

2021 全国煤层气学术研讨会优秀论文专栏



移动扫码阅读

孙腾民,刘世奇,汪涛.中国二氧化碳地质封存潜力评价研究进展[J].煤炭科学技术,2021,49(11):10-20. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.11.002

SUN Tengmin, LIU Shiqi, WANG Tao. Research advances on evaluation of CO<sub>2</sub> geological storage potential in China [J]. Coal Science and Technology 2021, 49(11): 10-20. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.11.002

## 中国二氧化碳地质封存潜力评价研究进展

孙腾民<sup>1,2,3,4</sup>, 刘世奇<sup>1,2</sup>, 汪涛<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 中国矿业大学 低碳能源研究院, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 江苏省煤基温室气体减排与资源化利用重点实验室, 江苏 徐州 221008; 3. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 4. 中国矿业大学 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** CCUS( Carbon Capture Utilization and Storage 碳捕集、利用与封存) 技术是减少化石能源发电和工业生产过程中 CO<sub>2</sub> 排放的关键技术, 也是我国实现碳中和的兜底技术。CO<sub>2</sub> 地质封存是 CCUS 技术的核心组成部分, 决定了 CCUS 技术的发展潜力和发展方向, 建立适用我国地质特点的 CO<sub>2</sub> 封存潜力评价方法, 科学评估我国主要沉积盆地 CO<sub>2</sub> 封存潜力是我国 CCUS 技术发展的基础。国外将 CO<sub>2</sub> 地质封存潜力评价分为国家/州级筛选、盆地级评价、场址描述、场址应用 4 个阶段, 并将封存地质体特征、区域地质、评估目的、地方保护、社会健康、封存安全和环境风险等作为主要指标, 形成了一系列盆地级别评价指标体系, 同时针对不同封存地质体, 建立了 CSLF( 碳封存领导人论坛) 法、DOE( 美国能源部) 法、欧盟法、ECOFYS 和 TNO-TING 法等 CO<sub>2</sub> 封存量计算方法。我国封存潜力评估整体处于起步阶段, 尚未建立统一、系统的封存潜力评估方法, 采用的封存潜力评价方法主要是基于层次分析法的模糊综合评价, 并发展了封存潜力的次级盆地评价方法和 CO<sub>2</sub> 封存量的溶解度计算方法。我国 CO<sub>2</sub> 地质封存潜力巨大、方式多样, 封存有利区域为渤海湾盆地、松辽盆地、鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、苏北盆地和四川盆地。由于中国地质条件的复杂性, 采用不同评价方法评估得到的 CO<sub>2</sub> 封存潜力差距较大, 亟需对深部咸水层、正在开采或枯竭的油气田、深部不可采煤层、浅海等主要封存地质体开展 CO<sub>2</sub> 封存潜力的精细评估。

**关键词:** 二氧化碳封存; 碳捕集; 碳中和; 封存潜力评价; 沁水盆地

中图分类号: P618

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336( 2021) 11-0010-11

### Research advances on evaluation of CO<sub>2</sub> geological storage potential in China

SUN Tengmin<sup>1,2,3,4</sup>, LIU Shiqi<sup>1,2</sup>, WANG Tao<sup>1,2,3,4</sup>

(1. Low Carbon Energy Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Coal-based Greenhouse Gas Control and Utilization, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3. School of Mineral Resource and Geoscience, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** CCUS ( Carbon Capture Utilization and Storage) is a crucial technology that can be used to reduce CO<sub>2</sub> emissions of electricity generated from fossil energy and industrial process. It plays an important role in China's Carbon Neutral. CO<sub>2</sub> geological storage is the key component of the CCUS which determines the development potential and development direction of CCUS. Therefore, establishing the evaluation method of CO<sub>2</sub> sequestration capacity that suit for China's geologic characteristic and estimating the CO<sub>2</sub> storage capacity of China's main basins are the foundation of the CCUS development in China. The evaluation of CO<sub>2</sub> sequestration capacity was divided into four steps

收稿日期: 2021-08-26; 责任编辑: 黄小雨

基金项目: 国家自然科学基金资助项目( 41972168); 江苏省煤基温室气体减排与资源化利用重点实验室重大自主研究资助项目( 2020ZDZZ01)

作者简介: 孙腾民( 1998—), 男, 甘肃平川人, 硕士研究生。E-mail: ts20010127p31@cumt.edu.cn

通讯作者: 刘世奇( 1984—), 男, 山东单县人, 研究员, 硕士生导师, 博士。E-mail: liushiqi@cumt.edu.cn

at abroad, named as country/state evaluation, basin estimate, site description, and site application, respectively. Considering geological characteristics, regional geology, assessment purpose, local protection, social health, the safety of storage and environment as key indicators for evaluation, a series of assessment indicator systems of basin estimate were established. Meanwhile, different calculation methods of CO<sub>2</sub> sequestration capacity were put forward for different geological bodies of CO<sub>2</sub> storage, such as CSLF (Carbon Sequestration Leaders Forum) method, DOE (United States Department of Energy) method, European Union method, and ECOFYS and TNO-TING method. The evaluation of CO<sub>2</sub> sequestration capacity in China is in its infancy, that Unified and systematic evaluation method of CO<sub>2</sub> sequestration capacity has not been established. The fuzzy comprehensive evaluation based on analytic hierarchy process was the main method used in CO<sub>2</sub> sequestration capacity evaluation in China, and evaluation method of subsidiary basin estimate and solubility calculation method for CO<sub>2</sub> sequestration capacity were put forward. China has huge potential and diversified geological bodies for CO<sub>2</sub> geological storage, and Bohai bay basin, Songliao basin, Ordos basin, Jungar basin, Subei basin, and Sichuan basin are favorable areas for CO<sub>2</sub> geological storage. Due to the complex geological conditions, the CO<sub>2</sub> sequestration capacities of China obtained from different evaluation methods are to be a great discrepancy. Therefore, detailed assessment of CO<sub>2</sub> sequestration capacity for means geological bodies urgently need to be carried out, including deep saline formations, being exploited and depleted oil and gas field, deep unminable coal seams, and shallow sea.

**Key words:** CO<sub>2</sub> storage; carbon capture; carbon neutrality; evaluation of carbon sequestration potential; Qinshui Basin

## 0 引 言

化石能源在全球能源系统中占主导地位。化石能源的大规模使用产生了大量 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 等温室气体,加剧了全球气温变暖的趋势。其中,CO<sub>2</sub> 含量多,所占比例大,对全球升温的贡献最大。据全球碳地图集 2019 年的统计数据,自 2006 年我国 CO<sub>2</sub> 排放量超过美国,连续 14 a 成为全球最大的温室气体排放国,减排压力巨大<sup>[1]</sup>。

碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)技术被认为是减少化石能源发电和工业生产过程中 CO<sub>2</sub> 排放的关键技术。根据国际能源署(IEA)的预测,2070 年要实现全球陆地地表气温增加量控制在 1.5 °C 以内,CCUS 技术可分别贡献钢铁、水泥、化工、燃料转换和发电行业 25%、61%、28%、90% 和 16% 的碳减排量<sup>[2]</sup>。目前,包括 IEA 在内的全球主要能源研究机构、主要碳减排积极倡导组织和国家一致将 CCUS 技术作为未来的主要碳减排技术。CO<sub>2</sub> 地质封存是 CCUS 技术的重要组成部分,是国际公认的减少 CO<sub>2</sub> 排放的地质处置方法,其主要封存地质体包括深部咸水层、正在开采或枯竭的油气田、深部不可采煤层、玄武岩层、浅海等<sup>[3-5]</sup>。中国能源消费以煤炭为主,2020 年煤炭消费量占能源消费总量的 56.8%(数据来源:国家统计局)其中,燃煤电厂是主要的大型 CO<sub>2</sub> 排放点源,发展 CO<sub>2</sub> 地质封存技术是减少煤炭燃烧过程中碳排放的有效途径之一,将有效助力我国实现碳中和目标。

笔者系统梳理了 CO<sub>2</sub> 地质封存潜力及适宜性评价理论研究进展,以期以及我国主要封存地质体 CO<sub>2</sub> 封存潜力评价结果,以期为我国 CCUS 示范工程选址提供参考。

## 1 CO<sub>2</sub>地质封存潜力评价方法

### 1.1 CO<sub>2</sub>地质封存潜力表征模型

CO<sub>2</sub> 地质封存是将 CO<sub>2</sub> 以吸附态、游离态、水溶态和矿化态等形式储集于封存地质体中。封存地质体的 CO<sub>2</sub> 封存潜力受其规模、封闭性、埋深、孔隙度、渗透率、温度、压力、地应力、水文等地质条件,以及技术、经济 and 政策措施等因素综合影响。BACHU 和 SHAW<sup>[6]</sup>最先系统地提出了 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力评价方法理论<sup>[6]</sup>,之后 IPCC(政府间气候变化专门委员会)提出了 CO<sub>2</sub> 地质储存潜力与适宜性评价的总体框架<sup>[4]</sup>。目前,常采用 BOND 提出的技术-经济资源金字塔模型表征 CO<sub>2</sub> 地质封存潜力<sup>[7]</sup>,该模型为 CO<sub>2</sub> 地质封存潜力评价奠定了理论基础(图 1、图 2)。

该模型根据评估目的和封存地质体认识程度将 CO<sub>2</sub> 地质封存潜力划分为理论封存量、有效封存量、实际封存量和匹配封存量 4 个等级,封存潜力的确定性逐步提高,而封存费用依次降低。理论封存量指封存地质体中 CO<sub>2</sub> 的理论最大封存量,是封存地质体能够提供给 CO<sub>2</sub> 的物理空间极限量;有效封存量是理论封存量的子集,考虑了地质条件与工程条件对封存量的影响;实际封存量是有效封存量的子集,进一步考虑了技术、法律、基础设施和经济条件对封存潜力的影响;匹配封存量是实际封存量的子集,是通过 CO<sub>2</sub> 排放源和封存场地详细匹配得到的<sup>[8-9]</sup>。对于不同的封存地质体,学者提出了特定的 CO<sub>2</sub> 封存潜力的概念。例如,针对深部煤储层 CO<sub>2</sub> 地质封存,桑树勋等<sup>[10]</sup>提出极大存储容量和有效存储容量,前者相当于技术-经济资源金字塔模型中的理论存储容量,后者指在具体地质条件下可

存储的容量, 介于技术-经济资源金字塔模型中的

理论储存容量和有效储存容量之间。

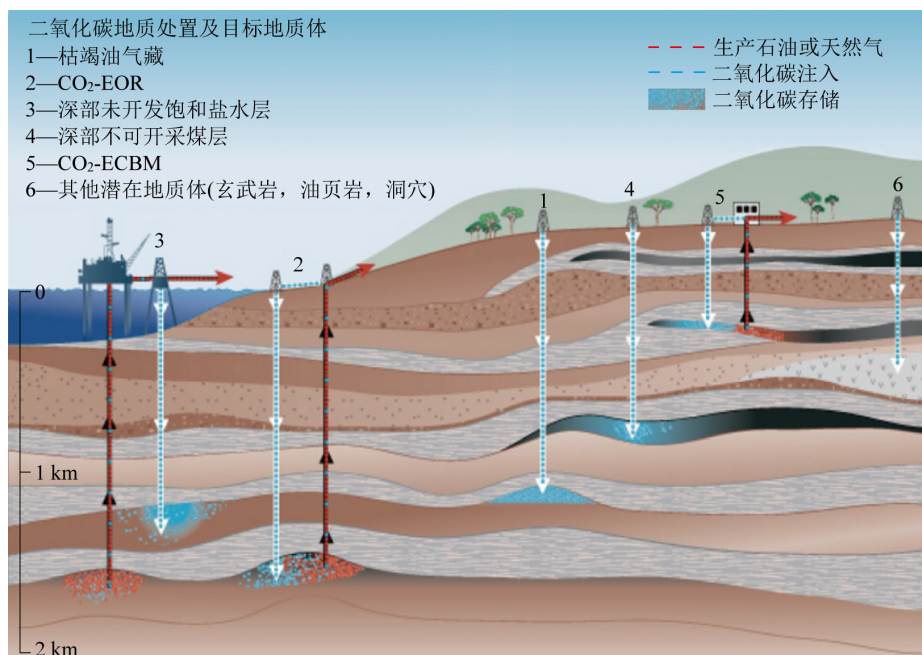


图 1 碳捕集、利用与封存技术示意<sup>[5]</sup>

Fig.1 Sketch map of CCUS<sup>[5]</sup>

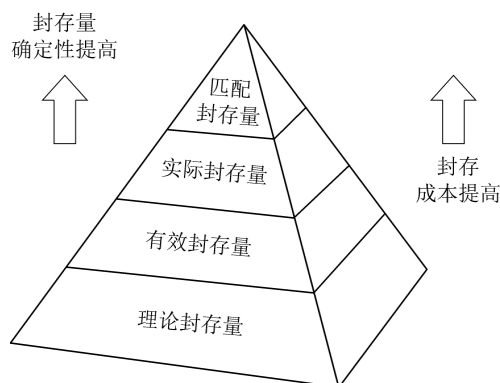


图 2 技术-经济资源金字塔模型示意<sup>[7]</sup>

Fig.2 Diagram of technology-economic resources pyramid model<sup>[7]</sup>

## 1.2 CO<sub>2</sub>地质封存适宜性评价体系

CO<sub>2</sub>地质封存潜力主要依据实验条件、地质条件和理论计算等方式确定,其评价指标以及各指标的权重、分析方法尚无统一标准。学者一般根据封存地质体特征、评估目的等自行制定。国外将 CO<sub>2</sub>地质封存潜力评价分为国家/州级筛选、盆地级评价、场址描述、场址应用 4 个阶段<sup>[11]</sup>。评价初期,首先根据储层及储层流体特征、地表设施等对 CO<sub>2</sub>地质封存条件初步筛选,根据封存地质体特征、评估目的等制定相应的封存适宜性指标系统<sup>[12-15]</sup>。初步筛选后,即对潜在封存储层开展进一步的评价和排序筛选,建立盆地级别评价指标体系。最具代表性的是 BACHU 和 ADAMS<sup>[16]</sup>针对加拿大的盆地提出的

包含 15 项指标的盆地级别评价指标体系,并利用该评价指标体系对加拿大的盆地进行了盆地级别的封存潜力评价。此后在其基础上,考虑区域地质、地方保护、社会健康、封存安全和环境风险,形成了一系列评价指标体系,例如,OLDENBURG 等<sup>[17-21]</sup>在 BACHU 和 ADAMS 评价指标基础上进一步考虑了 CO<sub>2</sub>地质储存的健康、安全和环境风险等因素。

借鉴国外学者所建立的评价指标基础上,综合考虑我国沉积盆地的复杂性、CO<sub>2</sub>封存地质条件特殊性,以及我国“循序渐进、分步勘查”的矿产资源开发原则,国内学者采用基于层次分析法的模糊综合评价方法,将我国 CO<sub>2</sub>地质封存适宜性评价工作划分为国家级潜力评价、盆地级潜力评价、目标区级潜力评价、场地级潜力评价和灌注级潜力评价 5 个阶段<sup>[22-25]</sup>,并建立了表 1 所示的工作流程与评价体系。

## 1.3 CO<sub>2</sub>地质封存量计算方法

CO<sub>2</sub>地质封存量计算是封存潜力评价的主要任务之一,CO<sub>2</sub>地质封存量与封存方式密切相关。地质体中,CO<sub>2</sub>存在多种封存方式,包括吸附封存、构造圈闭封存、溶解封存、矿化封存和残留封存等<sup>[26]</sup>。碳封存领导人论坛(Carbon Sequestration Leaders Forum, CSLF)将 CO<sub>2</sub>地质封存方式分为物理封存和化学封存,其中吸附封存、构造圈闭封存和残留封存属于物理封存,溶解封存和矿化封存属于化学封存<sup>[27-28]</sup>。

表 1 中国二氧化碳地质储存潜力与适宜性评价地质工作阶段划分<sup>[25]</sup>

Table 1 Geological working stage of potential and suitability assessment of CO<sub>2</sub> geological storage in China<sup>[25]</sup>

工作阶段	研究对象	等级	CO <sub>2</sub> 地质封存潜力评价		综合评价
			潜力级别	含义与任务	
区域级潜力评价	以全国单个盆地 为评价单元	E	预测 潜力	以单个沉积盆地为单位,评价 CO <sub>2</sub> 地质封存潜力,即预测潜力;对全国沉积盆地进行 CO <sub>2</sub> 地质封存适宜性评价,淘汰部分不适宜 CO <sub>2</sub> 地质封存的盆地,选择出可供下一阶段继续研究,适宜 CO <sub>2</sub> 地质封存的盆地	以单个盆地为单位进行潜力与适宜性评价,对全国面积大于 200 km <sup>2</sup> 的盆地进行排序,评价出适宜 CO <sub>2</sub> 地质封存的盆地
盆地级潜力评价	以盆地一、二级构造单元为研究对象和评价单元	D	推定潜力	以盆地一、二级构造单元为研究对象和评价单元,计算各盆地一级构造单元 CO <sub>2</sub> 地质封存潜力,即 D 级推定潜力;对各盆地一、二级构造单元进行 CO <sub>2</sub> 地质封存适宜性评价,评价出盆地内 CO <sub>2</sub> 地质封存远景区,为宏观 CO <sub>2</sub> 地质封存场地选择提供依据	以盆地一、二级构造单元为单位,进行适宜性评价,评价出盆地中 CO <sub>2</sub> 地质封存远景区
目标区级潜力评价	以盆地三级构造单元内的有利构造为研究对象和评价单元	C	控制潜力	以三级构造单元内的有利构造为研究对象和评价单元,通过 CO <sub>2</sub> 地质封存适宜性评价,优选出 CO <sub>2</sub> 地质封存目标靶区,计算目标靶区 CO <sub>2</sub> 地质封存潜力,即 C 级控制潜力,为我国 CO <sub>2</sub> 地质封存提供一批目标靶区	制定 CO <sub>2</sub> 地质封存目标靶区选择标准;比选出 CO <sub>2</sub> 地质封存目标靶区
场地级潜力评价	储存场地	B	基础 封存量	根据 CO <sub>2</sub> 地质封存场地选量标准,充分考虑业主意见,进一步筛选出最佳 CO <sub>2</sub> 地质封存场地通过场地综合地质调查、地球物理勘探、钻探与灌注试验、动态监测、室内物理模拟与数值模拟,查明场地 CO <sub>2</sub> 地质封存地质条件,计算场地级 CO <sub>2</sub> 地质封存量, B 级基础封存量,制定合理的 CO <sub>2</sub> 灌注方案,为一氧化碳灌注工程施工图设计提供依据	开展 CO <sub>2</sub> 地质封存场地勘探,对场地作出勘查评估,为 CO <sub>2</sub> 灌注工程设计提供依据
灌注级潜力评价	CO <sub>2</sub> 地质封存工程场地	A	工程 封存量	在场地级基础封存量评价的基础上,实现了灌注试验转化为工程性实际灌注,并经历了较长的 CO <sub>2</sub> 灌注监测时间,灌注量日趋稳定,CO <sub>2</sub> 扩散量在储层内不断有效地扩展,且没有出现 CO <sub>2</sub> 泄露、诱发地震等环境、安全问题,通过拟合、改进的数值模型而得出的场地级工程封存量	开展 CO <sub>2</sub> 灌注工程监测,根据灌注工程的运行状况,对灌注场地 CO <sub>2</sub> 灌注量及场地环境与安全风险进行评价

不同封存地质体中主要封存方式存在差异,CO<sub>2</sub>封存量的计算方法也因此不同。目前所采用的 CO<sub>2</sub>地质封存量计算方法主要确定的是理论封存量和有效封存量<sup>[29]</sup>。

1) 深部不可采煤层 CO<sub>2</sub>地质封存量计算方法。深部不可采煤层中 CO<sub>2</sub>的封存方式主要包括吸附封存、构造圈闭封存、溶解封存和矿物封存,其中吸附封存是煤层区别于其他地质体的主要封存形式。目前国际上通用的深部不可采煤层中 CO<sub>2</sub>地质封存量计算方法主要有 4 种: CSLF( Carbon Sequestration Leaders Forum,碳封存领导人论坛) 计算方法( 式

( 1 ) )、DOE( United States Department of Energy,美国能源部) 计算方法( 式( 2 ) )、采用不同封存类型总和的计算方法( 式( 3 ) )、以及简化的 CSLF 计算方法( 式( 4 ) )<sup>[26,30-31]</sup>。

$$M_{CO_2} = P_{PGI} \rho_g R_E \tag{1}$$

式中:  $M_{CO_2}$  为 CO<sub>2</sub>封存量;  $\rho_g$  为 CO<sub>2</sub>密度;  $P_{PGI}$  为煤层可产气量  $P_{PGI}$  = 煤储层体积×煤密度×甲烷含量×完成率×采出率  $R_E$  为 CO<sub>2</sub>与 CH<sub>4</sub>的体积置换比。

$$M_{CO_2} = \rho_g A_{coal} h (V_a + V_f) E \tag{2}$$

其中  $A_{coal}$  为目标煤层面积;  $h$  为目标煤层厚度;  $V_a$  为单位体积煤的 CO<sub>2</sub>吸附量;  $V_f$  为单位体积煤中

CO<sub>2</sub>游离量;  $E$  为 CO<sub>2</sub> 储层的有效因子, 包括: 煤中 CO<sub>2</sub> 封存的适用性, 吸附能力, 浮力特征, 运移能力, 饱和吸附量等<sup>[30]</sup>。

$$M_{\text{CO}_2} = M_v + M_w + M_{\text{ads}} + M_a \quad (3)$$

式中:  $M_v$  为煤层中游离态 CO<sub>2</sub> 质量;  $M_w$  为煤层中溶解态 CO<sub>2</sub> 质量;  $M_{\text{ads}}$  为目标区煤的剩余探明地质储量中总的 CO<sub>2</sub> 吸附量;  $M_a$  为目标区煤的新增探明地质储量中总的 CO<sub>2</sub> 吸附量。

$$M_{\text{CO}_2} = 0.1 \rho_g G R_f R_E \quad (4)$$

式中:  $G$  为煤层气资源量;  $R_f$  为煤层气采出率。

2) 深部咸水层 CO<sub>2</sub> 地质封存量计算方法。研究表明, CO<sub>2</sub> 在咸水层中主要有 4 种封存方式: 构造圈闭封存、残留封存、溶解封存和矿化封存<sup>[25-30]</sup>。深部咸水层中 CO<sub>2</sub> 地质封存量的计算方法与深部不可采煤层 CO<sub>2</sub> 地质封存量计算方法相近, 主要有 4 种: CSLF 计算方法(式(5))、DOE 计算方法(式(6))、欧盟计算方法(式(7))、ECOFYS 和 TNO-TING 计算方法(式(8))<sup>[10, 26, 31-34]</sup>。

$$M_{\text{CO}_2} = M_s + M_r + M_d \quad (5)$$

式中:  $M_s$  为构造圈闭封存的 CO<sub>2</sub> 质量;  $M_r$  为残留封存的 CO<sub>2</sub> 质量;  $M_d$  为溶解封存的 CO<sub>2</sub> 质量。

$$M_{\text{CO}_2} = \rho_g A H \varphi \quad (6)$$

式中:  $A$  为目标咸水层面积;  $H$  为目标咸水层厚度;  $\varphi$  为目标咸水层孔隙度。

$$M_{\text{CO}_2} = A F_{\text{AC}} S_F H \quad (7)$$

式中:  $F_{\text{AC}}$  为深部咸水层覆盖系数;  $S_F$  为埋存系数。

$$M_{\text{CO}_2} = \rho_g A H \times 0.01 \times 0.02 \varphi \quad (8)$$

其中, 0.01 为深部盐水层 1% 的体积为构造地层圈闭; 0.02 为 2% 的构造地层圈闭可用于 CO<sub>2</sub> 封存。

另外, 李小春等<sup>[33]</sup>提出了考虑溶解度的 CO<sub>2</sub> 地质封存量计算方法(式(9))。

$$M_{\text{CO}_2} = a A H \eta \varphi R \rho_w M \quad (9)$$

其中:  $a$  为可用于封存 CO<sub>2</sub> 的咸水层平面分布范围占总盆地的比例, 可取 0.01;  $\eta$  为含水层厚度占总沉积层的比例, 可取经验值 0.1;  $R$  为地层水总 CO<sub>2</sub> 溶解度;  $\rho_w$  为封存深度条件下饱和 CO<sub>2</sub> 的咸水密度;  $M$  为 CO<sub>2</sub> 的摩尔质量。

3) 油气藏 CO<sub>2</sub> 地质封存量计算方法。油气藏 CO<sub>2</sub> 地质封存量计算方法主要基于物质平衡方程而建立, 其基本假设条件是已采出的油气所让出的空间均可用于 CO<sub>2</sub> 封存<sup>[16, 35]</sup>。BACHU 和 ADAMS<sup>[16]</sup>提出了利用 CO<sub>2</sub> 驱油的封存量计算公式, 将 CO<sub>2</sub> 封存量划分为 CO<sub>2</sub> 突破前和突破后分别计

算; 沈平平在参考国外研究基础上结合我国油气藏开发特点提出了考虑溶解封存的理论封存量计算方法<sup>[35]</sup>。

## 2 中国主要地质体 CO<sub>2</sub> 封存潜力

### 2.1 深部不可采煤层 CO<sub>2</sub> 封存潜力

我国深部煤层广泛发育, 是实施煤层 CO<sub>2</sub>-ECBM 的良好地质体, 具有广阔的前景。诸多学者和机构对我国深部煤层 CO<sub>2</sub> 地质封存潜力进行了评估, 评估结果差异较大。刘延峰等<sup>[36]</sup>考察了全国范围内 300 ~ 1 500 m 的煤层气资源量, 综合 CO<sub>2</sub>-ECBM 技术和我国各煤阶的煤层气开采系数和 CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> 体积置换比得到了我国主要含煤盆地 CO<sub>2</sub> 地质封存潜力, 认为我国煤层 CO<sub>2</sub> 地质封存量约为 120.78 × 10<sup>8</sup> t (表 2)。LI 等<sup>[37]</sup>从宏观尺度对中国 45 个含煤盆地深部不可采煤层 CO<sub>2</sub>-ECBM 的 CO<sub>2</sub> 封存量进行了评价, 认为我国 45 个主要含煤盆地的 CO<sub>2</sub> 地质封存量约为 120 × 10<sup>8</sup> t, 与刘延峰等的评估结果基本一致(表 3)。

更多学者针对我国单个盆地的 CO<sub>2</sub> 封存潜力开展了更精确的评估。姚素平等对江苏省煤层地质情况进行了详细调查, 认为江苏省煤层 CO<sub>2</sub> 封存的有利区主要集中在埋深 1 000 m 以上的煤层中, 并将江苏省煤层划分为苏南含煤区、徐州煤矿区以及丰沛煤矿区分别进行了评估, 结果显示江苏省煤层 CO<sub>2</sub> 封存总量超过 3 × 10<sup>8</sup> t, 其中苏南含煤区 CO<sub>2</sub> 封存量为 8.1 × 10<sup>7</sup> t, 徐州煤矿区 CO<sub>2</sub> 封存量近 1.5 × 10<sup>8</sup> t, 丰沛煤矿区为 8.7 × 10<sup>7</sup> t<sup>[38]</sup> (表 4)。桑树勋等将沁水盆地 3 号煤层划分为超临界 CO<sub>2</sub> 封存区域和亚临界 CO<sub>2</sub> 封存区, 并由沁水盆地南部郑庄区块的 CO<sub>2</sub> 封存量估算出整个沁水盆地 3 号煤层的 CO<sub>2</sub> 封存量, 认为沁水盆地 3 号煤层 CO<sub>2</sub> 封存量可观, CO<sub>2</sub> 的理论封存量和理论有效封存量分别达 273.4 × 10<sup>7</sup> t 和 136.8 × 10<sup>7</sup> t, 其中, 理论吸附封存量、理论游离封存量和理论溶解封存量分别为 238.4 × 10<sup>7</sup>、336.4 × 10<sup>6</sup> 和 150.5 × 10<sup>5</sup> t, 理论有效存吸附封存量、理论有效存游离封存量和理论有效存溶解封存量分别为 119.0 × 10<sup>7</sup>、121.8 × 10<sup>6</sup>、75.2 × 10<sup>5</sup> t<sup>[10]</sup> (表 5)。同时, 桑树勋等基于沁水盆地 3 号煤层超临界 CO<sub>2</sub> 封存区域和亚临界 CO<sub>2</sub> 封存区的 5 个封存子区域(图 3), 计算得到各封存区域的 CO<sub>2</sub> 封存容量, 其中超临界 CO<sub>2</sub> 封存区的 CO<sub>2</sub> 理论存储容量为 228.1 × 10<sup>7</sup> t, 理论有效存储容量为 114.0 × 10<sup>7</sup> t, 占据绝对优势<sup>[10]</sup>。

表 2 中国主要含煤盆地 CO<sub>2</sub>封存量<sup>[36]</sup>Table 2 CO<sub>2</sub> storage capacity of main coal bearing in China<sup>[36]</sup>

评价区	CO <sub>2</sub> 煤层储 存量/10 <sup>8</sup> t	评价区	CO <sub>2</sub> 煤层储 存量/10 <sup>8</sup> t	评价区	CO <sub>2</sub> 煤层储 存量/10 <sup>8</sup> t	评价区	CO <sub>2</sub> 煤层储 存量/10 <sup>8</sup> t
准葛尔北部	5.3	张家口	0.72	依兰—伊通	0.06	昆明—开远	0.1
准葛尔东部	6.54	宣化—蔚县	0.44	蛟河—辽源	0.02	鄂中	0
准葛尔南部	3.42	大同一宁武	1.64	敦化—抚顺	0.11	川鄂湘边	0.01
三塘湖	9.91	承德	0.11	延边	0.05	桂中北	0.01
吐鲁番—哈密	21.95	北京—唐山	0.55	浑江—红阳	0.03	百色	0.05
伊犁	5.63	大城	0.25	松辽南缘	0.28	南宁	0.03
尤尔都斯	0.26	沁水	6.13	阜新一彰武	0.07	涟源—邵阳	0.04
焉耆盆地	1.19	太行山东麓	0.51	北票—建昌	0.08	郴州—资兴	0.03
塔里木北部	0.36	豫西	0.56	唐古拉	0.01	鄂赣边	0
塔里木东部	1.01	豫东	0.04	土门—巴青	0	萍乐	0.04
柴达木北部	0.30	鲁西	0.68	昌都—芒康	0.01	吉仪	0
中祁连	0.25	鲁中	0.04	广旺	0.01	粤北	0.01
北祁连	0.11	济南	0.07	雅乐	0	广州	0
靖远—景泰	0.14	鲁南	0	华蓥山—永荣	0.11	苏浙皖边	0.02
桌子山—贺兰山	0.38	徐州—淮北	0.78	川南—黔北	0.79	长江下游	0.01
鄂尔多斯	44.52	淮南	1.22	六盘水	1.07	浙赣边	0.01
大青山—乌拉山	0.27	三江—穆棱河	2.37	渡口楚雄	0.02	永梅	0.02

表 3 中国 45 个主要含煤盆地 CO<sub>2</sub>封存量<sup>[37]</sup>Table 3 CO<sub>2</sub> storage capacity for 45 coal bearing basins in China<sup>[37]</sup>

评价区	CO <sub>2</sub> 煤层 储量/10 <sup>8</sup> t	评价区	CO <sub>2</sub> 煤层 储量/10 <sup>8</sup> t	评价区	CO <sub>2</sub> 煤层 储量/10 <sup>8</sup> t	评价区	CO <sub>2</sub> 煤层 储量/10 <sup>8</sup> t
鄂尔多斯	44.5	六盘水	1.1	柴达木北部	0.30	北票	0.08
三塘湖	9.9	塔里木东部	1.0	松辽盆地南部	0.28	济南	0.07
吐鲁番—哈密盆地	22	川南—黔北	0.79	大青山—乌拉山	0.27	阜新一彰武	0.07
准噶尔东部	6.5	徐州—淮北	0.78	尤尔都斯	0.26	依兰—伊通	0.06
沁水盆地	6.1	张家口	0.72	祁连山脉中部	0.25	延边	0.05
伊犁	5.6	山东西部	0.68	大城	0.25	百色	0.05
准噶尔北部	5.3	河南西部	0.56	靖远—景泰	0.14	河南东部	0.04
准噶尔南部	3.4	北京—唐山	0.55	祁连山脉北部	0.11	山东中部	0.04
三江	2.4	太行山东部	0.51	承德	0.11	涟源—邵阳	0.04
大同一宁武	1.6	宣化—蔚县	0.44	敦化—抚顺	0.11		
焉耆盆地	1.2	桌子山—贺兰山	0.38	华蓥山—永荣	0.11		
淮南	1.2	塔里木北部	0.36	昆明—开远	0.10		

表 4 江苏省各地区煤层 CO<sub>2</sub>封存量估算值<sup>[38]</sup>Table 4 Estimation of CO<sub>2</sub> storage resources in Jiangsu Province<sup>[38]</sup>

地区	宁镇	常州	锡/澄/虞	靖通	宜溧	苏州	徐州
面积/km <sup>2</sup>	205.4	273.8	809.5	251.3	259.6	152.7	512.8
$q_x / (\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	26.92	22.96	28.28	24.48	13.3	14.07	12.84
$Q_m / 10^4 \text{ t}$	11 969	30 797	39 186	13 175	13 931	7 178	323 753
$Q_h / 10^8 \text{ m}^3$	32.22	70.71	110.82	32.25	18.53	10.1	415.69
$S_{\text{CO}_2} / 10^4 \text{ t}$	955.48	2 096.91	3 286.36	956.37	549.51	299.52	1 4792.74

注:  $q_x$  为吸附量;  $Q_m$  为海拔 -600~1 500 m 的煤炭资源量;  $Q_h$  为煤层气资源量;  $S_{\text{CO}_2}$  为估算的 CO<sub>2</sub> 埋藏量。

表 5 沁水盆地 3 号煤层 CO<sub>2</sub>煤层存储能力评价结果<sup>[10]</sup>

Table 5 Evaluation of CO<sub>2</sub> storage capacity of No.3 coal seam in Qinshui Basin<sup>[10]</sup>

项目	超临界区				亚临界区			合计
	有利存储	较有利存储	不利存储	合计	较有利存储	不利存储	合计	
面积/km <sup>2</sup>	440.49	8 558.63	5 999.78	14 998.90	10 460.80	4 040.31	14 501.10	29 500.00
煤质量/10 <sup>8</sup> t	29.56	574.33	402.62	1 006.50	701.97	271.12	973.10	1 979.60
最大存储容量/10 <sup>6</sup> t	60.10	1 906.54	3 126.34	5 092.98	336.97	1 122.25	1 459.22	6 552.20
最大吸附存储容量/10 <sup>6</sup> t	51.24	1 665.15	2 680.00	4 396.38	308.40	1 034.56	1 342.95	5 739.33
最大游离存储容量/10 <sup>5</sup> t	83.75	2 305.59	4 286.03	6 675.36	268.00	818.78	1 086.78	7 762.14
最大溶解存储容量/10 <sup>3</sup> t	328.10	10 345.58	17 538.22	28 211.90	1 724.26	5 911.76	7 636.02	35 847.93
理论存储容量/10 <sup>6</sup> t	13.79	831.59	1 435.57	2 280.95	168.49	284.75	453.23	2 734.19
理论吸附存储容量/10 <sup>6</sup> t	11.82	724.19	1 230.63	1 966.65	154.69	263.07	417.76	2 384.41
理论游离存储容量/10 <sup>5</sup> t	18.72	1 034.56	1 968.62	3 021.89	134.00	207.90	341.90	3 363.79
理论溶解存储容量/10 <sup>3</sup> t	73.90	4 550.08	8 049.85	12 673.83	875.93	1 504.54	2 380.47	15 054.30
考虑 R <sub>f</sub> 和 R <sub>E</sub> 的理论有效存储容量/10 <sup>6</sup> t	6.90	415.79	717.29	1 139.98	84.74	142.87	227.60	1 367.59
考虑 R <sub>f</sub> 和 R <sub>E</sub> 的理论吸附存储容量/10 <sup>6</sup> t	5.91	361.60	614.82	982.34	76.85	131.04	207.90	1 190.23
考虑 R <sub>f</sub> 和 R <sub>E</sub> 的理论游离存储容量/10 <sup>5</sup> t	9.85	52.22	984.31	1 046.38	67.00	104.44	171.44	1 217.82
考虑 R <sub>f</sub> 和 R <sub>E</sub> 的理论溶解存储容量/10 <sup>3</sup> t	37.44	2 275.04	4 024.92	6 337.41	432.54	751.78	1 184.32	7 521.73

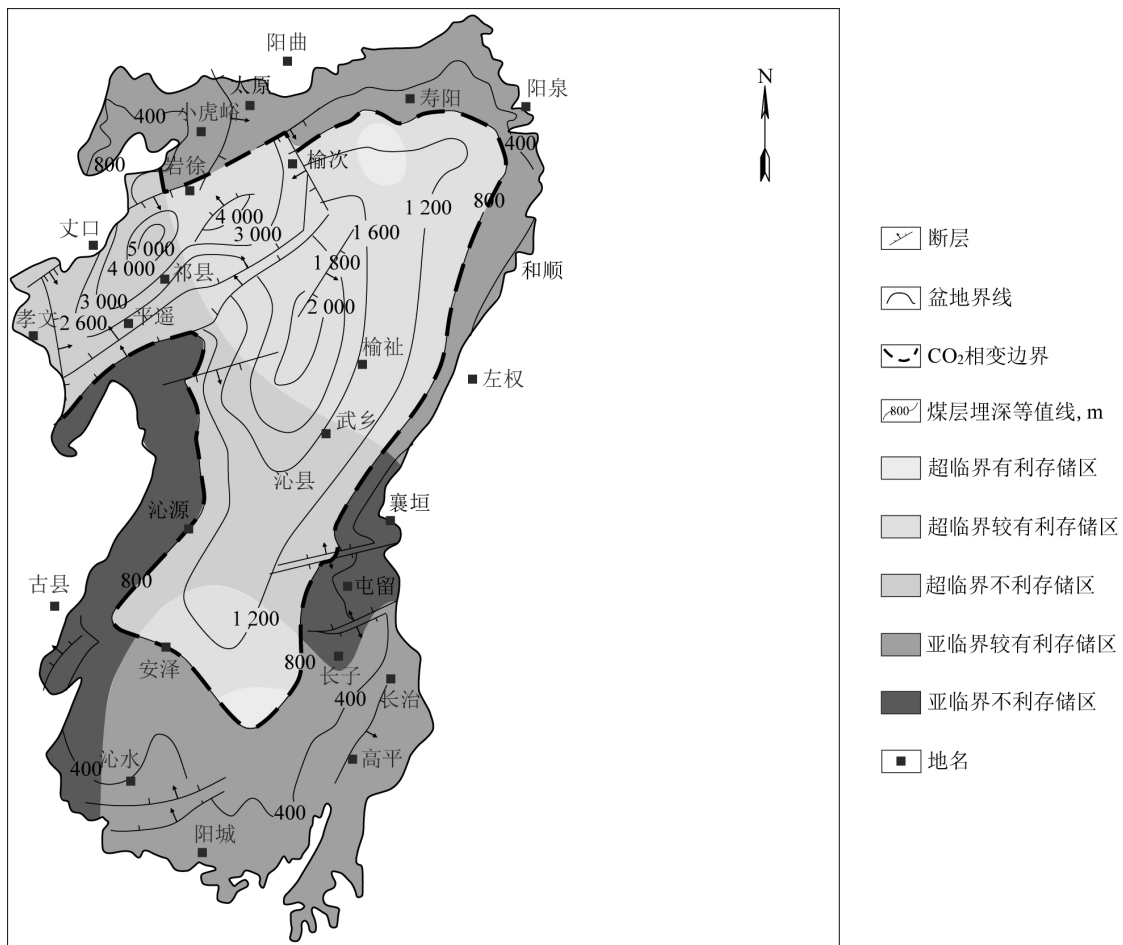


图 3 沁水盆地 3 号煤层 CO<sub>2</sub>封存区域划分<sup>[10]</sup>

Fig.3 CO<sub>2</sub> storage regions of No.3 coal seam in Qinshui Basin<sup>[10]</sup>



2.2 深部咸水层封存 CO<sub>2</sub> 封存潜力

我国深部咸水层 CO<sub>2</sub> 封存量的估算基本采用考虑溶解度的 CO<sub>2</sub> 封存量计算方法(式(9))。李小春等利用该方法计算了我国 24 个主要沉积盆地的深部咸水层理论 CO<sub>2</sub> 封存量,结果显示可封存量为  $143.5 \times 10^9$  t<sup>[33]</sup>。李琦等<sup>[39]</sup>在此基础上考虑了我国沉积盆地含水系统的差异,将 25 个主要沉积盆地划分为三种类型含水系统,分别建立模型后计算得到 CO<sub>2</sub> 封存量为  $119.20 \times 10^9$  t。研究认为,相对于考虑溶解度的 CO<sub>2</sub> 地质封存量计算方法,CSFL 计算方法(式(5))根据封存机理的不同将咸水层中 CO<sub>2</sub> 封存量分为构造封存量、残余气封存量以及溶解封存量,评估结果更为准确<sup>[40]</sup>。张冰等<sup>[40]</sup>采用 CSFL 计算方法估算了鄂尔多斯盆地一级构造单元的咸水层 CO<sub>2</sub> 封存潜力(图 4),认为鄂尔多斯盆地深部咸水层的 CO<sub>2</sub> 有效地质封存量为  $13.32 \times 10^9$  t。ZHU 等<sup>[41]</sup>基于源-汇匹配方法,评估了苏北-南黄海盆地 CO<sub>2</sub> 地质封存量为  $52.1 \times 10^6$  t,按断层可划分为 28 个封存区块(图 5)。

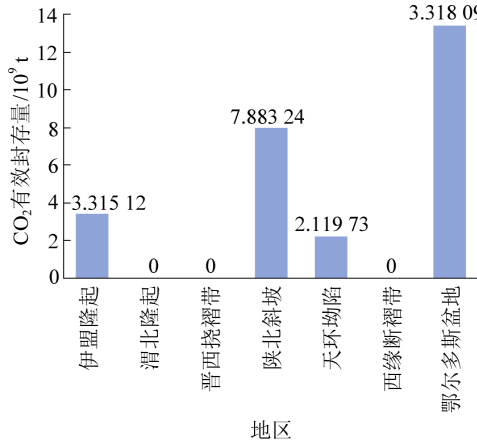


图 4 鄂尔多斯盆地深部咸水层 CO<sub>2</sub> 有效封存潜力<sup>[40]</sup>

Fig.4 CO<sub>2</sub> effective storage capacity of deep saline formation in Ordos Basin<sup>[40]</sup>

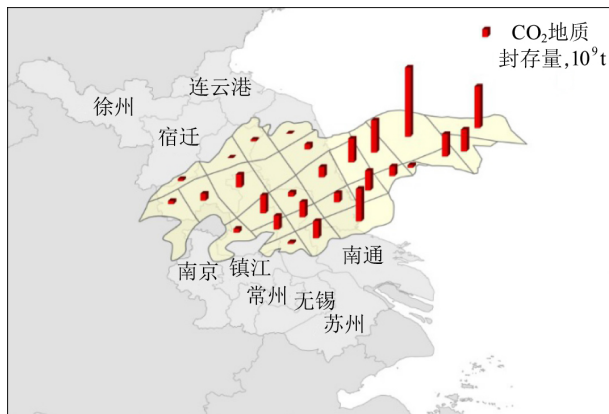


图 5 苏北-南黄海盆地 CO<sub>2</sub> 地质封存量<sup>[41]</sup>

Fig.5 CO<sub>2</sub> geological storage capacity of Subei-south Huanghai Basin<sup>[41]</sup>

2.3 枯竭油气藏 CO<sub>2</sub> 封存潜力

油气产出后,油气藏剩余的地下空间本身就是一个良好的 CO<sub>2</sub> 地质封存场所。相比咸水层、煤层,油气藏具有良好的封闭性,往往无需进行适宜性评价,只需从盆地的一级构造单元入手即可,而油气开采工作中所积累的地质资料也为 CO<sub>2</sub> 注入提供了资料保障<sup>[42]</sup>。枯竭油气藏 CO<sub>2</sub> 封存一般属于物理封存,其封存量即为油气开采后所产生的能够用于封存 CO<sub>2</sub> 的空间体积。由于油气开采一般采用注水开发,实际生产过程中,油气开采后的地下空间会被水填充,注入的 CO<sub>2</sub> 只能排出大部分水,剩余部分才是理论上的 CO<sub>2</sub> 地质封存量<sup>[42]</sup>。要进一步得到更精确的封存量,则需要以物质平衡法和类比法为基础结合数值模拟获得<sup>[35]</sup>。刘延峰等<sup>[42]</sup>根据第 2、3 次全国天然气资源评估结果,计算得到我国主要含油气盆地的 CO<sub>2</sub> 地质封存量约为  $30.5 \times 10^9$  t,此次评估结果相对比之前的评估结果更加精确(表 6),其中结果已进行了近似处理。

表 6 中国主要含油气盆地 CO<sub>2</sub> 封存量计算结果对比  
Table 6 Calculation and comparison of CO<sub>2</sub> storage in major oil-and gas-bearing basin in China

盆地	Stevens 计算结果 <sup>[39]</sup>		刘延峰计算结果 <sup>[42]</sup>	
	天然气可采资源量/ 10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	CO <sub>2</sub> 储存容量/ 10 <sup>8</sup> t	天然气可采资源量/ 10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	CO <sub>2</sub> 储存容量/ 10 <sup>8</sup> t
渤海湾	5 862	16	5 412	14.5
松辽	3 313	8	1 466	6.3
塔里木	9 911	22	20 790	26.8
准葛尔	2 945	6	5 179	16.0
四川	11 553	24	24 494	58.9
鄂尔多斯	8 099	35	35 610	85.9
莺歌海	5 210	11	9 504	37.5
合计	46 893	122	102 455	245.9

2.4 浅海 CO<sub>2</sub> 封存潜力

浅海 CO<sub>2</sub> 封存主要有 2 种方式: ①靠近大陆的大陆架部分的沉积盆地可用于封存 CO<sub>2</sub>; ②由于 CO<sub>2</sub> 独特的物理化学性质,可将其注入海洋深部,达到一定压力后,液态 CO<sub>2</sub> 会在海洋深部聚集形成类似“CO<sub>2</sub> 湖”。研究表明,如果 CO<sub>2</sub> 注入的深度足够,可以和海水形成水化物沉积在海底,从而达到固碳的目的<sup>[43]</sup>。除此之外,也可将 CO<sub>2</sub> 以干冰的形式注入深海,达到水体封存 CO<sub>2</sub> 的目的。另外 KOIDE 等<sup>[44]</sup>还提出了利用深海沉积物封存 CO<sub>2</sub>,其封存机理类似于深部咸水层 CO<sub>2</sub> 封存,即注入的 CO<sub>2</sub> 在水体中溶解、运移扩散后与沉积物中的物质发生反应



从而被固定; CALDEIRA 和 RAU 等<sup>[45]</sup> 研究认为, 可通过提高海水的 PH 值促进 CO<sub>2</sub> 在海水中的溶解量, 然后再向其中加入石灰粉抵消增加的 PH 值, 分析显示在经济上是可行的。

我国目前只对大陆架部分的沉积盆地 CO<sub>2</sub> 封存量进行了粗略估算, 对海洋水体的 CO<sub>2</sub> 封存潜力尚未开展评估。对大陆架的沉积盆地的适宜性评价, 李小春等<sup>[33]</sup> 在评价我国咸水层 CO<sub>2</sub> 封存潜力时, 对大陆架沉积盆地的 CO<sub>2</sub> 封存量进行了简单计算, 认为我国大陆架沉积盆地的 CO<sub>2</sub> 封存量约为  $661.25 \times 10^8$  t; 霍传林<sup>[46]</sup> 首次将 CO<sub>2</sub> 封存潜力模型应用于浅海沉积盆地, 并提出了 CO<sub>2</sub> 海底封存区规划指标体系与评估方法, 评价计算得到中国近海总的 CO<sub>2</sub> 有效封存量为  $25 \times 10^{11}$  t。

### 3 结论及展望

通过对我国目前 CO<sub>2</sub> 地质封存潜力评价工作的梳理可以发现, 我国 CO<sub>2</sub> 地质封存潜力巨大, 具有广阔的前景。其中, 对深部不可采煤层和深部咸水层 CO<sub>2</sub> 封存潜力的研究相对较大, 具有相对明确的理论封存潜力和有效封存潜力; 而枯竭油气藏和浅海 CO<sub>2</sub> 封存潜力的研究尚不成熟。我国作为全球最大的温室气体排放国, 实现碳达峰、碳中和的任务艰巨性, CO<sub>2</sub> 地质封存将成为我国 2030 年以后实现碳达峰和 2060 年实现碳中和必不可少的技术方向, 可以在避免能源结构过激调整、保障能源安全的前提下完成减排, 实现我国能源结构从化石能源为主向可再生能源为主平稳过渡。然而目前相对于我国的 CO<sub>2</sub> 排放量和减排需求, CO<sub>2</sub> 地质封存的减排贡献仍然很低, 大量工作仍需进一步开展。在 CO<sub>2</sub> 地质封存潜力评估方面, 有如下 4 个方面展望:

1) 进一步核实深部不可采煤层和深部咸水层 CO<sub>2</sub> 封存潜力。通过更细致的地质勘察工作, 查明地质体中的有利圈闭, 明确 CO<sub>2</sub> 封存目标区域、目的层系, 更新我国 CO<sub>2</sub> 地质封存潜力, 以服务大规模示范工程开展。

2) 跟进枯竭油气藏和浅海 CO<sub>2</sub> 封存潜力研究。油气藏 CO<sub>2</sub> 封存从以油气增产为目的过渡为 CO<sub>2</sub> 减排为目标, 完善大陆架沉积盆地 CO<sub>2</sub> 封存潜力评估, 开展海洋水体的 CO<sub>2</sub> 封存潜力评估与适宜性评价。

3) 明确 CO<sub>2</sub> 地质封存适宜性评价体系及指标选取。现今 CO<sub>2</sub> 地质封存适宜性的评价指标基本通过层次分析法获取, 为更好地服务 CO<sub>2</sub> 地质封存示范工程, 需要进一步对 CO<sub>2</sub> 地质封存适宜性评价体系及指标进行修正, 从而获得更精确的实际封存量和

匹配封存量。

4) 完善 CO<sub>2</sub> 地质封存量计算方法。例如, 深部咸水层 CO<sub>2</sub> 地质封存方面, 计算方法中如何将理想的纯 NaCl 溶液假设过渡至实际 CO<sub>2</sub>-混合盐体系; 深部不可采煤层 CO<sub>2</sub> 地质封存方面, 如何改进吸附模型, 从而准确预测超临界 CO<sub>2</sub> 的吸附封存量。

### 参考文献 (References):

- [1] FRIEDLINGSTEIN P, O'SULLIVAN M, JONES M W, *et al.* Global carbon budget, 2020 [J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(4): 3269-3340.
- [2] PAGE B, TURAN G, ZAPANTIS A, *et al.* Global status of CCS 2020[R]. The Global CCS Institute: 2021.
- [3] 叶建平, 张兵, 韩学婷, 等. 深煤层井组 CO<sub>2</sub> 注入提高采收率关键参数模拟和试验 [J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 149-155.  
YE Jianping, ZHANG Bing, HAN Xueting, *et al.* Well group carbon dioxide injection for enhanced coalbed methane recovery and key parameter of the numerical simulation and application in deep coalbed methane [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 149-155.
- [4] METZ B, DAVIDSON O, CONINCK H D, *et al.* IPCC special report on carbon dioxide capture and storage [J]. *Economics & Politics of Climate Change*, 2005.
- [5] AMINU M D, NABAVI S A, ROCHELLE C A, *et al.* A review of developments in carbon dioxide storage [J]. *Applied Energy-Barking Then Oxford*, 2017, 208(1): 1389-1419.
- [6] BACHU S, SHAW J. Evaluation of the CO<sub>2</sub> sequestration capacity in Alberta's oil and gas reservoirs at depletion and the effect of underlying aquifers [J]. *The Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2003, 42(9): 51-61.
- [7] BOND L L. Applications of carbon dioxide in enhanced oil recovery. Energy conversion and management [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2003, 33(2): 579-586.
- [8] BACHU S, BONIJOLY D, BRADSHAW J, *et al.* CO<sub>2</sub> storage capacity estimation: methodology and gaps [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2007, 1(4): 430-443.
- [9] BRADSHAW J, BACHU S, BONIJOLY D, *et al.* CO<sub>2</sub> storage capacity estimation: Issues and development of standards [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2007, 1(1): 62-68.
- [10] 桑树勋, 刘世奇, 王文峰, 等. 深部煤层 CO<sub>2</sub> 地质储存与煤层气强化开发有效性理论及评价 [M]. 北京: 科学出版社, 2020: 403-435.
- [11] 刘桂臻, 李琦. 气候变化背景下二氧化碳地质封存的盆地级选址评价方法 [J]. *气候变化研究快报*, 2014, 3(1): 13-19.  
LIU Guizhen, LI Qi. Assessment methodology of basin-scale site selection for CO<sub>2</sub> geological storage under background of climate change [J]. *Climate Change Research Letters*, 2014, 3(1): 13-19.
- [12] CHADWICK A, ARTS R, BERNSTONE C, *et al.* Best practice for the storage of CO<sub>2</sub> in saline aquifers—observations and guidelines from the SACS and CO<sub>2</sub> STORE projects [R]. Nottingham: British Geological Survey, 2008.

- [13] GRATALOU P, BONIJOLY D, BROSE E, *et al.* A site selection methodology for CO<sub>2</sub> underground storage in deep saline aquifers: case of the Paris basin [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 2929–2936.
- [14] KOVSCEK A R. Screening criteria for CO<sub>2</sub> storage in oil reservoirs [J]. *Petroleum Science and Technology*, 2002, 20(7/8): 841–866.
- [15] BENSON Sally M, MYER Larry R, OLDENBURG Curtis M *et al.*. GEO-SEQ best practices manual – geologic carbon dioxide sequestration: Site evaluation to implementation [EB/OL]. (2004–10–23) [2021–08–26]. <https://escholarship.org/uc/item/27k6d70j>.
- [16] BACHU S, ADAMS J J. Sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media in response to climate change: capacity of deep saline aquifers to sequester CO<sub>2</sub> in solution. *Energy conversion and management* [J]. *Energy Conversion & Management*, 2003, 44(20): 3151–3175.
- [17] OLDENBURG C M. Screening and ranking framework for geologic CO<sub>2</sub> storage site selection on the basis of health, safety, and environmental risk [J]. *Environmental Geology*, 2008, 54(8): 1687–1694.
- [18] OLDENBURG C M, LEWICKI J L, DOBECK L, *et al.* Modeling gas transport in the shallow subsurface during the ZERT CO<sub>2</sub> release test [J]. *Transport in Porous Media*, 2010, 82(1): 77–92.
- [19] FORBES S M, VERMA P, CURRY T E, *et al.* Guidelines for carbon dioxide capture, transport and storage [J]. Washington DC: World Resources Institute, 2008.
- [20] RODOSTA T D, LITYNSKI J T, PLASYNSKI S I, *et al.* U. S. Department of energy's site screening, site selection, and initial characterization for storage of CO<sub>2</sub> in deep geological formations [J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 4664–4671.
- [21] CARPENTER M, KVIEN K, AARNES J. The CO<sub>2</sub>qualstore guideline for selection characterisation and qualification of sites and projects for geological storage of CO<sub>2</sub> [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 5(4): 942–951.
- [22] 张森琦, 郭建强. 中国二氧化碳地质储存地质基础及场地地质评价 [M]. 北京: 地质出版社, 2011.
- [23] WEI N, LI X, WANG Y, *et al.* A preliminary sub-basin scale evaluation framework of site suitability for onshore aquifer-based CO<sub>2</sub> storage in China [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013(12): 231–246.
- [24] 中国 21 世纪议程管理中心, 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心. 中国二氧化碳地质封存选址指南研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- [25] 贾小丰, 张杨, 张徽, 等. 中国二氧化碳地质储存目标靶区筛选技术方法 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(4): 1314–1326.
- JIA Xiaofeng, ZHANG Yang, ZHANG Hui, *et al.* Method of target area selection of CO<sub>2</sub> geological storage in China [J]. *Journal of Jilin University( Earth Science Edition)*, 2014, 44(4): 1314–1326.
- [26] WHITE C M, SMITH D H, JONES K L, *et al.* Sequestration of carbon dioxide in coal with enhanced coalbed methane recovery: A review [J]. *Energy & Fuels*, 2005, 19(3): 659–724.
- [27] 刁玉杰, 张森琦, 郭建强, 等. 深部咸水层二氧化碳地质储场地选址储盖层评价 [J]. *岩土力学*, 2012, 33(8): 2422–2428.
- DIAO Yujie, ZHANG Senqi, GUO Jianqiang, *et al.* Reservoir and caprock evaluation of CO<sub>2</sub> geological storage site selection in deep saline aquifers [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(8): 2422–2428.
- [28] 吴江莉, 马俊杰. 浅议 CO<sub>2</sub> 地质封存的潜在风险 [J]. *环境科学导刊*, 2012, 31(6): 89–93.
- WU Jiangli, MA Junjie. A discussion about potential risks of geological storage of CO<sub>2</sub> [J]. *Environmental Science Survey*, 2012, 31(6): 89–93.
- [29] 曹龙, 边利恒. CO<sub>2</sub> 地质封存技术与封存潜力评价方法研究进展 [J]. *地下水*, 2013, 35(6): 211–213.
- CAO Long, BIAN Liheng. CO<sub>2</sub> geological storage technology and evaluation method of potential sequestration: A review [J]. *Groundwater*, 2013, 35(6): 211–213.
- [30] PNKDE S, RANJITH P G, CHOIS K. A study of methodologies for CO<sub>2</sub> storage capacity estimation of coal [J]. *Fuel*, 2012, 91(1): 1–15.
- [31] LI D Y, LIU Q F, WEINGER P, *et al.* High-pressure sorption isotherms and sorption kinetics of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> on coals [J]. *Fuel*, 2010, 89(3): 569–580.
- [32] 韩赓, 梁荣柱. 深部盐水层二氧化碳储量的计算新方法 [J]. *西部探矿工程*, 2011(6): 112–115.
- HAN Yi, LIANG Rongzhu. The new means of estimation of CO<sub>2</sub> storage capacity in deep saline aquifer [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2011(6): 112–115.
- [33] 李小春, 刘延锋, 白冰, 等. 中国深部咸水含水层 CO<sub>2</sub> 储存优先区域选择 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(5): 963–963.
- LI Xiaochun, LIU Yanfeng, BAI Bing, *et al.* Ranking and screening of CO<sub>2</sub> saline aquifer storage zones in China [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5): 963–963.
- [34] TURK G, COBB T, JANKOWSKI D, *et al.* CO<sub>2</sub> Transport: A new application of the assignment problem [J]. *Energy*, 1987, 12(2): 123–130.
- [35] 沈平平, 廖新维, 刘庆杰. 二氧化碳在油藏中埋存量计算方法 [J]. *石油勘探与开发*, 2009(2): 93–97.
- SHEN Pingping, LIAO Xinwei, LIU Qingjie. Methodology for estimation of CO<sub>2</sub> storage capacity in reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009(2): 93–97.
- [36] 刘延锋, 李小春, 白冰. 中国 CO<sub>2</sub> 煤层储存容量初步评价 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(16): 2947–2952.
- LIU Yanfeng, LI Xiaochun, BAI Bing. Preliminary estimation of CO<sub>2</sub> storage capacity of coalbeds in China [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2947–2952.
- [37] Li X, Wei N, Liu Y, *et al.* CO<sub>2</sub> point emission and geological storage capacity in China [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 2793–2800.
- [38] 姚素平, 汤中一, 谭丽华, 等. 江苏省 CO<sub>2</sub> 煤层地质封存条件

- 与潜力评价[J]. 高校地质学报, 2012, 18(2): 203–214.
- YAO Suping, TANG Zhongyi, TAN Lihua, *et al.* The CO<sub>2</sub> geological sealing conditions and potential evaluation in coal seams in Jiangsu province [J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(2): 203–214.
- [39] 李琦, 魏亚妮, 刘桂臻. 中国沉积盆地深部 CO<sub>2</sub> 地质封存联合咸水开采容量评估[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 93–96.
- LI Qi, WEI Yani, LIU Guizhen. Assessment of CO<sub>2</sub> storage capacity and saline water development in sedimentary basins of China [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(4): 93–96.
- [40] 张冰, 梁凯强, 王维波, 等. 鄂尔多斯盆地深部咸水层 CO<sub>2</sub> 有效地质封存潜力评价[J]. 非常规油气, 2019, 6(3): 19–24.
- ZHANG Bing, LIANG Kaiqiang, WANG Weibo, *et al.* Evaluation of effective CO<sub>2</sub> geological sequestration potential of deep saline aquifer in Ordos basin [J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(3): 19–24.
- [41] ZHU Q, WANG C, FAN Z H, *et al.* Optimal matching between CO<sub>2</sub> sources in Jiangsu province and sinks in Subei–Southern South Yellow Sea basin, China [J]. Greenhouse Gases: Science and Technology, 2019, 9(1): 95–105.
- [42] 刘延锋, 李小春, 方志明, 等. 中国天然气田 CO<sub>2</sub> 储存容量初步评估[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2277–2281.
- LIU Yanfeng, LI Xiaochun, FANG Zhiming, *et al.* Preliminary estimation of CO<sub>2</sub> storage capacity in gas fields in China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2277–2281.
- [43] 倪建宇, 初凤友, 金翔龙. CO<sub>2</sub> 海洋封存的研究现状[C]//二氧化碳减排控制技术与资源化利用研讨会论文集, 上海: 2009: 84–88.
- NI Jianyu, CHU Fengyou, JIN Xianglong. An overview of ocean storage of carbon dioxide [C]//The proceedings of carbon dioxide emissions control technology and resource utilization, Shanghai: 2009: 84–88.
- [44] KOIDE H, SHINDO Y, TAZAKI Y, *et al.* Deep sub-seabed disposal of CO<sub>2</sub>—The most protective storage [J]. Energy Conversion & Management, 1997, 38(2): 253–258.
- [45] CALDEIRA K, RAU G H. Accelerating carbonate dissolution to sequester carbon dioxide in the ocean: Geochemical implications [J]. Geophys Research Letters, 2000, 27(2): 225–228.
- [46] 霍传林. 我国近海二氧化碳海底封存潜力评估和封存区域研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
- HUO Chuanlin. Study on the potential evaluation and the storage areas of the carbon dioxide seabed storage in offshore China [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014.