

骆迪, 陈建文, 袁勇, 等. 挪威北极光项目进展及其对中国海域二氧化碳地质封存的启示[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(3): 48-55.

LUO Di, CHEN Jianwen, YUAN Yong, et al. Progress of Norway's Northern Lights project and its implications for offshore CO₂ geological storage of China[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(3): 48-55.

挪威北极光项目进展及其对中国海域二氧化碳地质封存的启示

骆迪^{1,2,3,4,5}, 陈建文^{1,2,3,4,5*}, 袁勇^{1,2,3,4,5}, 李清^{1,2,3,4,5}, 梁杰^{1,2,3,4,5}, 赵化淋^{1,2,3,4,5}

(1 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237; 2 青岛海洋科技中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237; 3 海洋地质碳封存山东省工程研究中心, 青岛 266237; 4 青岛市海洋地质碳封存重点实验室, 青岛 266237; 5 青岛市海洋地质碳封存工程研究中心, 青岛 266237)

摘要: 二氧化碳地质封存是二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 技术的关键环节, 海域二氧化碳地质封存是将工业源捕集的二氧化碳通过管道或船舶运输至封存点, 并以超临界态注入到海底咸水层、枯竭油气藏等地质体中, 从而实现与大气永久隔离的过程。海域二氧化碳地质封存具有封存潜力大、安全性高、环境风险小的特点, 受到欧美等国家和地区的高度重视。挪威作为最早开始商业应用的欧洲国家, 已成功实施了 Sleipner 等商业应用项目。2021 年 3 月, 挪威政府正式批准了北极光项目, 是全球首个获批的二氧化碳跨境运输并实施海底地质封存的项目, 对于推动中国封存技术的发展具有重要的借鉴和启示意义。本文系统梳理了北极光项目的概况和最新研究进展, 总结了该项目在实施过程中所积累的宝贵经验, 旨在为中国海域二氧化碳地质封存事业发展提供启示和借鉴, 有效助力中国实现“碳达峰、碳中和”的目标。

关键词: 二氧化碳地质封存; 挪威; 北极光; 安全稳定性评价; 脱碳

中图分类号: P744.4; P736 文献标识码: A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.240

0 引言

最新数据表明, 目前大气中二氧化碳的浓度已达到 420×10^6 , 与工业化前水平 (1700 年约 280×10^6) 相比增加了近 50%, 导致大气温度升高, 引发一系列气候效应, 同时造成水温升高、海平面上升、海洋

酸化, 对海洋生物的生存构成严重威胁。减少二氧化碳等温室气体的排放, 已成为国际社会共同关注的重大议题。迄今为止, 全球已有超过 135 个国家承诺实现碳中和, 大多数欧美国家都制定了到 2050 年甚至更早实现碳中和的目标 (如德国到 2045 年实现碳中和)^[1]。2020 年 9 月, 中国在第 75 届联合国大会上提出双碳目标, 即 2030 年实现碳达峰, 2060 年实现碳中和。根据生态环境部环境规划院等发布的《中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023)》, 从实现碳中和目标来看, 到 2060 年二氧化碳减排需求约为 2.35 Gt, 减排压力巨大。碳捕集、利用与封存 (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) 技术作为实现碳中和目标的关键路径之一, 可提供巨大的减排潜力, 是实现碳中和目标的托底技术保障。二氧化碳地质封存是 CCUS 中减排潜力最大的技术之一, 其中, 海域二氧化碳地质封存是其重要组成部分, 是将工

收稿日期: 2024-10-15

资助项目: 山东省重点研发计划 (科技示范工程) “石油开采行业全流程规模化 CCUS 技术研发示范” (2024SFGC0302); 中国地质调查局项目 “我国东部海域地质碳封存选区调查评价” (DD202503023), “渤海等海域新生界油气地质条件与碳封存选区” (DD20230401); 自然资源部科技战略研究项目 “海底地质碳封存战略研究” (2023-ZL-18)

第一作者: 骆迪 (1982—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事海洋地球物理、海洋地质碳封存及天然气水合物方面的研究工作. E-mail: luodi0927@sina.com

* 通讯作者: 陈建文 (1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海洋油气资源调查评价以及碳封存方面的研究工作. E-mail: jwchen2012@126.com

业碳排放源或油气开发过程中捕集的二氧化碳, 以超临界态注入到海底咸水层、枯竭油气藏等地质体中, 实现与大气长期隔离的过程。海域远离人类居住区和赖以生存的水源, 海水的压力和阻隔可大大降低二氧化碳泄漏的风险, 因此, 与陆域相比海域二氧化碳地质封存具有安全性高、环境影响小、封存周期长等特点^[2]。同时, 也是沿海地区开展二氧化碳地质封存, 实现碳中和目标的重要选择。

20 世纪 70 年代, 国际上开始了二氧化碳地质封存基础理论研究, 90 年代开始实施海域示范项目, 从发展历程来看, 海域二氧化碳地质封存可划分为基础研究、潜力评价、工程示范和商业应用 4 个发展阶段。挪威是最早实施商业应用的国家, 1996 年, 挪威在北海 Sleipner 气田实施了全球首个工业和商业规模的海域咸水层二氧化碳地质封存项目, 证实了海域二氧化碳地质封存的潜力和可行性^[3]。2020 年 12 月, 挪威政府批准了长船 (Longship) 全链条 CCS (Carbon Capture and Storage) 项目, 北极光项目是长船项目的运输和封存部分^[4], 计划将挪威东部陆域及欧洲其他地区工业源 (水泥厂和废物发电厂) 捕获的二氧化碳封存至北海咸水层, 实现难减排行业的脱碳, 是全球首个获批的二氧化碳跨境运输并实施海底地质封存的项目, 可为中国海域二氧化碳咸水层封存示范工程建设提供重要的借鉴意义。基于此, 本文从封存场地地质背景、基础设施建设、商业应用等多角度出发, 对北极光离岸碳封存项目全方位多角度剖析, 旨

在为中国开展海上 CCUS 项目提供工程实践经验和技术指导, 有效助力中国实现“双碳”目标。

1 北极光离岸碳封存项目概况

1.1 项目概况

2020 年 12 月, 挪威政府启动了一个名为“长船”的全链条 CCS 项目, 该项目旨在从挪威东南部奥斯陆峡湾地区的工业源 (水泥厂和废物发电厂) 捕获二氧化碳, 液化后通过船舶运输到 Øygarden 陆上终端, 并通过水下管道 (直径 0.304 8 m, 长度约 110 km) 注入至北海 (封存许可证 EL001, Aurora 区块) 距离海底 2 600 m 的咸水层永久封存 (图 1)^[5]。为了实现这个目标, 2021 年 3 月挪威政府批准, 由挪威国家石油公司、壳牌和道达尔 3 家公司合资成立了北极光合资公司, 负责长船项目的二氧化碳运输和封存部分。北极光项目的主要目标是为挪威和欧洲其他国家提供二氧化碳运输和封存服务, 推动欧洲脱碳目标的实现, 同时为其他类似项目开辟道路。项目分 2 个阶段进行, 在 2024 年底开启第 1 阶段, 封存量为 1.5 Mt/a, 预计 2025 年开始注入, 运行 25 a, 预计第 1 阶段封存二氧化碳 37.50 Mt。第 2 阶段建成后二氧化碳最大封存量达到 5 Mt/a, 预计整个项目周期封存二氧化碳总量将达到 127.8 Mt, 实现 124.5 Mt 净减排, 相当于二氧化碳总量的 97.4%^[6-7]。

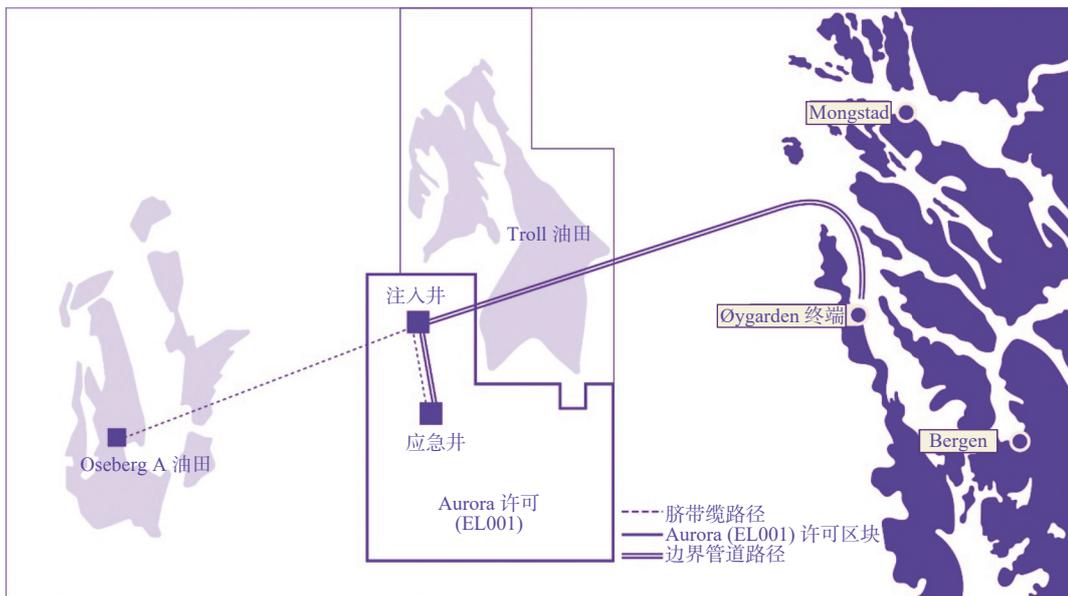


图 1 EL001 许可区块平面分布^[5]

Fig.1 The location of the EL001 licensed block^[5]

1.2 北极光项目二氧化碳封存区地质背景

北极光项目 EL001 号许可区块 Aurora 位于挪威西部近海 Horda 台地, 离岸约 50~100 km, 是由二叠纪—三叠纪、晚侏罗世—中白垩世两次主要的裂陷活动^[8] 和随后的热沉降活动而形成的构造高地, 区内断裂方向主要为 NS 和 NW-SE 向。注入井 (31/5-7 井) 位于 Troll West 和 Troll East 巨型油气田的南部, 属于一个东向的构造单元, 东西两侧分别受控于 Tusse 和 Svartalv 断裂带 (图 2)。储盖层主要为早侏罗统 Dunlin 群, 是在 Horda 台地的构造静止时期沉积, 伴随着缓慢的海平面上升, 为浅海-海相沉积, 发育 4 套砂岩和泥岩组合, 其中 Johansen 组是主要的目标储层, Cook 组为次目标储层, Johansen 组砂岩主要分布在 Horda 台地的东部和中部, Cook 组分布更为广泛, 穿过 Horda 台地向北、西、南向延伸。盖层为 Drake 组海相泥岩, 平均厚度约 100 m^[9]。

2 北极光离岸碳封存项目进展

2.1 二氧化碳地质封存安全稳定性评估

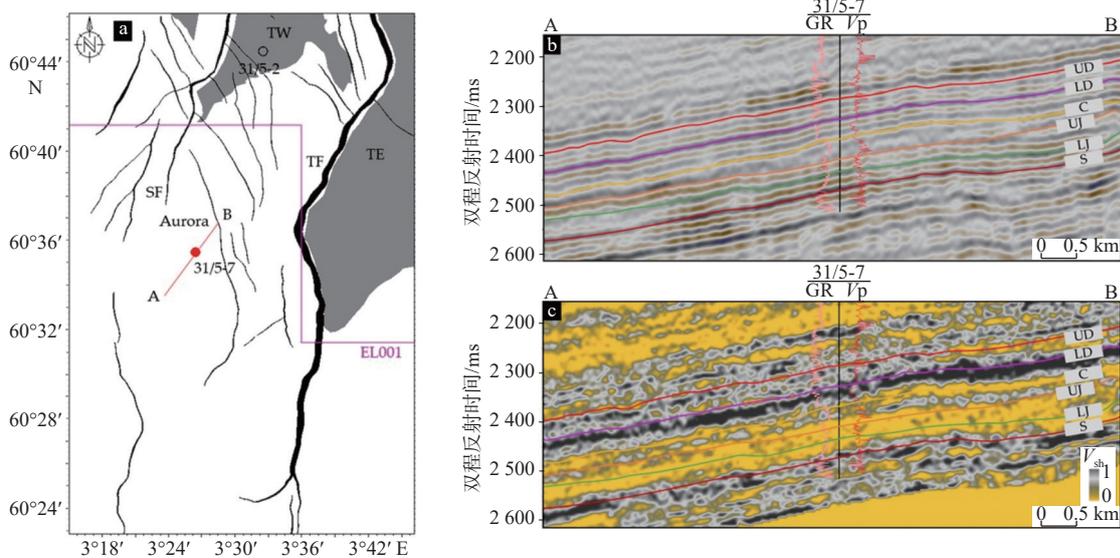
对于北极光项目这类大规模的二氧化碳地质

封存项目, 详细评估封存的安全稳定性至关重要。挪威北海二氧化碳封存盖层分析和密封完整性研究 (Overburden Analysis and Seal Integrity Study for CO₂ Sequestration in the North Sea, OASIS) 项目的目的是针对北极光项目的安全稳定性进行评估, 有效遏制封存风险。该项目提出了一个跨学科的工作流程, 通过物理模拟、数值模拟、地球物理、岩石物理和地质力学调查等跨学科综合研究, 引入了不同的封存风险评估方法, 评估了 Horda 台地北极光项目相关的盖层、断层和上覆地层, 从而改进注入方式, 遏制封存风险^[11]。

使用 50 口钻井及二维、三维地震调查数据, 详细评估了 Drake 组盖层的特征^[12]。在二氧化碳注入井 31/5-7 所在的 Horda 台地区域, Drake 组上部和下部单元的脆性指数 (EBI) 图显示, 存在相对韧性较强的盖层 (低脆性指数值) (图 3), 注入井附近的脆性指数相对较低。研究结果表明, 北极光项目在二氧化碳注入过程中, 盖层发生破裂的可能性较小, 封存稳定性良好。

2.2 基础设施建设

北极光项目包括船舶运输、岸上临时储存、管道运输和二氧化碳注入海底咸水层封存 4 个阶段 (图 4)。由于管道并不能提供二氧化碳运输的全部解决方案, 北极光项目采用了船舶运输的方式将捕



(a) EL001 许可平面位置和断裂分布 (SF-Svartal 断裂; TF-Tusse 断裂; TE-Troll East 油田; TW-Troll West 油田); (b) 过注入井 31/5-7 的地震剖面 (GR-伽马射线测井; V_p -P 波速度; UD-上 Drake 组; LD-下 Drake 组; C-Cook 组; UJ-上 Johansen 组; LJ-下 Johansen 组; S-Statfjord 油田) 和测井曲线; (c) 图 b 测线对应的泥质含量剖面 (V_{sh} -泥质含量)

图 2 EL001 许可区块平面图和过注入井地震剖面^[10]

Fig.2 The map of EL001 license and the cross-well seismic profile^[10]



图5 正在建造的2艘液态二氧化碳运输船^[5]

Fig.5 Two liquid CO₂ ships under construction in China^[5]

架的跨境二氧化碳运输和封存可以免税,为在挪威大陆架运营的二氧化碳运输和封存项目铺平了道路。

北极光项目拟采用全链条数字化,2023年12月北极光公司与SLB和微软公司合作,共同优化北极光项目运营的集成式云端 workflows,涵盖从二氧化碳捕集点到永久封存的整个端到端全链条(图6)。SLB公司将在其 Delfi™ 数字平台上扩展数字 CCS 工作流和数值模拟系统,该平台于2022年部署,以简化北极光项目的地下工作流程。微软公司将部署和扩展 Microsoft Azure 平台,确保可扩展的云服务支持北极光项目的业务和SLB数字 CCS 工作流程。SLB和微软公司正在合作开发兼容 Azure 的开源数据平台,该平台将作为北极光项目的数字基础设施。

2024年9月26日,北极光项目陆上和海上的基础设施已经完成建设并交付,准备好将来自挪威和欧洲工业的二氧化碳进行跨境运输和封存,其中,

陆上终端包含12个二氧化碳存储罐,高32.5 m,储量约700 t(图7)。灌注系统包含2口井,注入井31/5-7和向南7 km的应急井31/5-C-1,其中,注入井于2021年完钻,应急井于2022年完钻。

2.3 引领欧洲 CCS 商业市场, 推动难以减排行业脱碳

目前,挪威政府已与比利时、丹麦、法国、德国、荷兰、瑞典、瑞士和英国签署了双边协议,开放跨境运输和封存二氧化碳,且已先后与荷兰和丹麦签署了二氧化碳储存协议。2023年11月20日,北极光和 Yara 国际签署了一项全面的二氧化碳商业运输和储存协议,目标是从2025年起,每年从荷兰 Sluiskil 的氨生产中捕集和储存80万 t 二氧化碳,这是世界上第1个商业 CCS 协议,是向难以减排的行业脱碳迈出的重要一步,也是 Yara 实现无碳食品生产和提供清洁氨能源目标的重要里程碑,同时推进了欧洲 CCS 服务的商业市场。2023年5月15日,北极光和丹麦 Ørsted 宣布签署了一项商业协议,将运输和储存来自丹麦2个发电厂的生物二氧化碳排放。该协议的签订为北极光迎来了第2个商业客户,从2026年开始,每年将运输和储存43万 t 二氧化碳,为期10年。Ørsted 公司在丹麦 CCUS 基金的首次招标中获得了丹麦能源署的公共资金,将为其生物发电站 Asnæs 和 Avedøre 开发一个二氧化碳捕集中心,每年将捕获并液化43万 t 生物二氧化碳,然后通过船舶运输,在北海永久储存^[5]。

北极光合资公司已经确定欧洲为其主要市场,并特别针对已经启动 CCS 战略和激励计划的发达

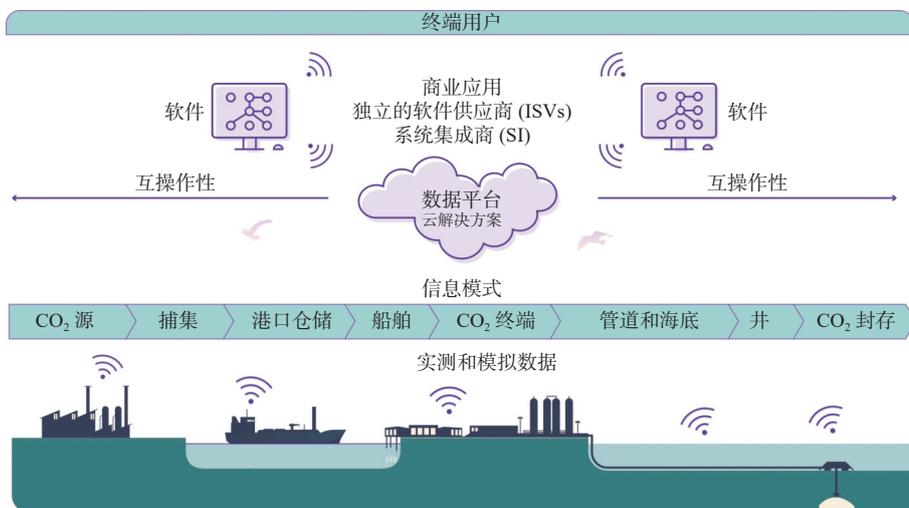


图6 数字化全链条示意图^[5]

Fig.6 Diagram of the full digital value chain^[5]



图 7 挪威 Øygarden 二氧化碳陆地接收终端^[5]
Fig.7 CO₂ receiving terminal in Øygarden, Norway^[5]

国家, 商业模式与国家、地区和国际碳减排计划保持一致, 如欧盟排放交易系统(ETS)。目标客户群包括水泥、钢铁/金属、炼油、化工和化肥等有配额义务的行业, 这些行业也是难以减排的行业, CCS 解决方案对减少二氧化碳排放至关重要。除了与 Yara 和 Ørsted 达成里程碑式的商业协议外, 北极光合资公司还在进一步推进技术和商业上最成熟的客户, 以支持存储设施的扩建。北极光项目的建成和实施将成为欧洲首个全面的碳捕集和封存价值链, 为降低 CCS 成本和扩大未来类似项目的规模铺平道路。

3 北极光项目的经验和启示

3.1 基于多学科融合的稳定性的评价

评估盖层的完整性和稳定性对于二氧化碳地质封存的成功至关重要。盖层页岩地质力学性质复杂, 受地层的物理性质, 如温度、地应力和压力等多种因素的影响, 了解各种因素对地质力学性质的影响具有挑战性。因此, 需要融合多学科、多技术手段, 建立跨学科的工作流程, 整合各种可用数据, 从而建立强大的地质力学模型, 提高封存稳定性评价的可靠性。

3.2 采用绿色能源, 降低二氧化碳运输和封存过程中的碳排放

北极光项目价值链的评估结果表明, 整个项目周期预计可储存 127.8 Mt 二氧化碳, 实际减排 124.5 Mt, 整个过程中总排放二氧化碳 3.32 Mt, 占 2.6%, 即每储存 1 t 二氧化碳只排放 0.026 t 二氧化碳。二氧化碳排放主要与运输操作有关, 来自于船舶燃料消耗。北极光项目计划采用液化天然气燃料、风力助推转子系统和空气润滑等解决方案, 与传统船舶相比, 这些解决方案可有效减少二氧化碳排放。

3.3 标准化的制定至关重要

2023 年北极光与 Yara 和 Ørsted 商业协议的签订是 CCS 服务商业市场的开始, 标志着欧洲向脱碳工业迈出了实质性的一步。这种跨境、跨行业的商业谈判具有挑战性, 主要表现在: ①谈判各方特定的行业术语存在差异。虽然碳运输和储存服务主要是在石油和天然气行业的传统基础上发展起来的, 但碳捕获方面的客户代表了氨、化肥和电力生产等行业; ②具有行业和文化差异。谈判各方都是拥有自己行业的标准, 一个行业的普遍做法不一定适用于另一个行业。在没有 CCS 行业标准先例的情况下, 对于采用哪些国际标准, 特别是在施工要求和标准方面, 存在不同的看法。因此, 需要制定 CCS 领域国际化标准, 统一行业术语和规范, 从而推动技术创新与发展、规范市场秩序、促进国际合作与交流以及推动双碳目标的实现。

3.4 基于新知识及时更新二氧化碳规范要求

液态二氧化碳具有特定的特性, 在碳捕获和储存中需要考虑这些特性。为了确保从碳捕集点产生的液态二氧化碳符合碳运输和储存的行业标准, 北极光项目制定了一套液态二氧化碳质量规范, 定义了液态二氧化碳中所需的纯度和可接受的杂质水平, 对于确保基础设施的完整性和安全操作至关重要。随着 CCS 行业的成熟, 北极光公司已经意识到有必要根据最新的研究成果和公开的行业知识和专业知识, 重新审视和更新其液态二氧化碳的质量规范。2023 年, 北极光项目组成立了一个由 DNV 牵头的工作组, DNV、北极光合资公司和业主公司(挪威国家石油公司、壳牌和道达尔)超过 75 名专家都参与了该项工作。考虑了组分间交叉反应、腐蚀性流体的发展、北极光船舶和设施的设计以及扩大允许杂质清单的可能性, 形成了一套最高安全标准的液态二氧化碳规范, 多家排放企业已确认这些规格的技术可行性。新的液态二氧化碳规格于 2024 年 2 月发布, 并将成为当前和未来商业运输及存储协议的基础。

3.5 一致和包容的监管框架和政策支持是实现 CCS 商业应用的关键

商业性碳捕集与封存市场成功的关键是投资者的信心。随着碳管理解决方案需求的日益增加,

该行业在政策制定者的支持下亟需加速对 CCS 的投资,以满足市场需求。然而,在全球市场面临通货膨胀加剧和监管环境充满不确定性的背景下,投资者对 CCS 领域缺乏信心。必须建立一致且包容的监管框架和相应的政策支持,以应对 CCS 作为低利润行业所面临的挑战。以挪威为例,目前监管机构要求二氧化碳注入许可运营商为发生概率极低的突发事件(如井筒故障和海底二氧化碳泄漏)提供财务担保,而且担保周期要求涵盖许可证有效期及关闭后 20 年,导致所需担保金额巨大,进一步增加了运营商的财务负担,从而提高了 CCS 项目的运营成本,制约了 CCS 商业化发展。因此,制定一个一致且包容的监管框架至关重要。

4 结论和展望

本文系统梳理了挪威北极光项目的概况,探讨了其封存稳定性的科学评价方法与最新研究成果,介绍了项目基础设施建设的关键技术与进展,并分析了该项目在商业应用领域的进展与潜力。通过对北极光项目的深入剖析,总结了该项目在实施过程中所积累的宝贵经验,并凝练了对中国海域二氧化碳地质封存事业发展的启示。

(1) 盖层稳定性是成功实施二氧化碳地质封存的关键,必须充分融合多学科知识体系与多元化的数据源,全面深入地开展二氧化碳封存选址评价工作。除了盖层稳定性评价之外,还应高度重视并加强封存安全性的评估工作。对整个封存系统长期稳定性和环境适应性进行深入分析,通过构建科学的风险评估模型,结合先进的数值模拟技术和实时监测手段,更准确地预测和评估在封存过程中可能出现的各种潜在风险,如盖层破裂、二氧化碳泄漏等,从而提前制定有效的应对措施,确保封存的安全性和稳定性。

(2) 在制定二氧化碳运输与储存流程时,必须充分考虑过程中的减排问题,确保这一系列环节不会在实现减排目标的同时引发新的、大量的二氧化碳排放问题。为了达成这一目的,采用太阳能、风能、水能等绿色能源是首要选择,能够在很大程度上减少化石燃料的依赖,进而显著降低因能源使用而产生的碳排放。

(3) 标准化的制定与政策支持的加强对于推动碳封存技术的发展与应用具有至关重要的意义。标准化不仅能够确保碳封存过程的规范性和一致

性,提高技术效率和安全性,还能为行业内的技术创新提供明确的方向和框架。同时,通过制定严格的评价标准,有助于筛选出最有效的封存方法,减少不必要的资源消耗和环境污染。而政策支持则是碳封存技术得以广泛推广和持续优化的关键保障,包括资金补贴、税收优惠、市场准入等方面的政策能够激励企业加大研发投入,加快推进碳封存的商业化进程。因此,中国应加强碳封存标准化的制定与政策支持的力度,从而加快推动碳封存技术的发展,助力“双碳”目标早日实现。

参考文献:

- [1] LUO J, XIE Y, HOU M Z, et al. Advances in subsea carbon dioxide utilization and storage[J]. *Energy Reviews*, 2023, 2(1): 100016.
- [2] 陈建文,王嘹亮,王平康,等. 中国海域沉积盆地咸水层二氧化碳地质封存潜力[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2024, 44(3): 98-114.
CHEN J W, WANG L L, WANG P K, et al. Carbon dioxide geological storage potential in saline aquifer of sedimentary basins in China sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2024, 44(3): 98-114.
- [3] FURRE A K, EIKEN O, ALNES H, et al. 20 years of monitoring CO₂-injection at Sleipner[J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 3916-3926.
- [4] BJRNAR T I. Assessing potential thermo-mechanical impacts on caprock due to CO₂ injection: a case study from Northern Lights CCS[J]. *Energies*, 2021, 14: 5054.
- [5] Northern Lights Joint Ventures. Northern Lights annual report 2023[R]. Stavanger: Northern Lights Joint Ventures, 2024.
- [6] THOMPSON N, ANDREWS J S, WU L, et al. Characterization of the in-situ stress on the Horda Platform: a study from the Northern Lights Eos well[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2022, 114: 103580.
- [7] GENTILEA V, CAUCHOIS G, ÅLUND I, et al. Carbon footprint of the Northern Lights JV CO₂ transport and storage value chain[R]. Stavanger: Northern Lights Joint Ventures, 2023.
- [8] RAHMAN M J, FAWAD M, MONDOI N H. Potential secondary seals within overburden: observation from the CO₂ storage sites Aurora and Smeaheia, northern North Sea[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2024, 133: 104101.
- [9] MENEGUOLO R, SUNDAL A, MARTINIUS A W, et al. Impact of the lower Jurassic Dunlin Group depositional elements on the Aurora CO₂ storage site, EL001, northern North Sea, Norway[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2022, 119: 103723.
- [10] RAHMAN M J, FAWAD M, JAHREN J, et al. Influence of depositional and diagenetic processes on caprock properties of CO₂ storage sites in the northern North Sea, offshore Norway[J]. *Geosciences*, 2022, 12(5): 181.

- [11] RAHMAN M J, FAWAD M, MONDOI N H. Integrated containment risks assessment for subsurface CO₂ storage: overburden analysis and top seal integrity study, offshore Norway[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2024, 282: 104440.
- [12] RAHMAN M J, FAWAD M, JAHREN J, et al. Top seal assessment of Drake Formation shales for CO₂ storage in the Horda Platform area, offshore Norway[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2022, 119: 103700.

Progress of Norway's Northern Lights project and its implications for offshore CO₂ geological storage of China

LUO Di^{1,2,3,4,5}, CHEN Jianwen^{1,2,3,4,5*}, YUAN Yong^{1,2,3,4,5}, LI Qing^{1,2,3,4,5}, LIANG Jie^{1,2,3,4,5}, ZHAO Hualin^{1,2,3,4,5}

(1 Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266237, China; 2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China; 3 Shandong Engineering Research Center of Offshore CO₂ Geological Storage, Qingdao 266237, China; 4 Qingdao Key Laboratory of Offshore CO₂ Geological Storage, Qingdao 266237, China; 5 Qingdao Engineering Research Center of Offshore CO₂ Geological Storage, Qingdao 266237, China)

Abstract: Geological storage of carbon dioxide (CO₂) is a critical technology of CCUS (carbon capture, utilization, and storage). Offshore CO₂ geological storage involves transporting CO₂ captured from industrial sources via pipelines or ships to the storage site and injecting it in its supercritical state into geological formations such as saline aquifer and depleted oil and gas reservoirs beneath the seabed, thereby achieving permanent isolation from the atmosphere. Offshore CO₂ geological storage is characterized by “large storage potential, high safety, and low environmental risks,” and has received widespread attention from countries and regions such as Europe and the United States. Among them, Norway is the first country to initiate commercial applications, such as the Sleipner Project. In March 2021, the Norwegian government approved the Northern Lights project, the world’s first approved project for cross-border transportation of CO₂ and its subsequent geological storage beneath seabed. This paper systematically reviews the overview and the latest research progress of the Northern Lights project, summarizes the valuable experience accumulated during its implementation, aiming to provide insights and references for the development of offshore CO₂ geological storage in China and contribute to the realization of China’s “carbon peak and carbon neutrality” goals.

Key words: CO₂ geological storage; Norway; Northern Lights; safety and stability assessment; decarbonization