

全球海洋 CCS 技术进展及对广东的借鉴

杨伦庆, 张洒洒, 赵子亮

(广东省海洋发展规划研究中心, 广州 510220)

摘要: 在全球碳减排与气候变化议题日益凸显的今日, 海洋 CCS(碳捕集与封存)作为应对全球气候变化的重要技术之一, 正引领着全球应对气候变化的科技浪潮。对世界主要国家海洋 CCS 发展趋势进行研究, 分析广东目前海洋 CCS 发展情况, 从开展海底碳封存潜力评估、建立行业规范和标准体系、发展碳封存技术、开展试点示范工程等方面提出针对性对策建议, 以期培育广东绿色发展新引擎, 助力广东碳中和目标的率先达成。

关键词: 碳封存; 海洋 CCS(碳捕集与封存); 海洋; 广东

中图分类号: P74; F426.22; X701 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)19-0191-05

中国将力争于 2030 年前实现二氧化碳排放达到峰值、2060 年前实现碳中和。党的二十大提出要“积极稳妥推进碳达峰碳中和, 协同推进降碳、减污、扩绿、增长”。二氧化碳捕集、封存是化石能源近零排放的关键技术选择, 也是建材、钢铁、化工等难减排行业深度脱碳的可行技术方案, 实施有效的碳封存措施有助于中国碳中和目标的实现。沿海地区是工业集聚区域, 也是二氧化碳集中排放区域, 相比陆上封存, 实施海洋封存可实现更好的源汇匹配, 且安全性更高, 已是全球碳捕集、利用与封存的重点发展方向^[1]。封存二氧化碳于海底, 作为多国认可的应对全球变暖策略, 已催生出 CCS(carbon capture and storage, 碳捕集与封存)技术和 CCUS(carbon capture, utilization and storage, 碳捕集、利用与封存)技术^[2]。目前, 针对海洋 CCS 研究重点集中在实践方面, 卓成刚和刘秀慧^[3]通过归纳国内外海洋 CCS 的进展情况, 提出中国应当在技术、法律规范和项目示范上进行提升。赵金洲等^[4]提出要形成适用于中国海洋地质的 CCS 高效注入和增效封存方法。在海洋 CCS 技术应用方面, 彭天玥等^[5]基于专利分析, 对海洋碳封存技术发展进行总结, 认为目前中国专利申请质量整体偏低, 需吸取国内外先进经验, 积极推进学科交叉研究, 补足技术短板。杨旅涵等^[6]对海洋 CCS 的选址和监测技术进行了总结, 提出要多维度运用多种监测技

术, 并在合适海域开展碳封存示范项目。宋秦平和尹晓娜^[7]基于日本苫小牧港 CCS 示范项目的海洋碳封存环境风险监测方法, 提出海洋 CCS 环境监测的相关建议。

广东是经济第一大省, 也是能源消耗大省^[8], 能源消费以化石能源为主, 煤炭、石油约占 6 成, 清洁低碳、稳定的能源体系尚未完善, 碳达峰、碳中和时间窗口偏紧。海洋 CCS 作为实现碳中和目标不可或缺的关键途径之一, 发展海洋 CCS 对于降低化石能源使用过程中的碳排放、推动能源结构的优化和升级、助力实现“双碳”目标具有重要意义。目前, 针对广东的海洋 CCS 研究以个案研究为主, 缺少全局性的研究。例如, 刘雪雁等^[9]以南海北部珠江口盆地惠州 21-1 油田为研究对象, 通过建立模型, 对碳封存潜力进行定量分析和筛选评价研究; 衣华磊等^[10]以中国首个海上超百万吨级碳封存示范工程恩平 15-1 油田为例, 分析该海上 CSS 项目的工程方案。广东是海洋大省, 海洋经济总体实力强, 海洋产业门类齐全^[11], 产业链完善, 发展海洋 CCS 具备良好的自然条件、技术储备和产业支撑, 基于全球海洋 CCS 技术进展, 结合广东海洋 CCS 发展现状, 提出具有针对性的对策建议, 助力广东能结构转型升级, 为中国加快实现“双碳”目标贡献广东力量。

收稿日期: 2024-08-20

基金项目: 广东省哲学社会科学规划 2023 年度重大项目(GD23ZD07)

作者简介: 杨伦庆(1983—), 男, 江西上饶人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为海洋治理与政策、海洋产业; 通信作者张洒洒(1995—), 女, 安徽阜阳人, 硕士, 工程师, 研究方向为海洋战略、海洋经济; 赵子亮(1988—), 男, 湖北咸宁人, 硕士, 工程师, 研究方向为海洋战略、海洋经济。

1 发展海洋 CCS 必要性分析

1.1 海洋 CCS 发展潜力巨大

海洋 CCS 是指将二氧化碳“捕获”并且“封存”在海底的工程,是减少大气中二氧化碳浓度的有效方法之一。从国际经验来看,海洋 CCS 因其潜力大、安全性高、环境风险小等特点,已成为多个国家采纳的减缓全球气候变暖的解决方案。根据国际能源署(IEA)报告,到 2060 年,累积碳减排的 14% 将来自碳封存,其中海洋 CCS 是重要组成部分。

1.2 海洋碳储存规模大

海洋每年可吸收人类活动产生的 100 亿 t 二氧化碳,约为人类活动排放二氧化碳总量的 20%~30%^[12]。研究表明,全球海域沉积盆地的二氧化碳封存容量可达总量的 40%^[13]。2023 年 1 月,自然资源部中国地质调查局首次发布中国海域二氧化碳地质封存潜力评价结果表明,中国海洋二氧化碳封存潜力巨大,预测达 2.58 万亿 t^[14],可为中国实现“双碳”目标提供重要支撑。

1.3 海洋环境更适宜碳封存

相比较于陆地,海洋环境有着更有利于封存二氧化碳的条件。从封存环境看,海底形成的圈闭面积大、水层和盖层条件好、稳定性好;在深海高压、低温环境中,二氧化碳呈现出气态、液态、固态等多相态转换,有望扩展碳封存空间和模式,实现多级多模式海洋柔性封储固碳;而且由于海上远离人口密集区,工程实施及项目运行对人类生活影响较小,对环境的影响也更小。从有效消纳的条件看,海洋环境下的溶解泵、物理泵、化学泵,可以为二氧化碳提供物理固碳的有利条件,海底碳酸盐生成速度更快,可以促成永久矿化的实现。

1.4 海洋碳储存周期长、安全性高

与陆地生态系统的碳汇储存周期相比,海洋碳储存可达数百年甚至上千年。与陆地碳封存相比,海洋碳封存具有远离人类居住地、远离人类赖以生存的地表水体和地下水层的特点,安全性更高,环

境风险更低。封存地质体上表覆盖的海水不仅可以避免二氧化碳泄露直接排放到大气中,附加的海水压力也降低了对封盖封闭性的要求,使得二氧化碳的封存具有更高的稳定性。1996 年挪威启动的 Sleipner 油田 CCUS 项目是全球海底碳封存领域运行最久且技术最成熟的案例,项目将油气开采伴生的二氧化碳分离后,注入海底咸水层封存,利用咸水层气密性特性封存二氧化碳,成为全球第一个商业规模的咸水层碳封存项目,其已稳定运行超 20 年,年封存量达 100 万 t 二氧化碳,至今无泄漏记录。

2 世界主要国家海洋 CCS 发展

与此同时,海洋二氧化碳封存技术难度大、成本高,当前各国海洋 CCS 仍处于技术示范阶段,未进入大规模应用,且主要为海洋油气开发的伴生气回收(表 1)。海洋 CCS 进展情况主要可概括以下 5 个方面。

2.1 开展海洋 CCS 的潜力评价和风险评估

日本 2008 年成立 JCCS 公司,专门从事 CCS 调查研究利用,自 2014 年起实施“日本海域二氧化碳封存潜力评估”项目,在日本周边 10 处海域开展潜力封存点搜寻^[15]。英国 2012 年起在北海海底开展二氧化碳泄露模拟研究,测试和开发海底碳封存监测传感器和技术方法;2013 年,公布了全球首个碳封存信息数据库,并公布了其海洋 CCS 规模潜力。欧盟依靠英国地质调查局、德国亥姆霍兹极地海洋研究中心等机构,持续开展环境监测专项研究,论证海洋 CCS 的可靠性,如海洋环境对二氧化碳封存潜在泄露的敏感性研究、二氧化碳泄露成本的补救措施等^[16]。

2.2 通过立法和制定高层级规划推动海洋 CCS 发展

2024 年 5 月 29 日,德国批准修订通过《二氧化碳储存法》,允许将二氧化碳储存在北海或内陆的海床上,并允许在专属经济区或大陆架勘探海上封

表 1 全球典型海洋 CCS 项目统计

投运年份	项目名称	所在国家	位置	设施状态	二氧化碳来源	封存量/(10 ⁶ t·a ⁻¹)	地质封存类型
1996	Sleipner	挪威	海洋	运行中	伴生气	1.00	咸水层
2004	K12-B	荷兰	海洋	停注	伴生气	0.02~0.50	EGR(废气循环)
2008	Snehvit	挪威	海洋	运行中	伴生气	0.70	咸水层
2019	Gorgon	澳大利亚	海岛	运行中	气藏伴生气	3.4~4.00	咸水层
2021	NorthernLights	挪威	海洋	建设中	开放式碳源	1.50(I 期) 5.00(II 期)	咸水层
2023	恩平 15-1	中国	海洋	运行中	伴生气	0.30	咸水层

存场地,经过安全和生态标准验证的场地可用于开发适合工业的碳封存设施,为海洋 CCS 扫除法律障碍。印尼在国家层面立法推动本国 CCS 发展,2023 年 6 月,印尼能源和矿产资源部颁布 2023 年第 2 号条例,对石油天然气行业碳封存相关的活动区域、活动方式进行了法律规定;2024 年 7 月,印尼总统颁布 2024 年第 14 号总统令,提出要推广碳封存技术,充分发掘印尼碳储存潜力,帮助印尼减少碳排放。

2.3 加强资金支持海洋 CCS 技术攻关研究

2011—2023 年,美国政府为 CCS 研究和项目技术攻关总拨款 53 亿美元。在海洋 CCS 领域,NETL(National Energy Technology Laboratory,美国国家能源技术实验室)以美国东部近海和墨西哥湾为重点海域已开展多轮研究和开发项目,聚焦碳封存资源量和环境影响评估、相关技术研发以及商业化路径。2023 年 10 月,美国能源部为 8 个州 11 个项目提供 3 600 万美元用于加速开发海洋 CCS 技术,同年 11 月,拨款 4.44 亿美元支持国家碳管理行业发展,推动美国陆域和海域碳封存中心基础设施建设。英国财政部于 2023 年宣布,为碳封存设立 200 亿英镑的拨款,希望在 2030 年建成 4 个碳封存集群。

2.4 加快海洋 CCS 基础设施建设

在二氧化碳接收端码头及运输船舶方面,挪威在 2020 年提出“龙船计划”,计划 10 年内投资 26 亿美元建设完整的碳封存产业体系基础设施,其中包括在大陆架开辟多个海底永久储碳区、建立欧洲海底碳封存中心、建设临港二氧化碳工厂及运输船等。日本川崎汽船在 2022 年 12 月与挪威签署 2 艘 7 500 m³ 液化二氧化碳运输船租赁合同,船舶用于将液化二氧化碳从工业排放设施运往二氧化碳接收端码头。在海洋 CCS 管道铺设方面,美国、挪威等国家较早进行海洋 CCS 管道建设,目前全球海洋 CCS 管道已超过 440 km,如挪威 Snøhvit 管道全长 150 km,处于海底 330 m 深处,管道输送压力 20 MPa,平均每年完成二氧化碳输气量 70 万 t,用于将岸上液化天然气生产企业形成的二氧化碳反注回油田。中国二氧化碳管道输送目前处于中试阶段,暂无海底管道大规模输送能力^[17]。

2.5 引入市场机制推动海洋 CCS 产业化

2022 年 6 月,英国北海过渡管理局启动第一轮碳封存许可证申请,向 14 家公司颁发共 21 个碳封存许可证,覆盖面积达 1.2 万 km²,计划到 2030 年实现年封存 3 000 万 t 二氧化碳的目标,占英国

2021 年碳排放量的 10%。2024 年 3 月,英吉利海峡碳封存许可证招标程序启动,未来将向市场开放更多海域开展碳封存商业活动。挪威通过政府招标的形式向企业颁发碳储相关勘探许可证,推动 CCS 大规模商业化。2024 年 3—6 月,挪威能源部陆续公开北海多个区域的碳储勘探许可证申请,在 2024 年 3 月北海两个区域的招标中,就收到 8 家公司申请,海洋 CCS 成为挪威一项海洋新兴产业。

3 广东海洋 CCS 发展情况分析

3.1 广东近海拥有良好二氧化碳封存所需的地质条件

毗邻广东的南海北部区域广泛发育了新生代大型沉积盆地,如珠江口、莺歌海、北部湾及琼东南等海上含油气盆地,这些盆地面积广、沉积层厚、油气资源丰富,储集层高孔隙度、高渗透率,盖层优质,具备二氧化碳大规模封存潜力(分别约 308 亿、161 亿、52 亿、4 亿 t)。同时,区域内天然气水合物资源丰富,有利于二氧化碳置换天然气水合物进行碳封存。^[18]

3.2 广东沿海主要二氧化碳排放源分布

广东省工业发达,拥有众多电力、石化、钢铁、水泥等企业,碳排放源多,且主要分布在沿海地区。根据《广东省二氧化碳收集利用运输与封存规划研究报告》^[19]显示,从区域来看,广佛肇和深莞惠是全省碳排放最大的区域,每年碳排放超 1.2 亿 t;其次是粤西(湛茂阳)区域,碳排放约 0.7 亿 t/a;粤东(潮汕揭)地区和珠江西岸地区碳排放规模分别在 0.5 亿、0.4 亿 t/a。从行业来看,电力是广东省最大的温室气体排放行业,碳排放量超过 2 亿 t/a;水泥是广东省第二大排放行业,排放规模每年接近 1 亿 t;广东省石化行业企业的碳排放规模预计在 2 500 万 t/a 左右。根据《广东省 2023 年度碳排放配额分配方案》,广东省 2023 年度纳入碳排放管理和交易范围的行业企业分别是水泥、钢铁、石化、造纸、民航、陶瓷(建筑、卫生)、交通(港口)和数据中心 8 个行业企业,全省年度配额总量为 2.97 亿 t^[20]。

3.3 广东发展海洋 CCS 具有技术条件和基础

2013 年,广东成立了广东南方碳捕集与封存产业中心,是中国首个 CCUS 产学研平台。2019 年,华润电力海丰 CCUS 项目建成,是亚洲首个投入运行的碳捕集技术测试平台,年捕集二氧化碳总量达到 2 万 t。近年来,广东省积极发展离岸封存技术产业,2022 年启动了国内首个海上规模化 CCUS 集

群研究项目——大亚湾区二氧化碳捕集、利用及封存集群研究项目。2023年6月1日,国内首个百万t级海洋CCS示范工程恩平15-1启用,年封存二氧化碳超11万t,该工程自主研发了国内首套适合海洋高湿高盐环境的超临界大分子压缩机、复合材料二氧化碳分子筛脱水橇等关键设备,初步构建了海上二氧化碳注入、封存和监测的全套技术及装备体系。

4 广东海洋CCS发展若干建议

4.1 开展重点区域海底碳封存潜力评估

建议加快制定海洋CCS专项发展规划,明确重点发展区域、技术路径和阶段性任务。尽快开展南海北部关键区域的海底碳封存地质勘查,掌握海底碳封存储层与盖层的空间分布特征,评估各层位的封存潜力,划定优先封存区域,精选优质圈闭构造。在此基础上,结合全省电力、水泥、化工等工业分布现状和主要碳排放源基础数据,深入分析碳排放源和碳封存场地适配性,筛选出一批具备商业开发潜力的海底储集区块,为海洋CCS产业的规模化开发提供扎实基础。

4.2 建立完善海洋CCS行业规范和标准体系

结合国家及广东的节能减排目标和产业发展规划,建议出台专门针对海洋CCS的扶持政策,明确将海洋CCS纳入产业和技术发展重点支持名录。加快标准规范体系建设,针对海底二氧化碳管道建设、施工、封存选址、监测评价等关键环节,完善相关环保、安全及监管标准体系。研究建立覆盖捕集、储存、运输、封存和利用等全链条的海洋CCS监管机制,为海洋CCS的健康可持续发展提供坚实保障。

4.3 全面提升海洋CCS技术支撑能力

建议加大科研资金支持力度,研究设立海洋CCS科技重大专项,支持高校、科研院所及企业联合开展深海封存、深海监测与评估等海洋CCS关键技术攻关。建立海洋CCS技术创新中心和实验室,支持海洋CCS技术研发和成果孵化。加快海洋二氧化碳区域监测及风险防控能力建设,提升封存区周边海域生态环境、地质监测、预警预报等能力。加快海洋CCS领域人才培养,以企业为技术示范主要载体,建立产学研结合和产业联合创新机制,集成和融合跨领域、跨行业优势力量。

4.4 推动实施海洋CCS项目工程示范

借鉴对太阳能、风能、新能源汽车等绿色技术发展的支持方式,研究制定符合广东实际的海洋

CCS项目技术攻关和项目示范激励政策。争取设立海洋CCS专项引导基金,探索政府与市场有机结合的海洋CCS项目商业化投融资机制,积极利用绿色金融、气候债券、低碳基金等多种方式支持海洋CCS技术研发与项目示范。支持油气、电力、钢铁、水泥等相关行业海洋CCS示范项目建设。优选源汇匹配较好的区域开展百万吨级以上的全流程工程示范,搭建海洋CCS示范项目库,动态管理项目进展,及时总结经验教训,为后续项目提供借鉴。

参考文献

- [1] 李阳,王锐,赵清民,等.中国碳捕集利用与封存技术应用现状及展望[J].石油科学通报,2023,8(4):391-397.
- [2] 李勋祥.海底碳封存2.58万亿吨一个正在崛起的“未来产业”[J].科学大观园,2023(14):54-57.
- [3] 卓成刚,刘秀慧.CO₂海洋封存技术国内外研究进展与启示[J].安全与环境工程,2017(24):84-89.
- [4] 赵金洲,郑建超,任岚,等.海洋CO₂地质封存研究进展与发展趋势[J].大庆石油地质与开发,2024,43(1):1-13.
- [5] 彭天玥,唐得昊,刘丽强,等.基于专利分析的海洋碳封存技术[J].中国科学院院刊,2022,37(9):1347-1359.
- [6] 杨旅涵,施泽明,吴蒙,等.碳封存技术研究进展[J].中国煤炭地质,2023,35(6):44-50.
- [7] 宋秦平,尹晓娜.基于日本苫小牧港CCS示范项目的海洋碳封存环境风险监测方法浅析[J].环境工程,2023,41(7):8-13.
- [8] 王增栩,张佳鑫,李金惠.“双碳”目标下广东低碳发展的技术路径[J].科技和产业,2022,22(12):57-62.
- [9] 刘雪雁,李鹏春,周蒂,等.南海北部珠江口盆地惠州21-1油田CO₂-EOR与碳封存潜力快速评价[J].海洋地质前沿,2017,33(3):56-65.
- [10] 衣华磊,郭欣,贾津耀,等.恩平15-1油田开发CO₂[J].中国海上油田,2023,35(1):163-169.
- [11] 杜小坚,刘强,杨伦庆,等.海洋强国战略视角下广东建设海洋经济强省的路径研究[J].科技和产业,2022,22(12):288-296.
- [12] 中国环境与发展国际合作委员会.海底碳储存:大规模工业储碳的“新希望”[EB/OL].(2019-11-01)[2024-08-19].http://www.cciced.net/ghhphone/xwzx/hfyw/201911/t20191101_101077.html.
- [13] 张少鹏,刘晓磊,程光伟,等.海底碳封存环境地质灾害风险及监测技术研究[J].中国工程科学,2023,25(3):122-130.
- [14] 邝展婷.海底封碳,下一个风口[N].中国船舶报,2024-01-19(005).
- [15] 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.
- [16] 吴林强,张涛,睢雨璋,等.海域二氧化碳地质封存发展的国际经验与启示[J].中国国土资源经济,2023,36

- (4): 59-66, 81.
- [17] 丘惠娴. 海上二氧化碳长输管道成本分析[J]. 化工设计通讯, 2023, 49(4): 70-73.
- [18] 邓一荣, 汪永红, 赵岩杰, 等. 碳中和背景下二氧化碳封存研究进展与展望[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 429-439.
- [19] 广东南方碳捕集与封存产业中心, 广东工业大学碳中和与绿色发展协同创新研究院, 中国能建广东省电力设计研究院. 广东省二氧化碳捕集利用运输与封存规划研究报告[R]. 广州: 广东 CCUS 规划研究座谈会, 2022.
- [20] 广东省生态环境厅. 广东省生态环境厅关于印发广东省 2023 年度碳排放配额分配方案的通知[EB/OL]. (2024-01-11)[2024-08-19]. https://gdee.gd.gov.cn/shbtwj/content/post_4330650.html.

Technological Progress of Global Marine CCS and Its Reference to Guangdong

YANG Lunqing, ZHANG Sasa, ZHAO Ziliang

(Guangdong Marine Development Planning and Research Center, Guangzhou 510220, China)

Abstract: In the context of increasingly prominent global concerns about carbon emission reduction and climate change, marine CCS(carbon capture and storage)stands out as a crucial technology in addressing these issues. It is at the forefront of the global scientific and technological efforts to combat climate change. On the basis of studying the development trends of marine CCS in major countries worldwide. It proposes specific measures and suggestions aimed at advancing marine CCS development in Guangdong. These include conducting assessments of submarine carbon sequestration potential, establishing industry norms and standards systems, developing carbon sequestration technology, and implementing pilot demonstration projects, with a view to fostering a new engine of green development in Guangdong. The goal is to assist Guangdong in taking a leading role towards achieving carbon neutrality.

Keywords: carbon sequestration; marine CCS(carbon capture and storage); marine; Guangdong