

“双碳”目标下二氧化碳海底地质封存在中国的发展潜力及建议

宋爽, 韩建波, 陈虹, 杨文超*

国家海洋环境监测中心, 大连 116023

摘要 以二氧化碳海底地质封存在应对气候变化领域的作用为切入点, 分析了近年来二氧化碳海底地质封存的国内外发展动态。中国在地质结构特点、沿海产业布局等方面具备发展二氧化碳海底地质封存的优势。国外大量的工程应用证明了该技术的可行性和有效性, 国内近年来也启动了工程实践。二氧化碳海底地质封存已纳入国际公约管辖范畴, 部分发达国家已建立专项管理制度。结合“双碳”目标下中国对发展二氧化碳海底地质封存的整体定位, 阐述了未来可能面临的挑战, 并提出相应的对策建议。

关键词 二氧化碳; 碳中和; 地质封存; 海底地质

2015年通过的《巴黎协定》确定, “把全球平均气温升幅控制在工业化前水平以上低于2℃之内, 并努力将气温升幅限制在工业化前水平以上1.5℃之内”^[1]。2020年9月22日, 习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话, 提出“中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和”^[2]。2014年, 中国温室气体排放总量(不包括土地利用、土地利用变化和林业)为123.01亿t二氧化碳当量, 土地利用、土地利用变化和林业的温室气体吸收汇为11.15亿t二氧化碳当量, 考虑温室气体吸收汇后,

温室气体净排放总量为111.86亿t二氧化碳当量^[3]。这意味着实现碳中和需要匹配有效的碳汇手段。自然碳汇受制于植物生长规律和占地面积, 固碳量提升空间有限。因此, 在实现碳中和目标的过程中必须匹配人工碳汇技术, 为大规模碳减排、按期达成碳中和目标提供保障^[4]。二氧化碳捕集与封存(CO₂ capture and storage, CCS)是联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)推荐的稳定大气中温室气体浓度的技术手段^[5], 应意识到二氧化碳海底地质封存对于中国实现碳中和的战略意义, 做好相关的技术储备和政策管理体系的构建。

收稿日期: 2022-04-12; 修回日期: 2022-10-24

作者简介: 宋爽, 初级工程师, 研究方向为海洋倾废技术, 电子信箱: ssong@nmemc.org.cn; 杨文超(通信作者), 副研究员, 研究方向为海洋倾废管理技术, 电子信箱: weyang@nmemc.org.cn

引用格式: 宋爽, 韩建波, 陈虹, 等. “双碳”目标下二氧化碳海底地质封存在中国的发展潜力及建议[J]. 科技导报, 2023, 41(22): 30-37; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.22.005

1 CCS 技术简介及其主要封存方式

CCS是指将二氧化碳从工业或相关排放源分离输送至封存地点,将其长期与大气隔绝的过程^[5]。主要包括3个阶段和4种路线,3个阶段是指二氧化碳的捕集、运输和封存,4种路线包括CCS的可行性研究、前端工程设计、示范工程及商业规模。封存空间的选择是CCS大规模应用的前提。根据国际能源署(International Energy Agency, IEA)发布的《能源技术展望 2020》报告,在可持续发展情景下,二氧化碳捕集量将逐年升高,封存量也随之升高,预计到2070年,6.7 Gt化石燃料产生的二氧化碳将被捕集,6.6 Gt二氧化碳将被封存于地下,封存比例为98.5%^[6]。

适合二氧化碳封存的地质结构既存在于陆地,也存在于海底。根据IPCC发布的《二氧化碳捕集和封存》特别报告,CCS封存技术可概括为地质封存和海洋封存^[5]。二氧化碳海底地质封存属于地质封存的类型之一。海底地质结构因远离蓄水层,且具有岩石盖层和表层海水的压力及阻隔,局部风险降低^[7]。相较于陆地封存,二氧化碳海底地质封存具有封存潜力大、不占用陆地资源、对人类健康和影响较小等优势。二氧化碳海底地质封存主要有3种方式,第一种方式是在油气开发的晚期开展二氧化碳强化采油/二氧化碳驱油(CO₂-enhanced oil recovery, CO₂-EOR),第2种方式是在油气田枯竭之后开展纯粹的二氧化碳封存。这2种方式都要利用油气开发后遗留的空间来封存二氧化碳。第3种方式是利用油气田的设备将二氧化碳封存到油气田附近的咸水层中。目前国内外应用较多的是利用油气田开采空间实施封存。

2 中国发展二氧化碳海底地质封存的主要优势

根据IEA分析,二氧化碳封存场所的选址可能成为未来推进CCS的重要制约因素。从地质结构特点、沿海产业布局等方面看,中国具有显著的发展二氧化碳海底地质封存的优势。

2.1 近岸海底地质结构适宜大规模封存

全球陆上二氧化碳理论封存容量为6万亿~42万亿t,海底理论封存容量为2万亿~13万亿t。中国地质封存潜力约为1.21万亿~4.13万亿t^[8],封存潜力较大。原国家海洋局于2008年启动“中国二氧化碳海底封存能力评估与风险控制技术预研究”公益性项目,对中国近海11个大型沉积盆地封存容量及适宜性进行了初步评估,结果表明,中国近海沉积盆地的封存总容量约为2.5万亿t,其中,珠江口盆地、东海陆架盆地、渤海盆地具有良好的封存适宜性^[9]。

2.2 重点减排地区和行业密集分布在沿海

中国工业发达城市多聚集在东部沿海地区,根据中国二氧化碳排放分布情况,东北工业经济区、京津冀经济区、长江三角洲经济区、珠江三角洲地区等是二氧化碳排放空间格局的重点地区^[10],基于重点区域开展封存工作将大大提升减排效果^[11-12]。封存潜力较大且具有较好封存适宜性的盆地恰好位于这些重点区域的临近海域,如南黄海盆地、珠江口盆地、东海陆架盆地、渤海盆地^[13],体现出中国开展二氧化碳海底地质封存的地理优势。此外,中国沿海地区碳排放具有高度的产业集中性^[14],以火力发电为例,仅沿海市县火力发电厂产生的二氧化碳就约占全国碳排放的10%^[15],利用海底地质条件在火电厂加装CCS设施可为电力行业绿色发展发挥重要作用。

2.3 海上油气勘探开发为封存提供了良好基础

二氧化碳海底地质封存的建设和运行成本较高,降低成本的一个有效途径是利用现有的油气勘探的资料和设备用于二氧化碳封存的选址和工程设计。如果将现有的平台、钻井、管线等设备经适当改造后应用于二氧化碳运输和封存,则离岸封存的基建成本不仅会显著降低,而且建设工期也会缩短。因此,开展二氧化碳海底地质封存示范工程选择封存场地时,可优先考虑利用现有的油气田。中国大陆海岸线长度约为1.8万km,海域总面积约为473万km²,近海石油地质资源和天然气地质资源丰富,近海石油地质资源量为1.074×10¹⁰t,天然气地质资源量为8.1×10¹²m³。近岸海域海上开发及

在建的油气田众多,截至2013年,中国已投入海上开发油气田90个。渤海油田是国家重要的能源基地,现有在生产油气田42个^[16],可为二氧化碳海底地质封存提供大量的场所。

3 国内外二氧化碳海底地质封存技术发展与实践

3.1 国外典型案例

挪威、英国、日本、欧盟等发达国家及地区已将CCS视为积极应对气候变化的有效措施并开展大量相关示范工程研究,重点包括场地封存潜力、泄漏情况监测、环境风险评估等方面。以下对典型项目从全链条工程实践、安全风险评估及跨境运输3个角度展开分析。

1) 全链条工程实践。挪威 Sleipner 项目与 Snohvit 工程,日本苦小牧(Tomakomai)CCS 示范项目等都属于全链条的二氧化碳海底地质封存工程。Sleipner 天然气田工程是世界上首个二氧化碳海底地质封存工程,该工程采用近海咸水层封存技术。自1996年投产以来,该项目年封存量约100万t二氧化碳,期间,欧盟对该工程进行了6次大规模监测,结果显示该区域封存状态安全稳定。2008年,Snohvit 工程投入使用,二氧化碳年封存量约为70万t^[9]。苦小牧CCS 示范项目是日本首次进行的大规模二氧化碳捕集、封存、监测全链条CCS项目,该项目采用“一深一浅”2个离岸储层进行封存,深储层位于海床以下约2400~3000 m处,浅储层位于海床以下约1000~1200 m处^[17]。截至2019年底,该项目已按计划完成注入二氧化碳0.3 Mt^[18]。

2) 安全风险评估。二氧化碳海底地质封存存在一定泄漏风险,对该技术开展环境与安全风险评 估至关重要。欧盟ECO₂项目(EU project ECO₂)及STEMM-CCS 项目(Strategies for Environmental Monitoring of Marine Carbon Capture and Storage)是2个重点关注封存场地环境状况监测及安全风险评估的工程。欧盟于2010年启动ECO₂项目,对二氧化碳海底地质封存进行环境风险评估,分析二

氧化碳海底地质封存泄漏的可能性及对海洋生态环境造成的潜在影响。该项目提出了生态或生物重要海洋区域(Ecologically or Biologically Significant Marine Areas, EBSA)以分析研究区域的海洋资源,评估具有丰富资源场地的环境价值,识别目标储层的潜在泄漏特征,并估算发生泄漏时受影响海床的范围^[19]。STEMM-CCS项目由英国国家海洋学中心牵头开展,该项目在北海中部进行了一项人为二氧化碳释放实验,模拟封存过程中可能出现的意外泄漏情况,旨在检测、表征并量化二氧化碳海底地质封存的泄漏行为^[20-21]。

3) 跨境运输。北极光项目(Northern Light)是全球第1个允许跨境运输二氧化碳并实施海底地质封存的项目。2021年3月,挪威政府正式批准由挪威国家石油公司、荷兰皇家壳牌集团和道达尔公司开发北极光CCS项目,该项目是挪威开展的第3个二氧化碳离岸封存CCS项目。项目捕集的二氧化碳经压缩后将跨境运送至位于北海的封存场地^[22],注入并封存在北海海床以下2600 m处。预计从2024年起,北极光项目每年能够处理和封存150万t二氧化碳,后期将达到500万t^[23]。

3.2 中国工程实践

近年来,中国在CCS的技术研发及工程实践方面取得了一定的进展,中国华能集团有限公司、中国石油天然气集团有限公司、中国神华能源股份有限公司、绿色煤电有限公司、新奥集团股份有限公司等都已着手开展CCS项目研究和产业化^[24]。其中,华能上海石洞口第二电厂于2009年建成投产,是目前世界最大的燃烧后二氧化碳捕集示范工程。中国神华CCS示范工程于2011年5月在鄂尔多斯盆地北部启动试验,该工程是中国首个深部咸水层地质封存项目,涵盖CCS全流程技术体系。为响应国家“双碳”目标,中国海洋石油集团有限公司于2021年8月宣布在南海珠江口盆地开展恩平15-1油田群二氧化碳封存项目,该项目于2023年6月正式投入使用,是恩平15-1油田群开发的环保配套项目,预计二氧化碳年封存量可达约30万t,累计可封存二氧化碳约150万t以上。

4 国际公约及部分国家管理情况

4.1 已纳入国际公约管辖范畴

《联合国气候变化框架公约》及《京都议定书》中明确要求加快控制二氧化碳排放,加强二氧化碳封存技术研究^[25]。《东北大西洋海洋环境保护公约》(OSPAR 公约)修正案允许将二氧化碳注入海床以下的地质结构。1972年《防止倾倒废物及其他物质污染海洋的公约》(《伦敦公约》)及《〈伦敦公约〉1996年议定书》(《96议定书》)是防止废物倾倒污染海洋环境的国际专项公约,2006年11月,《96议定书》附件1修订决议“将用于海底地质封存的二氧化碳流列入了可考虑海洋倾倒的物质清单”,要求必须同时符合以下条件时可考虑倾倒:(1)二氧化碳只能被封存在海底地质构造中;(2)被考虑倾倒物中包含绝对数量的二氧化碳,其中可含有原始材料伴生的和捕集及封存过程中使用的其他物质;(3)不得以处置为目的将其他物质掺入其中^[26]。中国是《伦敦公约》及其《96议定书》的双缔约国,公约相关要求为中国二氧化碳海底地质封存提供了管理方面的借鉴。

4.2 部分发达国家已建立专项制度

截至2021年7月,全球约有83%的国家将CCS纳入国家长期低碳排放和发展战略^[27]。欧盟委员会于2008年1月发布二氧化碳封存指令草案,对封存选址、工程项目全流程操作(运行阶段—工程关闭—关闭后阶段)提出要求^[28]。英国发布《2008年能源法案》对二氧化碳封存提出相关规定^[29]。日本于2007年颁布《海洋污染与海灾防治法》,将二氧化碳注入地下咸水层这一活动合法化,并对CCS活动制订严格要求。澳大利亚修订了《2006年近海石油和温室气体储存法案》以允许近海水域的CCS活动^[30]。发达国家主要从许可审批(以签发许可证的形式严格管控地质封存选址及封存活动)、环境影响评价、环境监测(监测封存场地在封存活动各个阶段的环境状况),以及应急事故补救措施这4个方面制订CCS的管理制度^[31]。二氧化碳海底地质封存属于CCS领域,可参考相关管理制度。

5 发展定位

5.1 国家顶层设计

习近平总书记高度重视二氧化碳地质封存,曾赴东营市莱州湾胜利油田莱113区块考察,了解二氧化碳捕集、利用与封存技术研发应用情况。目前国内CCS发展思路和定位已明确,《国务院关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》在推动能源体系绿色低碳转型方面已明确提出“开展二氧化碳捕集、利用和封存试验示范”。《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中要求“推进规模化碳捕集利用与封存技术研发、示范和产业化应用”,加大“对碳捕集利用与封存等项目的支持力度”,明确了中国二氧化碳海底地质封存的发展战略地位。

此外,CCS相关技术标准和指南正在逐步建立。2016年原环境保护部颁布实施《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南(试行)》,明确了陆上CCS项目的环境风险评估技术路线^[32]。2022年中国环境科学学会发布了《二氧化碳捕集利用与封存术语》(T/CSES 41—2021),用于规范CCS技术相关的术语定义^[33]。已发布的技术标准与指南的适用范围多为陆上封存,国内关于二氧化碳海底地质封存技术方面的指南或标准规范有待进一步研究和确立。

5.2 地方发展规划

自“十四五”规划发布以来,部分省、自治区或直辖市陆续发布的规划纲要及2035远景目标、“双碳”目标行动方案文件中明确要求探索推进二氧化碳捕集与封存技术研究(表1)。其中,浙江省率先出台《浙江省碳达峰碳中和科技创新行动方案》,方案中明确要求“在沿海地区开展二氧化碳源汇匹配研究,进行二氧化碳离岸封存工程示范”。CCS及二氧化碳海底地质封存技术对于沿海省份实现碳中和目标可起到重要作用。

5.3 重点行业减排

CCS技术作为降碳减排的重要技术手段,能够促进相关产业技术创新发展的同时履行减排义务。

表1 部分省、自治区或直辖市发布的涉及碳封存的相关文件及任务

地区	时间	文件名称	重点任务
北京市	2022年10月	《北京市碳达峰实施方案》	开展碳达峰、碳中和科技创新专项行动,打造能源技术迭代验证平台,围绕新能源利用、智慧能源互联网、新能源汽车、智慧交通系统、氢能、储能、建筑零碳技术、碳捕集利用与封存(CCUS)、森林增汇等重点领域开展技术研发攻关,尽快实现关键技术突破和产业化示范应用
浙江省	2021年6月	《浙江省碳达峰碳中和科技创新行动方案》	实施先进技术成果转化工程,其中包括CCUS技术转化应用,在沿海地区开展二氧化碳源汇匹配研究,进行二氧化碳离岸封存工程示范
河北省	2021年5月	《河北省国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》	围绕钢铁、火电、水泥、焦化等传统产业行业,实施重大节能低碳技术改造示范工程,开展碳捕集利用与封存重大项目示范,持续降低企业碳排放强度,打造一批碳达峰碳中和示范园区
广东省	2021年4月	《广东省国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》	高水平建设广东碳捕集测试平台,积极推动碳捕集、利用、封存技术的研究、测试及商业化应用
河南省	2021年4月	《河南省国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》	探索碳捕集利用和封存新技术新模式,提升碳汇规模和质量。加强碳减排统计、核查、监管等基础能力建设
海南省	2021年3月	《海南省国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》	制定实施碳排放达峰行动方案,支持有条件项目开展碳捕集利用与封存,研究率先达到碳排放峰值
内蒙古自治区	2021年2月	《内蒙古自治区国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》	聚焦制约产业转型升级的重点领域,瞄准稀土、大规模储能、石墨烯、氢能、碳捕集封存五大领域
四川省	2021年2月	《四川省国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》	促进气候投融资,实施碳资产提升行动,推动林草碳汇开发和交易,开展生产过程碳减排、碳捕集利用和封存试点,创新推广碳披露和碳标签
福建省	2021年1月	《福建省国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》	在应对气候变化领域,支持开展碳普及、利用与封存等技术研发及应用
陕西省	2021年1月	《陕西省国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》	加快能源结构和产业结构低碳调整,推进建筑、交通和农业等重点领域低碳发展,持续增加森林碳汇。深化低碳试点示范,扩大碳捕集与封存等重点减排技术应用

电力、钢铁、水泥、交通等行业二氧化碳排放贡献率较高,属于碳排放重点行业^[34]。电力行业方面,煤电产业结合CCS和生物质二氧化碳捕集与封存技术(bioenergy with carbon capture and storage, BECCS)可实现累计贡献减排量的25%~39%^[35]。钢铁行业对中国二氧化碳排放量的贡献约为13%~15%,CO₂-EOR及二氧化碳强化采煤层气(CO₂-enhanced coal bed methane recovery, CO₂-ECBM)是

中国钢铁行业碳捕集技术发展的重要驱动力^[8, 36]。此外,石油领域由于其行业相关性,油气开发过程中各个阶段的技术工作都与CCS相契合^[37]。海上石油勘探开发及油气运输是推行二氧化碳海底地质封存技术研究的重要切入口。为落实“双碳”战略目标部署,将技术发展及重点工程建设与CCS相结合至关重要。

6 挑战与对策

许多国家和地区已针对二氧化碳海底地质封存出台法案,制订专项管理制度,对封存活动提出明确要求,并开展大量工程实践研究工作。中国关于二氧化碳海底地质封存活动的专项制度还有待建立,工程实践的开展也处于起步阶段。推动中国二氧化碳海底地质封存发展需立足中国国情和优势,从顶层战略、行动方案和研发实践等不同层面做好相关工作。

6.1 制定基于中国优势的发展路径

碳中和目标确立以来,中国二氧化碳海底地质封存的发展战略逐渐清晰。中国近海沉积盆地封存潜力较大,基于中国近岸排放源密集分布与潜力较大的封存位置的高度匹配性,明确电力、钢铁、石油等重点排放行业不同发展情景下的减排需求,根据减排需求制定二氧化碳海底地质封存发展规划和实施路径,协同推进二氧化碳海底地质封存技术与重点行业创新技术耦合,逐步提高二氧化碳海底地质封存的减排规模。

6.2 充分利用现有条件推动试点

二氧化碳海底封存的基建成本高、工期长,可充分利用现有的油气勘探资料和设备,降低选址、工程设计、设备投入等成本,提高实施效率。借鉴国外已开展的二氧化碳海底地质封存工程实践情况,尽快推动开展海上封存试点工作,识别和解决实际运营中的技术难题,协同推动出台封存区域选划、监测、环境影响评价、应急处置等配套技术和标准体系。

6.3 制定专项政策和管理体系

海上工程的技术要求和实施难度较陆地更高,目前没有实践证明海底地质结构储存二氧化碳的稳定性和安全性。因此,在发展路径明确的前提下,应尽快建立二氧化碳海底地质封存监管体系,分析与现行政策和法律体制的兼容性,制定配套的专项管理制度与保障措施。做好与国际公约中关于二氧化碳海底地质封存管理要求的衔接,为主管部门实施行业监管,推动国际履约提供政策基础。

6.4 推动纳入碳排放交易体系

二氧化碳捕集和运输过程的成本较高,预计到2030年,二氧化碳捕集、运输及封存成本可达90~390元/t、0.7元/(t·km)及40~50元/t^[8],二氧化碳捕集能耗占减排成本的70%^[38]。目前中国已开展的CCS项目大多为企业自主投入,辅以政府投资或补贴,总体规模较小。国内也没有出台碳税等鼓励企业实施的政策,距离打通融资渠道,通过技术的市场化产业化运行实现规模效应还有一定距离。如果考虑将二氧化碳海底地质封存相关行业(如海上油气/天然气开采、海底管道运输等)纳入中国碳排放交易市场,确定海洋领域碳排放配额,再加上有效控制封存成本,这样长远部署能够大大提高实现二氧化碳海底地质封存的可行性。

参考文献(References)

- [1] 联合国. 巴黎协定[R]. 巴黎: 联合国, 2015.
- [2] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N]. 人民日报, 2020-09-23(3).
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 中国气候变化第三次国家信息通报及第二次两年更新报告核心内容解读[R/OL]. (2019-07-01)[2022-04-12]. http://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtgz/201907/t20190701_708248.shtml.
- [4] 于贵瑞, 朱剑兴, 徐丽, 等. 中国生态系统碳汇功能提升的技术途径: 基于自然解决方案[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 490-501.
- [5] Metz B, Davidson O, Coninck D C, et al. IPCC Special report on carbon dioxide capture and storage[R]. United Kingdom and New York: Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005.
- [6] International Energy Agency. Energy technology perspectives 2020[R]. Paris: IEA, 2020.
- [7] 霍传林, 李官保, 潘建明, 等. 我国开展CO₂海底封存的利弊分析和对策建议[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(1): 138-143.
- [8] 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]. 北京: 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.
- [9] 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: 大连海事大学环境科学与工程学院, 2014.

- [10] 杨青林, 赵荣钦, 邢月, 等. 中国城市碳排放的空间分布特征研究[J]. 环境经济研究, 2017, 2(1): 70-81.
- [11] 生态环境部环境规划院. 环境规划院气候中心建立中国首个高空间分辨率二氧化碳排放网格[EB/OL]. (2013-06-19) [2022-04-12]. http://www.caep.org.cn/zclm/qhbhjhjzcyjzx/zxd_21888/201306/20130619_627374.shtml.
- [12] 王金南, 蔡博峰, 曹东, 等. 中国 10 km 二氧化碳排放网格及空间特征分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(1): 1-6.
- [13] 臧雅琼. 我国含油气盆地 CO₂地质封存潜力分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 2013.
- [14] 胡安俊, 罗妹, 李涵. 沿海地区碳排放的时空格局、形成机理与实现碳达峰和碳中和的建议[J]. 城市, 2021(11): 59-69.
- [15] 霍传林, 李官保, 张永华, 等. 中国二氧化碳海底封存能力评估与风险控制技术预研究[EB/OL]. (2015-09-25) [2022-04-12]. https://kgo.ckcest.cn/kgo/detail/1006/dw_achievement/I3SrTVMnBU3gsc2fX71dbg%253D%253D.html.
- [16] 周守为, 李清平, 朱海山, 等. 海洋能源勘探开发技术现状与展望[J]. 中国工程科学, 2016, 18(2): 19-31.
- [17] Tanaka Y, Sawada Y, Tanase D, et al. Tomakomai CCS demonstration project of Japan CO₂ injection in progress [J]. Energy Procedia, 2017, 114: 5836-5846.
- [18] International energy agency. CCUS around the world, Tomakomai CCS demonstration project[EB/OL]. (2020-04-15)[2022-04-12]. <https://www.iea.org/reports/ccus-around-the-world/tomakomai-ccs-demonstration-project>.
- [19] EU Project ECO₂ Office. ECO₂-sub-sea CO₂ storage: Impact on marine ecosystems[R]. Germany: EU Project ECO₂ Office, 2019.
- [20] Berndt C, Blackford J C, Connelly D P, et al. STEMM-CCS project consortium strategies for environmental monitoring of marine carbon capture and storage: Research highlights[R]. United Kingdom: STEMM-CCS Project Consortium, 2020.
- [21] Anita F, Schaap A, Achterberg E P, et al. Towards improved monitoring of offshore carbon storage: A real-world field experiment detecting a controlled sub-sea-floor CO₂ release[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2021, 106: 103237.
- [22] Sverre Overå. Northern lights-receiving and permanent storage of CO₂, part II-impact assessment[R]. Norway: Equinor, 2021.
- [23] International Energy Agency. CCS around the world, northern lights[EB/OL]. (2020-04-15) [2022-04-12]. <https://www.iea.org/reports/ccus-around-the-world/northern-lights>.
- [24] 韩文科, 杨玉峰, 苗韧, 等. 全球碳捕集与封存(CCS)技术的最新进展[J]. 宏观经济研究, 2009(12): 22-23.
- [25] 徐鹏. 国际法如何规制海洋倾废[J]. 中国生态文明, 2019(4): 43-48.
- [26] Convention L. 1996 Protocol to the convention on the prevention of marine pollution by dumping of wastes and other matter 1972(London Protocol)[EB/OL]. (2022-04-25) [2022-04-12]. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/lpamended2006.pdf>.
- [27] 全球碳捕集与封存研究院. 全球碳捕集与封存现状: 2021[R]. 澳大利亚: 全球碳捕集与封存研究院, 2021.
- [28] 邹乐乐, 张九天, 魏一鸣. 二氧化碳封存技术相关国际法规与政策的回顾与分析[J]. 中国能源, 2010, 32(4): 15-18.
- [29] Department of Energy & Climate Change. CCS roadmap: The regulatory framework[R]. London: Department of Energy & Climate Change, 2012.
- [30] Jiang K, Ashworth P, Zhang S, et al. China's carbon capture, utilization and storage (CCUS) policy: A critical review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2020, 119: 109601.
- [31] 王金南, 刘兰翠. 二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)项目的环境管理思考[J]. 低碳世界, 2013(1): 22-25.
- [32] 环境保护部科技标准司. 二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南(试行)[Z]. 北京: 环境保护部办公厅, 2016.
- [33] 生态环境部环境规划院. 二氧化碳捕集利用与封存术语: T/CSES 41—2021[S]. 北京: 中国环境科学学会, 2021.
- [34] 严刚, 郑逸璇, 王雪松, 等. 基于重点行业/领域的我国碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 309-319.
- [35] 李政, 陈思源, 董文娟, 等. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 3987-4001.
- [36] 张利娜, 李辉, 程琳, 等. 国外钢铁行业低碳技术发展概况[J]. 冶金经济与管理, 2018(5): 30-33.
- [37] 薛华, 于景琦. 碳捕集与封存作为我国石油行业发展机遇的探讨[J]. 油气田环境保护, 2018, 28(3): 4-7.
- [38] 翟明洋, 林千果, 马丽, 等. 电力行业碳捕集现状和发展趋势[J]. 环境科技, 2014, 27(2): 65-69.

Development potential and countermeasures of sub-seabed CO₂ sequestration under the target of carbon peaking and carbon neutrality in China

SONG Shuang, HAN Jianbo, CHEN Hong, YANG Wenchao*

National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China

Abstract In this article, the role of CO₂ geological sub-seabed storage in the field of climate change is discussed, as well as the development trends of CO₂ geological sub-seabed storage in China and abroad. Furthermore, countermeasures for the development of this technology are proposed. From the aspects of geological structure characteristics and coastal industrial layout, China has the advantages of developing CO₂ geological sub-seabed storage. A large number of foreign engineering applications have proved the feasibility and effectiveness of the technology. In recent years, engineering practices have also been launched in China. CO₂ geological sub-seabed storage has been subject to the jurisdiction of international conventions, and some developed countries have established special management systems. Combined with China's overall positioning for the development of CO₂ geological sub-seabed storage based on carbon peak and carbon neutrality goals, the possible challenges in the future are elaborated and corresponding countermeasures are proposed.

Keywords carbon dioxide; carbon neutrality; geological storage; sub-seabed geological formations ●



(责任编辑 傅雪)