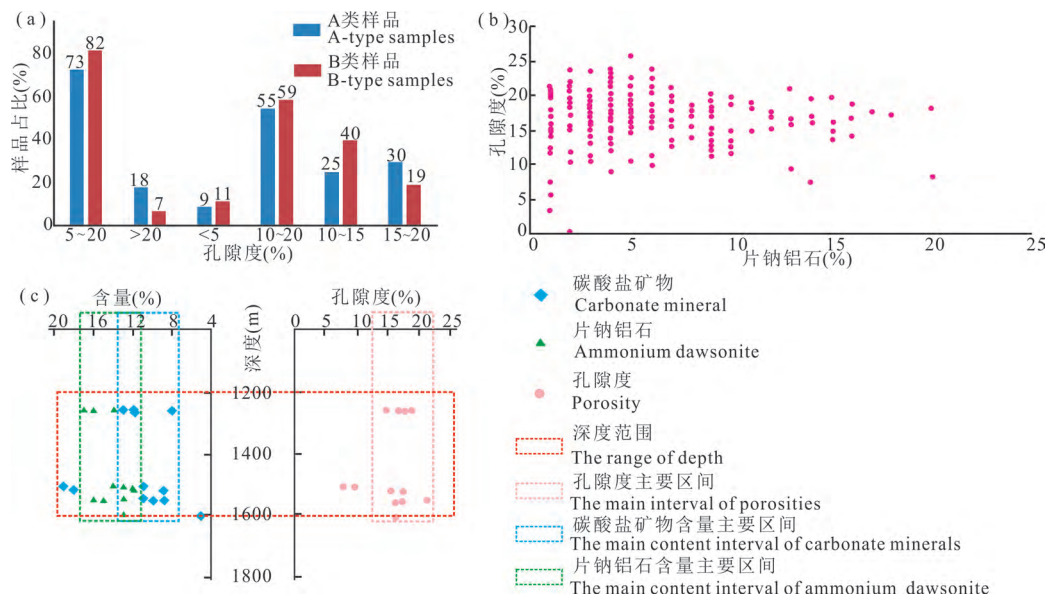
方案编号	断层类型
1	无断层
2, 3, 7, 8	高渗透性断层
4, 5, 6, 9, 10, 11	低渗透性断层

刘娜(2011)对松辽盆地南部红岗地区 CO₂ 注入后的含片钠铝石的砂岩(统称 A 类)与未注入 CO₂ 砂岩(统称 B 类)的相近深度段(A 类:埋深 910~2401 m, 2180 组数据;B 类:埋深 1195~2223 m, 831 组数据)岩石学特征进行了比较,其孔隙度各区间占总样本数的比值显示(图 6a):孔隙度 5%~20%的比例 B 类(0.82)比 A 类(0.73)多 9%,孔隙度高于 20%的比例 A 类(0.18)比 B 类多出 11%,孔隙度低于 5%的比例以及样本数量较多的 10%~20%的比例二者接近(0.09:0.11;0.55:0.59),而在 10%~20%区间内,10%~15%与 15%~20%二者对比情况分别为 0.25:0.4 和 0.3:0.19,互有长短,因此,从两类砂岩各孔隙度区间样本数量占比来看,两类砂岩的孔隙度高低很难比较,看不出 CO₂-水-岩反应对于储层孔隙度的影响规律。对片钠铝石含量与孔隙度关系的统计(图 6b)显示作为该地区储层主要固碳矿物的片钠铝石与孔隙度之间并没有很明显的正相关性,而研究区内某井位片钠铝石与孔隙度、埋深关系图则显示 1200~1600 m 埋深的片钠铝石含量、碳酸盐矿物含量、埋深都与孔隙度有一定程度的关联(图 5c),很难确定孔隙度究竟受哪项因素控制,这也说明了 CO₂ 注入后产生储层孔隙度变化的原因或者主要原因目前依然难以定论。

图5 储层内小断层对于 CO₂ 存储的影响Fig. 5 The impact of the CO₂ storage produced by the intra-reservoir small sized fault

(a) 含高渗透性断层储层内 CO₂ 含量(含断层); (b) 含高渗透性断层储层内 CO₂ 含量(不含断层); (c) 含低渗透性断层储层内 CO₂ 含量(含断层); (d) 断层前缘 CO₂ 拦截量(据卜繁婷, 2015 修改)

(a) —The CO₂ content of the reservoir with high-permeability faults (including the intra-faults CO₂ content); (b) —the CO₂ content of the reservoir with high-permeability faults (without the intra-faults CO₂ content); (c) —the CO₂ content of the reservoir with low-permeability faults (including the intra-faults CO₂ content); (d) —the CO₂ content of the front margin of faults (modified from Bu Fanting, 2015)

图6 松辽盆地红岗地区注入 CO₂ 砂岩样品与未注入 CO₂ 砂岩样品岩石学特征比较Fig. 6 The comparison of petrological characteristics between sandstones with CO₂ injection and sandstones without CO₂ injection (all samples are collected in the Honggang area of the Songliao basin)

(a) 不同孔隙度区间样品数量占比; (b) 注入 CO₂ 砂岩样品中片钠铝石含量与孔隙度之间的关系; (c) 不同深度片钠铝石含量、碳酸盐矿物含量与孔隙度之间的关系(据刘娜, 2011 修改)

(a) —Ratios of numbers of samples in different intervals of the porosity; (b) —the relationship between the content of the ammonium dawsonite and the porosity in sandstone samples with CO₂ injection; (c) —the relationship among the ammonium dawsonite content, the carbonate minerals content, and the porosity in different depths (modified from Liu Na, 2011)

4.4 多场耦合模拟中存在的的多不确定性

数值模拟方法的优势在于它能充分考虑各个化

学反应、力学变形过程间复杂的耦合关系,可直观有效地对地质模型进行数学分析,同时还可以对许多

室内实验产生的机理方面的认识进行多个角度的验证和分析(李小春等, 2016; 陈逸云等, 2020; 刘苗苗等, 2020)。CO₂ 咸水层封存则是一个复杂的热力学-流体力学-岩石力学-化学多场相互作用的过程(李小春等, 2016; 刘宁, 2018; 刘苗苗等, 2020), 各场之间相互作用、相互影响(图 7)。不过实际研究中很少会将以上四个场的影响都涉及到, 因为并不是所有的场都会对最终的模拟效果造成影响, 一般都是在流体力学和热力学参数的基础上, 通过化学场参数模拟 CO₂-水-岩反应、矿物捕集的影响或者结合岩石力学、应力场参数模拟 CO₂ 注入后储层、盖层力学特征的变化, 岩石力学场合化学场在多场耦合模拟很少兼顾, 这是由于 CO₂-水-岩反应的时间尺度较长而储层、盖层力学性质的变化主要集中在注入阶段的几十年中, 因此力学场和化学场之间往往不会互相干扰(姜玲, 2010; 刘苗苗等, 2020)。董建兴等(2012)在分析 CO₂-水-岩反应对于江汉盆地盖层的影响时采用了热力学场、渗流场和地球化学场的耦合, 刘苗苗等(2020)在对盖层力学完整性模拟的综述中则强调 CO₂ 注入的模拟实验往往以力学场、渗流场和热力学场的耦合为主。然而, 任何一种场本身也都是存在多种机理的, 但目前有关 CO₂ 注入后封存状态演变以及对于储层、盖层影响的数值模拟研究很难做到多种机理的兼顾(雷宏武等, 2015; 伍海清等, 2018; 刘苗苗等, 2020), 比如在已有的力学问题耦合效应数值模拟研究中, 有的单从流场角度分析储层封存的可行性, 研究了裂缝对于渗流场的影响, 而很少同时关注其对应力场的影响; 有的单从力学角度考虑盖层是否会失稳, 关注了 CO₂ 注入可能诱发的裂缝产生问题, 而较少关注裂缝产生后对渗流场的影响(刘苗苗等, 2020)。此外, 许多参数比如垂直方向渗透率、毛细管压力、残余气体饱和度、形变程度参数以及边界范围等的不确定性(郑艳等, 2009; 董建兴等, 2012; 郑菲等, 2014; 胡叶军等, 2016; 刘苗苗等, 2020)以及目前数值模拟领域的通用问题比如三维建模的粗化、概化(资料少、数据精度低的情况下建立对真实地址特征还原程度较低的简易三维模型)、数值分析的精准度、模拟的时间、效率、软件性能等问题也都会影响 CO₂ 地质封存相关的数值模拟效果(雷宏武等, 2014; 郑菲等, 2014; 刘苗苗等, 2020)。

4.5 封存潜力计算中的不确定性

封存潜力计算的不确定性主要在于其计算公式中参数的不确定性, 可分为两点。第一点是各计算

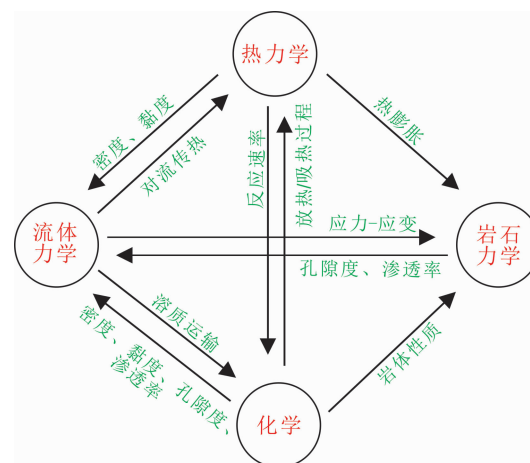


图 7 CO₂ 地质封存相关的数值模拟类型以及各类型之间的关系(据刘苗苗等, 2020 修改)

Fig 7 Numerical simulations which is related with the CO₂ geological storage and their relationships (modified from Liu Miaomiao et al., 2020)

公式中经常用以表征不同封存机制影响的存储效率因子和容量系数的不确定性, 存储效率因子是有效封存量与理想条件下理论封存量之间的比值, 用于矫正理想储层的厚度、面积、孔隙度与有效储层厚度、有效面积、有效孔隙度之间的差异, 受储层地质特征、储存机理、地球化学、压力、温度、相对渗透率等多因素的影响(刘廷等, 2021)。有效存储容量系数也涉及多种因素影响, 需要通过较多野外经验和数值模拟得到(张炜等, 2008; 张亮等, 2010; 赵利昌等, 2012; 陈昌照等, 2013; 唐蜜, 2014)。由此可见二者均存在一定程度的不确定性。另一点是各类地层参数的不确定性, 尤其是一些非均质性较强的层系和地区, 许多参数往往只取平均值进行计算, 这无疑也会增加封存潜力评价的不确定性(Goodman et al., 2013; 刘廷等, 2021)。

5 结论

(1) CO₂ 咸水层封存选址的地质依据可根据在评价中的作用分为两类, 第一类是可行性评价的通用依据, 包括大地构造、容积、储层、盖层、构造、区域稳定性和水文七个方面, 可实现选址评价的初步定位; 第二类是用于进一步筛选优选靶区的封存适宜性和安全性指标, 其中封存适宜性评价针对的是更加细致的储层特征(相较于可行性评价), 还应注重与 CO₂-水-岩反应和构造方面认识的结合, 而安全性评价则集中在盖层适宜性、场地地震安全性、水文地质条件、地面场地地质条件、储层盖层空间分布和

构造六个方面。

(2) 根据不同封存量计算方法的特点, 大范围的可行性评价可首选资料要求较低的面积法进行封存潜力评价, 对小范围的优选靶区采取精度更高的容积法和包含更多封存机制的容量系数法

(3) 目前 CO₂ 地质封存中的不确定性问题主要在于相同依据在不同评价方面产生的不同影响、CO₂-水-岩反应对储集物性的影响、研究发现的特殊现象、多场耦合模拟研究不系统以及封存潜力计算中参数不确定问题。

References

- Bachu S. 2003. Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO₂ in geological media. *Environmental Geology*, 44(3): 277~289.
- Bachu S. 2007. Carbon dioxide storage capacity in uneconomic coal beds in Alberta, Canada: methodology, potential and site identification. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1(3): 374~385.
- Bachu S, Bonijoly D, Bradshaw J, Burruss R, Holloway S, Christensen N P, Mathiaseng O M. 2007. CO₂ storage capacity estimation: methodology and gaps. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1(4): 430~443.
- Bu Fanting. 2015. Influence of minor faults within the reservoir on CO₂ spatial distribution and storage. Master thesis of Jinlin University (in Chinese with English abstract).
- Caine J S, Evans J P, Foster C B. 1996. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24(11): 1025~1028.
- Cao Long. 2014. Modeling of the CO₂ storage body in the JT203 well area in Qiaojiawa of Jingbian oilfield. Master thesis of North West University (in Chinese with English abstract).
- Chen Changzhao, Wang Wanfu, Chen Hongkun, Hou Yue, Wang Xiaoqiang. 2013. The research status and issues of carbon dioxide sequestration in saline aquifer. *Environmental Protection of Oil and Gas Fields*, 23(3): 1~5 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yiyun, Feng Tao, Yu Hongyan, Chen Hao, Yin Shuguo. 2020. Review and prospects of the CO₂-water-shale interactions. *Guangzhou Chemistry*, 45(2): 53~63 (in Chinese with English abstract).
- Childs C, Manzocchi T, Walsh J J, Bonson C G, Nicol A, Schopfer M P J. 2009. A geometric model of fault zone and fault rock thickness variations. *Journal of Structural Geology*, 31(2): 117~127.
- Diao Yujie, Zhang Senqi, Guo Jianqiang, Li Xufeng, Zhang Hui. 2011. Geological safety evaluation method for CO₂ geological storage in deep saline aquifer. *Geology in China*, 38(3): 786~792 (in Chinese with English abstract).
- Dockrill B, Shipton Z K. 2009. Structural controls on leakage from a natural CO₂ geologic storage site: central Utah, USA. *Journal of Structural Geology*, 32(11): 1768~1782.
- Dong Jianxing, Li Yilian, Yang Guodong, Ke Yibing, Wu Ronghua. 2012. Numerical Simulation of CO₂-water-rock interaction impact on caprock permeability. *Geological Science and Technology Information*, 31(1): 115~121 (in Chinese with English abstract).
- Eichhubl P, Davatz N C, Becker S P. 2009. Structural and diagenetic control of fluid migration and cementation along the Moab fault, Utah. *AAPG Bulletin*, 93(5): 653~681.
- Gong Yufei. 2020. Study on analysis of physical parameters and accurate modeling of CO₂ storage geology. Master thesis of Hunan University of Science and Technology (in Chinese with English abstract).
- Goodman A, Bromhal G, Strazisar B, Rodosta T, Guthrie W F, Allen D, Guthrie G. Comparison of methods for geologic storage of carbon dioxide in saline formations. 2013. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 18: 329~342.
- Goodman A, Sanguinito S, Tkach M, Natesakhawat S, Kutchko B, Fazio J, Cvetica P. 2019. Investigating the role of water on CO₂-Utica shale interactions for carbon storage and shale gas extraction activities-evidence for pore scale alterations. *Fuel*, 242: 744~755.
- Guo Bing. 2020. Study on thesealing ability evolution of caprock system in the process of CO₂ geological storage: a case study of Ziniquanzi Formation mudstone caprock in Xinjiang Junggar basin. Master thesis of Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Guo Jianqiang, Zhang Senqi, Diao Yujie, Li Xufeng, Zhang Hui, Fan Jijiao. 2011. Site selection method of CO₂ geological storage in deep saline aquifers. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(4): 1084~1091 (in Chinese with English abstract).
- He Kai. 2019. Research on integrity evolution and leakage of CO₂ geological storage system. Master thesis of Northeast Petroleum University (in Chinese with English abstract).
- Hu Yejun, Wang Wei, Ren Jie, Wang Yuan. 2016. Effect of CO₂ geological sequestration in deep saline aquifer on formation pressure environment. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 44(6): 512~518 (in Chinese with English abstract).
- Huo Chuanlin. 2014. Study on the potential evaluation and the storage areas of the carbon dioxide seabed storage in offshore China. Doctoral dissertation of Dalian Maritime University (in Chinese with English abstract).
- Jiang Ling. 2010. Research on the environmental impact of carbon dioxide geological sequestration on groundwater, a case study of Jiangnan basin. Master thesis of China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese with English abstract).
- Jing Jing. 2016. Influence of formation dip on CO₂ migration and storage amount in reservoir. Master thesis of Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Lei Hongwu, Li Jiaqi, Xu Tianfu, Wang Fugang, Shi Yan. 2014. Analysis effect and extent determination of boundary for numerical simulation of CO₂ geologic sequestration. *Journal of Chongqing University*, 37(3): 77~86 (in Chinese with English abstract).
- Lei Hongwu, Li Jiaqi, Xu Tianfu, Wang Fugang. 2015. Numerical simulation of coupled thermal-hydrodynamic-mechanical (THM) process for CO₂ geological sequestration in deep saline aquifers at Ordos basin, China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 45(2): 552~563 (in Chinese with English abstract).
- Li Haiyan, Peng Shimi, Xu Mingyang, Luo Chao, Gao Yang. 2013. CO₂ storage mechanism in deep saline aquifers. *Science & Technology Review*, 31(2): 72~79 (in Chinese with English abstract).
- Li Wei, Zhang Hongtu. 2013a. Study on carbon storage sitting from the view of uncertainty theory-based on evidence theory. *Resource Development & Market*, 29(11): 1148~1150+1159 (in Chinese with English abstract).
- Li Wei, Zhang Hongtu. 2013b. A study on carbon storage siting based on evidence theory. *Science & Technology Progress and Policy*, 30(23): 100~103 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaochun, Liu Yanfeng, Bai Bing, Fang Zhiming. 2006. Ranking and screening of CO₂ saline aquifer storage zones in China. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(5): 963~968 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaochun, Yuan Wei, Bai Bing. 2016. A review of numerical simulation methods for geomechanical problems induced by CO₂ geological storage. *Rock and Soil Mechanics*, 37(6): 1762~

- 1772 (in Chinese with English abstract).
- Li Yilian, Fang Qi, Ke Yibing, Dong Jianxing, Yang Guodong, Ma Xin. 2012. Effect of high salinity on CO₂ geological storage: a case study of Qianjiang depression in Jainghan basin. *Earth Science-Journal of China University of Geoscience*, 37(2): 283~288 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhiwei. 2012. The analysis and control of long-term stability of the CO₂ geological sequestration of salt water layer. Master thesis of Beijing Jiaotong University (in Chinese with English abstract).
- Liu Miaomiao, Meng Lingdong, Wang Haixue, Wu Tong. 2020. Review on mechanical integrity simulation of caprock in the geological storage of CO₂. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 27(2): 8~15 (in Chinese with English abstract).
- Liu N, Liu L, Qu X Y, Yang H D, Wang L J, Zhao S. 2011. Genesis of the Quthigene carbonate minerals in upper Cretaceous reservoir, Honggang anticline, Songliao basin: a natural analogue for mineral trapping of natural CO₂ storage. *Sedimentary Geology*, 237(3-4): 166~178.
- Liu Na. 2011. Mineral trapping capacity estimation of CO₂ in sandstones: constraints from the dawsonite-bearing sandstone in Honggang, southern part of Songliao basin. Doctoral dissertation of Jinlin University (in Chinese with English abstract).
- Liu Ning. 2018. Study on fluids transportation and water-rock interactions of CO₂ geological storage in sandstone reservoirs in continental sedimentary basins. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Wuhan) (in Chinese with English abstract).
- Liu Qun. 2007. Effect of the injection of CO₂ on diagenesis and physical properties of reservoir in Bayatala tectonic zone. Master thesis of Jinlin University (in Chinese with English abstract).
- Liu Ting, Ma Xin, Diao Yujie, Jin Xiaobin, Fu Jie, Zhang Chenglong. 2021. Research status of CO₂ geological storage potential evaluation methods at home and abroad. *Geological Survey of China*, 8(4): 101~108 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yan. 2014. Geological assessment symbols and log responses of CO₂ geologic sequestration body in Jingbina Qiaojiawa region. Master thesis of North West University (in Chinese with English abstract).
- Liu Yanfeng, Li Xiaochun, Fang Zhiming, Bai Bing. 2006. Preliminary estimation of CO₂ storage capacity in gas fields in China. *Rock and Soil Mechanics*, 27(12): 2277~2281 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongzhong, Huang Biwu, Wang Le. 2010. Characteristics of injection pressure and saturation distributions of supercritical CO₂ injecting into heterogeneous saline aquifers. *CIESC Journal*, 61(1): 32~42 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhijian, Shi Jiangong, Zhang Yi. 2017. Recent advances in storage technology of carbon dioxide. *Sino-Global Energy*, 22(3): 1~9.
- Luo Wei, Zhang Yang, Liu Ning, Cheng Jianmei. 2015. Assessment of site suitability and the capacity of CO₂ storage in deep aquifer in the northern central depression of Songliao basin. *Safety and Environmental Engineering*, 22(5): 52~58 (in Chinese with English abstract).
- Lü Miao. 2014. The characteristic and potential evaluation of the CO₂ storage layer in the Wuqi area, Ordos basin. Master thesis of Northwest University (in Chinese with English abstract).
- Moore J, Adams M, Allis R, Lutz S, Rauzi S. 2005. Mineralogical and geochemical consequences of the long-term presence of CO₂ in natural reservoirs: an example from the Springerville-St. Johns filed, Arizona, and New Mexico, USA. *Chemical Geology*, 217(3): 365~385.
- Qi Ning, Xue Haitao, Lu Shuangfang, Yang Jinxiu, Lu Mingyue, Xia Ying, Cao Yixin, Muhammad S, Rayon A. 2021. Analyse on main controlling factors of Surennuor CO₂ gas reservoir in Wuertun Sag. *Journal of Northeast Petroleum University*, 45(3): 22~31+43 (in Chinese with English abstract).
- Qin Changwen, Xiao Gang, Wang Jianfeng, Liu Yinghong. 2012. A Review of CO₂ storage technology and perspective of CO₂ storage in the nearshore area of South China. *Marine Geology Frontiers*, 28(9): 40~45 (in Chinese with English abstract).
- Qu Xiyu, Liu Zhen, Gao Yuan, Chen Xiu, Yu Qiang. 2015. The influence and formation environment of chlorite coatings in the clastic rock. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(4): 786~794 (in Chinese with English abstract).
- Ren Shaoran, Ren Bo, Li Yongzhao, Zhang Liang, Kang Wanli, Liu Yuncheng, Chen Guoli, Zhang Hua. 2012. Monitoring techniques of CO₂ geological storage and its application analysis. *Journal of China University of Petroleum*, 36(1): 106~111 (in Chinese with English abstract).
- Shang Mohan, Zhao Xiangyuan, Zeng Daqian, You Yuchun. 2021. Research progress on heterogeneity of deep marine carbonate reservoirs. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1359.TE.20210825.1524.006.html> (in Chinese with English abstract).
- Sun Liang, Chen Wenying. 2012. A review of selection criteria for the geological sequestration of CO₂. *Ecological Economy*, (7): 33~38+46.
- Sun Tengmin, Liu Shiqi, Wang Tao. 2021. Research advances on evaluation of CO₂ geological storage potential in China. *Coal Science and Technology*, 49(11): 10~20 (in Chinese with English abstract).
- Tang Mi. 2014. The mechanism and numerical simulation of the CO₂ storage of the saline aquifer. Master thesis of Southwest Petroleum University (in Chinese with English abstract).
- Tian Hailong. 2014. Impacts of CO₂-brine-rock interaction on the caprock sealing efficiency: a case study of Shiqianfeng Formation mudstone caprock in Ordos basin. Doctoral dissertation of Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Wan Yuyu. 2012. Migration and transformation of CO₂ in CO₂ geological sequestration process of Shiqianfeng saline aquifers in Ordos basin. Doctoral dissertation of Jinlin University (in Chinese with English abstract).
- Wang Chongqing. 2012. Study on evaluation method for safety risk of CO₂ geological storage. Master thesis of North China Electric Power University (in Chinese with English abstract).
- Wang Guanghua, Zhao Jing, Zhang Fengjun, Tao Yi, Yang Xiaoying, Wang Huaiyuan. 2013. Interactions of CO₂-brine-rock in sandstone reservoir. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 44(3): 1167~1173 (in Chinese with English abstract).
- Wu Haiqing, Bai Bing, Li Xiaochun, Liu Mingze, He Yuanyuan. 2018. Analytical model of fluid pressure evolution in the reservoir for CO₂ geological storage. *Rock and Soil Mechanics*, 39(6): 2099~2105 + 2114 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Minrui. 2014. The Coping strategies of China's energy structure adjustment and energy law. *Ecological Economy*, 30(3): 103~108 (in Chinese with English abstract).
- Xu T F, APPs J A, Pruess K. 2004. Numerical simulation of CO₂ disposal by mineral trapping in deep aquifers. *Applied Geochemistry*, 19(6): 918~936.
- Xu T F, APPs J A, Pruess K. 2005. Mineral sequestration of carbon dioxide in a sandstone-shale system. *Chemical Geology*, 217(3-4): 295~318.
- Xu Wenbo. 2017. Geological assessment and risk analysis in CO₂ geological sequestration-an example from CO₂ testing area at the Jingbian Oil field. Doctoral dissertation of Jinlin University (in Chinese with English abstract).
- Yang Fang. 2010. Mechanisms and geological modeling of CO₂ sequestration in saline aquifers. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).

- Yang Guodong, Li Yilian, Ma Xin, Dong Jianxing. 2014. Effect of chlorite on CO₂-water-rock interaction. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences (Beijing)*, 39(4): 462~472 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yanlin. 2014. The implementation technology of CO₂ geological storage in complex geological structure and applying it to Ordos basin. Doctoral dissertation of Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Yu Ying, Li Yilian, Yang Guodong, Liu Danqing, Jiang Fengcheng, Yang Sen. 2017. Influence of reservoir physical parameters on the long-term CO₂ storage capacity. *Safety and Environmental Engineering*, 24(5): 75~83+89 (in Chinese with English abstract).
- Zang Yaqiong. 2013. Analysis of CO₂ geological sequestration potential of Chinese petroliferous basins. Master thesis of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Zhang Eryong, Li Xufeng, He Jin, Zhang Fucun. 2009. Key techniques research of CO₂ storage in salinity aquifer. *Ground Water*, 31(3): 15~19.
- Zhang Liang, Ren Shaoran, Wang Ruihe, Yi Ping, Mi Honggang, Liu Junting. 2010. Estimation of CO₂ 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 Senqi, Diao Yujie, Cheng Xuxue, Zhang Xiaojuan, Zhang Yang, Zheng Baofeng, Zhao Xueliang. 2010. CO₂ geological storage leakage routes and environment monitoring. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 32(6): 1251~1261 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Senqi, Guo Jianqiang, Diao Yujie, Zhang Hui, Jia Xiaofeng, Zhang Yang. 2011. Technical method for selection of CO₂ geological storage project sites in deep saline aquifers. *Geology in China*, 38(6): 1640~1651 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Li Yilian, Zheng Yan, Jiang Ling, Qiu Gengbiao. 2008. CO₂ storage capacity estimation in geological sequestration: issues and research progress. *Advances in Earth Science*, 23(10): 1061~1069 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Lichang, Wang Tao. 2012. Numerical simulation of influencing factors of CO₂ storage in saline aquifer. *Science & Technology Review*, 30(31): 39~42 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ruirui. 2012. Mechanisms of trapping CO₂ in abnormal-pressured continental sedimentary basin and the effects of large-scale CO₂ storage. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese with English abstract).
- Zheng Fei, Shi Xiaoqing, Wu Jichun, Zhao Liang, Chen Yang. 2014. Global parametric sensibility analysis of numerical simulation for CO₂ geological sequestration in saline aquifers; a case study of Yancheng Formation in Subei basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(1): 310~318 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yan, Chen Shengli, Zhang Wei, Xiong Peng, Jiang Ling, Qiu Gengbiao, Wang Hai. 2009. Numerical simulation on geological storage of carbon dioxide in Jiangling depression, Jiangnan basin, China. *Geological Science and Technology Information*, 28(4): 75~82 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Zihan, Li Mingyuan, Lin Meiqin, Peng Bo, Sun Liang. 2011. Review of the CO₂-water-rock interaction in reservoir. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 30(1): 104~112 (in Chinese with English abstract).
- 模. 西北大学硕士学位论文.
- 陈昌照, 王万福, 陈宏坤, 侯岳, 王小强. 2013. 二氧化碳咸水层封存的研究现状和问题. *油气田环境保护*, 23(3): 1~5+73.
- 陈逸云, 冯涛, 喻红艳, 陈浩, 尹书郭. 2020. CO₂-水-页岩相互作用的研究现状及展望. *广州化学*, 45(2): 53~63.
- 刁玉杰, 张森琦, 郭建强, 李旭峰, 张徽. 2011. 深部咸水层 CO₂ 地质储存地质安全性评价方法研究. *中国地质*, 38(3): 786~792.
- 董建兴, 李义连, 杨国栋, 柯怡兵, 武荣华. 2012. CO₂-水-岩相互作用对盖层渗透率影响的数值模拟. *地质科技情报*, 31(1): 115~121.
- 宫玉菲. 2020. CO₂ 封存物性参数分析及地质精准建模研究. 湖南科技大学硕士学位论文.
- 郭兵. 2020. CO₂ 地质封存过程中盖层系统的封闭性演化研究. 吉林大学硕士学位论文.
- 郭建强, 张森琦, 刁玉杰, 李旭峰, 张徽, 范基蛟. 2011. 深部咸水层 CO₂ 地质储存工程场地选址技术方法. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(4): 1084~1091.
- 贺凯. 2019. CO₂ 地质封存系统完整性演化及其泄漏研究. 东北石油大学硕士学位论文.
- 胡叶军, 王蔚, 任杰, 王媛. 2016. 深部咸水层 CO₂ 地质封存对地层压力环境的影响. *河海大学学报(自然科学版)*, 44(6): 512~518.
- 霍传林. 2014. 我国近海二氧化碳海底封存潜力评估和封存区域研究. 大连海事大学博士学位论文.
- 姜玲. 2010. CO₂ 地质封存对地下水的环境影响研究. 中国地质大学硕士学位论文.
- 靖晶. 2016. 地层倾角对 CO₂ 运移与封存量的影响研究. 吉林大学硕士学位论文.
- 雷宏武, 李佳琦, 许天福, 王福刚, 石岩. 2014. 二氧化碳地质储存数值模拟中边界的影响分析和范围确定. *重庆大学学报*, 37(3): 77~86.
- 雷宏武, 李佳琦, 许天福, 王福刚. 2015. 鄂尔多斯盆地深部咸水层二氧化碳地质储存热-水动力-力学 (THM) 耦合过程数值模拟. *吉林大学学报(地球科学版)*, 45(2): 552~563.
- 李海燕, 彭仕宓, 许明阳, 罗超, 高阳. 2013. CO₂ 在深部咸水层中的埋存机制研究进展. *科技导报*, 31(2): 72~79.
- 李伟, 张宏图. 2013a. 不确定理论视角下的碳存储选址研究——基于证据理论. *资源开发与市场*, 29(11): 1148~1150 + 1159.
- 李伟, 张宏图. 2013b. 基于证据理论的碳存储选址研究. *科技进步与对策*, 30(23): 100~103.
- 李小春, 刘延锋, 白冰, 方志明. 2006. 中国深部咸水含水层 CO₂ 储存优先区域选择. *岩石力学与工程学报*, 25(5): 963~968.
- 李小春, 袁维, 白冰. 2016. CO₂ 地质封存力学问题的数值模拟方法综述. *岩土力学*, 37(6): 1762~1772.
- 李义连, 房琦, 柯怡兵, 董建兴, 杨国栋, 马鑫. 2012. 高盐度卤水对 CO₂ 地质封存的影响: 以江汉盆地潜江凹陷为例. *地球科学(中国地质大学学报)*, 37(2): 283~288.
- 李志伟. 2012. 咸水层 CO₂ 地质封存的长期稳定性分析及控制. 北京交通大学硕士学位论文.
- 刘苗苗, 孟令东, 王海学, 吴桐. 2020. 二氧化碳地质封存中盖层力学完整性数值模拟研究综述. *特种油气藏*, 27(2): 8~15.
- 刘娜. 2011. 砂岩对 CO₂ 的矿物捕获能力. 吉林大学博士学位论文.
- 刘宁. 2018. 陆相沉积盆地砂岩储层 CO₂ 地质封存流体运移和水岩相互作用研究. 中国地质大学(武汉)博士学位论文.

参 考 文 献

- 卜繁婷. 2015. 储层内部小断层对 CO₂ 空间分布及储存量的影响研究. 吉林大学硕士学位论文.
- 曹龙. 2014. 靖边乔家洼 JT203 井区 CO₂ 地质封存体的三维地质建

- 刘群. 2007. 巴彦塔拉构造带 CO₂ 注入对储集砂岩成岩作用及储层物性的影响. 吉林大学硕士学位论文.
- 刘廷, 马鑫, 刁玉杰, 金晓琳, 付杰, 张成龙. 2021. 国内外 CO₂ 地质封存潜力评价方法研究现状. 中国地质调查, 8(4):101~108.
- 刘延锋, 李小春, 方志明, 白冰. 2006. 中国天然气田 CO₂ 储存容量初步评估. 岩土力学, 27(12):2277~2281.
- 刘妍. 2014. 靖边乔家洼地区 CO₂ 封存体的地质评价标志与测井响应特征. 西北大学硕士学位论文.
- 刘永忠, 黄必武, 王乐. 2010. 非均质多孔盐水中超临界 CO₂ 的注入压力与饱和度分布特性. 化工学报, 61(1):32~42.
- 刘志坚, 史建公, 张毅. 2017. 二氧化碳储存技术研究进展. 中外能源, 22(3):1~9.
- 罗伟, 张洋, 刘宁, 成建梅. 2015. 松辽盆地中央坳陷区北部咸水层 CO₂ 储存场地适宜性评价与储量计算. 安全与环境工程, 22(5):52~58.
- 吕苗. 2014. 鄂尔多斯盆地吴起地区某区块长 4+5 二氧化碳封存层特征及潜力评估. 西北大学硕士学位论文.
- 齐宁, 薛海涛, 卢双舫, 杨金秀, 卢明月, 夏紫, 曹怿昕, Muhammad Saqib, Rayon Abrams. 2021. 乌尔逊凹陷苏仁诺尔 CO₂ 气藏主控因素分析. 东北石油大学学报, 45(3): 22~31+43.
- 秦长文, 肖钢, 王建丰, 柳迎红. 2012. CO₂ 地质封存技术及中国南方近海 CO₂ 封存的前景. 海洋地质前沿, 28(9):40~45.
- 曲希玉, 刘珍, 高媛, 陈修, 于强. 2015. 绿泥石包壳对碎屑岩储层物性的影响及其形成环境——以鄂尔多斯盆地大牛地气田上古生界为例. 沉积学报, 33(4):786~794.
- 任韶然, 任博, 李永钊, 张亮, 康万利, 刘运成, 陈国利, 张华. 2012. CO₂ 地质埋存监测技术及其应用分析. 中国石油大学学报(自然科学版), 36(1):106~111.
- 尚墨翰, 赵向原, 曾大乾, 游瑜春. 2021. 深层海相碳酸盐岩储层非均质性研究进展. 油气地质与采收率. <https://doi.org/10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2021.05.004>.
- 孙亮, 陈文颖. 2012. CO₂ 地质封存选址标准研究. 生态经济, (7): 33~38+46.
- 孙腾民, 刘世奇, 汪涛. 2021. 中国二氧化碳地质封存潜力评价研究进展. 煤炭科学技术, 49(11): 10~20.
- 唐蜜. 2014. 地下盐水中 CO₂ 埋存机理及数值模拟研究. 西南石油大学硕士学位论文.
- 田海龙. 2014. CO₂-咸水-岩相互作用对盖层封闭性影响研究. 吉林大学博士学位论文.
- 王玉玉. 2012. 鄂尔多斯盆地石千峰组咸水层 CO₂ 地质储存中 CO₂ 的迁移转化特征. 吉林大学博士学位论文.
- 王广华, 赵静, 张凤君, 陶怡, 杨潇瀛, 王怀远. 2013. 砂岩储层中 CO₂-地层水-岩石的相互作用. 中南大学学报(自然科学版), 44(3):1167~1173.
- 王重卿. 2012. 二氧化碳地质储存安全风险评价方法研究. 华北电力大学硕士学位论文.
- 伍海清, 白冰, 李小春, 刘明泽, 何媛媛. 2018. CO₂ 地质封存中储层流体压力演化规律的解析模型. 岩土力学, 39(6):2099~2105+2114.
- 熊敏瑞. 2014. 论我国能源结构调整与能源法的应对策略. 生态经济, 30(3):103~108.
- 许文波. 2017. CO₂ 封存的地质评价与风险分析. 西北大学博士学位论文.
- 杨芳. 2010. 盐水层二氧化碳封存机理与地质模拟. 中国地质大学(北京)博士学位论文.
- 杨国栋, 李义连, 马鑫, 董建兴. 2014. 绿泥石对 CO₂-水-岩石相互作用的影响. 地球科学(中国地质大学学报), 39(4):462~472.
- 杨艳林. 2014. CO₂ 地质储存中地质特征实现技术与应用. 吉林大学博士学位论文.
- 喻英, 李义连, 杨国栋, 刘丹青, 姜凤成, 杨森. 2017. 储层物性参数对 CO₂ 长期封存能力的影响研究. 安全与环境工程, 24(5):75~83+89.
- 臧雅琼. 2013. 我国含油气盆地 CO₂ 地质封存潜力分析. 中国地质大学(北京)硕士学位论文.
- 张二勇, 李旭峰, 何锦, 张福存. 2009. 地下咸水层封存 CO₂ 的关键技术研究. 地下水, 31(3):15~19.
- 张亮, 任韶然, 王瑞和, 易平, 米洪刚, 李俊廷. 2010. 南海西部盐水中 CO₂ 埋存潜力评估. 岩土力学, 31(4):1238~1242.
- 张森琦, 刁玉杰, 程旭学, 张晓娟, 张杨, 郑宝峰, 赵学亮. 2010. 二氧化碳地质储存逃逸通道及环境监测研究. 冰川冻土, 32(6): 1251~1261.
- 张森琦, 郭建强, 刁玉杰, 张徽, 贾小丰, 张杨. 2011. 规模化深部咸水含水层 CO₂ 地质储存选址方法研究. 中国地质, 38(6):1640~1651.
- 张炜, 李义连, 郑艳, 姜玲, 邱耿彪. 2008. 二氧化碳地质封存中的储存容量评估:问题和研究进展. 地球科学进展, 23(10):1061~1069.
- 赵利昌, 王涛. 2012. 盐水层 CO₂ 埋存潜力及影响因素数值模拟. 科技导报, 30(31):39~42.
- 赵锐锐. 2012. 陆相异常压力沉积盆地 CO₂ 封存机理及大尺度 CO₂ 封存影响研究. 中国地质大学(武汉)博士学位论文.
- 郑菲, 施小清, 吴吉春, 赵良, 陈畅. 2014. 深部咸水层 CO₂ 地质封存数值模拟参数的全局敏感性分析——以苏北盆地盐城组为例. 吉林大学学报(地球科学版), 44(1):310~318.
- 郑艳, 陈胜礼, 张炜, 熊鹏, 姜玲, 邱耿彪, 王海. 2009. 江汉盆地江汉凹陷二氧化碳地质封存数值模拟. 地质科技情报, 28(4):75~82.
- 朱子涵, 李明远, 林梅钦, 彭勃, 孙亮. 2011. 储层中 CO₂-水-岩石相互作用研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 30(1): 104~112.

The site selection geological evaluation of the CO₂ storage of the deep saline aquifer

CAO Molei^{1,2)}, CHEN Jianping^{*1,2)}

1) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2) Beijing Key Laboratory of Land and Resources Information Research and Development, Beijing 100083, China

* Corresponding author: 3s@cugb.edu.cn

Abstract

The CO₂ storage of the deep saline aquifer is the most perspective CO₂ geological storage way. This manuscript arranged papers which are related to researches of the CO₂ geological storage, classifying geological conditions which is applied in the site selection evaluation of the saline aquifer CO₂ storage, summarizing quantitative methods of the saline aquifer CO₂ storage, and discussing main aspects of the uncertainty for the current CO₂ geological storage. Current geological conditions for the site selection of the CO₂ storage can be classified into two categories according to their different functions in the evaluation: the first category is the general condition for the feasibility evaluation and the second category is characteristics of the suitability and security of the storage which can be used to select the high-quality target area. Suitability features are more accurate features of reservoirs compared with the feasibility evaluation and the security evaluation focus on the suitability of cap rocks, the security of earthquakes, hydrogeological conditions, geological conditions of ground sites, the spatial distribution of reservoirs and cap rocks and structural features. The area method can be the prior consideration of the calculation of the storage volume in the large size area because of low requirements of materials. The volume method and the capacity coefficient method should be prior selection in the storage potential evaluation of high-quality target areas because of higher accuracy and the consideration of more storage mechanisms respectively. The uncertainty of the current geological evaluation of the saline aquifer storage lies in the following five aspects, which are respectively different impacts of geological factors in different aspects of evaluations, the uncertainty of the influence on the reservoir physical property produced by the CO₂-water-rock reactions, special phenomena of the study, the insufficient understanding on the mechanism of various numerical simulations, and the uncertainty of parameters in the evaluation of storage potentials.

Key words: CO₂; the saline aquifer storage; geological conditions; reservoirs; quantitative studies; uncertainty