

OCCUS 2023

第三届离岸碳捕集 利用与封存论坛

The Third Offshore Carbon Capture, Utilization and Storage Forum

主办单位：近海海洋环境科学国家重点实验室、中国太平洋学会

承办单位：近海海洋环境科学国家重点实验室

协办单位：厦门大学海洋与地球学院、环境与生态学院、材料学院、经济学院

中国科学院南海海洋研究所、中国科学院武汉岩土力学研究所、海洋天然气水合物全国重点实验室
自然资源部第二海洋研究所、海洋油气高效开发全国重点实验室

总结报告

OCCUS 2023
2023.11.12-15 | 厦门



离岸碳捕集、利用与封存论坛

宗旨：“离岸碳捕集、利用与封存论坛”（Offshore Carbon Capture, Utilization, and Storage Forum, OCCUS）是以碳捕集、利用与封存相关学科交叉为特色、一年一度的学术盛会。其目标在于探讨离岸 CCUS 战略定位与促进蓝色经济协调发展、基础科学发现与工程技术实践新方法、产业技术应用提质降本与规模增扩、协同推进产业融合与科技创新，为国内外科研院所、企事业单位和高校提供一个离岸 CCUS 相关产、学、研、金、服等交叉领域高水平的信息交流平台，分享有关方面的成果和经验，探讨离岸 CCUS 发展所面临的挑战与机遇，提升我国海洋增汇与陆海资源、生态、产业、空间互动协调发展能力。

历史：离岸碳捕集、利用与封存论坛（OCCUS）是一个以中文为主，英文为辅的国际性开放论坛。论坛自 2021 年至今已成功举办三届，论坛的规模逐届增大，学科交叉的深度和广度也在不断加强。论坛在促进学科交叉的同时，也提倡科学技术与产业的有效结合，积极推动中国低碳产业的发展转型。经过多年来学术界、产业界、金融界等同仁的共同努力，离岸 CCUS 论坛已经成为促进中国沿海地区低碳产业发展的一张靓丽名片。

新意：离岸碳捕集、利用与封存论坛（OCCUS）紧扣时代脉搏，落实生态文明建设推动陆海统一谋划、统筹协调发展，着力解决沿海及离岸二氧化碳（CO₂）减排困难局面，科学布局离岸 CCUS 产业，建立健全陆海统筹、人海和谐的海洋空间低碳开发新格局。论坛相继围绕海洋碳封存环境与信息技术、离岸碳捕集利用技术等主题开展学术交流与研讨，在推动学术创新、促进低碳产业发展和服务“双碳”战略上做出了重要贡献。



秉承前两届论坛的优秀传统，本届论坛最大的特点在于高度的跨学科性、强调并着重讨论科学技术研究与低碳产业发展融合，形式上从主旨报告到专题报告到学术展报到方向研讨及总结报告。“第三届离岸碳捕集、利用与封存论坛”除了一贯的科学、技术、产业发展主题，还将突出科学技术与产业结合的精神，组织特色经济及政策相关研讨交流活动。

免责声明

离岸 CCUS 论坛总结报告中的观点、调查结果和相关出版物不一定代表论坛主办方、承办方或其个别参会人员的观点。

本报告中表达的观点和意见不一定反映离岸 CCUS 论坛、其支持组织、任何参会代表或人员的观点和意见。

上述任何一项均不对报告中展现的任何信息、技术、仪器、产品等的信息准确性、完整性或有效性作出任何明示或暗示的保证，承担任何责任或后果，或表示使用其不会侵犯私人所有权利，包括任何一方的知识产权。本报告提及的任何商业产品、技术、服务或商品名称、商标或制造商不一定构成或暗示对此类产品的任何认可、推荐或任何偏袒。

离岸 CCUS 论坛明确否认因使用本报告中的信息而造成的任何损失或损害，包括任何商业或投资决策。

版权

离岸 CCUS 论坛第一主办方（近海海洋环境科学国家重点实验室（厦门大学））保留所有权利。



致谢

这份总结报告记录了2023年11月13日-14日在厦门大学举办的第三届离岸碳捕集、利用与封存论坛上所包含的报告及研讨内容。该届论坛由近海海洋环境科学国家重点实验室（厦门大学）和中国太平洋学会共同主办；由近海海洋环境科学国家重点实验室承办；由厦门大学海洋与地球学院、环境与生态学院、材料学院、经济学院，中国科学院南海海洋研究所，中国科学院武汉岩土力学研究所，海洋天然气水合物全国重点实验室，自然资源部第二海洋研究所，海洋油气高效开发全国重点实验室共同协办。

本报告由厦门大学的曹福勇、徐路根据论坛报告人的报告内容整理，由李姜辉、王子明和余凤玲修改编辑。

主办方感谢论坛学术委员会和组织委员会成员对论坛的大力支持和贡献。

学术委员会

主任：戴民汉（中国科学院院士 厦门大学）

委员：李 阳（中国工程院院士 中国石油化工股份有限公司）

丁巍伟（研究员 自然资源部第二海洋研究所）

李小春（研究员 中国科学院武汉岩土力学研究所）

李清平（教授级高级工程师 中国海油研究总院）

刘 强（副院长 中海油研究总院新能源研究院）

周 蒂（研究员 中国科学院南海海洋研究所）

组织委员会

主任：李姜辉（教授 厦门大学）

委员：李琦（研究员 中国科学院武汉岩土力学研究所）

马剑（教授 厦门大学）

童峰（教授 厦门大学）

牛雄伟（副研究员 自然资源部第二海洋研究所）

李彦尊（副研究员 中海油研究总院新能源研究院）

李鹏春（副研究员 中国科学院南海海洋研究所）

王子明（副教授 厦门大学）

李智（副教授 厦门大学）

余凤玲（副教授 厦门大学）

主办方感谢所有专题召集人、主持人和报告人在论坛中所做的贡献，并感谢研讨会与会人员的热情参与和交流。

引用

该报告应在文献中中文引用如下：“近海海洋环境科学国家重点实验室（厦门大学），“第三届离岸碳捕集、利用与封存论坛”总结报告，厦门大学，2023年11月13日-14日。”

该报告应在文献中英文引用如下：“State Key Laboratory of Marine Environment Science (Xiamen University), “The 3rd Offshore Carbon Capture, Utilization and Storage Forum” Summary Report, Xiamen University, 13th -14th November, 2023.”



目录

前言.....	10
致辞.....	11
背景：离岸 CCUS 与碳中和.....	11
主旨报告	15
2.1 CCUS 的成功与风险（李小春 中国科学院武汉岩土力学研究所）	15
2.2 千万吨级海上 CO ₂ 咸水层封存场地评价与思考（刘强 中海油研究总院）	15
2.3 中国微藻转化利用电厂烟气 CO ₂ 的研发示范（程军 浙江大学）	15
专题一：离岸 CCUS 战略发展规划（召集人：李智、梅应丹）	16
3.1 玄武岩矿化封存技术及其离岸应用前景（周蒂 中科院南海海洋研究所）	16
3.2 CCUS 技术合作采用建模与评价研究（朱磊 北京航空航天大学）	16
3.3 碳捕集利用与封存的经济增长效应及作用机制（梅应丹 中国人民大学）	16
3.4 全球 CCS 集群化发展的现状与趋势（周佳丽 北京低碳清洁能源研究院）	16
3.5 海洋 CCUS 赋能广东未来海洋产业布局的发展路径研究（杨哲 广东海洋大学管理学院）	17
3.6 碳中和目标下碳捕集与封存技术的经济和减排影响研究（羊凌玉 中国科学院科技战略咨询研究院）	17
3.7 国际 CCUS 项目对长三角地区近海海域碳封存开发前景的启示—以挪威艾奎诺 Northern Lights 项目为例（冯凯龙 同济大学海洋资源研究中心）	17
3.8 发展方向建议.....	18
专题二：海洋生物/藻类固碳与资源化利用技术（召集人：傅维琦、高光、江宗培）	19
4.1 Δ5 延长酶在三角褐指藻 DHA 合成与高温适应中的功能研究（姜海波 宁波大学）	19
4.2 微生物能源转化藻类生物质制备清洁燃气（林日琛 东南大学）	19
4.3 碳中和背景下的微藻生物转化与高效合成技术（范建华 华东理工大学/石河子大学）	19
4.4 小球藻高 CO ₂ 耐受机制及烟气培养应用研究（赵妍 中国海洋大学）	20
4.5 规模化海带养殖的生命周期分析（李纪 上海交通大学）	20
4.6 大型海藻碳捕集与封存能力对气候变化的响应（高光 厦门大学）	20
4.7 微藻固碳及其产业化的关键技术（傅维琦 浙江大学）	20
4.8 发展方向建议.....	21
专题三：海洋 CO ₂ 输送管道及注采井筒安全保障技术（召集人：李玉星、付安庆、王子明）	22
5.1 基于流固耦合的 CO ₂ 输运管道双曲线模型建立（喻健良 大连理工大学）	22



5.2 中石化二氧化碳输送管道技术研究与工程实践（范振宁 中石化石油工程设计有限公司）	22
5.3 海上 CCUS 管道输送与装备技术研究与挑战（衣华磊、张明 中海油研究总院）	22
5.4 CCUS 生产工艺一体化数字解决方案及应用案例（吴海锋 康士伯数字公司）	22
5.5 CCUS-EOR/CCS 管输、注入与碳核算方法学技术进展（孟岚 大庆油田设计院）	23
5.6 CCUS-EOR CO ₂ 驱油井筒管柱腐蚀现状及防护技术研究进展（黄居峰、付安庆 中国石油集团工程材料研究院）	23
5.7 CO ₂ 注入管柱失效原因分析及对策（姜东 中石化胜利油田石油工程技术研究院）	23
5.8 水下油气管道泄漏气泡大小分布超声检测方法研究（杜华龙 中国科学院沈阳自动化研究所）	23
5.9 CCUS 系统含杂质超临界 CO ₂ 腐蚀速率预测（丁宏鑫、向勇 中国石油大学（北京））	24
5.10 海洋 CO ₂ 输注环境中 FeCO ₃ 成膜临界条件研究（王子明 厦门大学）	24
5.11 发展方向建议	24
专题四：近海咸水层 CO ₂ 地质封存与驱油潜力（召集人：李鹏春、李琦、张运迎、赵明辉）	25
6.1 粤西近海咸水层 CO ₂ 封存与驱油潜力研究（方小宇 南方海洋科学与工程广东省实验（湛江））	25
6.2 珠江口盆地咸水层碳封存潜力评价与有利区带优选研究（付玉通 广州海洋地质调查局三亚南海地质研究所）	25
6.3 我国海上盆地 CO ₂ 地质封存条件评价与选址策略思考（李林涛 中海油研究总院）	25
6.4 咸水层灌注过程中的 CO ₂ -水-岩耦合渗流机理实验研究（刘成 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司）	25
6.5 粤港澳大湾区 CO ₂ 地质封存科学选址（赵明辉 中国科学院南海海洋研究所）	27
6.6 海上 CO ₂ 封存及海洋工程装备发展趋势探讨（徐绍良 中国海洋工程装备技术发展有限公司）	27
6.7 基于 X 射线 CT 与中子技术的 CO ₂ 封存储层孔隙结构与渗透性研究（王朋飞 南方科技大学）	27
6.8 CO ₂ 封存潜力储层的地震探测响应特征评价（邱宁 中国科学院南海海洋研究所）	28
6.9 基于最小成本路径的离岸 CO ₂ 地质封存成本评估及潜力评价（许晓艺 中国科学院武汉岩土力学研究所）	28
6.10 木质素对 CO ₂ 水合物形成分解的影响：提升咸水层 CO ₂ 地质封存潜力（游昌宇 中国科学院广州能源研究所）	28
6.11 发展方向建议	29
专题五：海底 CO ₂ 驱油与封存协同理论与技术（召集人：陈建文、刘强、刘树阳）	30



7.1 海底 CO ₂ 地质封存方向及我国沿海碳源分布（李琦 中国地质大学（北京））	30
7.2 CO ₂ 置换沉积物中甲烷水合物的实验研究（孙建业 青岛海洋地质研究所）	30
7.3 孔隙内 CO ₂ /C ₃ H ₈ 溶剂-原油抽提特性研究（张毅 大连理工大学）	30
7.4 咸水层 CO ₂ 注入渗流运移特征及认识（李彦尊 中海油研究总院有限责任公司）	31
7.5 中国海域及盆地咸水层盆地级封存潜力预测方法（陈建文 青岛海洋地质研究所）	31
7.6 咸水层封存 CO ₂ 沿裂缝运移泄漏规律研究（刘树阳 中国石油大学（华东））	31
7.7 咸水层 CO ₂ 束缚封存的微观特征—基于 CT 扫描的实验研究（韦贝 中国石油大学（华东））	31
7.8 枯竭油气藏二氧化碳封存井适宜性定量评价方法与应用（何佑伟 西南石油大学）	32
7.9 热流固耦合条件下的 CO ₂ 驱油与封存模拟方法研究（周家兴 清华大学水利系）	32
7.10 发展方向建议	32
专题六：离岸 CO ₂ 地质封存数值模拟与监测技术（召集人：李琦、李鹏春、王立忠）	33
8.1 CO ₂ 咸水层与气藏封存数值模拟：从分子尺度到场地尺度（陈聪 大连理工大学）	33
8.2 海底地质封存 CO ₂ 泄漏监测布点优化研究（宋学行 中国科学院上海高等研究院）	33
8.3 南海东部珠江口盆地二氧化碳长期封存机理及封存潜力评价（李芳芳 中海油能源发展股份有限公司）	33
8.4 海底沉积层内水合物法二氧化碳封存的分子模拟研究（贺仲金 中国地质大学（武汉））	33
8.5 CO ₂ 离岸封存监测体系建立要素分析（刘桂臻 中国科学院武汉岩土力学研究所）	34
8.6 发展方向建议	34
专题七：海底 CO ₂ 运移监测的地球物理与数字孪生技术（召集人：牛雄伟、邱宁、黄海波、王元）	35
9.1 融合处理速度和加速度记录的地震检测模型及其在新丰江水库的应用（吕作勇 广东省地震局）	35
9.2 注水诱发地震对碳封存地震风险评估的启示：以加拿大西部盆地为例（俞红玉 浙江大学）	35
9.3 东海陆架盆地 CO ₂ 运移可控源电磁法监测技术（张涛 自然资源部第二海洋研究所）	35
9.4 OBS 地震探测技术在 CO ₂ 海底碳封存中的应用（牛雄伟 自然资源部第二海洋研究所）	36
9.5 OBS 监测海底冷泉流体运移-海马冷泉区试验结果（刘斌 广州海洋地质调查局）	36
9.6 海洋可控源电磁法监测离岸二氧化碳封存中羽流运移的敏感度（李鹏春、邱宁 中国科学院南海海洋研究所）	36



9.7 使用机器学习堆叠方法对海底 CO ₂ 封存储层地质建模 (邱宁、张永恒 中国科学院南海海洋研究所)	37
9.8 发展方向建议	37
专题八: 海底 CO ₂ 封存声学信息获取与处理技术 (召集人: 童峰、周天)	38
10.1 基于自适应核时频分析的浅海地震资料处理方法 (邢磊、林浩然 中国海洋大学)	38
10.2 湛江区域碳封存安全监测发展的若干思考 (董阳泽、熊逸文 湛江湾实验室)	38
10.3 多波束声学底质分类关键技术及其应用展望 (唐秋华 自然资源部第一海洋研究所)	38
10.4 水下泄漏/渗漏气体的单矢量水听器方位估计方法(徐超 哈尔滨工程大学)	38
10.5 水声轨道角动量三维成像技术 (李胜全、张翼 鹏城实验室)	39
10.6 发展方向建议	39
海报展板	40
11.1 东海陆架盆地咸水层基于多裂缝 CO ₂ 注入及封存的数值模拟 (王俊薇 清华大学)	40
11.2 斜坡构造对离岸场地二氧化碳运移效果与封存的影响 (马千里 大连理工大学)	40
11.3 基于智能手机的便携式水环境参数检测方法研究与应用 (李杭茜 厦门大学)	40
11.4 基于注射泵的集成式水环境分析仪的研发与应用 (方腾越 厦门大学)	40
11.5 新特提斯洋俯冲与大气二氧化碳浓度变化的动力学联系 (沈昊 中国科学院地质与地球物理研究所)	41
11.6 漂浮式地震仪在 CO ₂ 监测中的应用及优势 (刘博文 自然资源部第二海洋研究所)	41
11.7 基于多波束水体点云模型的海底气体羽流提取研究 (任昕 厦门大学)	41
11.8 海草床浮游植物固碳能力及其季节变化 (石哲萱 厦门大学)	42
11.9 CO ₂ 驱油水间歇润湿环境中管道腐蚀微观机理与缓蚀策略 (王茜茜 厦门大学)	42
11.10 受限溶液体积中 CO ₂ 管道腐蚀抑制机理研究 (洪昊 厦门大学)	42
11.11 Simulation Study on the Impact of CO ₂ Leakage from Storage on the Physical and Chemical Properties of Seawater (于松 中国海洋大学)	43
11.12 雷州半岛 CO ₂ 矿化封存区域地质与水化学研究及模拟 (江静练 中国科学院南海海洋研究所)	43
11.13 低通量水下气体渗漏被动声学检测的实现 (周道隆 厦门大学)	43
总结及建议 (由李姜辉、王子明、余凤玲及各专题召集人共同整理)	44
12.1 本届论坛的研讨成果	44
12.2 下届论坛组织形式及初步建议议题	46



前言

2023年11月13-14日,第三届离岸碳捕集、利用与封存(Offshore Carbon Capture, Utilization and Storage, OCCUS)论坛在厦门大学举办,讨论了我国离岸CCUS的产业及技术发展现状,并对我国在南海北部、东海及渤海沿海发展离岸CCUS的战略和技术可行性进行未来展望。本届论坛系统梳理了我国离岸CCUS领域已有技术和新兴技术,有力推动了我国将离岸CCUS技术推向大规模工程应用。

本次论坛由近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学)、中国太平洋学会联合主办,近海海洋环境科学国家重点实验室承办。论坛旨在探讨离岸CCUS战略定位,促进基础科学发现与工程技术实践互哺,协同推进产业融合与科技创新,服务于我国海洋增汇与陆海资源、生态、产业、空间互动协调发展能力提升,促进我国乃至全球蓝色经济协调发展。本届论坛吸引了来自国内外60余所高校、科研院所、企事业单位、非政府组织的160余位专家、学者和行业领军人才。专家们齐聚一堂,围绕离岸CCUS发展战略与关键科学技术问题展开了广泛的交流与深入的研讨,共同展望了离岸CCUS的发展前景,并凝练了未来5-10年的主要发展方向。

第三届离岸碳捕集、利用与封存论坛涵盖了八个专题(表1),包括:离岸CCUS战略发展规划、海洋生物/藻类固碳与资源化利用技术、海洋CO₂输送管道及注采井筒安全保障技术、近海咸水层CO₂地质封存与驱油潜力、海底CO₂驱油与封存协同理论与技术、离岸CO₂地质封存数值模拟与监测技术、海底CO₂运移监测的地球物理与数字孪生技术、海底CO₂封存声学信息获取与处理技术。每个专题都设有5-10个左右的口头报告,部分学生展板报告以及25-50分钟的专题讨论时间,供与会专家充分、深入地交流和凝练专题未来发展方向。

本届论坛是离岸CCUS论坛第一次线下举办的论坛,领域专家的参与热情骤增,报告数量从前两届的每届10-12个报告拓展到近80个报告。考虑到论坛只有两天时间,组委会给每个报告安排了15分钟,并且额外给每个专题安排了25-50分钟的讨论环节。除了论坛报告数量骤增之外,本届论坛的报告也呈现出了研究方向的多样性和多学科交叉等特征,不仅涵盖了多个行业部门、不同的发展路线,其中甚至包括了陆源-海汇匹配和多种方案及路线规划,同时考虑到宏观经济政策建议和微观工程落地措施。由于目前我国离岸CCUS项目刚开始运行,尚未涉及具体的项目进展报告,论坛中更多的报告涉及了国外已有的封存案例与经验、我国具体海域封存潜力评估理论、潜在的海底碳封存监测技术与降本增效优化路径,并未涉及更多的具体技术应用细节。然而,与会专家围绕一些典型或紧迫的未来技术需求进行了多角度研讨:如枯竭油气田的问题、深部咸水层的使用、注入及监测井筒的完整性、现有海上及海底基础设施的再利用等。

论坛各专题的讨论环节都相当激烈,专题召集人也做了很好的总结,包括离岸CCUS相关经济政策导向、基础数值模拟软件的国产化需求、海底碳封存潜力评估基础理论统一、海底碳封存各类监测技术的集成、离岸CO₂利用与封存的结合、海底CO₂泄漏影响及相关标准的制定等等。中海油研究总院分享的更多离岸CCUS项目未来规划也令人印象深刻。此外,各专题在研讨中也给予了一些我国离岸CCUS未来发展建议,如,需要对海底碳封存评估方法进行标准化、建设我国沿海地区(尤其是相对较发达且碳排放量相对较高的地区)的离岸CCUS源汇匹配及资源管理系统、工程项目与碳交易市场衔接等。论坛在研讨过程中也对我国离岸CCUS的发展提出了未来预期和需求,如各研究机构开发的技术应紧密围绕产业真实需求,并被应用

到具体的实际项目中并不断测试与完善，及具体的离岸 CCUS 项目需要带有强烈的目的性和方向性来选择相关的监测方案及技术。

总的来说，本届论坛的成功在于其首次较全面地向国内及国际社会展现了我国“离岸碳捕集、利用与封存”产业及研究目前取得的科技进步与工程进展，并且让各相关领域的专家分享了许多专业知识，共同为我国的一个新兴低碳行业的发展贡献中国智慧。

表 1：第三届离岸 CCUS 论坛报告安排总览

日期	多功能厅（1楼）	1号会议厅（1楼）	4号会议厅（2楼）
11月13日 日上午	开幕式		
	主旨报告		
11月13日 日下午	专题二：海洋生物/藻类固碳与资源化利用技术	专题一：离岸 CCUS 战略发展规划	专题四：近海咸水层 CO ₂ 地质封存与驱油潜力
	专题六：离岸 CO ₂ 地质封存数值模拟与监测技术		
11月14日 日上午	专题八：海底 CO ₂ 封存声学信息获取与处理技术	专题五：海底 CO ₂ 驱油与封存协同理论与技术	专题三：海洋 CO ₂ 输送管道及注采井筒安全保障技术
	专题七：海底 CO ₂ 运移监测的地球物理与数字孪生技术		
11月14日 日下午	闭幕式		

致辞

离岸 CCUS 论坛主席厦门大学教授李姜辉在开幕式上致辞，并向莅临本届论坛的各位领导、专家学者、技术精英以及年轻学子表达热烈的欢迎。

中国科学院院士、厦门大学讲席教授戴民汉代表主办单位致欢迎辞。戴民汉强调“海洋碳汇”对全球实现“碳中和”战略目标具有关键作用，期望各界精英学者能借此学术盛宴共同探索未来海洋资源开发、利用、治理与保护的发展方向。中国工程院院士、中国石油化工股份有限公司副总工程师李阳发表致辞。李阳指出我国沿海地区 CCUS 工程与技术正呈现蓬勃发展的势头，但离岸 CCUS 工程仍然面临许多挑战，碳捕集、运输、封存安全和驱油利用等工程技术难题亟待解决，本次论坛将为推动离岸 CCUS 技术的发展应用与规模化、产业化作出积极贡献。本届论坛的联合主办方中国太平洋学会副会长李正楼表示太平洋学会将发挥自身学术资源优势，为论坛的进一步发展提供全方位、多层次、宽领域、立体化的支持。

本届论坛是第一个完全线下举办的离岸 CCUS 论坛，它代表着我国相关领域的科学研究、工程技术、经济管理等领域及其人员线下研讨并提出离岸 CCUS 产业发展策略和解决方案的又一次升温，也将成为促进我国沿海地区低碳产业进一步发展的又一个里程碑。

背景：离岸 CCUS 与碳中和

由人为产生的 CO₂ 和其他温室气体排放引起的全球变暖和气候变化是人类如今面临的最严重和最广泛的全球威胁之一。对减少 CO₂ 排放日益紧迫的需求促使人们对 CCUS 越发重视。然而，推广并发展 CCUS 产业，特别是离岸 CCUS，还存在许多技术性和非技术性挑战，如资



金来源、工程作业、安全运输及封存、生态环境影响、以及公众接受度等等。

国际能源署《2020年能源技术展望》考虑了CCUS在减少全球能源部门25%的CO₂排放方面的作用，以在2050年前实现净零排放。国际能源署发布了一份关于CCUS的特别报告，以解决现有能源利用的排放问题，为水泥和航空等行业最具挑战性的排放提出解决方案，开发低碳氢气生产平台，以及直接从大气中捕集CO₂。CCUS的作用预计将在2035年前减少40亿吨CO₂的排放。在2021年联合国气候变化框架公约第二十六次大会上，缔约方提出了几个目标，包括最终确定《巴黎协定》（第六条）的1.5°C升温控制目标。国际能源署亦指出，如果各缔约方的净零承诺全部实现，将使地球平均升温预期从2.1°C降至1.8°C。

2020年9月22日，习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上向全世界宣布，“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”。同时指出：发展海洋经济，保护海洋生态环境，加快建设海洋强国。我们要坚持绿色发展，依托海洋科研机构、海洋创新实验室、海洋观测站等，科学开发和利用海洋资源，不断优化海洋经济空间布局，加快构建现代海洋产业体系，提升海洋科技自主创新能力，向着“依海富国、以海强国、人海和谐、合作共赢”的方向稳步前进，推动我国海洋事业发展开启新篇章。

中国气候变化事务特使解振华和美国总统气候问题特使约翰·克里于2023年7月16-19日在北京、11月4-7日在加利福尼亚阳光之乡举行会谈，并在本届论坛举办期间发表与能源相关的声明，其中包括：两国争取到2030年各自推进至少5个工业和能源等领域碳捕集利用和封存（CCUS）大规模合作项目。



第三届离岸碳捕集、利用与封存论坛参会人员在厦门大学科学艺术中心前合影留念





戴民汉院士致欢迎辞



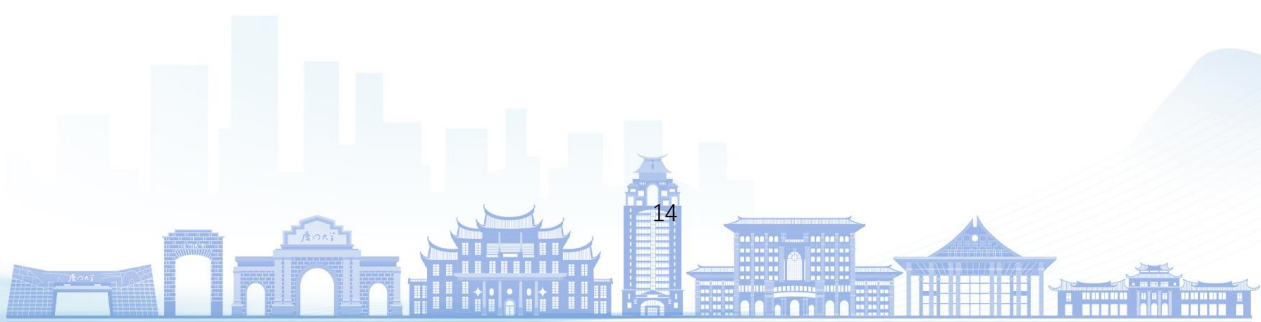
李阳院士致辞





第三届离岸 CCUS 论坛 获“优秀海报”奖的学生和颁奖嘉宾

(从左至右依次是：颁奖嘉宾 中国石油大学储运与建筑工程学院院长 李玉星；三等奖获得者 厦门大学海洋与地球学院博士研究生 任昕；一等奖获得者 中国科学院南海海洋研究所硕士研究生 江静练；二等奖获得者 厦门大学材料学院硕士研究生 王茜茜；颁奖嘉宾 中国科学院南海海洋研究所研究员 周蒂；颁奖嘉宾 中海油研究总院新能源研究院副院长 刘强)



主旨报告

2.1 CCUS 的成功与风险（李小春 中国科学院武汉岩土力学研究所）

近年来国内外 CCUS 技术发展迅速，商业项目数量激增并向集群化发展，但是在发展过程中，也出现了因各种原因导致的项目终止、暂停或失败。2010 年至 2023 年期间，项目成功率低于 80%。因此，全生命周期风险管理对提高 CCUS 的成功率至关重要。风险是不确定性对项目目标的影响，从风险属性上可以将 CCUS 的风险划分为政策、经济、技术风险三大类；从影响链条上可以划分为全局风险与交叉风险。ISO TR27918 识别出 15 条全局风险与 14 条交叉风险，并对其属性、影响环节与风险传递、影响阶段进行了分析。CCUS 的风险应对需要涵盖整个 CCUS 系统的专家团队，利用与风险目标、源和路径有关的完整信息，进行风险识别以及系统的风险评估。完善的监管和全面的预研可以有效降低 CCUS 风险。

2.2 千万吨级海上 CO₂ 咸水层封存场地评价与思考（刘强 中海油研究总院）

海上咸水层封存是未来 CCUS 的主要方向之一，对于解决我国沿海地区碳减排具有重要意义。本文系统梳理了千万吨级 CO₂ 海上封存面临的挑战，并针对我国海上地质条件，形成了场地优选、注入能力评估、地层稳定性及全流程风险管控等方面系列关键技术，提出了海上封存主要模式和注入能力评价方法，解决了疏松砂岩储层注入能力评价难，力学稳定性差等问题，明确了海上 CCUS 项目全流程风险及管控措施。同时结合全球典型的 CO₂ 海洋封存实例，提出了中国海上 CCUS 的发展建议，首先，圈闭的有效性和地层稳定性是决定大规模海上封存选址的核心；其次，CCUS 项目的选址需要结合碳源、技术、经济等多方面进行综合评估；最后，配套政策的支持和法律法规的完善是推动千万吨级海上封存成功实施的关键。

关键词：CO₂ 海上封存；中国近海；碳捕集、利用与封存（CCS/CCUS）

2.3 中国微藻转化利用电厂烟气 CO₂ 的研发示范（程军 浙江大学）

中国研发成功了微藻光合作用转化利用燃煤电厂烟气 CO₂ 的高新技术，校企产学研合作攻克了高效固碳藻种（螺旋藻、小球藻、微拟球藻等）和光合固碳反应器等关键技术瓶颈。在内蒙古鄂尔多斯建成微藻固定利用煤化工厂烟气捕集提纯的食品级（纯度≥99.95%）CO₂ 能力达到 10000 吨/年的产业工程示范。在山东烟台建成微藻直接利用燃煤电厂超低排放烟气（浓度~12%）CO₂ 能力达到 1000 吨/年的工程示范。多个中央国有企包括华润集团和广东能源集团等已投资建设微藻固定利用燃煤烟气 CO₂ 的产业应用项目。固碳微藻生物质多联产已实现商业化运行：可以作为营养食品、或功能饲料、或有机肥料等产品销售。微藻固碳产业应用前景广阔，具有显著的环境社会和经济效益，将对推动实现碳中和国家目标做出重要贡献。

专题一：离岸 CCUS 战略发展规划（召集人：李智、梅应丹）

3.1 玄武岩矿化封存技术及其离岸应用前景（周蒂 中科院南海海洋研究所）

玄武岩 CO₂ 矿化封存作为玄武岩发育区开展 CCUS 的途径，其可行性已得到美国 Wallula 项目和冰岛 CarbFix 项目的证明。这两个项目代表了两种不同思路的技术路线，从而在技术特点和选址条件上都有所区别。Wallula 技术向玄武岩储层注入超临界 CO₂，可看做是沉积岩碳封存技术向玄武岩的移植，因而技术特点和选址条件与传统的沉积岩碳封存类似。而 CarbFix 技术的思路是模仿并加速自然界玄武岩的风化过程，其技术的特点是向玄武岩储层注入 CO₂ 水溶液，CO₂ 以溶解相和矿化相封存，不存在泄漏风险。其选址勿需盖层，不避断层裂隙，而且储层不要求深度大于 800 米。但需要注入的水量较大。

全球海洋的 70% 面积是玄武岩，离岸玄武岩矿化封存具有巨大潜力。仅洋脊的封存潜力就达 1014 吨 CO₂ 以上，足以容纳数千年的人类 CO₂ 排放。美国 CarbonSae 计划提出在俄勒冈州以西的东太平洋 Cascadia 盆地开展每年 5 千万吨 CO₂ 的玄武岩矿化封存项目。我国南海北部的大陆边缘沉积盆地发育新生代玄武岩，也可在实施沉积岩碳封存的同时纳入玄武岩储层，以提高封存容量。离岸玄武岩 CO₂ 矿化封存具有不占地、环境影响小的优点，但需要解决用海水代替淡水所产生的效应以及其他许多理论、技术和工艺问题。本文提议在雷州半岛东北部的东海岛-硃洲岛选址，开展离岸玄武岩 CO₂ 矿化封存有关的基础研究、技术开发和工程试验，为我国以至全球离岸玄武岩碳封存资源的利用做出贡献。

3.2 CCUS 技术合作采用建模与评价研究（朱磊 北京航空航天大学）

为了支持合作减排，我们建立了一个基于实物期权的模型，以评估在石油市场和地质不确定性的情况下，对 CCS-EOR 项目进行决策。评估了 CO₂-EOR 利益相关者之间的三种可能的合作机制。结果表明，不同利益相关者在合作缓解中的利益最大化目标冲突在很大程度上是无法避免的。在合作减排中，合资企业的商业模式是首选，因为它可以有效地削弱此类冲突。与补偿上游碳捕获技术的采用成本相比，向 CO₂-EOR 链的下游提供激励更合理。从全球角度来看，低效的合作可能是阻碍深度减排发展的主要障碍。全球缓解战略不应侧重于促进技术进步，还应设计创新的商业模式，以平衡利益相关方。

3.3 碳捕集利用与封存的经济增长效应及作用机制（梅应丹 中国人民大学）

碳捕集利用与封存（CCUS）能有效统筹减排、发展与安全，是碳达峰碳中和“1+N”政策体系的重要组成部分。本文以 CCUS 项目投入生产为“准自然实验”，基于 1999-2020 年中国县级经济发展和 CCUS 项目数据集，采用合成双重差分模型（Synthetic Difference-in-Difference Model）识别碳捕集利用与封存的经济增长效应与作用机制。实证结果显示：（1）CCUS 能够使当地 GDP 水平显著提高约 5.11%。（2）CCUS 主要通过提高第二产业增加值来影响当地经济增长，体现对经济的直接拉动作用；同时创造新的公司机会和大量就业岗位，体现对经济的间接拉动作用。（3）CCUS 的经济增长效应具有显著的区域差异性，在经济欠发达地区的贡献更为显著。该研究为未来 CCUS 项目的成本效益分析及科学部署提供了科学依据。

3.4 全球 CCS 集群化发展的现状与趋势（周佳丽 北京低碳清洁能源研究院）

随着全球温室气体排放的不断增加，碳捕集与封存技术（Carbon Capture and Storage, CCS）作为一项可大规模降碳的关键技术被广泛研究和开发。CCS 集群化发展模式是一种通过共享基础设施和资源的方式，将从不同排放源捕集的二氧化碳埋存到同一地点的方法。首先，报告介绍了全球“双碳”背景下，CCS 集群化发展的原因，单个 CCS 项目的建设和运营成本较高，而集群化能够降低成本、提高效率。此外，集群化还可以实现碳排放源的密集共享，使得整个地区的碳减排效果更为显著。接着，报告概述



了国际和国内 CCS 集群发展的典型案例。国际上许多国家已经采取了集群化发展模式，包括加拿大、美国、英国、挪威等。国内的大亚湾区和华东地区 CCS 集群规划，这些案例证明了集群化模式的可行性和成效。最后，文章讨论了 CCS 集群化所面临的技术挑战，如运输和储存的风险管理、地质条件的适宜性、相关技术规范成熟度、投资运营成本高于碳交易价格等。全球 CCS 集群化发展是应对气候变化的关键举措之一。通过共享基础设施和资源，集群化能够降低成本、提高效率，并实现更大规模的碳减排。然而，仍需要进一步的研究和合作来解决技术挑战，以发挥全球 CCS 集群化发展的最大潜力。此外，本报告提出一些思考和建议，以促进 CCS 集群化在可持续发展中的应用。

3.5 海洋 CCUS 赋能广东未来海洋产业布局的发展路径研究（杨哲 广东海洋大学管理学院）

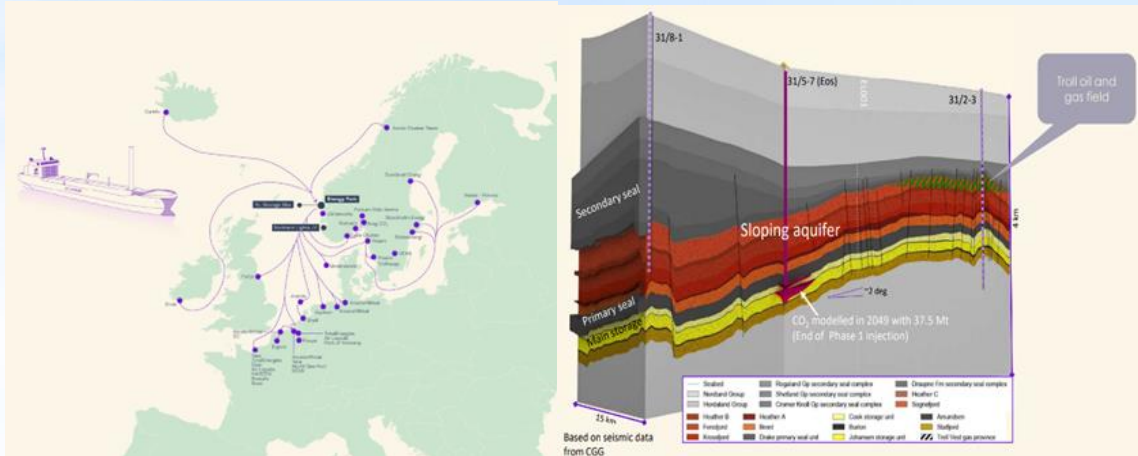
海洋碳捕集、利用与封存（CCUS）技术作为一种新型碳中和工具，在助力传统化石能源产业转型升级的同时，也为海洋产业布局、碳交易市场提供了发展的新契机。作为工业大省、沿海碳排放大省，广东对利用 CCUS 技术进行减排的需求强烈。因此，本次研究系统梳理了广东省 CCUS 发展现状，对省内重点排控企业碳捕集技术应用潜力与经济可行性进行了初步分析，通过对广东省二氧化碳利用途径及地质封存潜力的系统调研，结合中海油恩平 15-1 示范项目的进展，进而对省内 CCUS 的集群规划提出新见解。藉由挪威艾奎诺(Equinor)的北极光项目（Northern Lights Project）带来的启示，从降本增效、源汇匹配、监管相适、设施联通、产业推广、商业服务、多边合作、补贴激励和碳交易市场九个方面，对广东省发展 CCUS 提出打通海洋 CCUS 技术链、价值链、产业链的对策建议，以期为沿海省份未来布局海洋产业、建设示范项目，以及制定相关产业发展政策提供参考。

3.6 碳中和目标下碳捕集与封存技术的经济和减排影响研究（羊凌玉 中国科学院科技战略咨询研究院）

碳捕集与封存（CCS）技术作为推动化石能源低碳化利用的关键技术，将成为我国实现碳中和目标的重要技术选择。本研究基于内生 CCS 技术的动态能源-经济-环境 CGE 模型，比较了化工、钢铁、水泥和煤电四类煤基能源行业引入 CCS 技术的经济和排放影响，并进一步评估了在碳中和目标下基于已有减排政策体系加入 CCS 技术对减排有效性的影响。研究结果表明：引入 CCS 技术将对经济产生微弱的负面影响，但可以有效增加减排规模，减排效率总体提升；CCS 技术影响存在显著的行业异质性，应用 CCS 技术行业以及 CCS 产品供给行业是主要受益行业，而出口导向型行业和服务业是主要受损行业；从碳中和目标实现视角，CCS 技术的加入可以扩大可行的政策情景选择空间，减轻总体减排压力和平均经济损失。本研究为完善碳中和目标下 CCS 技术发展综合评估框架，推动 CCS 技术发展方案优化设计提供科学依据。

3.7 国际 CCUS 项目对长三角地区近海海域碳封存开发前景的启示——以挪威艾奎诺 Northern Lights 项目为例（冯凯龙 同济大学海洋资源研究中心）

二氧化碳捕集、利用和封存（CCUS），作为应对全球气候变化的关键技术之一受到当世公认。2022 年起，我国先后投产了多个大型 CCUS 项目，如山东省齐鲁石化-胜利油田百万吨级 CCUS 项目、广东省中海油恩平 15-1 油田碳封存示范工程。然而在作为我国经济龙头的长三角地区，海域 CCUS 项目推进速度则相对较慢，这其中主要涉及三大方面，其一、东海陆架盆地作为多板块共同作用影响下的叠合盆地，具备更为复杂的地质条件，需要进一步开展研究。其二、东海近海海域为多省市共管，在 CCUS 政策与行政管理层面需要同步协调。其三、东海矿权归属多家能源公司，在经济效益层面亟待各方通力合作，拟合推进。而 Northern Lights 项目聚合欧盟多国，挪威艾奎诺（Equinor）、壳牌(Shell)和道达尔(Total)共同合作，在北海复杂的地质条件下成为了首开先河的 CCUS 项目，其成功的关键要素可为长三角地区海域碳封存的发展提供重要的启示作用。



3.8 发展方向建议

1. 基于大数据的 CCUS 福利效果及影响机制研究。
2. 新型能源体系中 CCUS 技术耦合及角色定位研究。
3. CCUS 在经济、社会与环境方面的项目风险评估。

专题二：海洋生物/藻类固碳与资源化利用技术（召集人：傅维琦、高光、江宗培）

4.1 $\Delta 5$ 延长酶在三角褐指藻 DHA 合成与高温适应中的功能研究（姜海波 宁波大学）

硅藻是重要的海洋初级生产者，在全球碳循环、气候变化调节和健康的海洋食物网中发挥着至关重要的作用，它们是 ω -3 长链不饱和脂肪酸（LC-PUFA）的主要来源。三角褐指藻（*Phaeodactylum tricornutum*）是一种富含 LC-PUFA 的海洋硅藻，EPA 含量占到总脂肪酸的 30%，只合成少量 DHA，是研究和开发利用碳捕获技术合成 LC-PUFA 的模式硅藻。本研究采用多重 CRISPR/Cas9 技术获得了 $\Delta 5$ -ELO 基因敲除突变株（ $\Delta 5$ -ELO），发现在 22°C 培养条件下， $\Delta 5$ -ELO 突变株 DHA 相对含量降低了 74.31%，脂质组分析表明 $\Delta 5$ -ELO 基因敲除导致突变株叶绿体膜脂中 MGDG 的 20:5/16:3 分子种类显著增加，而 DGDG 中 20:5/16:0、20:5/16:1、20:5/16:2 含量显著降低；叶绿体外磷脂中 PC 20:5/22:6、PE 20:5/22:6、DGTA 20:5/22:6、22:6/22:6 等分子种类显著降低；TAG 分子种类中 14:0/16:1/20:5 等包含 EPA 的种类明显增加。突变株在 28°C 高温下生长几乎停止，细胞形态也发生一定改变。突变株的光合参数测定也表明其光合作用能力相比野生型更易受到高温胁迫的影响，其中 $rETR_{max}$ 降低 14.43%，Fv/Fm 降低 12.96%，NPQ 升高 89.43%，而叶绿素 a 含量下降 13.62%。突变株在高温处理时，总脂肪酸含量较野生型分别降低 16.23% 和 12.01%；不同脂肪酸相对含量的变化趋势基本一致。综合上述结果表明， $\Delta 5$ 延长酶是三角褐指藻从 EPA 转化并合成 DHA 的关键酶，同时 $\Delta 5$ 延长酶的对高温适应所必需的。

4.2 微生物能源转化藻类生物质制备清洁燃气（林日琛 东南大学）

微生物转化藻类生物质制取清洁燃料（如甲烷）和高价值化学品（如脂肪酸、醇等）既是国际学术前沿热点，也是我国实现“双碳”目标的重要技术路径。然而，微生物转化过程是涉及多相多组分传质和多步生化反应的复杂耦合体系，其中能质传递及转化机理并未完全明晰。本研究提出串联耦合藻类生物质碳化和生化转化过程（如厌氧发酵和微生物碳链延长），为构建循环经济系统、降低碳排放提供了一条新思路。实验建立了生物炭微观理化特性（如 sp^2 杂化碳含量、含氧官能团 C=O 及不同种类含氮官能团的相对含量）与生物转化性能（如氢气、甲烷、挥发性脂肪酸的生成速率等）之间的构效关系。

4.3 碳中和背景下的微藻生物转化与高效合成技术（范建华 华东理工大学/石河子大学）

微藻不仅能利用光合作用吸收二氧化碳，而且还能将固定的二氧化碳用来生产一些高价值产物，对于实现“碳达峰、碳中和”战略目标具有重要意义。藻类是古老的原核或真核光合生物，光合作用效率高，是地球上的主要初级生产力。微藻细胞作为“天然的绿色工厂”，可以合成长链烃、PUFAs、多糖、色素、蛋白等先进燃料与高值品，在绿色生物制造领域具有独特优势。此外，微藻也是水体生态系统中的重要组成部分，是增加陆地/海洋碳汇和解决环境问题的有效手段，对固碳减排、土壤/水体修复、水生动物健康以及生态系统的平衡具有重要的意义。微藻绿色生物制造研究可开辟以光能和 CO_2 为原料的新型绿色细胞工厂，但是由于自然界的天然微藻生长性能低下且与非天然工业应用环境不匹配，光合自养和光暗发酵过程中仍存在碳氮磷生物转化效率偏低的问题，大多数高端藻类生物制品仍为西方企业所垄断，限制了微藻生物制造技术在我国相关行业中的广泛应用。近年来，代谢工程与基因编辑技术日新月异，更加高效的叶绿体转化、同源重组、RNAi、CRISPR 体系等技术均有突破，借助真核微藻这一“活细胞生物反应器”表达外源蛋白、食品添加剂及工业原料，将会降低医药及功能食品的成本，解决新型植物蛋白和功能食品来源受限和价格昂贵的问题。未来聚焦以微藻作为生物反应器的研究，可满足人们对高附加值产品的需求，具有广阔的应用前景。

4.4 小球藻高 CO₂ 耐受机制及烟气培养应用研究（赵妍 中国海洋大学）

利用微藻固定燃煤电厂烟气中的 CO₂，是生物法实现 CO₂ 减排的重要手段。而微藻对烟气高浓度 CO₂ 的不耐受是限制其广泛应用的“瓶颈”问题。为解决这个“瓶颈”问题，必须首先明确微藻对高浓度 CO₂ 的响应和耐受机制。基于此，本研究选取重要资源微藻小球藻为研究对象，首先通过比较研究不同小球藻藻株对高 CO₂ 的耐受差异，从生长、光合固碳和能量分配的角度解析小球藻耐受高 CO₂ 的生理生化机制，继而通过比较转录组分析的方法，进一步阐明了其耐受高 CO₂ 的分子机制，包括增强固碳能力、缓解胞质酸化及加速有机碳消耗。最后，将高 CO₂ 耐受藻株进行电厂烟气现场培养，结果表明该藻株在烟气条件下生长和固碳速率均高于空气培养，且能够有效抵御其中的重金属污染。研究结果系统阐明了小球藻对高 CO₂ 耐受的生理生化和分子机制，并明确了其在现场烟气培养应用中的具体表现，获得了一批高固碳生物标志物，为利用微藻实现生物固碳提供重要的数据基础和理论依据。

4.5 规模化海带养殖的生命周期分析（李纪 上海交通大学）

大型海藻因为生长迅速，固碳效率高，同时其人工养殖具有成本低、产量高等优点，在近年来被认为具有很大的生物固碳潜力，特别是大规模海藻养殖可能作为人为增加海洋碳汇的手段而受到更多的关注和评估。本研究应用生命周期评估（LCA）的方法来评价了 6 万余吨海带从海带育苗到收获期间的碳足迹和环境影响，评价包括了对气候变化、水体酸化和海洋富营养化，以及水和能源使用的影响。同时，应用同样的方法学手段，同欧洲已发表的养殖海带的生命周期评价的数据清单进行了比较。我们评估的海带养殖场的产量是欧洲同类研究的 1000 倍以上。结果显示，与小规模的养殖相比，在我国大型海带养殖精简成熟的生产方式下，电力和燃料相对消耗较低，反而养殖所需养殖绳和浮标等材料的消耗对碳足迹和环境影响较大，而通过合理的材料回收工序可以减少其影响。本研究结果，在威海的养殖场，海带养殖从育苗到收获阶段的生产过程，每吨海带（湿重）的碳足迹约是 57.5 千克二氧化碳当量。湿海带收获后，后续的碳足迹因最终产品的加工要求不同，碳足迹有很大的区别，需要具体评估。本研究有助于大型海带的规模化碳中和潜力评估。

4.6 大型海藻碳捕集与封存能力对气候变化的响应（高光 厦门大学）

大型海藻是重要的海洋初级生产者，但是其固碳及储碳能力如何响应气候变化，以及营养盐在其中如何发挥调节作用，这些科学问题尚属未知。本研究设置了气候变化模拟培养实验，研究结果发现，酸化、升温 and 富营养化均对硬石莼的生长有促进作用，经过 6 周的培养，相比较对照组，三者协同提高了硬石莼 130% 的生长和 245% 的碳捕集。对龙须菜的研究发现，低氮条件下，海洋热浪下调了龙须菜光合作用相关基因表达并降低了净光合速率，导致溶解有机碳（DOC）提前释放且大幅增加了 DOC 及惰性溶解有机碳（rDOC）产量；高氮条件下，龙须菜净光合速率增加，生物量及颗粒型有机碳（POC）产量显著增加；高氮热浪耦合条件下光合基因表达上调，DOC 产率及 DOC 和 rDOC 产量与单独热浪条件相比显著下降；这些结果显示海洋热浪会促使龙须菜释放更多 DOC，形成更多 rDOC，有利于碳的长期储存。两个实验的结果暗示，气候变化会刺激大型海藻碳捕集与封存能力，显示了大型海藻的负反馈调节作用。

4.7 微藻固碳及其产业化的关键技术（傅维琦 浙江大学）

海洋碳汇是由浮游植物等通过光合作用捕获并固定储存于海洋生态系统。微藻是重要的光合固碳细胞工厂，但目前微藻光合作用的效率偏低。针对微藻代谢受光驱动的特性，我们提出开展微藻的适应性实验室进化（ALE）研究，利用窄光谱、高频脉冲光胁迫选育微藻，并获得光合作用效率提高 150% 的小球藻种及系列优质藻种。以微藻重要色素代谢研究为基础，开发胞内光谱转换方法，利用荧光蛋白将过量的蓝光转换为绿光，减少光抑制，在模拟自然界强光条件下提升硅藻光合作用效率 50% 以上，揭示了海藻抗光逆境的机制及其关键的光捕获基因。通过 ALE 在海洋硅藻 *P.tricornutum* 的酸性胁迫后恢复光



合能力的可行性，并揭示了遗传调控的基本变化，使细胞能够耐受低环境 pH。我们开发了基于酸性环境胁迫的适应性进化路线，发掘了硅藻耐酸调控的关键基因，提供了微藻光合固碳和育种的新思路。研究工作深度优化了海洋微藻光合固碳的开发路径，提供了微藻固碳及其资源化的关键技术，助力绿色低碳产业发展。

4.8 发展方向建议

1. 融合生态和生物化工固碳路径，提升碳封存量级。
2. 聚焦光合作用效率强化，实现微藻高密度培养。



专题三：海洋 CO₂ 输送管道及注采井筒安全保障技术（召集人：李玉星、付安庆、王子明）

5.1 基于流固耦合的 CO₂ 输运管道双曲线模型建立（喻健良 大连理工大学）

管道是保证 CCUS（Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS）产业持续可靠发展的最优输运方式。BTCM（Battelle two-curve model）已被证实不能直接用于指导 CO₂ 管道设计。BTCM 在设计之初并没有协同分析介质减压相变与管道韧性断裂间的耦合作用。本文基于能量平衡理论建立了含裂纹尖端张开角（CTOA）的管道止裂压力模型。采用双向流固耦合法（Fluid-structure-interaction, FSI）将 CO₂ 介质与管道建立欧拉-拉格朗日耦合（CEL）分析模型。采用拉格朗日方程和 Johnson-Cook、GTN（Gurson-Tvergaard-Needleman）材料模型建立管道本构方程。采用欧拉方程和 GERG-2008 状态方程建立管道内 CO₂ 流体行为。耦合 CEL 模型可开展不同纯度 CO₂ 和不同管道尺度的全尺寸断裂数值分析。双向流固耦合数值模型允许对管道失效的驱动力进行更复杂的力学行为分析。开展的 CEL 模型可获取不同纯度的 CO₂ 减压波传播速度，裂纹尖端前后的三维压力分布。FSI 法有望解决双曲线独立分析偏于过渡/危险设计管道的问题，为 CO₂ 输运管道设计和止裂控制提供了全新思路。

5.2 中石化二氧化碳输送管道技术研究与工程实践（范振宁 中石化石油工程设计有限公司）

管道作为二氧化碳规模化转运的最佳方式之一，将有力促动 CCUS 技术路径在碳中和目标实现中的作用发挥。2023 年 7 月，国内首个百万吨级 CCUS 示范项目二氧化碳输送管道工程建成投运，标志着二氧化碳管道建设进入商业应用阶段。本报告结合示范工程的建设，从国内外二氧化碳管道发展现状、面临主要挑战、示范工程实践等方面进行分析，梳理总结二氧化碳管输模式及其适用范围、管输技术研发与应用实践、管道建设与运行标准体系构建等。同时，对标国家 CCUS 产业发展与规模定位，从二氧化碳管道的技术与装备研发、管道运行模式的构建与建议、管输安全风险应对等方面提出合理可行的解决方案。

5.3 海上 CCUS 管道输送与装备技术研究与挑战（衣华磊、张明 中海油研究总院）

在国家“碳达峰、碳中和”目标下，中国海洋石油集团有限公司作为中央骨干企业，围绕公司总体发展思路，着力实施绿色发展跨越工程，积极推进企业绿色低碳转型，争当能源绿色低碳转型生力军，并开展了国内海上首个超百万吨级 CO₂ 回注封存示范工程--恩平 15-1 油田 CO₂ 回注封存项目。由于独特的海洋环境条件、受限的海上平台空间、较高的施工难度及开发成本等因素，国内海上油气田开发中 CCUS 应用难度较大。为促进海上油气田绿色低碳发展、推动我国 CCUS 工程技术创新，重点针对海上 CO₂ 管道输送技术、CO₂ 捕集输送腐蚀机理及控制技术、海上天然气/伴生气脱碳技术及海上 CO₂ 回注关键设备等关键技术和装备开展研究并取得阶段性进展。最后提出了国内海上 CCUS 当前面临的挑战与未来发展方向。

5.4 CCUS 生产工艺一体化数字解决方案及应用案例（吴海锋 康士伯数字公司）

在 CCUS 场景下，二氧化碳的运输与注采是非常关键的环节。康士伯数字所提供的基于 K-Spice 和 LedaFlow 的一体化数字解决方案可以通过软件模拟仿真预测二氧化碳在不同运输及注采场景下的工艺情况，实时监测生产的安全阈值，形成一整套的瞬态在线辅助决策系统，解决二氧化碳混合及临界态下输送的流动保障问题以及提高注采效率的同时极大地降低生产安全事故的发生率。目前，相关技术已在



全球众多 CCUS 项目进行应用，如挪威的北极光项目，英国的 Net Zero Tesside 项目，中国某百万吨级 CCUS 项目等。

5.5 CCUS-EOR/CCS 管输、注入与碳核算方法学技术进展（孟岚 大庆油田设计院）

针对油藏 CCUS-EOR 开发及注入工程建设特点，研究并明确含杂质二氧化碳气质要求，以 CCUS 捕集与驱油一体化全产业链优化可行性研究为基础优选输送相态和方案，以研究含杂质二氧化碳碳源相特征为基础确定管道输送压力，以稳态瞬态相结合仿真分析为管道流动性提供保障，以跨相态减压波与止裂分析为管道工艺安全提供保障，以泄放仿真分析与高后果分析为管道操作安全提供保障，以数字化交付与工艺孪生相结合为管道智能运行提供保障，以开发试验不同阶段注气需求创新 3 种典型注入模式满足 CCUS-EOR 注碳要求，最终创新出 CCUS-EOR 及枯竭油藏地质体 CCS 管输和注入技术体系。并分析 CCUS-EOR/CCS 全链条工艺流程，研究地面工艺物理边界、地下 CO₂ 运移边界、泄漏核算边界以及基准线情景识别分析，制定“CO₂ 捕集、驱油与封存项目碳减排量核算”方法学，促进 CCUS 项目获得碳资产收益。先后在大庆油田开辟了 5 个试验区，累计埋存二氧化碳 211 万吨，产油 84.8 万吨，实现碳减排社会效益与驱油经济效益“兼得”。

5.6 CCUS-EOR CO₂ 驱油井筒管柱腐蚀现状及防护技术研究进展（黄居峰、付安庆 中国石油集团工程材料研究院）

CO₂ 驱油是 CCUS 技术最为现实有效且可行的二氧化碳减排技术，CO₂ 驱油可提高低渗透油藏采收率 8%~15%，是油田企业应对碳达峰和碳中和最现实的对策。然而在 CCUS-EOR 实施过程中由于高浓度 CO₂ 导致的井筒腐蚀问题严重影响了油田安全高效开发。本文主要介绍吉林、长庆、大庆、延长、新疆、福山等我国 CO₂ 驱主力油田的井筒腐蚀现状：1）超临界/密相 CO₂ 导致的腐蚀问题；2）原生和次生 H₂S 导致的应力腐蚀开裂问题；3）注入端 CO₂ 导致管柱的低温问题；4）超临界/密相 CO₂ 导致橡胶筒密封失效问题；5）超临界/密相 CO₂ 和高矿化度地层水导致的结垢问题。其次，在防腐技术方面，重点介绍了经济型耐蚀管材、防腐药剂、表面涂镀层等技术及其在 CO₂ 驱油环境中的适用性评价研究。

5.7 CO₂ 注入管柱失效原因分析及对策（姜东 中石化胜利油田石油工程技术研究院）

分析胜利油田 CO₂ 注入管柱失效的原因，并提出有效的解决措施，以减少同类事故的再次发生。采用宏观分析、拉伸性能、化学成分分析、金相分析、腐蚀产物分析、水质分析及结垢预测等方法，对可能造成井下管柱腐蚀的原因进行深入分析。结果失效件的拉伸性能、化学成分及金相显微组织均满足标准要求，排除因材质缺陷引起腐蚀，确认环空环境中硫化物应力腐蚀开裂是造成 CO₂ 注入井油管断裂的主要原因。阐明井下油管的应力腐蚀断裂行为及规律，提出了 CO₂ 注入井环空环境下油管硫化物应力腐蚀断裂机理，并在此基础上进行了相应的应力腐蚀断裂综合防护方法研究。

5.8 水下油气管道泄漏气泡大小分布超声检测方法研究（杜华龙 中国科学院沈阳自动化研究所）

水下油气管道泄漏过程中往往会释放大量的天然气、甲烷等气体，通过对泄漏产生的气泡大小分布的检测不仅有助于定位泄漏源，而且能够提供泄漏源大小等相关信息。基于超声散射原理，本文提出一种水下气泡大小分布超声检测方法，利用缆控水下机器人 ROV 搭载超声传感器发射超声波并收集由气泡背散射回来的超声散射信号，采用特定信号处理算法对收集的超声散射信号进行分析得到气泡大小分布。在实验室开展的模拟水下管道泄漏实验中验证了该检测方法的可行性。本文提出的超声检测方法有助于探测和定位二氧化碳输送管道泄漏位置，而且还可为泄漏源表征提供重要信息。

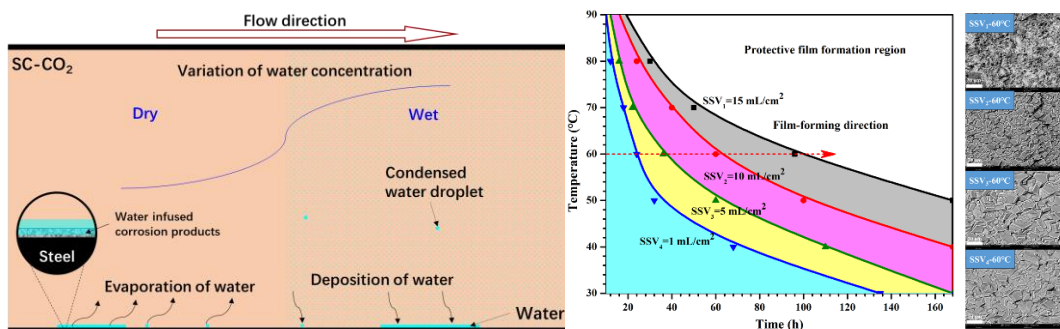


5.9 CCUS 系统含杂质超临界 CO₂ 腐蚀速率预测 (丁宏鑫、向勇 中国石油大学(北京))

CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) 技术在有效减少 CO₂ 排放、实现化石燃料低碳利用方面具有非凡的前景。在 CCUS 系统中, 含有杂质气体的超临界 CO₂ 会引起管道以及井筒的腐蚀问题。在本研究中, 综合考虑了 H₂S、SO₂、NO₂、O₂ 等杂质气体的影响, 建立了碳钢管材在 CCUS 系统中超临界 CO₂ 腐蚀速率预测模型。该模型涉及到了基于 Redlich-Kwong 状态方程建立出来的超临界 CO₂ 与 H₂O 的溶解度模型、考虑到多种杂质气体的电离电解而建立的多组分的溶解与电离平衡模型、FeCO₃、FeS 沉淀反应以及它们在钢表面生成腐蚀产物薄膜的演变生长模型、多组分在流体和多孔产物膜中的传质模型以及碳钢电化学腐蚀模型等子模型。同时, 该模型考虑了地层水矿化度对腐蚀的影响, 考虑了 Cl⁻、Ca²⁺、SO₄²⁻ 等离子对于腐蚀速率的影响, 可以对在超临界 CO₂ 地层水工况下的腐蚀行为进行分析预测。该模型可以计算各杂质浓度对腐蚀速率的影响, 并能进行稳态和瞬态条件下的腐蚀速率预测。

5.10 海洋 CO₂ 输注环境中 FeCO₃ 成膜临界条件研究 (王子明 厦门大学)

腐蚀是海洋 CO₂ 输送和注入管道面临的关键技术经济难题。当前, 采用极限控制含水量方法能够确保较低腐蚀风险, 然而 CO₂ 深度脱水成本高昂, 不利于大规模工业应用。本报告重点研究海洋 CO₂ 输送和注入典型工况下碳钢管道腐蚀行为, 尝试提出基于腐蚀产物膜稳定性的 CO₂ 管道防护策略, 并实验确定形成稳定 FeCO₃ 膜的临界环境条件。利用高温高压原位电化学阻抗方法, 突破仅依靠腐蚀产物形貌评判其保护性的评估方法, 建立 FeCO₃ 膜稳定性的电化学评价指标。本报告将为 CO₂ 输送与注入管道, 为 CO₂ 管道长期腐蚀行为评估和腐蚀控制提供新思路, 保障海洋 CO₂ 运输安全。



5.11 发展方向建议

1. 适用于含杂质不同场景的二氧化碳物性及相特性及耦合水力热力的模块化特性研究。
2. 离岸二氧化碳管道流固耦合与材料性能研究。
3. 二氧化碳管道腐蚀特性研究。
4. 离岸二氧化碳管道安全泄放及完整性管理技术。
5. 离岸二氧化碳管道数字孪生技术及功能模块的开发。

专题四：近海咸水层 CO₂ 地质封存与驱油潜力（召集人：李鹏春、李琦、张运迎、赵明辉）

6.1 粤西近海咸水层 CO₂ 封存与驱油潜力研究（方小宇 南方海洋科学与工程广东省实验（湛江））

2022 年广东省 CO₂ 排放量约 6.7 亿吨，减排形势严峻。适宜广东的碳封存方式为离岸封存方式，海上沉积盆地有望为广东碳中和发挥重要作用。粤西作为广东的临海重化工聚集区，近海发育油气田和沉积凹陷，具备近源埋碳的先天优势，有望在全国较早实现岸碳入海的 CCUS 工程应用。本文立足粤西近海北部湾盆地，在海上油气勘探开发积累的大量资料和认识基础上，基于地质模型法系统评价了北部湾盆地各沉积凹陷的封存潜力，基于换油系数类比法系统评价了粤西近海乌石油田群的封存-驱油潜力，基于聚类分析法建立了针对海上油气藏的驱油适宜性评价方法。研究所形成的方法为二氧化碳离岸封存和驱油靶区优选、工程应用提供了技术支撑。

6.2 珠江口盆地咸水层碳封存潜力评价与有利区带优选研究（付玉通 广州海洋地质调查局三亚南海地质研究所）

广东省 CO₂ 排放源，以沿海地区的大型点状源为主，毗邻海域的珠江口盆地是潜在的地质碳封存场所，摸清珠江口盆地地质碳封存潜力，查明适合地质碳封存的有利区和目标层位成为当务之急。在系统调研国内外海域碳封存最新研究成果基础上，广泛搜集地质调查和油气田勘探开发资料，首先总结了珠江口盆地地层、构造、断层、储盖层特征及组合关系、温压系统等碳封存基础地质条件；然后采用体积法计算了珠江口盆地咸水层地质碳封存潜力；其次建立了区带级碳封存适宜性评价指标体系；最后利用层次分析法评价了各区带碳封存适宜性，根据得分高低筛选出适宜碳封存的区带。研究结果表明：珠江口盆地珠一坳陷碳封存潜力 1280 亿吨，封存潜力最大，封存类型以构造封存为主，最适宜封存二氧化碳。研究成果为广东省海域地质碳封存选址提供了地质依据。

6.3 我国海上盆地 CO₂ 地质封存条件评价与选址策略思考（李林涛 中海油研究总院）

双碳背景下，利用海上沉积盆地开展 CO₂ 封存是缓解我国沿海地区发展经济与降碳减排矛盾的必然选择。根据盆地类型、盆地面积、沉积物层厚度、地温特征、地震活动情况、断裂分布与活动特征等条件，对我国海上盆地 CO₂ 地质封存条件进行评价与分类。以钻井、地震等资料为基础，开展 CO₂ 地质封存储盖层分布与有效性研究，结合构造、沉积等区域地质研究认识，完成我国海上盆地 CO₂ 地质封存潜力评价。结合珠江口盆地 CO₂ 封存选址工作实践，指出我国海上盆地 CO₂ 封存选址面临的挑战主要包括：复杂的地质条件、缺乏相应标准与经验、可用资料少、要兼顾源汇与工程条件、要平衡封存与油气生产关系。提出海上盆地 CO₂ 封存选址策略与建议：因地制宜，结合具体地质条件开展不同模式封存；建立体系，边实践边总结不断完善选址方法与标准；舍远求近，重视盆缘残洼与盆内凹陷区选址研究；安全为本，攻关规模化注入封存稳定性评价技术；示范先行，促进海上封存与油气生产融合发展。

6.4 咸水层灌注过程中的 CO₂-水-岩耦合渗流机理实验研究（刘成 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司）

利用咸水层实现 CO₂ 地质封存是目前国内外 CCS 技术发展的方向之一，为实现 CO₂ 向咸水储层中的顺利灌注，必须充分认识目标咸水层 CO₂-水-岩耦合渗流特征和运移规律。本文利用西江油田获取的咸水层储层流体和岩心样品资料，通过高温高压驱替实验一系列实验方法获取必要数据来分析评价 CO₂-



咸水相渗、启动压力、溶解度、可动流体及碳酸水驱等方面的动态特征场地可注性，具体如下：①绘制了总矿化度 29384ppm 的地层水的 CO₂ 溶解度图版（图 1），得到溶解度图版和给定矿化度咸水溶解度与压力经验关系式，预测 CO₂ 的场地溶解封存潜力；②建立了咸水层 CO₂ 灌注过程的启动压力测试方法，量化了岩心渗透率、含水饱和度与启动压力的关系曲线（图 2），可用于 CO₂ 注入压力和注入能力的评估预测。③表征了不同地层压力下的 CO₂/咸水两相渗流特征，发现了地层压力的升高，CO₂ 相渗透率曲线有抬升的趋势（图 3），发现平均残余水饱和度为 47%；④通过 CO₂ 灌注中地层水蒸发实验，揭示了盐析后储层岩心渗透率变化特征（图 4）；⑤500 倍饱和和 CO₂ 碳酸水驱替过程会引起岩心渗透率的降低（图 5），推测为碳酸水对胶结矿物的溶蚀松动造成了储层岩心渗流能力的下降。

以上实验结果有助于支持咸水层 CO₂ 注入能力评估、构造/毛管捕获/溶解封存能力的量化提供基础数据，进而为有利封存目标区块筛选和试注方案设计提供支持。

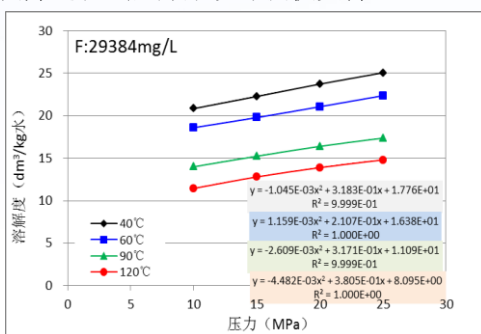


图 1 CO₂ 溶解度与温度、压力关系图版及经验公式

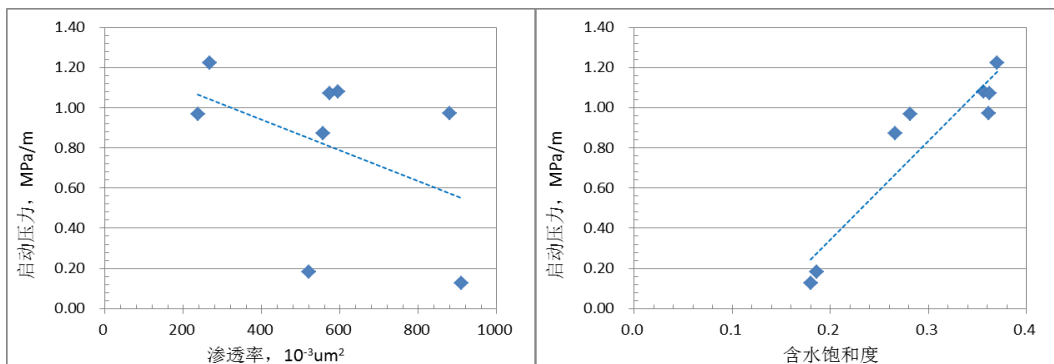


图 2 储层岩心渗透率（左）、含水饱和度（右）与启动压力关系图

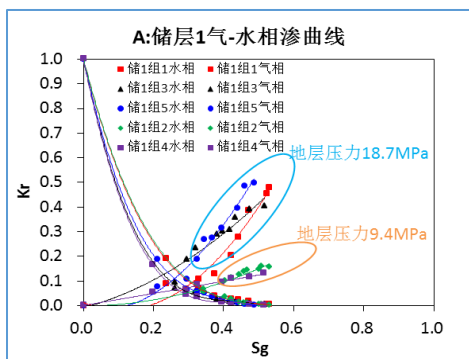


图 3 储层 5 组岩心不同注入压力下 CO₂ 驱替地层水的相渗曲线

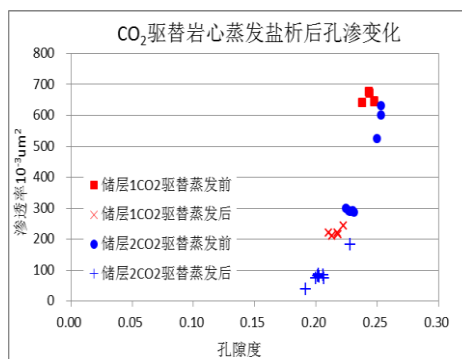


图 4 盐析前后孔隙度渗透率关系图

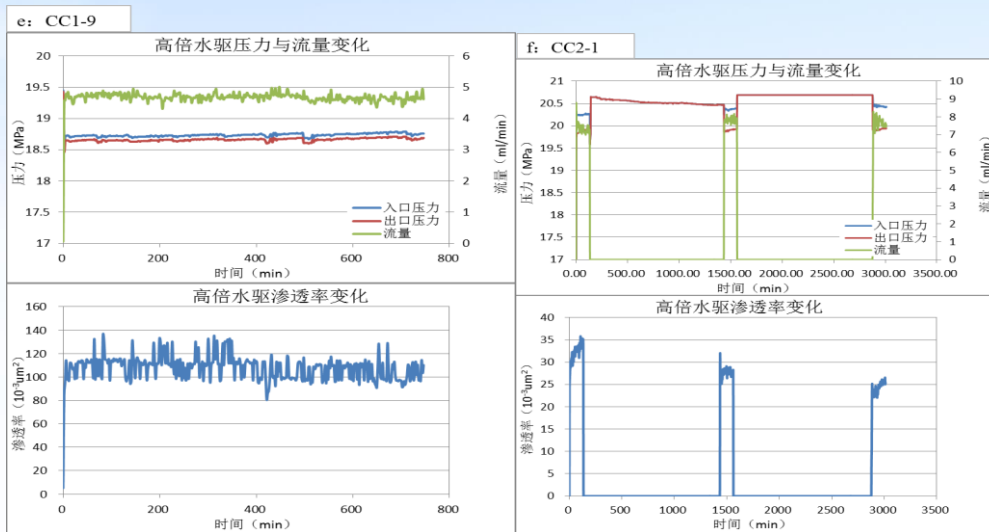


图 5 高倍饱和 CO₂ 碳酸水驱实验过程曲线图

6.5 粤港澳大湾区 CO₂ 地质封存科学选址（赵明辉 中国科学院南海海洋研究所）

全球气候变暖导致极端灾害频发，CO₂ 捕集利与封存（CCUS）成为国内外研究热点。在国家“双碳”战略任务下，具有高度密集型的工业 CO₂ 排放源的粤港澳大湾区，面临着经济可持续发展的巨大压力。CCUS 方法将捕获的 CO₂ 充注到海底储层中是目前缓解环境变化最有效的方法之一。然而，从沿海陆架至陆坡区的地质结构和 CO₂ 储集体属性研究一直比较薄弱。本研究拟基于丰富的深地震探测资料与新采集 MCS 数据，结合钻井岩芯样品，采用地球物理、地球化学、数值模拟等多学科交叉方法，开展粤港澳大湾区 CO₂ 封存场址的地质构造、环境因素、储盖层属性等技术攻关，寻找高孔/渗性的砂岩咸水层储集体，探明新生代地质结构储集体分布，评估储集体的岩性和埋藏条件，优选出封存 CO₂ 前景区带，促进区域经济与环境协调发展。

6.6 海上 CO₂ 封存及海洋工程装备发展趋势探讨（徐绍良 中国海洋工程装备技术有限公司）

针对“长三角”和“珠三角”等沿海省市，分析了区域的碳排放总量、碳排放强度、碳排放增长趋势等碳排指标，并结合陆上和海上的可供 CO₂ 封存的地质构造，以及陆上和海上封存两种方式的优缺点对比，论述了“陆集海储”碳封存是沿海省市实现碳中和的必由之路。

在调研国内外主要海上 CO₂ 封存项目的基础上，针对不同海上 CO₂ 封存项目中的主要海洋工程装备，如液化 CO₂ 运输船、CO₂ 注入平台、CO₂ 海底监测系统等，分析其主要装备选型参数和 CO₂ 注入量/封存规模的匹配性，以及面临的主要困难和挑战。阐述了对我国海上 CO₂ 封存示范项目的借鉴意义，并探讨了我国未来海上 CO₂ 封存项目的海工装备的发展趋势。

6.7 基于 X 射线 CT 与中子技术的 CO₂ 封存储层孔隙结构与渗透性研究（王朋飞 南方科技大学）

海底咸水层 CO₂ 封存是未来最具潜力的碳减排技术，对于我国实现碳中和目标具有重要意义。该技术是一个涉及储层内 CO₂ 驱替和咸水渗吸的复杂过程。咸水层 CO₂ 封存的驱替渗吸过程对储层孔隙结构与渗透性的影响机制不明，是制约 CO₂ 封存效果准确评估的关键科学问题。本研究将首先利用小角中子散射并结合多种互补性技术，精确测量咸水储层岩心的孔隙结构特征，有效评价储层的连通性；其次，结合小角中子散射与 X 射线 CT 技术，探究不同 CO₂ 驱替咸水条件下，孔隙内 CO₂、咸水的分布规律；最后，利用中子成像技术，阐明储层岩心孔隙结构与非饱和渗吸动态含水率的相互关系，改进海底咸水



储层岩心的非饱和扩散函数。本研究将中子技术应用到海底咸水层 CO₂ 封存过程研究，将为高效安全封存提供理论支撑。

6.8 CO₂ 封存潜力储层的地震探测响应特征评价（邱宁 中国科学院南海海洋研究所）

人类活动产生的 CO₂ 给世界气候变化带来巨大挑战，采取有效措施来控制温室气体排放，减缓全球变暖是全球热点问题。CCUS（Carbon Capture, Utilization and Storage：碳捕获、利用与封存）是应对全球气候变化以及实现“3060 双碳目标”的关键技术之一。该技术目前主要将深层咸水层和地下反应性岩石（如玄武岩）作为封存地点。利用地震方法准确识别储层并研究 CO₂ 注入储层前后储层物性特征和流体运移规律，对 CCUS 工程选址、封存储量评估及 CO₂ 监测至关重要。

安全性和有效性是 CO₂ 地质封存和利用根本保障。深部地层条件、地质结构复杂，长期监测可靠性低，重复实验和校核困难等，均是碳封存技术将面临的挑战。CCUS 作为我国化石能源低碳利用的首要技术，在实施中会有以下问题：（1）CO₂ 是否封存在预期的深度以及横向范围内，由于深层地质构造复杂，地震资料成像难度较大。（2）CO₂ 泄漏的风险，（3）量化评估 CO₂ 长期的封存量。这要求地震监测手段对 CO₂ 注入前后做到严格、准确的监测，才能够证实注入和封存的 CO₂ 量，保证 CO₂ 在地下封存层中预期的形式和运移。

研究考虑充注不同饱和度的临界态 CO₂ 和 CO₂ 水合物对岩石物理性质的影响，分析叠前 AVO 正演分析储层叠前响应规律，以及实际 CO₂ 注入储层前后的反射结构差异性特征。利用 CO₂ 封存相关地质、地球化学、地球物理、岩石物理资料联合建立时变地震地质模型并使用高精度的谱元法进行地震波正演模拟，分析可封存地层与目的层的地震响应特征。根据不同储层组合模型响应分析，为封存地层的评价提供借鉴依据。以上研究对 CCUS 的选址、监测与评价有重要意义。

6.9 基于最小成本路径的离岸 CO₂ 地质封存成本评估及潜力评价（许晓艺 中国科学院武汉岩土力学研究所）

二氧化碳（CO₂）捕集、利用与封存技术（CCUS）是减排温室气体 CO₂，实现中国“双碳”目标的重要手段。CCUS 项目建设投资成本较高，提前对 CCUS 实施最优规划与布局对未来大规模部署 CCUS 项目十分重要。CO₂ 输送系统作为 CCUS 技术的中间环节，是连接捕集源与封存地点的重要纽带，也是构成 CO₂ 地质封存总运行成本的关键要素，设计高效的运输管网是降低总运行成本的关键。管道路线选择本质上是一种寻路问题，CO₂ 管道运输成本取决于地理条件，例如地形、环境生态等级、土地利用类型等，应用最小成本路径分析（LCPA）方法可以找到从起点到终点的最经济运输路线。本研究基于能源成本潜力视角，探索碳价机制驱动下，CO₂ 咸水层封存作为一种纯减排手段而无驱油等附加收益项目的运行成本。研究过程中不针对特定排放源对中国全局进行基于最小成本的点对点的源汇匹配评估，以成本效益最优的方式实现碳减排，旨在助力中国“双碳”目标，响应全球 2°C 温升控制的宏伟蓝图，明确中国 CO₂ 地质封存的成本潜力。

6.10 木质素对 CO₂ 水合物形成分解的影响：提升咸水层 CO₂ 地质封存潜力（游昌宇 中国科学院广州能源研究所）

咸水层 CO₂ 封存常伴 CO₂ 水合物生成和分解。井筒内水合物生成妨碍注入，而咸水层中 CO₂ 形成水合物比形成碳酸盐矿物更快，且 CO₂ 以水合物形式封存可增加封存量，防止 CO₂ 流体溢出。故延迟 CO₂ 水合物形成、增加其后期生成量可提升封存量并增强封存稳定性。此外温度波动可能引起水合物分解，因此 CO₂ 水合物分解行为也需关注。现有水合物的促进/抑制剂多是人工合成，而木质素是植物中第二大有机高分子化合物和海洋沉积物中有机质来源，作为促进/抑制剂应用于 CO₂ 封存过程，可减轻环境和经济负担。本研究在纯水和 1%、3% 浓度木质素溶液中进行 CO₂ 溶解、生成和分解实验。结果显示，木质素能增加 CO₂ 溶解度，浓度越高效果越显著。木质素能延长 CO₂ 水合物的生成诱导时间，增加总生



成量，浓度越高影响更显著。温度回升时，木质素溶液中水合物持续生成，但一旦开始分解，分解快于纯水体系，浓度高时分解减缓。总之，木质素的应用有助于提升咸水层 CO₂ 地质封存潜力，并为该领域的研究提供启示。

6.11 发展方向建议

1. 海上咸水层封存潜力评估方法体系。
2. 近岸浅水区咸水层分布及封存潜力调查分析。
3. 咸水层 CO₂-水-岩反应过程对封存潜力影响规律。
4. 区域源汇匹配规划布局与产业化潜力。
5. 区域近海 CCUS 集群化潜力与示范。

专题五：海底 CO₂ 驱油与封存协同理论与技术（召集人：陈建文、刘强、刘树阳）

7.1 海底 CO₂ 地质封存方向及我国沿海碳源分布（李琦 中国地质大学（北京））

二氧化碳封存技术,尤其是海底二氧化碳封存是能够有效缓解温室效应,实现碳中和的重要手段。总结国内外相关技术特点和发展趋势,为二氧化碳海底地质封存的实施提供技术依据,获得我国沿海二氧化碳地质封存条件以及沿海碳源分布特点。

我国近海沉积盆地面积大、地层厚度大,储盖层组合好,圈闭非常发育,地质封存潜力高,其中渤海盆地、珠江口盆地、东海陆架盆地均具有良好的封存适宜性。近海沉积盆地中油、气藏及深部咸水层是 CO₂ 封存的目标区域,封存潜力高。油气成藏的地质特点决定了油气藏具有良好的地质圈闭结构,CO₂ 地质封存适应性高,近海地区发展 CO₂-EOR 技术发展意义重大,主要的贮存方式为构造空间和束缚空间贮存。

中国沿海地区高碳排放企业地理空间分布特征明显,具有显著的沿海岸线分布特征,近海封存从运输距离上具有独特的优势。基于源汇匹配,初步划分中国近海二氧化碳源汇集群匹配,分为环渤海地区、临黄海地区、临东海地区以及华南沿海地区,各空间集群碳汇均具备较高的地质封存潜力。

7.2 CO₂ 置换沉积物中甲烷水合物的实验研究（孙建业 青岛海洋地质研究所）

CO₂ 置换甲烷水合物法的研究对天然气水合物资源的开采和 CO₂ 埋存具有双重意义。对置换效率和置换机理的深刻理解是解决该方法应用可行性的突破口。针对上述两个问题,本文进行了 CO₂ 置换甲烷水合物模拟实验,对置换后 CO₂ 在沉积层的垂向分布规律和沉积孔隙中气、水合物、水的作用过程进行分析得出,宏观过程中,置换反应分为快速反应和缓慢反应两个阶段,即气固接触层 CO₂ 置换和气体双向扩散置换阶段;置换后样品甲烷、二氧化碳垂向分布特征证实了宏观过程,随着沉积层深度的增加 CO₂ 含量逐渐降低,甲烷含量逐渐增加(初始甲烷水合物样品甲烷水合物在沉积物中分布均匀);置换温度升高会提高整体置换效率,沉积层甲烷初始饱和度越低,置换效率越高;对置换过程中 CO₂ 消耗量规律分析,发现置换反应主要发生在快速反应阶段(2-3d)(置换率达到 80%),而 CO₂ 与孔隙自由水的反应几乎匀速贯穿实验周期,从而总结了 CO₂ 置换石英砂中甲烷水合物的孔隙尺度置换过程:首先 CO₂ 注入后,气体会扩散到沉积层内部,置换反应发生,并优先在气固界面发生置换,同时伴随 CO₂ 与孔隙内自由水的反应,置换合成的 CO₂/CH₄ 混合水合物和 CO₂ 与自由水合成的 CO₂ 水合物包裹在甲烷水合物颗粒表面,隔绝了 CO₂ 与甲烷水合物的接触,导致之后的置换过程十分缓慢甚至停滞。

7.3 孔隙内 CO₂/C₃H₈ 溶剂-原油抽提特性研究（张毅 大连理工大学）

吞吐法是提高致密油藏采收率的有效方法,探明微观尺度溶剂与原油的作用机制,有助于优化采收率和 CO₂ 封存效果。采用分子动力学模拟方法,构建了 CO₂/C₃H₈ 抽提基质孔隙内原油的模拟体系,对比研究了 CO₂/C₃H₈ 对纳米孔隙内原油的采收能力和微观作用机理。结果表明:CO₂ 的表面吸附有助于将纳米受限条件下的原油从表面剥离,而 C₃H₈ 具有更强的溶解作用。在 CO₂ 体系中,浸泡时间存在一个阈值,浸泡不充分时,原油会发生明显的回流现象,残余油量重新升高。浸泡充分条件下,残余油量在降压阶段持续降低,固-液相互作用的降低为原油流动提供了必要条件,CO₂ 脱附形成的气相为原油流动提供了持续的驱动力。在 C₃H₈ 体系中,回流现象较弱且降压采收效果不明显,重组分形成残余油吸附在孔隙表面。阐明了吞吐过程中气-液-固相互作用,揭示了吸附、溶解、原油回流等微观作用行为,优化了协同作用下的混合溶剂比例,为非常规资源采收提供重要的基础理论支持。



7.4 咸水层 CO₂ 注入渗流运移特征及认识（李彦尊 中海油研究总院有限责任公司）

CO₂ 咸水层封存潜力巨大，是未来的主要发展方向。CO₂ 在注入过程中受浮力、两相界面张力等影响，其渗流和分布规律与常规油气驱替存在较大差异。本研究通过毛管模型对 CO₂ 渗流受力进行分析，建立了注入运移力学模型，评价了不同注入阶段 CO₂ 在储层中的运移分布规律，并将注入过程进行阶段划分，为 CO₂ 注入指标和方案设计提供了依据。同时考虑 CO₂ 溶解和毛管力封存机理，评价了不同倾角地层条件下 CO₂ 运移分布规律，提出了非封闭储层安全注入模式，进一步拓展了海上封存选区范围和注入条件，为海上大规模封存注入提供了理论依据。

7.5 中国海域及盆地咸水层盆地级封存潜力预测方法（陈建文 青岛海洋地质研究所）

海洋地质碳封存是我国沿海地区、尤其是东南沿海省市实现碳中和的主要重要途径，我国海域封存潜力及其分布对沿海地区 CCUS 产业规划研究具有重要意义。作者研究团队在系统整理地质调查实测与成果资料，以及收集商业石油公司公开发表勘探开发成果基础上，建立我国海域二氧化碳地质封存基础地质数据库，形成了海域地形地貌、盆地构造、沉积地层、水文地质、工程地质、地温场特征、油气勘探开发程度等七大类数据集。针对我国海域沉积盆地地质特征和勘探开发程度，确定海底以下 800~3200 米地层为有利封存层位，在建立地层体积计算模型、相控砂地比计算模型、砂岩孔隙度函数模型、二氧化碳温压场空变模型的基础上创新性提出了模型体积法，解决了评价中关键参数科学取值和精度问题，计算表明盆地级预测潜力 2.58 万亿吨。

7.6 咸水层封存 CO₂ 沿裂缝运移泄漏规律研究（刘树阳 中国石油大学（华东））

咸水层 CO₂ 封存是主要的 CCUS 技术之一，封存潜力巨大，是助力实现“碳中和”目标的关键技术。CO₂ 地质封存过程中的潜在泄漏问题是 CCUS 技术面临的主要挑战之一，尤其是在储层存在裂缝情况下，CO₂ 沿裂缝的运移泄漏规律对于封存安全性评价至关重要。目前，对咸水层封存过程中的 CO₂ 泄漏驱动力的定量评价和分析仍然缺乏。本研究建立了嵌入高渗透裂缝带的咸水层分层模型，模拟了注入后 CO₂ 沿裂缝的运移与泄漏过程。系统地分析了黏性力、重力、毛细力等主要作用力，引入无因次数评价各种力的主控作用，并根据泄漏特性将泄漏过程分为四个阶段：CO₂ 快速泄漏期、CO₂ 泄漏减缓期、盐水快速下沉期和稳定对流期。黏性力、重力、毛细力依次为前三个阶段的主导驱动力。泄漏运移至浅层咸水层的 CO₂ 以结构和残余捕获形式为主，并且造成了浅层的严重酸化。研究表明，增加 Gr 或降低 Ca 可以提高 CO₂ 的安全封存率。

7.7 咸水层 CO₂ 束缚封存的微观特征—基于 CT 扫描的实验研究（韦贝 中国石油大学（华东））

（1）研究目的和范围

由于其封存潜力大以及可行性，咸水层被认为是 CO₂ 封存的地点之一。明确 CO₂ 在咸水层孔隙中的赋存情况及运移特征，这会对 CO₂ 束缚封存及其安全性有着直接影响。因此，有必要开展咸水层 CO₂ 束缚封存的微观特征研究，为 CO₂ 长期安全封存提供理论依据。

（2）方法、步骤和过程

通过开展岩心驱替及 CT 扫描实验，对扫描结果进行图像分割并对 CO₂ 赋存形式进行分析，随后对 CO₂ 接触角进行了原位测量。此外，还研究了岩心渗透率、盐水矿化度和表面活性剂浓度对 CO₂ 束缚封存效率的影响。

（3）结果、认识和结论

CO₂ 的赋存形式主要有网状、簇状和孤滴状。残余捕获与孔隙结构直接相关，当渗透率为 100mD 时，CO₂ 束缚封存效率为 77.03%，而渗透率为 1500mD 时，封存效率为 48.21%。岩石的亲水能力随着盐度的降低以及表活剂浓度的增加而增强，当岩石亲水性增强时，孔隙中网状 CO₂ 占比增加，簇状和孤滴状



CO₂ 占比降低，CO₂ 束缚封存效率增加。

(4) 创新点、技术贡献和意义

该研究阐明了 CO₂ 束缚封存的微观特征，这将有助于咸水层 CO₂ 封存地点的选取，也为咸水层 CO₂ 封存的长期安全性提供了理论依据。

7.8 枯竭油气藏二氧化碳封存井适宜性定量评价方法与应用（何佑伟 西南石油大学）

研究目的：

CO₂ 封存是一种有效降低温室气体影响的技术。注入井是最可能的泄漏途径并且具有最高的泄漏风险。目前的研究主要集中在识别哪个井筒屏障具有最高的失效风险，而不是选择一口注入井。为了填补这一空白，本文提出了油藏与井筒相结合的封存井适宜性评价方法来选择一口 CO₂ 封存目标井。

研究方法：

将模糊综合评价与层次分析法相结合，建立了一种新的评价体系。该评价模型共有 29 项指标，包括地层、井、水泥环、固井质量、套管、油管、井口等 7 大类。应用该方法对 S 气藏 4 口井进行了 CO₂ 封存适用性评价。通过评价矩阵与评价指标权重之间的线性变换可以得到结果。根据最大隶属度原则选择目标井。

研究结果：

利用评价体系对 S 气藏 4 口注入井的适应性进行了评价。结果表明，P1 井和 P2 井的“良好”隶属度分别为 0.3271 和 0.4336，P3 井的“一般”隶属度为 0.3865，P4 井的“平均”隶属度为 0.3226。P1 和 P2 井具有更强的封存适用性和安全性。评价前，若固井产量小于 $5 \times 10^4 \text{m}^3$ ，且固井质量差的井长超过 30%，则该井不适宜作为注入井。油管的性能具有最大的权重系数，这意味着它在二氧化碳封存过程中泄漏的风险最高。为获得较好的固井质量，水泥浆驱替速率应大于 1.5m/s，套管定心度应大于 72%，油井水泥环滤失量应小于 25ml。该综合评价系统可用于快速识别适合封存 CO₂ 的井，从而显著降低注入井泄漏的风险，并在封存 CO₂ 期间保持井的完整性。

成果意义及创新点：

提出了考虑储层和井筒完整性的综合评价体系。若 29 个指标中部分指标的参数难以获取，本文提出的评价模型仍然适用。与“最小-最大”模糊算子相比，加权平均算子使最终结果更加客观和准确。该评价模型可用于快速确定哪口井适合注入和封存，并降低二氧化碳从注入井泄漏的风险。

关键词：二氧化碳封存；封存井评价；井筒完整性；层次分析法，模糊综合评价；实例应用

7.9 热流固耦合条件下的 CO₂ 驱油与封存模拟方法研究（周家兴 清华大学水利系）

CO₂ 驱强化采油封存技术（CO₂-EOR）不仅是实现“碳达峰、碳中和”战略目标的主要方法，也是提高油田采收率的关键技术。针对 CO₂ 封存与驱油全过程中的固体变形、油气多相流、油气相变等多物理场行为，建立了一个热流固全耦合计算模型。以胜利油田某区块为研究背景，采用 COMSOL 有限元软件对计算模型进行求解，研究了全过程中的储层变化特征、CO₂ 封存量与原油产出量。模拟结果表明：储层介质的孔隙度对 CO₂ 封存量影响较大，采用注入-采出井的双井模式能够有效提高 CO₂ 的封存效率。相关研究成果可为海底油藏开展 CO₂-EOR 工程提供技术支持。

7.10 发展方向建议

1. 海底咸水层封存条件下的泄漏机制和安全稳定性评价技术。
2. 咸水层封存条件下储层纵向动用度提高技术。
3. CO₂ 置换天然气水合物封存机理。



专题六：离岸 CO₂ 地质封存数值模拟与监测技术（召集人：李琦、李鹏春、王立忠）

8.1 CO₂ 咸水层与气藏封存数值模拟：从分子尺度到场地尺度（陈聪 大连理工大学）

海洋咸水层和气藏是二氧化碳地质封存的关键场地。咸水层与气藏封存条件下，CO₂/水/CH₄体系在地质构造中存在润湿、吸附、驱替、迁移等行为，本文采用分子模拟和场地尺度模拟方法探究了封存条件对 CO₂ 多相体系地质封存特性的影响规律。利用分子动力学模拟方法研究了不同岩石表面结构、温度、压力、盐度等多封存条件下，CO₂/盐水/岩石体系的润湿特性，揭示了分子间微观作用的影响机制，明晰了复杂条件下润湿性变化规律。利用分子模拟方法研究了纳米孔隙内 CO₂/CH₄ 吸附与驱替规律，揭示了气体竞争吸附、驱替机制及其对气体吸附量的影响，构建了孔隙内多元气体吸附模型。利用大尺度模拟方法研究了 CO₂ 咸水层封存条件下盐析及气体分布与迁移特性，揭示了润湿性等因素对 CO₂ 封存行为的影响规律，进一步分析了盖层厚度对封存安全性的影响。本文研究结果将有助于揭示 CO₂ 封存机理，评价 CO₂ 分布与迁移，优选封存场地等。

8.2 海底地质封存 CO₂ 泄漏监测布点优化研究（宋学行 中国科学院上海高等研究院）

我国沿海地区对化石能源依赖度较高，钢铁、化工等产业在经济结构中占比较大，预计未来对 CO₂ 地质利用与封存技术的需求较为显著。然而沿海地区尤其东南沿海地区缺少陆域 CO₂ 地质封存适宜场地，海底地质封存是实现碳中和的重要手段之一。开展海底地质封存必须对发生概率极低的 CO₂ 泄漏情景实施长期监测以避免对社会生产生活造成重大影响。为了降低长期监测成本，有必要针对监测指标的特征开展监测传感器网络布点优化。本文建立了海底潜在泄漏风险评估模型，开展了典型海域潜在泄漏等级评估分析；建立了 CO₂ 泄漏在海水中的运移扩散模型并评估了典型区域 CO₂ 运移扩散特征，结合泄漏风险评估结果，进一步开展了泄漏监测的传感器布点优化。海底地质封存 CO₂ 泄漏监测传感器布点优化将推动促进低成本长期高效监测，进而促进海底地质封存工程应用的发展。

8.3 南海东部珠江口盆地二氧化碳长期封存机理及封存潜力评价（李芳芳 中海油能源发展股份有限公司）

我国南海东部沿海城市经济发达，沿岸 CO₂ 排放源众多，亟需发展有效的减碳技术。南海东部珠江口盆地咸水层厚度大、面积广且封闭性好，是 CO₂ 地质封存的有利场所。本文以南海东部珠江口盆地 X 油田群为例，利用 ToughReact 软件模拟了海上咸水层封存 CO₂ 相态演变、迁移规律及四种封存机理长期演化特征；在此基础上，以珠江口盆地周边油气田韩江组、珠江组和珠海组咸水层为研究目标，基于地质参数、储集层条件和流体性质，开展咸水层理论封存潜力评价与有利区优选研究。研究表明，西江油田群构造平缓，储层内夹层发育，封存 10 年后以构造封存为主占比 37%，二氧化碳羽流距离为 100m；封存 200 年后构造封存消失以溶解封存为主，占比 49%，二氧化碳羽流距离从 100m 运移至 350m。珠江口盆地 4 个凹陷 18 个油气田咸水层中 CO₂ 理论封存量为 15083 万吨，其中西江凹陷为盆地中碳封存综合适宜性最好的单元。

8.4 海底沉积层内水合物法二氧化碳封存的分子模拟研究（贺仲金 中国地质大学（武汉））

研究海洋沉积物纳米孔隙中二氧化碳水合物的形成，对理解二氧化碳海底地质封存至关重要。海洋沉积物中水合物生成是一个极其复杂的过程，受黏土矿物类型、孔隙水 pH 和盐度等多重地质因素的影响



响。本工作采用全原子分子动力学模拟的方法，构建由各种黏土表面组成的狭缝纳米孔，系统地研究了黏土的表面性质与海水盐离子对黏土纳米孔中二氧化碳水合物形成的影响机制。模拟结果表明，黏土表面的相对亲/疏水性、带电性质显著影响其对二氧化碳分子、水分子还有盐离子的亲和性，进而表现出不同的吸附强度，影响这些分子的界面浓度和体相浓度，并最终影响黏土孔隙内气体水合物的形成过程。具体而言，电中性的高岭石黏土的三水铝石（gibbsite）表面分布较多氢键，具有较强亲水性，显著吸附水分子而排斥二氧化碳分子，而相对疏水的硅氧烷（siloxane）表面能吸附二氧化碳分子形成表面气泡，降低水相二氧化碳浓度，对水合物形成表现一定抑制性；而表面带负电的蒙脱石和伊利石黏土，对水分子和盐离子表现出更强的亲和性，在界面附近形成强烈的吸附层，导致水合物主要在远离黏土表面的体相形成。黏土表面的不同性质还影响生成的水合物固体与黏土表面的接触方式与作用强度，水合物笼子与亲水表面或带电表面形成氢键，作用较强；而与疏水表面作用相对较弱。此外，本工作还揭示了海水盐离子与黏土表面性质的耦合效应，以及盐离子的动力学效应对黏土孔隙水合物形成的影响。这些关于海洋沉积物黏土孔隙中气体水合物形成的分子机理认识，有助于理解海洋沉积物中二氧化碳水合物地质封存。

8.5 CO₂ 离岸封存监测体系建立要素分析（刘桂臻 中国科学院武汉岩土力学研究所）

离岸封存是沿海地区开展碳封存实现碳减排的重要的解决方案，但是监测技术体系的建立是需要解决的关键问题。因此，对 CO₂ 离岸封存项目的主要场地条件、工程运行情况及监测技术应用情况进行总结分析，得出监测体系建立的考虑要素：（1）基于风险的监测方案制定。已有项目未监测到 CO₂ 泄漏，但存在与储层性能有关的风险事件，比如储层出砂、盐析堵塞等，因此 CO₂ 海底封存监测方案的设计应该建立风险评估的基础上。（2）监测技术的选择受到封存场址特点和基础设施等多个因素的限制。例如，固结的碳酸盐岩储盖层，限制了地震监测技术在巴西 Lula 油田的应用。（3）工程条件影响监测技术的选择。小规模注入条件下，可重点考虑 2D 地震结合垂直地震剖面的核心监测技术；大规模封存项目可考虑 3D 时移地震结合海底重力监测，并在初期开展 2D 地震进行补充监测。以上内容有助于离岸封存监测工作的开展，促进 CO₂ 离岸封存的技术应用。

8.6 发展方向建议

1. 离岸 CO₂ 地质封存数值模拟软件的国产化开发。
2. 考虑实际海洋应用场景开发监测技术和工具。



专题七：海底 CO₂ 运移监测的地球物理与数字孪生技术（召集人：牛雄伟、邱宁、黄海波、王元）

9.1 融合处理速度和加速度记录的地震检测模型及其在新丰江水库的应用（吕作勇 广东省地震局）

人工智能技术已广泛应用于水库地震监测，但目前的地震检测模型多数使用速度型地震记录进行训练，对加速度波形的检测效果较差。本研究利用广东地震台网 2008-2021 年的 34 万条速度波形和加速度波形记录数据，分别训练得到了可检测速度波形的 PhaseNet_GD 模型和检测加速度波形的 PhaseNet_ITS 模型。测试表明，PhaseNet_GD 模型对 Pg 和 Sg 震相的到时匹配率分别为 90.5%和 92.8%；PhaseNet_ITS 模型对 Pg 和 Sg 震相到时匹配率分别为 73.8%和 72.6%。在此基础上，结合 GaMMA 震相关联方法和 HYPOSAT 地震定位，发展了一套新的地震数据智能处理系统，并处理了新丰江 2023 年河源 ML4.8 级地震序列，获得了 788 个事件，比人工多检测出 581 个地震，与人工地震目录匹配率高达 93.2%，误检测率为 0.38%。余震分布清晰的展示了发震断层的形态。这一系统可快速产出完备性高、高精度的地震目录，为水库地震监测和区域地震台网的数据实时处理提供技术支持。

9.2 注水诱发地震对碳封存地震风险评估的启示：以加拿大西部盆地为例（俞红玉 浙江大学）

减少碳排放以缓解全球气候变暖引发的环境问题已成为全球的共识。其中，二氧化碳地质封存（GCS）因其成熟技术和低成本，被视为未来减少碳排放的主要手段之一。然而，注碳会加载井附近的断层，可能诱发地震，导致设施损坏和社会恐慌。长期来看，断层活化还可能为 CO₂ 泄漏提供通道。虽然注碳项目尚未诱发有感地震（M>2）。随着项目的进行，已观测到诱发地震数量和震级上升的趋势。注碳诱发地震与注水诱发地震在发震机理上较为相似，后者实施时间久，诱发地震数量多，可为理解注碳诱发地震提供线索。

本次报告主要介绍我们在加拿大西部地区关于注水诱发地震的两个案例研究。案例一中，我们发现了一种新型的混频地震信号，并将它命名为 EHW 信号。EHW 占地震总数约 10%，和普通诱发地震相比，两者在注水井附近有相似的分布和迁移规律。其中 EHW 有较长的震源持续时间，可能表征了断层在注水活化的过程中，介于无震滑移和同震动态破裂之间的“慢”地震。案例二中，我们观测到一个地震静默区经历了 25 年的连续注水后，地震活动性突然上升，且地震分布指向走滑断层系统发育早期的利德尔切变构造，暗示长期注水可能加速断层系统的发育。

9.3 东海陆架盆地 CO₂ 运移可控源电磁法监测技术（张涛 自然资源部第二海洋研究所）

东海陆架盆地面积广阔且封闭性好，盆地深部咸水层体积巨大，储碳地质条件优越，同时盆地还具有水深浅、CO₂ 运输距离短、工程条件成熟等优点，是理想的海洋地质碳封存优选区域。在东海陆架盆地实施地质碳封存必须优先解决 CO₂ 注入有效性和安全性长期监测的技术难题，同时还应考虑监测方法需有针对性和低成本。传统四维地震监测虽然可以提供封存区的高分辨率结构和地层，但无法区分流体和流体中 CO₂ 饱和度，并且长期监测经济成本高昂。可控源电磁法（CSEM）不仅成本低，并且对流体和流体饱和度极为敏感。通过在海底部署 CSEM 监测网，实时测量封存区内电阻率变化，实现 CO₂ 运移监测，并与四维地震监测形成技术互补。CSEM 垂直电场对沿断层流动的 CO₂ 非常敏感，也为地质碳封存泄漏提供了一种有效的监测手段。



9.4 OBS 地震探测技术在 CO₂ 海底碳封存中的应用（牛雄伟 自然资源部第二海洋研究所）

二氧化碳（CO₂）的捕捉和储藏（CCP）被认为是减少 CO₂ 的一种重要手段，而石油和天然气的储层和盐水含水层是当今认为最理想的储藏空间。然而，海底或地下存储的安全性的长期预测是非常困难的和高度不确定的，仍然存在着二氧化碳可能泄漏到大气中的危险，降低这种风险的有效方法就是提高对目标区域储层构造的勘探程度。

近年来发展起来的多波多分量地震方法在探测海底渗漏方面也是非常有用的。流体对纵波影响不大，对横波则有极大衰减作用。对比纵、横波地震剖面可以识别地层中的流体，如纵波剖面上出现气烟囱的地方在横波剖面上表现为正常反射则可判断该处与气体运移有关。在地震剖面上还可以明显的识别出海底面以下流体（包括气体）的运移，如流体的上涌通道，沉积物的运移，麻坑的形成和气体的累积等。气烟囱及其通道表现为垂直的地震异常，通常被解释为连通着上下层的流体构造，其成因通常被解释为高压流体遇上不可渗透的上覆岩层时形成的含水裂隙。

开展高分辨率的三维多分量海底地震仪台阵对潜在的气体泄漏区（气烟囱型麻坑构造）进行高频震源底拖炸测勘探，可以获得高质量的地震纵横波数据，通过走时和波形反演、各向异性分析等手段获得气烟囱麻坑构造三维速度、泊松比和各向异性等结构模型，进而获得达到米级的高分辨率精细三维结构，进一步探讨气烟囱的内部破裂结构，判断这些破裂构造是否会打开或关闭进而预测气烟囱的渗透性，了解气烟囱周边构造特征及相互关系。再进一步通过气烟囱的结构建立 CO₂ 通量模型和流体运移模型。特别是：1. 获得渗透率与破裂构造的直接相关性；2. 获得流体运移特征并计算经过气烟囱的流体通量；3. 获得孔隙度-渗透率和气体运移的相互影响的关系；4. 通过气烟囱的结构特征来模拟预测潜在的泄漏点，评估对环境风险。

9.5 OBS 监测海底冷泉流体运移-海马冷泉区试验结果（刘斌 广州海洋地质调查局）

利用海底地震仪连续记录海底流体迁移所产生的微事件，为研究冷泉的流体过程和动态变化提供了一种有效的方法。2021 年 11 月 6 日至 11 月 19 日，我们在海马冷泉的一个活跃地点布设了一个四分量海底地震仪。该仪器以 4 ms 的采样率连续记录数据。OBS 数据解编后，转换为 SAC 格式用于后续分析。

我们主要使用 Matlab 进行数据分析。这些数据最初被转换为为期两天的 mat 格式文件。为了评估数据的一般质量，并大致了解它所包含的事件，首先扫描了所有的数据文件。然后通过人工方式来识别和选择感兴趣的事件。

我们一共识别了四种类型的信号：与 ROV 操作相关的信号、附近的航运噪音、自然地震和 SDEs。流体运移相关的 SDE 是我们关注的主要对象。一共发现了 5 个 SDEs，SDE 持续时间短（通常是 <1 s），没有 P 和 S 相的单脉冲。频率峰值约 10 Hz，持续时间小于 1 秒。由于 OBS 靠近一个已知的渗漏位置，而且这些 SDEs 与其他海域冷泉区记录的 SDEs 相似，我们将这些 SDEs 与流体迁移过程联系起来。SDEs 的发现表明流体运移可能仍在进行，但 SDE 的发生率非常低，可能表明，该位置的流体运移过程不是很活跃，这与之前通过化学分析观察到的渗漏活动的下降是一致的。这是首次在南海发现与冷泉流体运移相关的 SDEs。

此次海试结果初步显示了利用海底地震仪监测海底流体运移的可行性和有效性。类似的技术应该能够用于海底碳封存项目中，监测 CO₂ 的运移情况。

9.6 海洋可控源电磁法监测离岸二氧化碳封存中羽流运移的敏感度（李鹏春、邱宁 中国科学院南海海洋研究所）

随着全球气候变化问题的日益严重，对于控制温室气体排放和寻找替代能源的需求也日益迫切。离岸二氧化碳（CO₂）封存被认为是减少温室气体排放的一种有效方法。然而，封存过程中 CO₂ 的运移行



为对于封存的稳定性和安全性具有重要影响。因此，准确监测和评估 CO₂ 在封存过程中的运移行为是非常重要的。本研究基于海洋可控源电磁法（CSEM），针对离岸 CO₂ 封存中羽流运移的敏感度进行了研究。CSEM 能够通过测量海底地层电磁场响应来推断地下地层电性特征。首先，我们建立了 CO₂ 羽流在封存过程中的数值模拟模型，并确定了监测区域的几何形状和特征。然后，利用 CSEM 对模拟模型进行了电磁场响应的数值计算，并分析了不同参数对电磁场响应的敏感度。研究表明，CSEM 对于监测离岸 CO₂ 封存中羽流运移具有较高的敏感度。电磁场响应的变化可以反映 CO₂ 羽流的运移状态，从而提供了监测和评估封存过程中 CO₂ 运移行为的重要依据。本研究通过 CSEM 对离岸 CO₂ 封存中羽流运移的敏感度进行了探究，并验证了 CSEM 在封存过程监测中的可行性和有效性。这为进一步研究和应用 CSEM 提供了理论和实践依据，对于提高离岸 CO₂ 封存的安全性和稳定性具有重要意义。

9.7 使用机器学习堆叠方法对海底 CO₂ 封存储层地质建模（邱宁、张永恒 中国科学院南海海洋研究所）

全球气候变化问题日益严峻，温室气体的大量排放对环境 and 人类健康造成了严重威胁。为了减少温室气体的排放，海底 CO₂ 封存技术被广泛研究。然而，要实现可持续的 CO₂ 封存，需要深入了解 CO₂ 封存层的地质特征和运移规律。地质建模是研究 CO₂ 封存过程中不可或缺的一环，它可以帮助我们预测 CO₂ 封存层的地质属性，评估封存层的稳定性，以及优化封存方案。本研究提出了一种使用机器学习堆叠方法对海底 CO₂ 封存储层地质建模的新方法。首先，我们采集了大量的地质数据，包括地震数据、岩心样品数据、地质勘探数据等。然后，对采集到的数据进行预处理，包括数据清洗、异常值处理和特征工程等。接下来，我们使用特征选择方法选择最具代表性的特征用于建模。然后，我们将数据集分为训练集和测试集，并利用机器学习堆叠方法进行模型训练和预测。最后，我们对建模结果进行评估和分析，以验证该方法的有效性和准确性。实验结果表明，该方法能够更准确地预测 CO₂ 封存层的地质属性，并能够提供更可靠的封存方案。未来的研究可以进一步探索如何优化机器学习堆叠方法的参数设置，以提高建模效果。此外，还可以结合其他地质数据和方法，进一步提高 CO₂ 封存层地质建模的精度和可靠性。

9.8 发展方向建议

1. 重磁电震测井多手段结合延时监测 CO₂ 泄漏。
2. 水声、地声、水文要素多参数联合监测 CO₂ 泄漏。
3. 数据 AI 智能识别、实时传输技术。



专题八：海底 CO₂ 封存声学信息获取与处理技术（召集人：童峰、周天）

10.1 基于自适应核时频分析的浅海地震资料处理方法（邢磊、林浩然 中国海洋大学）

四维地震技术是海洋 CO₂ 地质封存最有效的监测技术。因 CO₂ 注入储层后与原状地层的反射地震信号特征差异较小，高保真的地震噪音衰减技术对 CO₂ 封存特征描述至关重要。现有常用的基于时频分析的地震资料去噪方法普遍存在时频谱受交叉项干扰导致去噪结果不理想的不足，特别是在浅海海洋地震资料中噪音影响严重。因此，为了有效克服上述缺陷以改善信号时频分析的结果，本文提出了一种基于自适应核时频分析的滤波方法，提高了地震资料的分辨率，从而可以获得更高精度的海底声学信息。通过理论模型验证了该方法的灵活性和在时频谱上的聚焦能力，并将该方法应用于我国渤海海域地震资料中，取得了较好的去噪效果，结果表明该方法可以同时提高地震资料的信噪比与分辨率，为后续基于四维地震技术的海洋 CO₂ 地质封存监测奠定了坚实基础。

10.2 湛江区域碳封存安全监测发展的若干思考（董阳泽、熊逸文 湛江湾实验室）

近年来，湛江大力发展第二产业，在 3060 双碳目标背景下，实施 CCUS 的需求更加紧迫。可喜的是，在碳源大幅增加的情况下，雷州半岛近海离岸同时具有良好的碳汇条件，发展离岸 CCUS 具有先天优势。在海底碳封存过程中，对注入和封存阶段进行多层次、多方位、多周期的环境地质监测与量化评估是确保封存安全的必要环节，是一项托底要求，必须在封存的全过程中同步实施。基于对湛江产业发展和国内相关技术的分析，提出 CO₂ 封存监测方案的若干思考，望有裨益于 CCUS 的推进。主要包括：（1）碳封存空间上方海洋环境理解。针对特定环境进行特定参数进行阶段性和周期性监测，对涉及地质安全和泄漏隐患的因素予以分析，作为评估和预警的依据；（2）海上平台的应用。结合广东省现代化海洋牧场示范市建设，充分利用大型智能化深远海养殖装备及其配套设施设备的能力，探讨其作为碳封存注入和安全监测的依托平台，分析其优势条件；（3）海洋观测网的拓展应用。海洋观测网因其不同功用而具有不同的组成，探讨将碳封存安全监测纳入海洋观测网的可行性和技术途径；（4）碳封存安全监测传感体系研究。基于光纤 OBC 的应用，同时考虑利用 UUV 载传感系统等，实现动静结合的传感体系。

10.3 多波束声学底质分类关键技术及其应用展望（唐秋华 自然资源部第一海洋研究所）

海底底质类型是一种重要的海洋环境参数，全面、系统的掌握海底底质类型及其分布情况对海洋开发管理以及海底碳封存等都具有重要意义。传统的海底底质取样主要采取表层或重力现场取样的方式进行，随着海洋开发管理活动的大规模开展，迫切需要更为高效的海底底质信息获取手段。多波束声呐技术可以同时获取高精度的水深与海底回波强度数据，研究表明这两种数据均与海底底质信息有较强的相关性，利用其信息并结合少量底质取样数据，能快速、准确识别海底底质类型，是传统海底底质取样与分类的有益补充。

针对多波束声学底质分类中真实强度数据获取难、底质分类精度低等技术难题，攻克了顾及底质分布和海底地形变化的回波强度修正方法等一系列关键技术，构建了一套海底底质声学分类技术体系，为大范围海底底质的高效探测提供了一种低成本、高精度的新途径，在海洋科考和海洋调查中得到广泛应用。针对海底碳封存中大面积高精度底质信息获取的需求，有望将多波束底质分类技术应用到海底碳封存底质信息探测中，为海底碳封存提供技术支撑。

10.4 水下泄漏/渗漏气体的单矢量水听器方位估计方法（徐超 哈尔滨工程大学）

水下泄漏/渗漏气体的被动声学监测技术是海底碳封存监测领域中关键的支撑技术之一。该技术通



常利用单只标量水听器反演气体流量，并利用在海底表面固定安装的标量水听器阵列估计泄漏点位置。为简化水下声学系统的布阵规模，实现水下气体泄漏/渗漏现象的快速监测和实际应用能力，本文引入单矢量水听器，研究单边指向性法、时域平均声强器法和频域平均声强器法对泄漏点进行方位估计的可行性，并进行水池试验验证。利用单矢量水听器分析 1kHz 频段附近的泄漏气体辐射声信号，并通过改变水听器与泄漏点的距离（0.5-7m 范围内）确定上述方法的方位估计效果。试验结果表明，三种方法均可对水下泄漏点进行方位估计，其中，单边指向性法能探测到 7m 距离泄漏点辐射声信号，而频域平均声强器与时域平均声强器的探测范围相对较小。综上所述，水池试验表明单矢量水听器可以实现水下泄漏/渗漏气体的方位估计，达到预期目的。

10.5 水声轨道角动量三维成像技术 (李胜全、张翼 鹏城实验室)

水下目标精细探测在水下工程作业项目尤其是海底碳封存上有着十分紧迫的应用需求。然而，水下声学三维成像技术目前仍面临着成像分辨力不高、硬件系统复杂且成本昂贵、计算量庞大等难题。针对这些问题，本研究介绍一种采用涡旋声波进行三维精细成像的方法。首先描述声学成像的数学物理模型和阵列信号优化处理算法，继而介绍根据理论研制的基于轨道角动量的三维成像系统原理样机及其湖试海试实验，最后对轨道角动量三维成像技术在工程上的运用作进一步的展望。

10.6 发展方向建议

1. 井下或监测点处的声通信。
2. 水下气体渗漏的定量估计。



海报展板

11.1 东海陆架盆地咸水层基于多裂缝 CO₂ 注入及封存的数值模拟（王俊薇 清华大学）

我国海底 CO₂ 封存需求巨大、条件具备，相较于陆地封存，海底 CO₂ 封存的潜力更大，安全性更高，但目前封存效率和能力不高。本文以东海盆地为研究对象，研究沿水平井多裂缝 CO₂ 注入和封存时储层的力学行为。基于地层孔隙度、渗透率、地温梯度等钻井探测数据，利用 TOUGH2 商业软件建立 CO₂ 沿水平井多裂缝注入和封存于咸水层的三维地质力学模型，考虑 CO₂ 运移过程中流体及地层物性参数变化，追踪储层中温度、压力及 CO₂ 运移规律，研究了裂缝形态（条数与间距）与封存效率及封存量之间的关系。数值结果表明：尽管多裂缝能够提高封存效率，但如果裂缝间距过小，提高的幅度非常有限，因此，在通过多裂缝进行 CO₂ 封存时，裂缝间距设计应当适量。本文研究结果将为我国海洋碳封存技术的发展提供参考。

11.2 斜坡构造对离岸场地二氧化碳运移效果与封存的影响（马千里 大连理工大学）

二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）技术可以实现化石能源大规模可持续低碳利用，不同于陆上封存，近海盆地具有分布广、封存容量大、安全与稳定性高等优势。但由于封存场地异常复杂，比如非均质性强、空间展布形态多样，对封存效果具有较大的影响。基于离岸储存场地条件，本文构建 2°、3°、5°、10°、20°、30° 共计 6 个倾角模型研究斜坡构造对二氧化碳运移效果与封存的影响。结果表明，倾角越大，气态 CO₂ 越快运移至斜坡最高处，在 0°-5° 范围内，随着倾角增大，结构封存占比降低，残余封存占比与最大气体饱和度增大，5°-30° 范围随着倾角的增大，残余封存占比逐渐降低。因此 5° 模型能最安全、有效地封存。

11.3 基于智能手机的便携式水环境参数检测方法研究与应用（李杭茜 厦门大学）

智能手机技术的快速发展为化学和生物传感器的发展创造了新的机遇。基于智能手机进行比色定量分析的报道越来越多，然而大多数研究采用经验公式或复杂的算法进行定量。本研究提出一种高稳定性的通用型算法来克服上述限制。建立了仿真模型分析了相机光谱信息到 RGB（红、绿、蓝）颜色信息的转换过程。此外，探讨了该算法用于不同分析物定量的可行性。基于该算法，建立了基于智能手机的便携式水环境参数分析系统 versatile smartphone-based environmental analyzer (vSEA)，并对该系统的可靠性、通用性和分析性能进行了全面优化。vSEA 已成功应用于 5 种重要营养盐（硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮、磷酸盐、硅酸盐）和 pH 的现场测量，其结果与分光光度法无显著性差异，具有实际应用性。vSEA 为自然水体中的营养物和 pH 的现场测量提供了一种简单、便携的方法，这有助于水生态系统的紧急监测以及基于公民科学的研究。

11.4 基于注射泵的集成式水环境分析仪的研发与应用（方腾越 厦门大学）

流动分析技术最早由 Ruzicka 提出，在过去的几十年里，已经发展出了各种类型的流动分析技术。本摘要描述了一种新型的自动化系统，称为 iSEA (integrated Syringe-pump-based Environmental-water Analyzer)。该系统由一个配有多位选择阀的微型注射泵和 LabVIEW 编写的编程软件组成。基于分光光度法检测，该分析仪已应用于营养盐的现场测定。当与液体波导毛细管流通池相结合时，iSEA 也是在纳摩尔水平检测极限下测量痕量分析物的强大工具。对于海洋酸化的研究，iSEA 在 pH 值、碳酸盐离子和总碱度的测量方面表现出色。iSEA 在生物培养基、河流、海湾和大洋等实际样品中的成功应用，证明了其在恶劣条件下进行自主监测的稳健性和可靠性。iSEA 可实现对海水中多个参数的现场高频监测，为研究生物地球化学循环和生态效应等科学问题、海洋资源的合理开发利用提供有力的数据支持，从而助



力发展碳捕获、利用和储存技术，实现碳中和。

11.5 新特提斯洋俯冲与大气二氧化碳浓度变化的动力学联系(沈昊 中国科学院地质与地球物理研究所)

新特提斯洋的脱碳俯冲被认为在新生代气候变化中发挥了重要作用，但仍然缺少定量的研究。本研究使用改进的地震层析成像重建方法构建了恢复了过去的俯冲情景，并计算了印度-欧亚大陆碰撞区域的俯冲板块通量。新生代时期的俯冲板片通量和古气候参数的变化之间存在显著的同步性，表明这些过程之间存在因果关系。新生代早期，新特提洋内俯冲的关闭导致更多富含碳的沉积物沿着欧亚大陆边缘俯冲，为大陆弧火山的岩浆作用提供了更多的碳源，进一步引发了全球变暖。在全球气候达到早始新世峰值后，印度-欧亚大陆碰撞导致的新特提斯俯冲的突然终止造成了距今 50-40 百万年期间大气中二氧化碳浓度的快速下降。距今 40 百万年后，大气中的二氧化碳浓度逐渐降低，这可能是由于青藏高原的生长导致大陆风化作用增强所致。我们的结果有助于更好地理解新特提斯洋演化的动态含义，并可能为未来的碳循环模型提供新的约束条件。

11.6 漂浮式地震仪在 CO₂ 监测中的应用及优势(刘博文 自然资源部第二海洋研究所)

漂浮式海洋地震仪是新型天然地震观测设备，将补充海洋区域的地震观测，完善全球深部结构成像。自然资源部第二海洋研究所在部专项和科技部重点研发计划的资助下，自主研发了一款漂浮式海洋地震仪，并命名为“海豚”。“海豚”携带的宽频带水听器在水深 800-1000 m 处开展数据采集，采样时间间隔为 0.02 s，频带宽度为 0.1 Hz-2 kHz。实现了准实时数据传输，周期式上浮或地震触发式上浮到水面，通过卫星传输回国内实验室。本研究基于 2021 年 2 台“海豚”和 2022 年 5 台“海豚”在南海北部海试期间采集的地震数据及仪器位置信息，对数据进行了格式转换、时间漂移校正、位置校正、水中走时校正、带通滤波、P 波到时拾取等处理，获得了如下初步认识：(1)“海豚”对仪器 100°范围内 5 级及以上天然地震有很好的识别能力，识别出清晰的 6 级以上地震 49 次，震中距为 500-8800 km；5-6 级地震 24 次，震中距为 550-2800 km；4-5 级地震 2 次，震中距 680-830 km，P 波到时与使用格林函数合成的 P 波到时结果一致，验证了“海豚”有较好的数据质量；(2) 获得了中国南海北部相对速度异常结构，结果显示低速异常区域与地壳减薄和沉积物增厚的区域重合。“海豚”在对 CO₂ 封存区的背景噪声实时监测和获取封存区速度结构方面具有优势。

11.7 基于多波束水体点云模型的海底气体羽流提取研究(任昕 厦门大学)

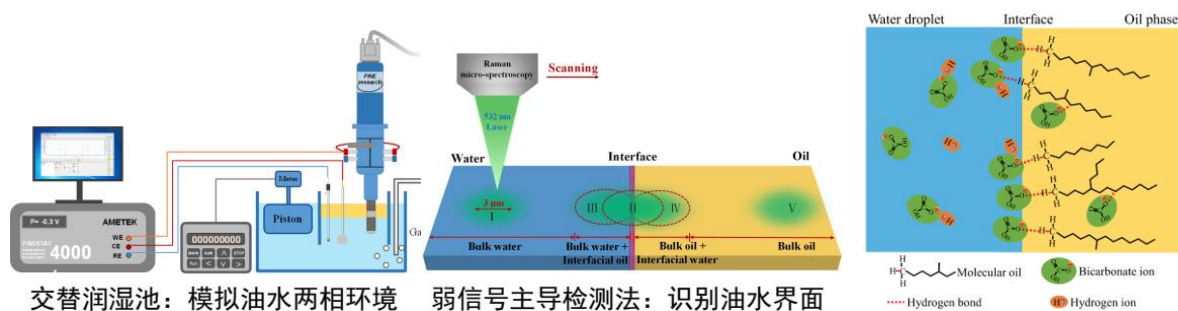
海底气体羽状流是海底冷泉活动的直接表现形式，也是指示天然气水合物赋存的重要标志之一。利用多波束水体数据能够高效、准确的对海底气体羽状流进行提取和识别。目前的研究方法多从图像学角度入手，不能识别气体羽状流的三维空间结构特征，使检测的效率、准确度降低。因此本文提出一种基于多波束水体点云模型的海底气体羽状流识别和提取的方法，该方法将多波束水体数据进行空间解析归位计算，构建含有声学反射强度信息的水体三维点云模型。利用水体噪声分布、气体羽状流反射强度特征，基于对称作差、天津算法等对水体三维点云进行噪声压制，并根据气体羽状流点云与背景水体点云密度差异，利用 Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) 聚类方法提取包含有海底气体羽状流的点云聚类，随后利用 Fast Point Feature Histograms (FPFH) 特征匹配方法对点云聚类进行识别，最终提取水体中气体羽状流点云集。通过墨西哥湾天然气水合物富集海域采集的多波束水体数据进行验证，结果表明，本方法所提取的海底气体渗漏位置与航次实测气体渗漏点位置高度吻合，获得了高分辨率海底气体羽状流点云数据集，准确刻画了海底气体羽状流的三维空间形态，可为天然气水合物探矿、海底气体渗漏区的圈定、海底渗漏气体通量估算提供技术支撑。

11.8 海草床浮游植物固碳能力及其季节变化 (石哲萱 厦门大学)

作为重要的三大滨海生态系统之一，海草床具有强大的固碳能力，而海洋浮游植物作为地球上主要的初级生产者，也通过光合作用发挥着重要的固碳功能。针对海草床的固碳能力已经展开的大量研究，然而对于海草床浮游植物的固碳能力的研究鲜有报道。本研究采用黑白瓶法测定山东荣成、广西钦州和海南黎安三个区域海草床浮游植物在不同季节的初级生产力，并利用同化系数法计算海草区浮游植物的固碳能力。结果表明浮游植物的固碳能力存在明显的季节变化。三个地区不同季节的初级生产力分别为春季：28.75~93.44 mg C/(m²·d) (山东荣成)、104.06~215 mg C/(m²·d) (广西钦州)、64.69~380 mg C/(m²·d) (海南黎安)；夏季：69.38~251.25 mg C/(m²·d) (山东荣成)、1126.48~1450.60 mg C/(m²·d) (广西钦州)、22.81~493.48 mg C/(m²·d) (海南黎安)；秋季：143.22~315.15 mg C/(m²·d) (山东荣成)；196.40~384.26 mg C/(m²·d) (海南黎安)。本研究为研究海草区浮游植物的固碳能力提供了数据支撑，有助于更好的了解海草床的固碳能力，从而为海草床的保护和修复提供支持。

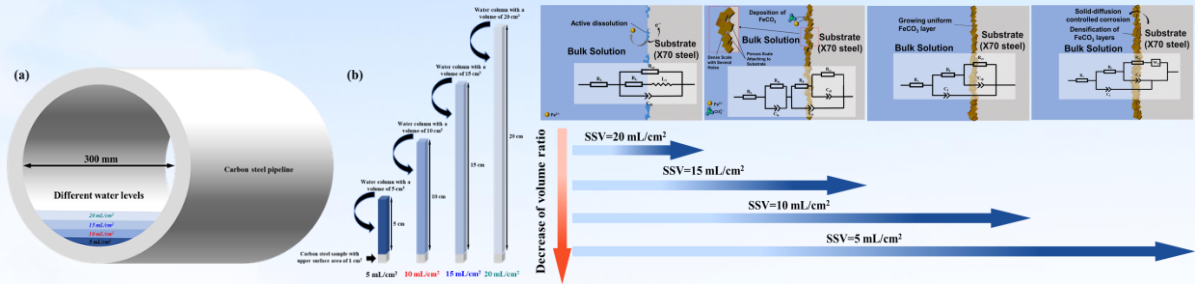
11.9 CO₂ 驱油水间歇润湿环境中管道腐蚀微观机理与缓蚀策略 (王茜茜 厦门大学)

CCUS 作为我国实现“碳达峰、碳中和”目标托底技术受到广泛关注。CO₂ 驱油技术可实现提高石油采收率和碳封存的双重效益。CO₂ 驱采油液再次回流到生产管道导致腐蚀。大量研究表明，CO₂ 溶于生产液的酸化效果和其对电极反应的促进作用是加速材料腐蚀的内因。然而面对流体和流型复杂的油水集输系统，化学惰性的油保护表面，而水润湿表面的行为则是诱发腐蚀的关键。因此，管道的腐蚀源于水润湿行为，而后受控于表面的电化学反应。本文将依托“交替润湿池”模拟油水两相环境，基于“弱信号主导检测法”识别油水界面结构的变化，对比分析 CO₂/O₂/脱氧溶液体系液滴行为，揭示流动条件下 CO₂ 改变覆油钢表面水润湿行为的微观机理，并提出相应的缓蚀策略。



11.10 受限溶液体积中 CO₂ 管道腐蚀抑制机理研究 (洪昊 厦门大学)

碳捕集与封存 (CCS) 目前是一种有效缓解工业中 CO₂ 的过量排放的方法，其中 CO₂ 从密集排放源捕获，通过管道运输，最后注入陆上或近海地质构造。在运输过程中，有限量的水会残留在 CO₂ 流体中以密相状态输送。随着运输距离的增加，部分游离水会凝结在管道表面，管道中水与 CO₂ 反应不可避免的会形成碳酸来加速管道内壁钢的腐蚀。在二氧化碳饱和溶液中，钢的腐蚀速率通常为几个毫米每年，而在缺水的二氧化碳环境下，腐蚀速率通常小于 0.1 毫米每年。在本研究中，我们将在超临界 CO₂ 条件下对不同受限溶液体积下 Fe²⁺ 浓度变化以及管道内壁腐蚀机理展开研究。最终总结出一个全新的、经济的 CO₂ 安全运输和注入的腐蚀管理策略。



11.11 Simulation Study on the Impact of CO₂ Leakage from Storage on the Physical and Chemical Properties of Seawater (于松 中国海洋大学)

(未提供)

11.12 雷州半岛 CO₂ 矿化封存区域地质与水化学研究及模拟 (江静练 中国科学院南海海洋研究所)

雷州半岛具有丰富的玄武岩资源及良好的碳源碳汇条件，是良好的潜在 CO₂ 封存场所，但目前针对雷州半岛玄武岩 CO₂ 矿化封存的研究尚少。分析了雷州半岛的地层地质及岩石化学、水化学条件，该区域 CO₂ 注入目标主要是 20-400 米深度的玄武岩岩层，岩体矿物以斜长石、辉石系列及铁镁橄榄石等为主，富含能形成碳酸盐矿物的二价阳离子。目标区域水样 PH 值为 7.5~8.2，水硬度为 38~83mg/L。CO₂-玄武岩-H₂O 相互作用引起了矿物蚀变及生成，进一步影响了岩体的孔隙度及渗透率，同时水体中的钙镁离子浓度受到次生矿物沉淀的限制。在此基础上建立了雷州半岛 CO₂-玄武岩-H₂O 反应迁移模型，模拟 CO₂ 注入后由于地球化学反应引起的岩层矿物变化以及水化学参数变化。地球化学模拟结果证明在雷州半岛实现玄武岩 CO₂ 矿化封存的可行性，并且该可行性是由玄武岩中丰富的二价金属阳离子及与含水的可渗透岩层支持的。但对注入过程中矿化反应对于水体 PH 值、矿物沉淀对于孔隙空间的置换机制等还有待进一步研究。

11.13 低通量水下气体渗漏被动声学检测的实现 (周道隆 厦门大学)

随着工业的不断发展，越来越多的二氧化碳 (CO₂) 被排放到大气中，减少碳排放已逐步成为全球共识。碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术作为减少 CO₂ 排放的重要途径，逐渐受到沿海国家和地区的重视。海底碳封存作为离岸 CCUS 中重要的一环，需要对其密闭性提供保障。为了对海底碳封存的地质不稳定区域进行提前预警，本文对一种水下气体渗漏被动声学检测算法进行了优化，并将其作嵌入式处理，设计了一套低通量水下气体渗漏监测系统。

为了实现该系统对选用的算法进行了优化。一是降低采样率及单次处理声音信号的长度，保证了单次处理数据所需要的时间小于输入声音信号的时间，二是解决了短时傅里叶变换造成的首尾列数据遗漏问题，三是解决了首列数据中的气泡无法被定位而造成的识别遗漏问题。同时，还引入了基于数学形态学的时频图去噪方法。以优化后的算法为基础，设计了一套水下气体渗漏声学监测系统。该系统能够长期对海底气体渗漏进行监测，并发出渗漏预警。系统以 OMAP-L138 为核心，实现了设备间的 TCP 通信，还通过 SysLink 开发工具包实现了开发板的双核通信功能，实现了整套装置的高效运转。

总结及建议（由李姜辉、王子明、余凤玲及各专题召集人共同整理）

12.1 本届论坛的研讨成果

在各专题主持人引导讨论之后，各专题召集人分别总结了专题未来核心发展方向建议，如表 2 所示。

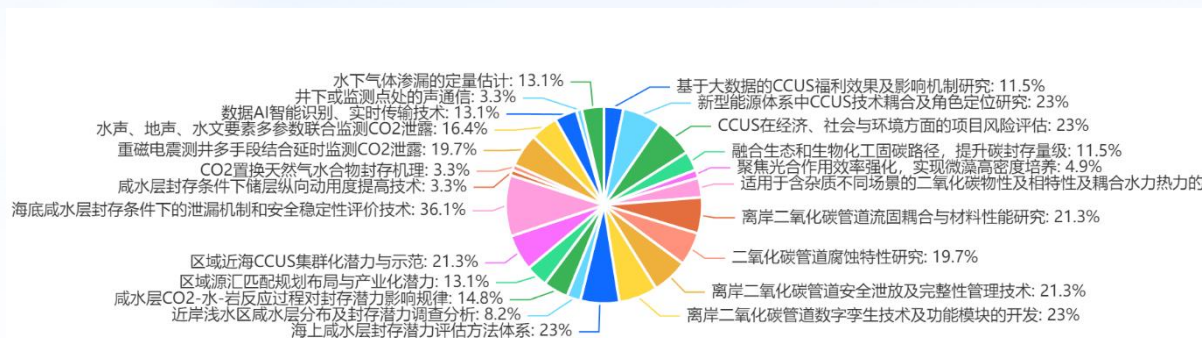
表 2：论坛各专题研讨成果：未来核心发展方向建议

序号	专题	研讨成果：未来核心发展方向建议
1a	一：离岸 CCUS 战略发展规划	基于大数据的 CCUS 福利效果及影响机制研究
1b		新型能源体系中 CCUS 技术耦合及角色定位研究
1c		CCUS 在经济、社会与环境方面的项目风险评估
2a	二：海洋生物/藻类固碳与资源化利用技术	融合生态和生物化工固碳路径，提升碳封存量级
2b		聚焦光合作用效率强化，实现微藻高密度培养
3a	三：海洋 CO ₂ 输送管道及注采井筒安全保障技术	适用于含杂质不同场景的二氧化碳物性及相特性及耦合水力热力的模块化特性研究
3b		离岸二氧化碳管道流固耦合与材料性能研究
3c		二氧化碳管道腐蚀特性研究
3d		离岸二氧化碳管道安全泄放及完整性管理技术
3e		离岸二氧化碳管道数字孪生技术及功能模块的开发
4a	四：近海咸水层 CO ₂ 地质封存与驱油潜力	海上咸水层封存潜力评估方法体系
4b		近岸浅水区咸水层分布及封存潜力调查分析
4c		咸水层 CO ₂ -水-岩反应过程对封存潜力影响规律
4d		区域源汇匹配规划布局与产业化潜力
4e		区域近海 CCUS 集群化潜力与示范
5a	五：海底 CO ₂ 驱油与封存协同理论与技术	海底咸水层封存条件下的泄漏机制和安全稳定性评价技术
5b		咸水层封存条件下储层纵向动用度提高技术
5c		CO ₂ 置换天然气水合物封存机理
6a	六：离岸 CO ₂ 地质封存数值模拟与监测技术	离岸 CO ₂ 地质封存数值模拟软件的国产化开发
6b		考虑实际海洋应用场景开发监测技术和工具
7a	七：海底 CO ₂ 运移监测的地球物理与数字孪生技术	重磁电震测井多手段结合延时监测 CO ₂ 泄漏
7b		水声、地声、水文要素多参数联合监测 CO ₂ 泄漏
7c		数据 AI 智能识别、实时传输技术
8a	八：海底 CO ₂ 封存声学信息获取与处理技术	井下或监测点处的声通信
8b		水下气体渗漏的定量估计

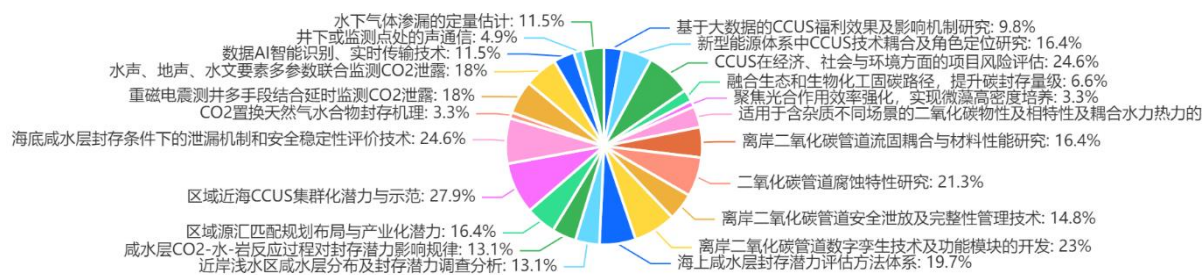
在闭幕式上，本届论坛组委会通过现场及在线问卷形式调查评估了各专题的未来核心发展方向建议的重要性和紧迫性。每位参与投票的专家对这两个多选题每题最多投 4 票，最少投 1 票。投票完成后，论坛组委会对投票结果进行汇总，如下图所示。大部分参会专家都提供了他们对这两个问题评估的实时投票。



投票结果将为如何最好地开展往后论坛专题组织工作提供指导，从而使基础科学或应用技术朝着示范工程落地的方向发展，也为聚焦解决离岸 CCUS 领域当前面临的核心问题提供方向指引，同时量化并降低金融政策、科学研究和工程技术可能偏离正确发展方向的风险。这种通过论坛专家研讨总结并投票的方法可以为评估特定未来核心发展方向的重要性和紧迫性判断提供参考。



第三届离岸 CCUS 论坛关于最重要的离岸 CCUS 发展方向建议的投票结果



第三届离岸 CCUS 论坛关于最紧迫的离岸 CCUS 发展方向建议的投票结果

从调查问卷的结果，我们得出结论：

排名前 5 的**最重要**的离岸 CCUS 未来核心发展方向建议是：

- 海底咸水层封存条件下的泄漏机制和安全稳定性评价技术 (36.1%)
- 海上咸水层封存潜力评估方法体系 (23%)
- 新型能源体系中 CCUS 技术耦合及角色定位研究 (23%)
- CCUS 在经济、社会与环境方面的项目风险评估 (23%)
- 离岸二氧化碳管道数字孪生技术及功能模块的开发 (23%)

排名前 5 的**最紧迫**的离岸 CCUS 未来核心发展方向建议是：

- 区域近海 CCUS 集群化潜力与示范 (27.9%)
- 海底咸水层封存条件下的泄漏机制和安全稳定性评价技术 (24.6%)



- CCUS 在经济、社会与环境方面的项目风险评估 (24.6%)
- 离岸二氧化碳管道数字孪生技术及功能模块的开发 (23%)
- 海上咸水层封存潜力评估方法体系 (19.7%)

12.2 下届论坛组织形式及初步建议议题

基于本届论坛研讨及调研成果，本届论坛对下届论坛的初步建议议题包括：

1. 海底咸水层封存条件下的泄漏机制和安全稳定性评价技术；
2. 海上咸水层封存潜力评估方法体系；
3. 新型能源体系中 CCUS 技术耦合及角色定位研究；
4. CCUS 在经济、社会与环境方面的项目风险评估；
5. 离岸二氧化碳管道数字孪生技术及功能模块的开发；
6. 区域近海 CCUS 集群化潜力与示范。

此外，本届论坛在报告和研讨期间提出了许多技术和非技术问题，其中许多问题表明，任何项目设计都需要解决和/或减少不确定性。与其他全球变暖的解决方案一样，离岸 CCUS 同样有动态风险管理问题。任何潜在的解决方案都需要了解不确定性、成功概率、金融投资、运营成本、监管和公众接受度等问题，以及所有这些因素如何随着时间的推移而演变。

考虑到这些问题，建议下届论坛同时考虑如下议题：

1. **不确定性问题**。离岸 CCUS 项目成功的首要关键因素在于厘清不确定性，如，什么是已知的，什么是未知的，什么是有待发现的。
2. **技术及非技术标准问题**。开发通用的技术标准，帮助项目评估及其在不同情境下对周围环境的影响；建立跨学科参与机制，以促进复杂离岸 CCUS 项目的技术、监管和运营协调。
3. **法律法规问题**。制定离岸 CCUS 的法律和监管框架，以促进和鼓励项目开发；离岸 CCUS 的规则框架非常复杂，如，多种法律法规可能同时适用于某个项目；即使某个项目是合法的，但获得社会运营许可可能很困难；项目在法律、政策和社会可接受层度上可能存在很大的地理差异。建立一个明确的综合性的监管框架可能会减少某些不确定性问题。
4. **融资和债务问题**。探索激励离岸 CCUS 投资的政策选择；财务和债务风险与经济和商业因素有关，目前所有项目的设计在这些方面都存在不确定性。
5. **技术性问题**。从技术分类上包括：成熟的技术、仍在发展的技术、最具挑战性的技术差距以及扩大技术应用规模的潜力。从技术设备上包括：海上平台类型、CO₂ 捕集、运输、注入、监测设备。此外，各类技术的应用效果在很大程度上取决于它们应用的环境。每个离岸 CCUS 项目的设计都必须针对此类问题进行专门评估。
6. **基于具体工程或科研项目研讨**。包括：CO₂ 捕集、运输、海底注入和监测系统技术的工

程设计、测试和集成；海上平台、工业设施、CO₂纯度要求、CO₂输送方式选择；不同储层的可持续 CO₂ 封存；海底长期监测示范项目；钻井和完井技术等。在任何一个地点建造海上 CO₂ 封存设施都可能采用成熟的商业技术，但不同的地理位置、水深、海况和 CO₂ 来源可能需要开发新的技术来支撑。了解 CO₂ 注入岩层的地质差异，以及每个场地地质特征的不确定性水平的差异。

7. **CO₂ 源和 CO₂ 流处理**。CO₂ 的来源对运输过程的化学杂质、温度、压力和水分含量影响较大，如 CO₂ 对管道和钻井设备的腐蚀。工业来源的 CO₂（包括其成分和流速）可能会有很大差异，这取决于 CO₂ 的具体来源，而这又可能因选择的封存地点而异。此外，到达海底注入点的 CO₂ 流的性质差异也很大。
8. **CCU 及经济可行性问题**。围绕 CO₂ 的高值化生物化学转化，重点关注碳捕集、利用与潜在的经济效益等。





近海海洋环境科学国家重点实验室（厦门大学）

State Key Laboratory of Marine Environmental Science
(Xiamen University)



中国太平洋学会



中国科学院南海海洋研究所

SOUTH CHINA SEA INSTITUTE OF OCEANOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



中国科学院武汉岩土力学研究所

Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences



自然资源部第二海洋研究所

SECOND INSTITUTE OF OCEANOGRAPHY, MNR



中国海油
CNOOC

