

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.02.09

引用格式: 曹珂, 吴林强, 王建强, 等. 我国海洋地质碳封存研究进展与展望[J]. 中国地质调查, 2023, 10(2): 72–76. (Cao K, Wu L Q, Wang J Q, et al. Progress and perspective of marine geological carbon storage in China[J]. Geological Survey of China, 2023, 10(2): 72–76.)

我国海洋地质碳封存研究进展与展望

曹珂¹, 吴林强², 王建强³, 孙建业¹, 孙晶¹

(1. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;
3. 浙江省水文地质工程地质大队, 浙江 宁波 315012)

摘要: 我国海洋地质碳封存潜力巨大, 主要碳封存目标区与主要 CO₂ 排放源匹配性良好, 可以为碳中和目标的实现提供重要助力。论文分析了我国开展海洋地质碳封存的必要性, 介绍了国内外海洋地质碳封存工作的研究进展; 指出海洋地质碳封存区划研究、海洋地质碳封存与资源协同性研究、海洋地质碳封存数据库建设以及海洋地质碳封存示范工程的实施是当前工作的重点。研究可为我国碳中和目标的实现提供数据支撑和技术储备。

关键词: 海洋; 地质碳封存; 进展与展望

中图分类号: P67; P714+.6; P754; X14

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2023)02–0072–05

0 引言

我国承诺力争在 2030 年前实现碳达峰, 努力争取在 2060 年实现碳中和, 实施有效的碳封存措施有助于我国碳中和目标的实现。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)在《全球升温 1.5 °C 特别报告》^[1]中提出了 4 种将全球均温升幅控制在工业化水平 1.5 °C 以内的计算模型, 4 种模型的实现都需要移除大气中的 CO₂, 其中 3 种模型涉及大规模运用碳捕集与封存(Carbon Capture and Storage, CCS)技术。国际能源署已经认识到利用 CCS 技术有望实现化石能源利用的净零排放。发展碳封存是实现净零排放的必要措施之一, 受到了国际社会的广泛关注^[1]。

CCS 技术可将 CO₂ 从相关气体或气流中分离出来, 输送并封存在地质构造中, 从而使 CO₂ 长期与大气隔绝开。捕集的 CO₂ 被直接注入至地下 800~3 500 m 的地质构造中, 经过一系列岩石的物理束缚、溶解和矿化作用, 将 CO₂ 封存在地质体中,

可用于封存 CO₂ 的地质体主要有地下咸水层、枯竭油气田等。

我国东部沿海的山东、江苏、河北、广东等省份是 CO₂ 排放大省, 其中 2018 年碳排放量最大的河北省年 CO₂ 排放量达到了 $9.12 \times 10^8 \text{ t}^{[2]}$ 。根据相关研究, 250 km 是不需要 CO₂ 中增压站的最长管输距离, 在这个范围内 CCS 设施的建设成本较低, 因此 250 km 常被作为中国源汇匹配分析中的限制距离^[3]。根据这一标准, 在鄂尔多斯、渤海湾、松辽、塔里木和准格尔等盆地可以为部分 CO₂ 排放源寻找到适宜的封存场地, 但东南地区的 CO₂ 排放源无法在 250 km 的范围内找到适宜的封存场地^[3]。尽管陆域的渤海湾盆地(陆域)和苏北盆地可以为东部主要碳排放源提供封存场地, 但这些地区人口密度大、土地资源少、重大工程设施集中, 存在一定的安全风险, 而我国海域内的渤海湾盆地(海域)、南黄海盆地、东海陆架盆地、珠江口盆地、北部湾盆地、莺歌海盆地及琼东南盆地均毗邻陆地, 有一定的研究基础, 在场地空间、环境影响和风险可控性等方面具有一定的优势, 可以作为沿海主要 CO₂ 排放源的目标封存场

收稿日期: 2020–07–08; 修订日期: 2020–08–05。

基金项目: 中国地质调查局“浙江中部海岸带综合地质调查(编号: DD20190276)”项目资助。

第一作者简介: 曹珂(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事沉积学、海岸带综合地质调查方面的调查研究工作。Email: cdutck@163.com。

地。本文旨在通过介绍国内外海洋地质碳封存的研究进展,探讨海洋地质工作支撑国家碳中和需求的途径,为我国碳中和目标的实现提供数据支撑和技术储备。

1 国际海洋地质碳封存研究进展

从国际经验来看,世界主要发达国家的地质调查机构都将调查和研究 CO₂ 地质封存作为拓展地质工作领域、支撑服务国家重大战略的重要发力点。

美国在 CCS 设施建设和 CO₂ 地质封存潜力评价上已较为成熟。至 2020 年,美国拥有全球近一半的 CCS 设施,已有 10 家大型工厂正在运营 CCS 商业设施,另有 18 个设施处于不同的开发阶段^[4]。在美国 CCS 产业的发展过程中,美国地质调查局 (United States Geological Survey, USGS)、美国能源部等机构发挥了关键作用。自 1997 年开始,为储存工业产生的超过 50×10^4 t 的 CO₂,美国能源部下属的国家能源技术实验室获得的 CO₂ 地质封存资助项目累计达 140 个,重点开展 CO₂ 地质封存的选址、储层表征、建模和监测工作^[5]。USGS 是美国 CO₂ 海底地质封存的重要研究力量:2008 年,USGS 开展了“碳封存——地质研究和评估”项目;2013 年,USGS 完成了美国陆上和各州管辖海域的 CO₂ 地质封存潜力评价工作^[6],其工作主要集中于分析影响 CO₂ 存储能力和商业可行性的地质和地球化学因素,确定并评价潜在的地质储层。此外,美国将 CO₂ 驱油作为墨西哥湾海域提高油气采收率的主导技术^[7]。

欧盟将 CO₂ 海底封存技术作为应对气候挑战的关键手段,2020 年已有 13 个运行中或处于不同开发阶段的商业 CCS 设施,到 2030 年欧盟预计将建成 51 个 CCS 设施,CO₂ 年封存量将达到 $5\,000 \times 10^4$ t^[8]。2010 年,欧盟启动了“CO₂ 地质存储”大科学计划,共有来自 28 个国家的 34 家机构参与,其任务是建立国际间持久的 CO₂ 封存研究网络,制定国际、欧盟、国家层面的 CO₂ 封存研究和实践路线图,推动欧洲 CCS 的规模化和产业化,为 CO₂ 地质储存监管制度提供支撑^[9]。

挪威是全球最早开展 CO₂ 海底地质封存的 国家。1996 年挪威启动了全球首个 CO₂ 海底地质封存

项目“斯莱普内尔”,每年封存 CO₂ 达 100×10^4 t;2008 年,挪威启动了 CO₂ 海底地质封存项目“斯诺赫维特”,每年封存的 CO₂ 达 70×10^4 t,2 个项目已累计封存 CO₂ 超过 $2\,000 \times 10^4$ t。挪威在 2016 年启动了“北极光”项目,该项目是目前欧洲最先进的 CO₂ 海底地质封存项目之一,也是全球第一个允许第三方接入、开放式的 CO₂ 海底地质封存项目,预计最快于 2024 年在北海海底实现每年 150×10^4 t 的 CO₂ 封存,长期目标是将 CO₂ 海底地质封存的规模扩大到 500×10^4 t^[10]。

英国是全球首个公布碳封存相关信息的国家。2013 年,英国地质调查局 (British Geological Survey, BGS) 与英国皇家财政部以国有资产的形式合作开发了碳封存数据库,并通过该数据库公布英国海底深部有超过 700×10^8 t 的碳地质储藏潜力^[11]。BGS 受英国政府委托开展 CCS 重大工程项目选址调查,建立了 CO₂ 地下封存实验室,重点开展 CO₂ 的地下储集库地质条件和储集能力的综合评估,研发碳注入和碳封存的相关技术,储集库长期的地质环境监测以及泄漏风险预警等^[12]。2012 年,英国完成了对北海大陆架油气田的 CO₂ 驱油及封存潜力评估^[11],并在北海海底开展了 CO₂ 泄漏模拟研究,测试并开发了海底封存 CO₂ 泄漏的监测传感器和技术方法^[13]。

日本自 20 世纪 90 年代开始进行深海 CO₂ 封存的相关技术试验,将 CO₂ 海底地质封存技术作为海洋开发技术发展战略的重要组成部分。2008 年,由日本产业经济省牵头,37 家石油、天然气、电力、钢铁等相关领域的日本企业联合成立了一家专门从事 CCS 调查研究利用的公司——Japan CCS (JCCS),并设立了地质调查部门。自 2014 年起,JCCS 实施了“日本海域 CO₂ 封存潜力评估”项目,先后在日本周边的 10 处海域开展地质调查以寻找 CO₂ 封存量达到 10^8 t 的潜力封存点^[14]。2019 年,JCCS 现在距北海道海岸约 4 km,海床之下约 1 000 ~ 2 500 m 的地层中封存了 30×10^4 t 的 CO₂,成功完成既定目标^[4]。

此外,越南、马来西亚、阿联酋、巴西等国也在多处海域开展了海洋地质碳封存的先导试验项目^[15]。巴西的 Lula 海上超大型油田已开始了 CO₂ 驱油的商业化应用^[16],意大利也计划在拉文纳港建设世界上最大的 CO₂ 捕集和封存中心^[4]。

2 我国海洋地质碳封存研究进展

我国的陆上碳封存研究工作近年来进展较为迅速,自 2007 年起共开展了 12 个地质利用与封存项目,大多以提高石油采收率为主要目的,累计封存 CO_2 约 $200 \times 10^4 \text{ t}$ 。相对而言,我国的海洋地质碳封存研究仍以碳封存潜力评估为主,相关研究主要集中在南海北部地区。

Li 等^[17]系统研究了我国南海北部珠江口、北部湾、莺歌海和琼东南等盆地中主要油气田的 CO_2 封存潜力,估算其碳封存潜力可达 $10 \times 10^8 \text{ t}$; Zhou 等^[18]的研究认为南海北部油田的 CO_2 封存潜力达 $(1.36 \sim 2.43) \times 10^8 \text{ t}$,气田的 CO_2 封存潜力达 $(30 \sim 57) \times 10^8 \text{ t}$; Zhou 等^[18]和 Zhang 等^[19]评估了琼东南盆地的 CO_2 封存潜力,结果显示油田和气田的 CO_2 封存容量分别为 $(0.07 \sim 0.24) \times 10^8 \text{ t}$ 和 $(6.20 \sim 11.88) \times 10^8 \text{ t}$; Li 等^[20]测算了整个南海北部油气田的碳封存潜力,认为已开采的油田和气田中可分别封存 $0.4 \times 10^8 \text{ t}$ 和 $3.9 \times 10^8 \text{ t}$ 的 CO_2 。

Zhou 等^[21]评估了珠江口盆地近海咸水层和油气藏的 CO_2 封存潜力,结果显示油气藏的 CO_2 封存储量仅为 $6\,000 \times 10^4 \text{ t}$; Li 等^[22]对珠江口盆地中的 12 个油田开展了注入 CO_2 提高采收率的研究,评价结果表明 12 个油田中可封存 CO_2 的量约为 $3\,617 \times 10^4 \text{ t}$; Li 等^[23]评估了北部湾盆地的 CO_2 封存能力,结果显示北部湾盆地油田和气田的 CO_2 封存量分别为 $4\,230 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $6\,230 \times 10^4 \text{ t}$ 。

Heinemann 等^[24]估算惠州 21-1 油田的 CO_2 储量为 $220 \times 10^4 \text{ t}$; Li 等^[25]通过 CO_2 驱替提高采收率评估了 CO_2 封存能力,结果表明该油田在可混溶条件下可封存 CO_2 量为 $(810 \sim 1\,080) \times 10^4 \text{ t}$ 。

2013 年,中国地质调查局评估了我国海域 18 个沉积盆地的 CO_2 地质封存潜力和适宜性,结果显示我国海域主要沉积盆地的 CO_2 总封存潜力可达 $1.5 \times 10^{12} \text{ t}$,具有巨大的碳封存潜力。2023 年,中国地质调查局开展了我国海域沉积盆地新一轮 CO_2 地质封存潜力和适宜性评价,结果显示我国海域主要盆地 CO_2 地质封存潜力为 $2.58 \times 10^{12} \text{ t}$ 。

3 我国海洋地质碳封存研究展望

总体来看,我国海洋地质碳封存研究工作刚刚

起步,仍然存在大量问题需要进一步深入研究。

3.1 海洋地质碳封存区划研究

我国东部京津冀、黄河三角洲、长江三角洲、珠江三角洲等区域存在大量 CO_2 排放源,碳减排和碳封存工程的实施是支撑我国实现碳中和目标的重要途径之一,而渤海湾(海域)、北黄海、南黄海、东海陆架、珠江口、北部湾、琼东南、莺歌海等盆地均可作为海洋地质碳封存的目标区域。目前针对这些盆地碳封存潜力的研究主要集中在南海北部区域的油气田,其他盆地大多评价到一级构造单元,各盆地研究不均衡,碳封存具体潜力不明确,难以支撑我国海洋地质碳封存工作的总体需求。

下一步工作需要针对重点盆地开展碳封存潜力评价,查清重点盆地碳封存储层、盖层的分布特征,量化不同层位的碳封存潜力,圈定碳封存目标区,优选一批圈闭构造。在掌握沿海主要碳排放源基础数据的基础上,充分利用现有的海底地形地貌、海底底质、海洋动力等资料,结合海域使用现状及规划,开展 CO_2 排放源和碳封存场地的匹配性研究,提出我国海洋地质碳封存区划建议。

3.2 海洋地质碳封存与资源协同性研究

目前,我国的低浓度 CO_2 捕集成本为 $300 \sim 900 \text{ 元/t}$,罐车运输成本为 $0.9 \sim 1.4 \text{ 元/(t} \cdot \text{km)}$,经济成本依然是制约碳封存发展的重要因素。因此,开展海洋地质碳封存与油气、天然气水合物等资源协同性开发的研究是推动海洋地质碳封存工作的重要途径。

利用 CO_2 驱油提高石油采收率的技术在世界范围内已经得到广泛应用,我国的松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地和准噶尔盆地也开展了 CO_2 驱替采油的先导性试验。“中国陆上已开发油田提高采收率第二次潜力评价及发展战略研究”项目的评估结果显示适合 CO_2 驱替的原油储量为 $1.23 \times 10^{10} \text{ t}$,利用 CO_2 驱替可以累计增产 $1.6 \times 10^9 \text{ t}$ 。

天然气水合物是资源量丰富的清洁能源,被视为未来全球能源发展的战略制高点。但天然气水合物的开采会导致地层亏空、储层失稳,容易导致大量出砂,存在诱发海底滑坡等地质灾害的风险。科学家提出了利用 CO_2 置换开采水合物的设想,在水合物开采的后期注入 CO_2 ,形成的 CO_2 水合物可以填充甲烷水合物分解形成的地层亏空并保持地

层稳定,同时也实现了对 CO_2 的封存。目前相关研究仅从机理上讨论了 CO_2 在沉积物中以水合物形式封存的可能性和效果,其内在的物理化学过程、影响因素、效率、 CO_2 封存与天然气水合物产出的耦合关系等方面的研究仍然需要加强。

3.3 海洋碳封存数据库建设

应当开展海上碳封存潜力评估工作,建立碳封存数据库,集成海域沉积盆地、碳封存有利圈闭的构造地质、地层结构、储盖层、油气藏开发等地质条件,水文地质、工程地质等场地条件,海洋水文动力、海底底质、环境本底等碳封存风险评估数据,形成地质、工程、环境一体化的碳封存专业数据库,逐步建设为支撑我国海洋地质碳封存管理与决策的综合信息平台。

3.4 海洋地质碳封存示范工程

在圈定碳封存目标区的基础上,建议与企业合作实施海洋地质碳封存示范工程,实现碳捕集、运输、注入及监测全流程的技术示范。深入挖掘海洋地质碳封存流程中的地质工作支撑,提前谋划,形成目标区划定、场地选址、路由建设、环境监测等多方面的技术储备,为我国海洋地质碳封存工作的开展奠定基础。

4 结论

CCS 技术是世界各国实现碳中和目标的重要手段之一。我国海洋地质碳封存潜力巨大,具备良好的发展前景。当前阶段,海洋地质工作应重点开展海洋地质碳封存区划研究及海洋地质碳封存与资源协同性研究、海洋地质碳封存数据库建设,并推动海洋地质碳封存示范工程实施,为我国碳中和目标的实现提供数据支撑和技术储备。

参考文献(References):

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Global Warming of 1.5 °C [R]. 2018.
- [2] 中国碳核算数据库[EB/OL]. [2021-07-03]. <https://www.ceads.net.cn/>.
- [3] 蔡博峰,李琦,张贤,等. 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)——中国 CCUS 路径研究[R]. 武汉:生态环境部环境规划院,中国科学院武汉岩土力学研究所,中国 21

世纪议程管理中心,2021.

Cai B F, Li Q, Zhang X, et al. China Carbon Dioxide Capture, Utilization and Storage (CCUS) Report (2021): CCUS Path in China [R]. Wuhan: Institute of Environmental Planning, Wuhan Institute of Geotechnical Mechanics, China Agenda 21 Management Center, 2021.

- [4] 全球碳捕集与封存研究院. 全球碳捕集与封存现状报告 2020 [R]. 2020.
- [5] Global Carbon Capture and Storage Institute. Global Status of CCS 2020 [R]. 2020.
- [6] National Energy Technology Laboratory. Carbon storage program [R]. 2021.
- [7] U. S. Geological Survey. National Assessment of Geologic Carbon Dioxide Storage Resources – summary [R]. 2016.
- [8] Warwick P D, Verma M K, Attanasi E D, et al. A database and probabilistic assessment methodology for carbon dioxide – enhanced oil recovery and associated carbon dioxide retention in the United States [J]. Energy Procedia, 2017, 114: 7055 – 7059.
- [9] International Association of Oil & Gas Producers. CCUS Projects in Europe [R]. 2021.
- [10] CCS Europe. Pan – European coordination action on CO_2 Geological Storage [EB/OL]. [2021-07-03]. <http://www.cg-seurope.net/Partners.aspx?section=16>.
- [11] 余韵, 张涛, 蒋成竹, 等. 挪威二氧化碳海底地质封存助力欧洲实现碳中和目标 [R]. 北京: 中国地质调查局发展研究中心, 2021.
- [12] Yu Y, Zhang T, Jiang C Z, et al. Norway's Undersea Carbon Dioxide Storage in Helps Europe Achieve the Goal of Carbon Neutrality [R]. Beijing: Development and Research Center, China Geology Survey. 2021.
- [13] 姜杉钰, 王峰, 张凤仪. 英国地质调查局支撑减碳工作的经验与启示 [J]. 中国国土资源经济, 2021, 34(4): 19 – 22, 83.
- [14] Jiang S Y, Wang F, Zhang F Y. Experience and enlightenment of the British Geological Survey in supporting decarbonisation [J]. Natl Resour Econ China, 2021, 34(4): 19 – 22, 83.
- [15] British Geological Survey. Consultation Run by the British Geological Survey on Behalf of UKRI and NERC [R]. 2021.
- [16] Dean M, Blackford J, Connelly D P, et al. Insights and guidance for offshore CO_2 storage monitoring based on the QICS, ETI MMV, and STEMM – CCS projects [J]. Int J Greenh Gas Control, 2020, 100: 103120.
- [17] Tanaka Y, Sawada Y, Tanase D, et al. Tomakomai CCS demonstration project of Japan, CO_2 injection in process [J]. Energy Procedia, 2017, 114: 5836 – 5846.
- [18] 周蒂, 李鹏春, 张翠梅. 离岸二氧化碳驱油的国际进展及我国近海潜力初步分析 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 1 – 9.
- [19] Zhou D, Li P C, Zhang C M. Offshore CO_2 – EOR: Worldwide progress and a preliminary analysis on its potential in offshore sedimentary basins off China [J]. Southern Energy Constr, 2015,

- 2(3):1–9.
- [16] Malone T, Kuuskraa V, Dipietro P. CO₂ – EOR Offshore Resource Assessment[R]. National Energy Technology Laboratory, 2014.
- [17] Li H Y, Lau H C, Wei X F, et al. CO₂ storage potential in major oil and gas reservoirs in the northern South China Sea[J]. Int J Greenh Gas Control, 2021, 108:103328.
- [18] Zhou D, Zhao D Q, Liu Q, et al. The GDCCSR project promoting regional CCS – readiness in the Guangdong Province, South China[J]. Energy Procedia, 2013, 37:7622 – 7632.
- [19] Zhang C M, Zhou D, Li P C, et al. CO₂ storage potential of the Qiongdongnan Basin, northwestern South China Sea[J]. Greenh Gases; Sci Technol, 2014, 4(6):691 – 706.
- [20] Li P C, Zhou D, Zhang C M, et al. Potential of sub – seafloor CO₂ geological storage in northern South China Sea and its importance for CCS development in south China[J]. Energy Procedia, 2013, 37:5191 – 5200.
- [21] Zhou D, Zhao Z X, Liao J, et al. A preliminary assessment on CO₂ storage capacity in the Pearl River Mouth basin offshore Guangdong, China[J]. Int J Greenh Gas Control, 2011, 5(2):308 – 317.
- [22] Li P C, Liu X Y, Lu J M, et al. Potential evaluation of CO₂ EOR and storage in oilfields of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. Greenh Gases; Sci Technol, 2018, 8(5):954 – 977.
- [23] Li P C, Zhou D, Zhang C M, et al. Assessment of the effective CO₂ storage capacity in the Beibuwan Basin, offshore of southwestern P. R. China[J]. Int J Greenh Gas Control, 2015, 37:325 – 339.
- [24] Heinemann N, Haszeldine R S, Shu Y T, et al. CO₂ storage as dispersed trapping in proximal areas of the Pearl River Mouth Basin offshore Guangdong, China[J]. Energy Procedia, 2017, 114:4436 – 4443.
- [25] Li P C, Yi L Z, Liu X Y, et al. Screening and simulation of offshore CO₂ – EOR and storage: A case study for the HZ21 – 1 oil-field in the Pearl River Mouth Basin, Northern South China Sea[J]. Int J Greenh Gas Control, 2019, 86:66 – 81.

Progress and perspective of marine geological carbon storage in China

CAO Ke¹, WU Linqiang², WANG Jianqiang³, SUN Jianye¹, SUN Jing¹

(1. Qingdao Institute of Marine Geology, Shandong Qingdao 266071, China; 2. Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China; 3. Zhejiang Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Zhejiang Ningbo 315012, China)

Abstract: In China, the potential of marine geological carbon storage is huge and the main target areas for carbon storage are well matched with the main carbon dioxide emission sources, which could provide an important way to achieve carbon neutrality. The authors of this paper have analyzed the necessity of marine geological carbon storage and introduced its research progress at home and abroad. And the studies on regionalization, synergism of carbon storage and resource utilization, database construction and implementation of the demonstration projects of carbon storage have been pointed out to be the next working emphases. This research could provide data support and technology stock for carbon neutrality in China.

Keywords: ocean; geological carbon storage; progress and perspective

(责任编辑: 魏昊明)