

OCCUS
2024

第四届离岸碳捕集、利用与封存论坛

The Fourth Offshore Carbon Capture, Utilization and Storage Forum

总结报告

10月12-15日
中国·杭州

论坛简介

宗旨：“离岸碳捕集、利用与封存论坛”（Offshore Carbon Capture, Utilization, and Storage Forum, OCCUS）作为一年一度的学术盛事，专注于碳捕集、利用与封存领域的跨学科融合。其宗旨在于深入探讨 OCCUS 的战略布局与蓝色经济的和谐发展，探索基础科学的新发现与工程技术实践的创新途径，推动产业技术应用的质量提升与成本降低以及规模的扩大，并促进产业融合与科技创新的协同进步。该论坛旨在为国内外科研机构、企业及研究学者构建一个集产业、学术、研究、金融、服务、应用于一体的 OCCUS 高端信息交流平台，共享前沿成果与宝贵经验，共同应对 OCCUS 发展中的挑战与机遇，进而提升我国海洋碳汇潜力及陆海资源、生态、产业、空间的整体协调发展水平。

历史：论坛自 2021 年在厦门启动以来，已经成功举办了四届，并且规模不断扩大。首届论坛（线上形式）就吸引了超过 150 人同时在线参与，累计参与人次突破了 2000；第二届论坛（同样线上）的在线人数激增至 300 余人，总参与人次更是超过了 1 万。第三届论坛首次以线下形式呈现，展示了 80 多个精彩的学术报告，并成功吸引了 180 多位与会者共同参与这一盛会。第四届论坛则首次将活动扩展至厦门以外，在杭州以授权承办的方式举行，收到了 130 余份报告摘要，并有 200 余位与会者齐聚西子湖畔。随着论坛的不断深入发展，学科间的交叉融合在深度和广度上都得到了显著提升，不仅促进了不同学科间的相互融合，还积极倡导科学技术与产业的紧密结合，为中国低碳产业的转型与发展注入了强大的动力。经过学术界、产业界、金融界等多方同仁多年的共同努力，OCCUS 论坛已经发展成为中国沿海地区低碳产业发展的重要推动力量，成为了一张耀眼的名片。

新意：离岸碳捕集、利用与封存论坛（OCCUS）是一个以中文为主要语言，辅以英文的国际性开放平台，每年定期举办一次。该论坛紧随时代潮流，致力于生态文明建设，推动陆地与海洋的一体化规划和协调发展，积极应对沿海及离岸地区的二氧化碳减排挑战。论坛科学规划 OCCUS 产业布局，旨在构建一个陆海统筹、人与自然和谐共生的海洋空间低碳发展新体系。论坛持续关注 OCCUS 产业的金融发展战略布局，沿海工厂和离岸平台的二氧化碳物理化学捕集技术，近海及深远海生物养殖吸收二氧化碳及规模



化利用技术，近岸、海面及海底二氧化碳运输及安全保障技术，海上及海底二氧化碳注入封存钻井技术，海底碳封存井筒、地层及海洋环境风险防控与监测技术，以及 OCCUS 相关标准的制定等前沿议题。通过广泛的交流和深入的研讨，论坛旨在为沿海地区的低碳经济发展催生新的产业、新模式和新动能，有效支持国家实现“双碳”宏伟愿景。

免责声明

OCCUS 论坛的总结报告所呈现的观点、调查结果以及相关出版物，并不代表论坛的主办单位、承办单位或任何参与者的个人立场。报告中所提及的任何观点、调查结果和出版物，均不提供对报告中所涉及信息、技术、仪器、产品等的准确度、完整性或有效性任何形式的明确或隐含保证，不承担任何责任或后果，也不表明使用这些信息不会侵犯任何个人的私有权利，包括知识产权。报告中提到的任何商业产品、技术、服务或商品名称、商标或制造商，并不构成或暗示对这些产品的认可、推荐或偏爱。OCCUS 论坛明确声明，对于因使用本报告信息而可能导致的任何损失或损害，包括但不限于任何商业或投资决策的后果，均不承担责任。

版权

OCCUS 论坛的主办方——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

本次总结报告详细记录了 2024 年 10 月 12 日至 15 日，在浙江杭州百瑞运河大饭店举行的“第四届离岸碳捕集、利用与封存论坛”的报告和讨论内容。论坛由近海海洋环境科学国家重点实验室（厦大

学)与中华人民共和国太平洋学会联合主办,并由自然资源部第二海洋研究所负责承办。同时,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、海洋油气高效开发全国重点实验室、海洋天然气水合物全国重点实验室、浙江大学海洋学院、青岛海洋地质研究所、北京怀柔实验室、北京港震科技股份有限公司、杭州市西湖区科学技术协会、中国海洋学会海底科学分委会、中国海洋工程咨询协会海底勘查与开发分会、浙江省海洋学会以及自然资源部海底科学重点实验室等机构共同协办。主办方对论坛指导委员会、学术委员会、组织委员会及秘书处的成员表示衷心感谢,感谢他们对论坛的大力支持和宝贵贡献。同时,也对所有专题召集人、主持人和报告人所做出的努力表示感谢,并对所有与会者的积极参与和交流表示赞赏。

本报告由厦门大学的徐路、王茜茜和自然资源部第二海洋研究所的虞嘉辉根据论坛报告人的发言内容进行整理,并由厦门大学的李姜辉、王子明、余凤玲进行了修改和编辑。

引用

若涉及引用本报告的数据和内容,请按以下格式进行引用:

中文引用: “近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学),“第四届离岸碳捕集、利用与封存论坛”总结报告,厦门大学,2024年10月12日-15日。”

英文引用: “State Key Laboratory of Marine Environmental Science (Xiamen University), “The Fourth Offshore Carbon Capture, Utilization and Storage Forum” Summary Report, Xiamen University, 12-15 October, 2024.”

第四届 OCCUS 论坛相关信息

主题： 多圈层碳循环与 OCCUS 耦合协同

时间： 2024 年 10 月 12 日-15 日（12 日报到）

地址： 杭州百瑞运河大饭店（杭州市拱墅区金华路 58 号）

主办、承办及协办单位

主办单位： 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

承办单位： 自然资源部第二海洋研究所

协办单位： 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

海洋油气高效开发全国重点实验室、海洋天然气水合物全国重点实验室

浙江大学海洋学院、青岛海洋地质研究所、北京怀柔实验室

北京港震科技股份有限公司、杭州市西湖区科学技术协会

中国海洋学会海底科学分会、中国海洋工程咨询协会海底勘查与开发分会

浙江省海洋学会、自然资源部海底科学重点实验室

合作期刊： 《Fundamental Research》

《Journal of Marine Science and Application》

《中国工程科学》

《地球科学进展》

指导委员会

主任: 李家彪 (中国工程院院士 自然资源部第二海洋研究所)

副主任: 周守为 (中国工程院院士 中国海洋石油集团有限公司)

李 阳 (中国工程院院士 中国石油化工股份有限公司)

戴民汉 (中国科学院院士 厦门大学)

委员: (以姓氏笔画为序)

方银霞 (研究员 自然资源部第二海洋研究所)

王立忠 (教授 浙江大学)

刘 强 (副院长 中海油研究总院新能源研究院)

李小春 (研究员 中国科学院武汉岩土力学研究所)

李玉星 (教授 中国石油大学(华东))

李清平 (教授级高级工程师 中国海油研究总院)

陈建芳 (研究员 自然资源部第二海洋研究所)

周 蒂 (研究员 中国科学院南海海洋研究所)

程 军 (教授 浙江大学)

学术委员会

主任: 李姜辉 (教授 厦门大学)

副主任: 李 琦 (教授 中国科学院武汉岩土力学研究所)

张 涛 (研究员 自然资源部第二海洋研究所)

委员: (以姓氏笔画为序)

马 剑 (教授 厦门大学)

王子明 (副教授 厦门大学)

冯旭文 (研究员 自然资源部第二海洋研究所)

叶黎明 (研究员 自然资源部第二海洋研究所)

余凤玲（副教授 厦门大学）
陈建文（研究员 青岛海洋地质研究所）
李彦尊（副研究员 中海油研究总院新能源研究院）
李智（副教授 厦门大学）
李鹏春（副研究员 中国科学院南海海洋研究所）
沈佳轶（副教授 浙江大学）
周天（教授 哈尔滨工程大学）
金海燕（研究员 自然资源部第二海洋研究所）
赵明辉（研究员 中国科学院南海海洋研究所）
俞红玉（研究员 浙江大学）
高光（副教授 厦门大学）
傅维琦（研究员 浙江大学）

组织委员会

主任：丁巍伟（研究员 自然资源部第二海洋研究所）

副主任：牛雄伟（研究员 自然资源部第二海洋研究所）

梁裕扬（高级工程师 自然资源部第二海洋研究所）

委员：（以姓氏笔画为序）

于志腾 卫小冬 马乐天 王海涛 孔凡圣 刘亚楠
沈中延 张洁 陆哲哲 贾琰 管清胜 谭平川

秘书处

秘书长：牛雄伟（研究员 自然资源部第二海洋研究所）

成员：（以姓氏笔画为序）

王天睿 任显丽 刘博文 张永发 胡美琴
胡逊良 徐路 官文斐 程立群

十二个专题

专题	召集人
专题一：OCCUS 工程技术地球系统科学理论	包锐、Achim Kopf
专题二：海底 CO ₂ 驱油与封存协同理论与技术	刘树阳、蒋兰兰、张凯
专题三：海底碳封存选址、监测与评估	陈建文、邢磊、宋学行、李九娣、李宗阳、谢明英
专题四：海洋碳封存风险监测与核算方法	李琦、李姜辉、张涛、李鹏春、刘强
专题五：OCCUS 岩石物理与流体表征、模拟	周翔、谭永胜、汪文洋、刘月亮、李霞颖、李星
专题六：海洋 CO ₂ 管道输送安全保障技术	张建、李玉星、向勇、王子明
专题七：海底碳封存相关设备研发	丁巍伟、朱心科、庄灿涛、杨挺、王伟巍、王元、牛雄伟
专题八：海洋生物固碳及零碳生物化学品的开发技术	傅维琦、高光、魏东、刘进、范建华、金海燕
专题九：深远海 CCUS 海洋牧场设计与技术研发	连宇顺、石建高、陈世昌
专题十：深海物质能量循环与碳封存	李鹏春、赵中贤、苏丕波、李彦龙
专题十一：极地多圈层碳循环	张涛、李琦、李小虎、俞红玉、沈佳轶
专题十二：OCCUS 国内外标准的研究和制定	冯旭文、马乐天、牛雄伟

目录

前言	13
致辞	14
概况	16
1 主旨报告	17
1.1 页岩油藏 CO ₂ 强化采油机制与适应性研究	17
1.2 石化行业过程减碳与 CCUS 的融合创新发展	18
1.3 全球板块俯冲通量与深部碳循环计算	19
1.4 海上二氧化碳封存与利用技术进展与挑战	20
1.5 北极洋中脊热液系统及其对深部碳循环的作用	21
2 专题一：OCCUS 工程技术地球系统科学理论	22
2.1 基于天然类似物的 CO ₂ 长期地质封存评价方法	22
2.2 利用粉煤灰和海水高效矿化封存碳排放密集产业的 CO ₂	23
2.3 CO ₂ 地质封存过程中的盐析作用实验研究综述	24
2.4 双碳背景下 CCUS 规模化发展挑战与应对	25
2.5 天然气水合物系统及其碳汇作用	26
2.6 Molecular-Scale Insights into Nanoconfined Water-CO ₂ Interactions in Geological CO ₂ Storage and Utilization	27
2.7 利用加速碳酸钙溶解进行国际航运业碳减排的潜力研究	28
2.8 水合物法捕集具高温水蒸气的烟道气中 CO ₂ 时不同催化剂的适应性研究	29
3 专题二：海底 CO ₂ 驱油与封存协同理论与技术	30
3.1 醇与表面活性剂强化 CO ₂ -油混相机理的实验及分子模拟探索	30
3.2 海底二氧化碳封存机理与调控方法研究	31
3.3 黏土基质纳米多孔网络中二氧化碳的扩散与吸附	32
4 专题三：海底碳封存选址、监测与评估	33
4.1 粤西近海咸水层封存关键技术研究	33
4.2 数字岩心技术在海底碳封存微观机理研究中的应用	34
4.3 基于微地震和化学 CO ₂ 海底地质封存泄漏监测网络布点优化	35
4.4 海洋离岸咸水层 CO ₂ 封存羽流运移识别的海洋可控源电磁法响应特征	36
4.5 我国海域二氧化碳地质封存适宜性评价	37
5 专题四：海洋碳封存风险监测与核算方法	38
5.1 南海天然气水合物试采环境监测关键技术及其在海底碳封存领域的应用展望	38
5.2 二氧化碳地质封存监测技术标准起草中的几个问题	39
5.3 二氧化碳咸水层封存长时反应运移与封闭性评价	40
5.4 海洋枯竭气藏二氧化碳封存注入能力评价	41
5.5 离岸封存富 CO ₂ 环境固井水泥石反应层孔隙结构演化规律与微观力学强度变化特征分析	42
5.6 CO ₂ 前置压裂诱发断裂失稳机制及对策	43
5.7 基于界面跟踪理论的井-储层耦合两相流模型与应用	44

5.8	玄武岩 CO ₂ 矿化封存备选场地雷州半岛田洋火山断陷盆地地球物理勘查和潜力评价	45
5.9	CO ₂ 水合物生成微观机制与动态参数响应特征	46
6	专题五: OCCUS 岩石物理与流体表征、模拟	47
6.1	页岩油藏高温超临界 CO ₂ 开发及封存可行性实验研究	47
6.2	离岸 CO ₂ 矿化封存流体物性与孔隙结构特性研究	48
6.3	海上 CO ₂ 封存井筒完整性评价方法与软件开发	49
7	专题六: 海洋 CO ₂ 管道输送安全保障技术	50
7.1	海洋 CO ₂ 管道结构安全及工程对策	50
7.2	海洋 CO ₂ 管道安全运行关键技术研究进展	51
7.3	夹层管道整体屈曲理论模型研究	52
7.4	含杂质 CO ₂ 准临界判据及其在 CCUS 管输技术中的应用	53
7.5	海洋 CO ₂ 管道输送流体的含水量阈值确定准则探讨	54
7.6	CCUS 系统腐蚀在线监测及泄漏预警技术研究	55
7.7	CO ₂ 长距离输送管道腐蚀防护技术及实践	56
7.8	超临界 CO ₂ 输运管道的腐蚀及应力腐蚀研究	57
7.9	超临界二氧化碳环境中管道内壁液滴凝聚及其腐蚀行为	58
7.10	SO ₂ 及其水合物对 X65 钢焊接接头在 CO ₂ 溶液中的选择性吸附及腐蚀机理研究	59
8	专题七: 海底碳封存相关设备研发	60
8.1	海底地震仪与 OCCUS 现场监测设备	60
8.2	新型低频宽带海底地震仪的研发与应用	61
8.3	海底地震仪装备技术	62
8.4	我国海底地震仪的研发进展	63
8.5	北冰洋密集冰区海底地震探测	64
8.6	基于宽频带海底地震仪的海底气体逃逸监测	65
9	专题八: 海洋生物固碳及零碳生物化学品的开发技术	66
9.1	CO ₂ 驱动微藻光合固碳联产高蛋白或高油脂调控技术及碳迁移机理	66
9.2	代谢重塑固碳海洋微藻合成高值产物	67
9.3	Mirco 级浮游植物的沉降特征和机理——实验室和野外研究	68
9.4	浮游植物光合固碳的昼夜节律生物钟分子调控	69
9.5	基于基因组与单细胞拉曼光谱的好氧不产氧光合细菌资源开发研究	70
9.6	三角褐指藻油脂及多不饱和脂肪酸生产对高浓度 CO ₂ 的响应	71
9.7	饵料微藻响应养殖水体污染物的特征及在贝藻体系迁移机制	72
9.8	光驱固碳微藻作为未来食品潜力与挑战	73
10	专题九: 深远海 CCUS 海洋牧场设计与技术研发	74
10.1	海藻碳汇牧场构建技术, 助力实现国家双碳目标	74
10.2	随机波浪与随机边界变形联合作用下网衣的动力特性研究	75
11	专题十: 深海物质能量循环与碳封存	76
11.1	南海白云凹陷生物气生成与天然气水合物成藏的不确定性分析	76
11.2	基于机器学习的盆地尺度 CO ₂ 封存选址评价	77
11.3	边缘海深海沉积差异与有机碳埋藏: 以南海为例	78

11.4	离岸 CO ₂ 捕集与转化利用技术研究	79
11.5	天然气水合物对深海甲烷循环的阀门效应初探	80
11.6	海上二氧化碳地质封存技术路径——从浅海到深海	81
11.7	深海好氧甲烷氧化菌的生理特性及其驱动的甲烷“汇”潜力研究	82
12	专题十一：极地多圈层碳循环	83
12.1	深渊俯冲系统多圈层碳循环的研究现状与挑战	83
12.2	海冰输运与北冰洋盆地区表层水体颗粒有机质组成与来源	84
12.3	晚更新世以来北冰洋有机碳的埋藏与释放	85
12.4	疏浚海洋土稳定与 CO ₂ 固化：助力碳减排与资源循环的新思路	86
13	专题十二：OCCUS 国内外标准的研究和制定	87
13.1	海域二氧化碳地质封存目标区优选调查	87
13.2	二氧化碳地质利用与封存项目监测范围确定技术指南	88
13.3	《海上二氧化碳回注工程生态环境监测与评价指南》制定思路和探讨	89
13.4	搭建平台，让中国海洋技术标准快速走向世界	90
14	学生口头报告	91
14.1	地质碳封存中纳米限域水-CO ₂ 相互作用的分子尺度见解	91
14.2	二氧化硅微孔表面纳米级粗糙度对 CO ₂ 分子行为影响的研究	92
14.3	含杂质二氧化碳咸水层封存过程模拟和泄露风险评估	93
14.4	协调创新网络视角下湛江推进 CCUS 粤西集群建设的机制与路径研究	94
14.5	海底 CO ₂ 地质封存监测过程中可控源电磁正演模型建立	95
14.7	基于机器学习的 CO ₂ 海底封存快速泄漏评估研究	97
14.8	二氧化碳地质封存技术风险定量评价及传递机制——基于社会网络分析的研究	98
14.9	海底碳封存盖层密闭性泄漏风险及评价方法	99
14.10	图像引导的海洋可控源电磁法对海底 CO ₂ 封存储层建模监测分析	100
14.11	时延重力监测二氧化碳羽流运移可行性研究	101
14.12	孔隙几何非均质性对岩石输运性质影响的研究	102
14.13	含 CO ₂ 海水增强渗流作用下玄武岩溶解规律及离子协同沉积效应研究	103
14.14	稠油注超临界 CO ₂ 渗流规律及提采机理实验研究	104
14.15	致密封存体超临界 CO ₂ 微观渗流规律研究	105
14.16	致密砾岩油藏注 CO ₂ 补能提采实验研究	106
14.17	“海豚”移动式海洋地震仪的研制与应用	107
14.18	微藻固碳增汇设备研发与培养条件优化	108
15	展板报告	109
15.1	超深海沉积层中自生碳酸盐的碳同位素特征及其对深部碳循环的意义	109
15.2	激光拉曼光谱技术在海底碳封存流体监测中的应用	110
15.3	南黄海盆地烟台坳陷二氧化碳封存地质条件分析	111
15.4	二氧化碳水合物形成和分解过程中声学响应特征：来自声学和 CT 联合探测研究的启示	112
15.5	福山凹陷咸水层二氧化碳封存数值模拟研究	113
15.6	基于脂肪酸探究西北冰洋北风深海平原冬季颗粒有机碳的组成与转变	114
15.7	单层及多层注入条件下 CO ₂ 海洋地质封存模拟对比分析研究	115

15.8	海洋可持续发展背景下中国战略性关键金属的深海勘探与开采：思考与展望	116
15.9	基于分子动力学模拟的 CO ₂ 在不同封存环境下的溶解度差异研究	117
15.10	CO ₂ 捕集、驱油与封存项目碳减排量核算标准化研究	118
16	专题总结及未来发展建议	119
16.1	专题一：OCCUS 工程技术地球系统科学理论	119
16.2	专题二：海底 CO ₂ 驱油与封存协同理论与技术	119
16.3	专题三：海底碳封存选址、监测与评估	119
16.4	专题四：海洋碳封存风险监测与核算方法	120
16.5	专题五：OCCUS 岩石物理与流体表征、模拟	120
16.6	专题六：海洋 CO ₂ 管道输送安全保障技术	120
16.7	专题七：海底碳封存相关设备研发	121
16.8	专题八：海洋生物固碳及零碳生物化学品的开发技术	121
16.9	专题九：深远海 CCUS 海洋牧场设计与技术研发	122
16.10	专题十：深海物质能量循环与碳封存	122
16.11	专题十一：极地多圈层碳循环	122
16.12	专题十二：OCCUS 国内外标准的研究和制定	123



前言

2024年10月12日至15日，第四届离岸碳捕集、利用与封存（OCCUS）论坛在杭州隆重召开。本次论坛由近海海洋环境科学国家重点实验室（厦门大学）和中国太平洋学会联合主办，由自然资源部第二海洋研究所承办。论坛的核心目的是明确OCCUS的战略定位，促进基础科学研究与工程技术实践之间的相互促进，推动产业融合与科技创新的协同发展，以增强我国海洋增汇能力，并促进陆海资源、生态、产业、空间的互动协调发展，进而推动我国乃至全球蓝色经济的协调发展。

第四届离岸碳捕集、利用与封存论坛涵盖了十二个主要专题（详见P9）。每个专题都安排了5至15个口头报告，同时还有30个学生口头报告和20个展板报告；为了确保与会专家能够充分深入地交流，每个专题报告之间都预留了10至20分钟的讨论时间，以便凝练出专题未来的发展方向。

在各领域专家的积极参与下，本届论坛的报告展现了研究方向的多样性和多学科交叉的特征。报告不仅覆盖了多个前沿领域和发展路线，还包括了陆源-海汇匹配以及多种方案和路线规划。同时，报告还考虑了宏观经济政策建议和微观工程落地措施。

本届论坛进一步全面地向国内外展示了中国在新兴低碳领域——“离岸碳捕集、利用与封存”的产业发展和研究态势，以及在科技进步与工程实践方面取得的成果。论坛为相关领域的专家提供了一个知识分享和深度交流的平台，旨在为我国实现“双碳”历史战略目标探索一条新兴低碳产业的发展路径，并为全球OCCUS的发展贡献中国智慧。



第四届离岸碳捕集、利用与封存论坛参会人员合影

致辞

自然资源部第二海洋研究所研究员白雁向出席本次论坛的各位领导、专家学者、技术精英以及年轻学子致以热烈的欢迎。

中国科学院院士、厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室名誉主任戴民汉教授发表了热情洋溢的致辞。戴民汉院士特别强调了 OCCUS 在应对气候变化中的关键作用，并期望来自不同领域的精英学者能够利用这次学术盛会，共同探讨未来的发展道路。



戴民汉院士致辞

中国工程院院士、本届论坛指导委员会主任李家彪研究员在致辞中强调了中国在实现碳达峰和碳中和目标中所承担的大国责任。他建议，在未来，应加强 CCUS（碳捕集、利用与封存）领域的原创性基础研究，以提升该学科的规范化引文影响力。同时，应大力推动标准化工作，促进 CCUS 的规模化、商业化发展，并推动其标准的国际化，以争取在国际舞台上的话语权。此外，李家彪院士还提出要发展海洋地质碳封存技术，利用海洋地质碳封存的多项优势。



李家彪院士致辞

自然资源部第二海洋研究所所长方银霞研究员在致辞中，详细介绍了该所在海洋地质、海洋物理、海洋遥感、海洋生物化学等领域的创新研究成果，并分享了本次论坛筹备的历程。她表示，本次会议将聚焦于离岸碳捕集、利用与封存这一核心议题，深入探讨地球系统多圈层碳循环的新机制、OCCUS 蓝色经济协调发展的新策略、科学与技术的新方法、产业技术提升与扩展的新措施，旨在为实现“双碳”目标提供坚实的科技支持。



方银霞所长致辞

概况

离岸碳捕集、利用与封存论坛已成功举办四届，吸引了国内外 200 余名科研机构代表、企业代表及研究学者齐聚一堂，共同探讨 OCCUS 的发展路径。论坛致力于为推动我国海洋碳汇潜力以及陆海资源、生态、产业和空间的全面协调发展，贡献智慧与力量。

本次论坛聚焦于十二个核心议题，包括“OCCUS 工程技术与地球系统科学理论”、“海底 CO₂ 驱油与封存的协同理论与技术”、“海底碳封存的选址、监测与评估”、“海洋碳封存风险监测与核算方法”、“OCCUS 岩石物理与流体表征、模拟”、“海洋 CO₂ 管道输送的安全保障技术”、“海底碳封存相关设备的研发”、“海洋生物固碳及零碳生物化学品的开发技术”、“深远海 CCUS 海洋牧场的设计与技术研发”、“深海物质能量循环与碳封存”、“极地多圈层碳循环”以及“OCCUS 国内外标准的研究与制定”。论坛成功吸引了超过 200 位专业人士参与，他们通过报告分享和深入讨论，为各专题领域的发展前景提出了宝贵建议。此外，会场还特别设置了海报展示区，展示了相关领域的创新成果，为海洋科技的未来发展注入了新的活力。

此外，本届论坛特别设立了“优秀学生报告奖”，旨在激励在“离岸碳捕集、利用与封存”领域表现出色的学生们，积极投身于该领域的研究工作，并致力于其未来的发展。

本届获奖的学生有：

一等奖：侯斐 中国地质大学（武汉）

二等奖：王茜茜 厦门大学

莫福涛 浙江大学

三等奖：刘彬 中国科学院南海海洋研究所

牛建杰 北京大学

陈博文 中国科学院武汉岩土力学研究所

海洋二所所长方银霞、中国地质调查局青岛海洋地质研究所所长赵洪伟为获奖学生颁奖。



优秀学生报告获奖人与颁奖嘉宾合影

1 主旨报告

1.1 页岩油藏 CO₂ 强化采油机制与适应性研究

刘合 中国工程院院士

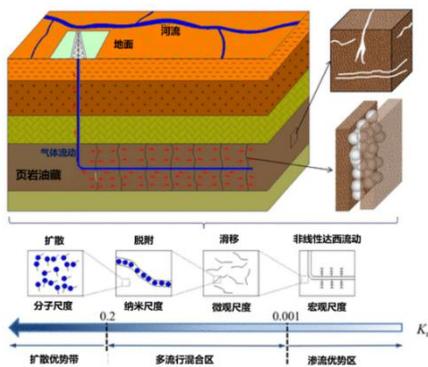
中国石油勘探开发研究院

本报告深入分析了二氧化碳驱替技术在中国页岩油藏中的应用潜力，特别强调了该技术在提升原油采收率和降低碳排放方面的双重效益。二氧化碳通过扩散、吸附和溶解作用，能够有效地改变页岩油藏的物理化学特性，从而提高石油的流动性并增加可采储量。在吉木萨尔和古龙等页岩油田的实验中发现，不同地质条件下二氧化碳驱替的效果存在显著差异。报告还探讨了该技术在实际操作中所面临的挑战，例如二氧化碳压裂过程的复杂性、运输和储存的高昂成本，以及基础设施的进一步开发需求。为了应对这些挑战，报告建议加强技术研发和政策扶持，以促进二氧化碳驱替技术的商业化进程，并助力中国实现碳中和的宏伟目标。

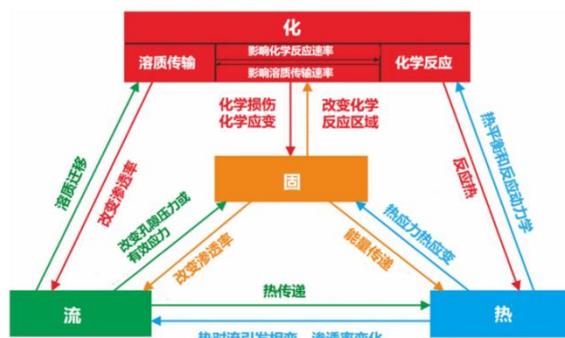


作用机理及适用性

- CO₂ 强化采油机理可以划分为 CO₂ 与页岩基质相互作用及 CO₂ 与原油相互作用两个方面；多重因素影响下，CO₂ 作用效果影响差异显著，需要进行系统性评价



页岩油藏 CO₂ 运移机理



CO₂ 压裂热流固化多场耦合机理

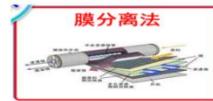
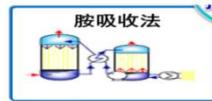
1.2 石化行业过程减碳与 CCUS 的融合创新发展

孙丽丽 中国工程院院士
中国石化工程建设有限公司

本报告专注于探讨中国石化产业中工艺脱碳技术与碳捕集、利用与封存（CCUS）技术的融合应用，揭示了这些技术在减少温室气体排放和提高能源利用效率方面的巨大潜力。报告明确指出，石化产业是全球碳排放的关键源头之一。近年来，中国通过一系列技术创新，在显著降低该行业碳排放方面取得了重大进展。报告特别强调了齐鲁石化和胜利油田实施的百万吨级 CCUS 项目，这些项目成功地将 CCUS 技术应用于工业领域。通过采用吸收法和膜分离技术，二氧化碳被有效捕集，并被用于提高石油采收率以及作为化工原料。此外，报告还探讨了将 CCUS 技术与碳交易市场相结合的潜力，强调了政策扶持和行业合作对于推广 CCUS 技术大规模应用的重要性。展望未来，石化产业预计将不断推进技术创新，以达成更深层次的脱碳目标。

3. CCUS 技术创新

① 适宜不同浓度排放源的CO₂灵活捕集技术



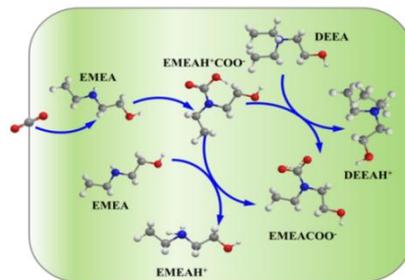
◆ 吸收液创新：复合吸收剂，以MEA法为主，辅助活性胺、缓蚀剂、抗氧化剂等



• CO₂捕集率 > 80% • CO₂纯度 ≥ 99.5% • 再生能耗 2.4GJ/tCO₂

◆ 工艺创新：“碱洗+微旋流”烟气预处理技术

- 减少溶剂损耗及维持系统水平衡
- 有效提高CO₂吸收能力
- 降低捕集能耗



CO₂吸收反应机理

1.3 全球板块俯冲通量与深部碳循环计算

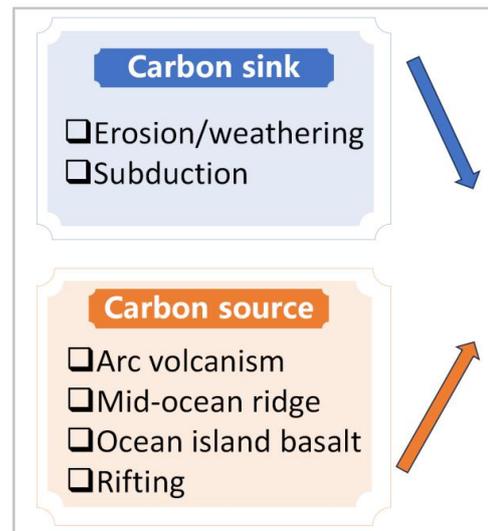
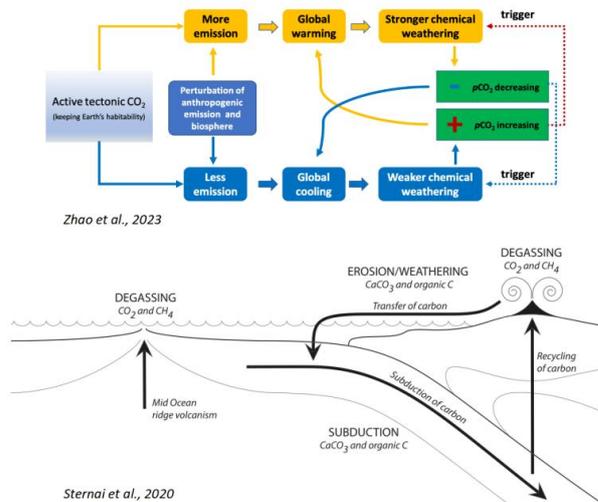
赵亮 研究员

中国科学院地质与地球物理研究所

本报告深入探讨了全球板块俯冲通量与地球深部碳循环之间的相互关系。通过对印度-欧亚板块碰撞事件以及其他全球俯冲带的详尽数据分析，我们计算并比较了不同俯冲带的碳输入与输出量。报告利用地震学和地质学数据，重建了从新生代至今的板块俯冲历史，揭示了俯冲作用在深部碳循环中所扮演的关键角色。特别是，印度-欧亚板块的汇聚与全球大气中二氧化碳（CO₂）浓度的变化之间显示出显著的相关性。此外，报告强调了火山弧和海底扩张脊在全球碳输出过程中的重要性。展望未来，研究将采用三维模型对碳循环过程进行更精确的分析，以期增强我们对全球碳循环，特别是深部碳储库和释放机制影响的理解。

CO₂ variation controls temperature variation

Earth conditioner



1.4 海上二氧化碳封存与利用技术进展与挑战

彭勃 教授

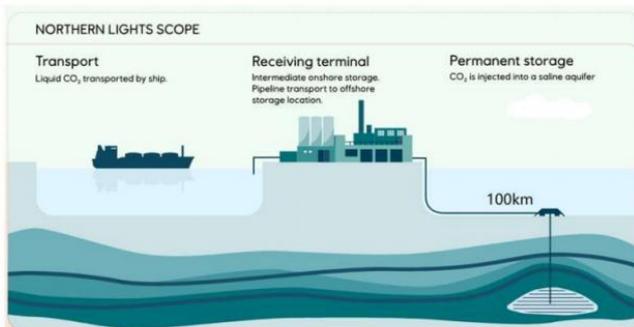
中国石油大学(北京)

本报告详尽阐述了 CCUS（碳捕集、利用与封存）技术在海洋应用领域的最新发展，特别是在全球追求碳中和目标的背景下，其关键作用不容忽视。据统计，2022 年全球范围内运行的 CCUS 项目共捕获了 4300 万吨二氧化碳，而预计未来新项目每年将能够捕获多达 2 亿吨。报告特别关注了几个示范性项目，例如北海的 Sleipner 项目、澳大利亚的 Gorgon 项目，以及中国在渤海油田的 CCUS 应用实例。报告深入探讨了海上 CCUS 所面临的主要技术难题，包括储层稳定性、二氧化碳的迁移机制以及封存地质模型的精确度等。通过分析 Northern Lights 项目的成功经验，报告展望了利用智能化技术、数字孪生技术等手段进一步提升 CCUS 效率的前景。此外，报告还探讨了 CCUS 与二氧化碳驱油技术相结合的潜力，以及其在中国实现碳达峰和碳中和目标中的重要作用。

四、北极光项目的启示



1. 研究概况



2024年9月16日北极光项目
陆上和海上基础设施完工

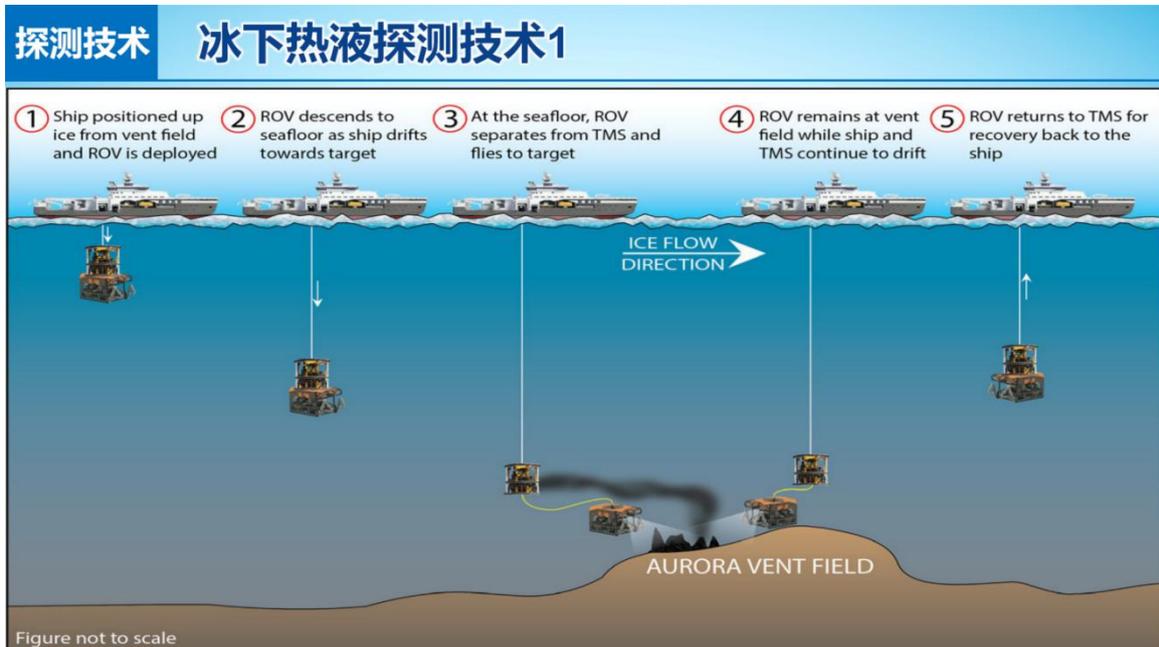
挪威“北极光”项目是欧盟首个开放式的、灵活的基础设施来封存工业排放二氧化碳的CCS项目。该项目已于今年9月完工，计划每年运输和封存150万吨二氧化碳，并将累计封存1亿吨二氧化碳。

1.5 北极洋中脊热液系统及其对深部碳循环的作用

张涛 研究员

自然资源部第二海洋研究所

本报告深入探讨了北极洋中脊的热液系统，并对其在全球碳循环中所扮演的独特角色进行了细致分析。报告明确指出，热液系统不仅是关键的碳源，也是碳汇，尤其是冰盖下活跃的热液羽流为理解碳排放提供了新的视角。借助 AURORA 热液场等新近发现，研究人员展示了在极端条件下如何实现对热液羽流的高精度探测。报告进一步阐述了热液系统通过海底的碳固定和释放机制参与深部碳循环的过程。展望未来，研究将着重于开发新型自主探测系统，以突破北极环境下的技术障碍。报告强调，在全球气候变化的大背景下，深入研究北极热液系统对碳循环的贡献，具有重大的科学价值和环境意义。



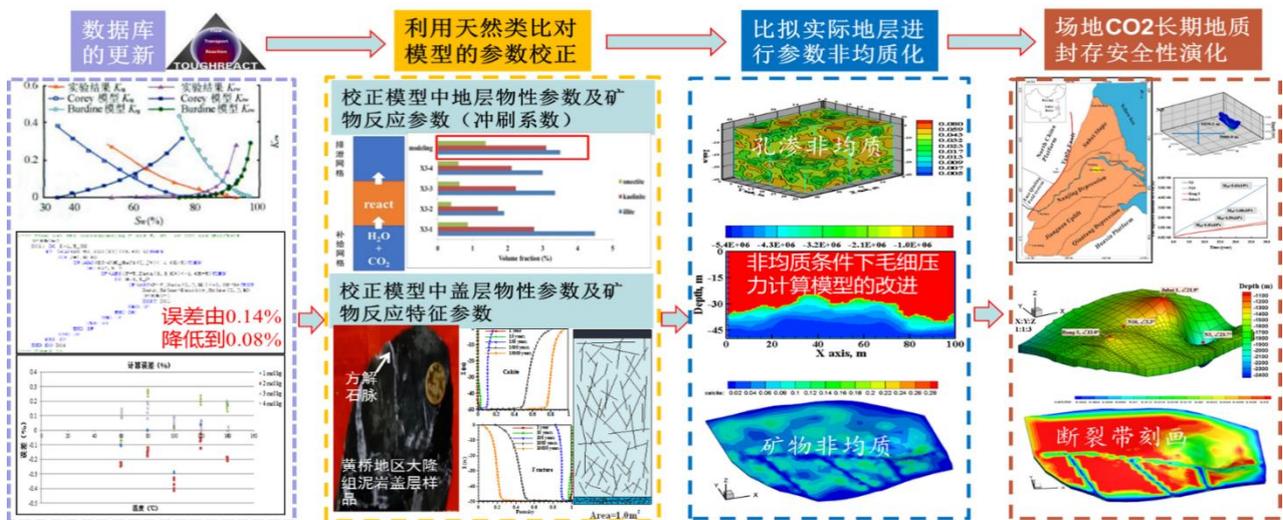
2 专题一：OCCUS 工程技术地球系统科学理论

2.1 基于天然类似物的 CO₂ 长期地质封存评价方法

周冰 副研究员

中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院

在 CO₂ 地质封存的基础研究领域，面对大时空尺度数值模拟可靠性验证的挑战，本研究计划采用 CO₂ 地质封存的天然类似物——天然 CO₂ 气藏。通过历史数据拟合天然 CO₂ 气藏，我们旨在优化模拟方法，以实现大时空尺度 CO₂ 封存数值模拟的可靠评估。研究选取了苏北盆地的黄桥气藏作为天然类似物，并以邻近的句容油气藏作为 CO₂ 长期地质封存的目标区域。通过对黄桥气藏的地质剖析和数值模拟反演，我们构建了一个“冲刷系数”的修正模型，并将其应用于句容油气藏的 CO₂ 地质封存数值模拟中，以模拟和评估其长期封存过程。这种基于天然类似物的修正验证方法，能够有效解决大时空尺度数值模拟的可靠性问题，为 CO₂ 长期地质封存研究提供了坚实的基础。



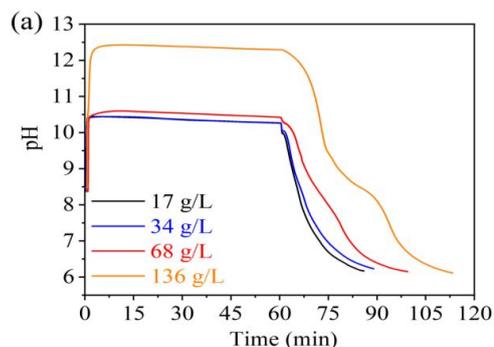
2.2 利用粉煤灰和海水高效矿化封存碳排放密集产业的 CO₂

潘依雯 教授

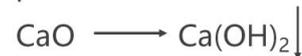
浙江大学

煤炭燃烧所排放的 CO₂ 占全国碳排放总量的近 70%，大量煤炭燃烧来自燃煤电厂，其余则主要来自能源密集型化工、钢铁、水泥等传统产业。这些碳排放密集产业有部分分布于沿海地区，因此我们提出利用海水介质实现粉煤灰矿化封存 CO₂ 是一种潜在的源头减排手段。本研究在常温常压下利用海水与粉煤灰矿化封存 CO₂，得到了高矿化效率，实时吸收 CO₂ 的能力超过 50%。机理探究显示，与高浓度 NaCl 的盐水类似，海水的高盐度有利于从粉煤灰中浸出 CaO，且还具备富含钙镁离子、成本低廉、资源丰富、取用方便的优点，可替代盐水与粉煤灰进行 CO₂ 封存。同时，实现高矿化效率的关键在于控制低 pH 范围(8.2-10.4)。在该 pH 范围内，CaO 的浸出速率快于 Ca(OH)₂，更快的 CaO 浸出速率增加了 Ca 浸出的量，因此提高了矿化效率。在该 pH 范围内，Mg(OH)₂ 的沉淀和溶解也影响了 CaCO₃ 的生成速率和晶型。矿化后溶液中重金属离子浓度远低于国家标准要求，可直接排放，具有环境友好性。矿化后溶液较低的 pH 有效提高了碱源的溶解度，则碱源无须进行精细化粉碎就可以直接进行较快速率溶解，并通过提高溶液碱度以降低待排放溶液的 pCO₂，实现低成本、高效率的加碱增汇效果。因此在常温常压下，利用粉煤灰和海水进行高效、环保、低成本的矿化封存 CO₂ 的方法，可有效结合海水加碱增汇技术，具有推广应用的巨大潜力。

02 反应机制 Reaction mechanism



pH > 12



Ca(OH)₂ 溶解速率低于 CaO
(接近 40%)

高矿化效率的关键：

合适的 pH 范围 (~10.0, ~12.4)



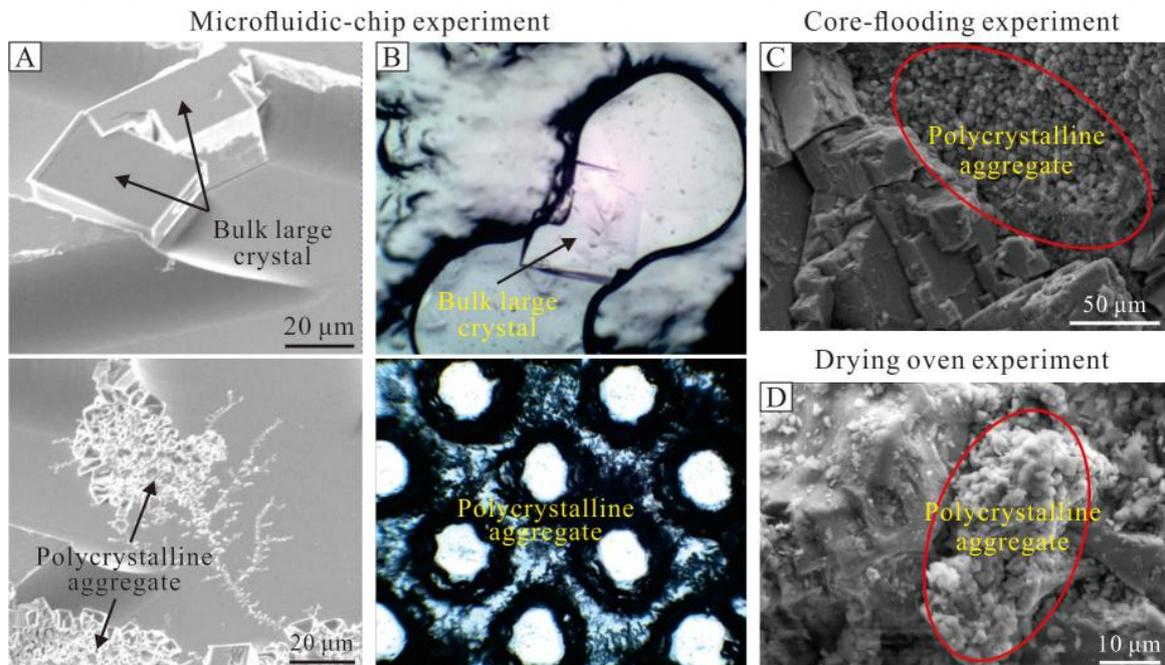
Giles et al., 1993

2.3 CO₂地质封存过程中的盐析作用实验研究综述

孙小龙 讲师

中国石油大学（华东）

CO₂地质封存过程中地层干化伴随的盐析作用是导致储层可入性损害的重要次生变化，本研究系统总结了盐析作用的实验研究进展。盐析研究主要依托于四类实验系统，包括岩心驱替实验、微流控芯片实验、静态水岩反应实验以及表面干燥实验。CO₂注入过程中的盐析作用本质为两相驱替、盐水蒸发、盐水毛细回流、盐溶质扩散以及盐成核生长的耦合作用。盐析宏观分布规律包括均质分布、非均质分布以及半均质分布三种模式，分别为蒸发主控、毛细回流主控以及扩散主控；盐结晶体主要包括单晶体、微晶集合体两类。本研究重点对盐析作用的影响因素进行了系统分析，地层水盐度、CO₂注入速率和初始储层特征是决定盐沉淀量和分布及其对储层可注入性损害程度的主控因素，通常认为低盐度、高注入速率以及高储层孔渗有利于减缓盐析作用及其对储层可注入性的负面影响。相对均质的孔隙和储层结构以及疏水的润湿性特征有利于降低局部强盐析发育的可能，有待通过专门设计的实验样品调查孔隙和储层结构以及润湿性对盐析作用的耦合影响机制。单价盐为主的地层水溶液以及超临界态的驱替流体具有相对较弱的盐析作用，但是聚焦盐水和驱替流体成分组成和相态的研究相对较少。此外，尽管前人已开展大量的CO₂地质封存背景下的盐析机理、分布规律和影响因素实验研究，但是常用的岩心驱替和微流控芯片实验所使用的样品尺寸远小于实际储层大小，可能导致对盐析过程中异位盐水补给的低估，从而导致对盐析含量及其过程的错误认识，有待通过实验样品设计和实验系统改进减少实验误差。



2.4 双碳背景下 CCUS 规模化发展挑战与应对

余学海/杨阳 教授级高级工程师

国家能源集团新能源技术研究院有限公司

CCUS 是实现碳中和目标技术组合的重要组成部分，我国已投运和规划建设中的 CCUS 示范项目已接近百个，其中已投运项目超过半数，具备 CO₂ 捕集能力约 400 万吨/年，注入能力约 200 万吨/年，捕集源涵盖电力、油气、化工、水泥、钢铁等多个行业。目前我国 CCUS 产业已逐步从中小规模迈入百万吨级大规模捕集示范和应用阶段，正加速向全流程、一体化、规模化和区域产业集群式方向发展，尤其是在珠三角、长三角区域启动了千万吨级 CCUS 项目。国家能源集团积极响应国家战略，加快企业转型升级，围绕低能耗捕集、高效利用、安全封存，开展了一系列 CCUS 技术研发与工程示范，关注新型碳捕集吸收剂体系研发，形成了从万吨级、十万吨级至百万吨级等多种规模量级的碳捕集工艺包，适用于 5%-20% 中低浓度和 80% 以上中高浓度等多浓度碳源场景，可服务于火力发电、煤化工、水泥厂、钢铁厂等行业领域。我国 CCUS 技术进展显著，但各环节技术发展不均衡，与规模化商业应用仍存在不同程度的差距，大规模碳捕集仍面临能耗大、成本高、技术装备放大难、耦合性强、灵活性差和长周期安全稳定运行难等关键问题，推动 CCUS 技术落地和产业化发展，应从政府、资本、科研、企业四方面入手。

泰州50万吨/年火电CO₂捕集与利用示范工程

- 2022年3月，第一根管桩打桩，2023年6月投产，**亚洲最大**煤电碳捕集示范工程，国家发改委“关键核心技术攻关项目”，江苏省“碳达峰碳中和重大示范项目”，集团公司“2021年十大科技攻关项目”
- 实现**100%消纳利用**，经**第三方机构**测试，CO₂捕集率**90.2%**，CO₂纯度**99.94%**，再生热耗**2.35GJ/tCO₂**，捕集电耗**51kWh/tCO₂**，突破了多项关键技术，电机工程学会鉴定为**整体国际领先水平**



项目名称	项目所在地	捕集规模	综合成本	能耗
边界大坝	加拿大	100万吨/年	105\$/t CO ₂	3.8GJ/t CO ₂
佩特拉诺瓦 (Petra Nova)	美国	140万吨/年	65\$/t CO ₂	2.6GJ/t CO ₂
泰州电厂	江苏泰州	50万吨/年	208元 (约30\$) /t CO ₂	2.35GJ/CO ₂

单位建设成本和运行成本均全球最低，已连续稳定运行400余天

2.5 天然气水合物系统及其碳汇作用

卢海龙 教授

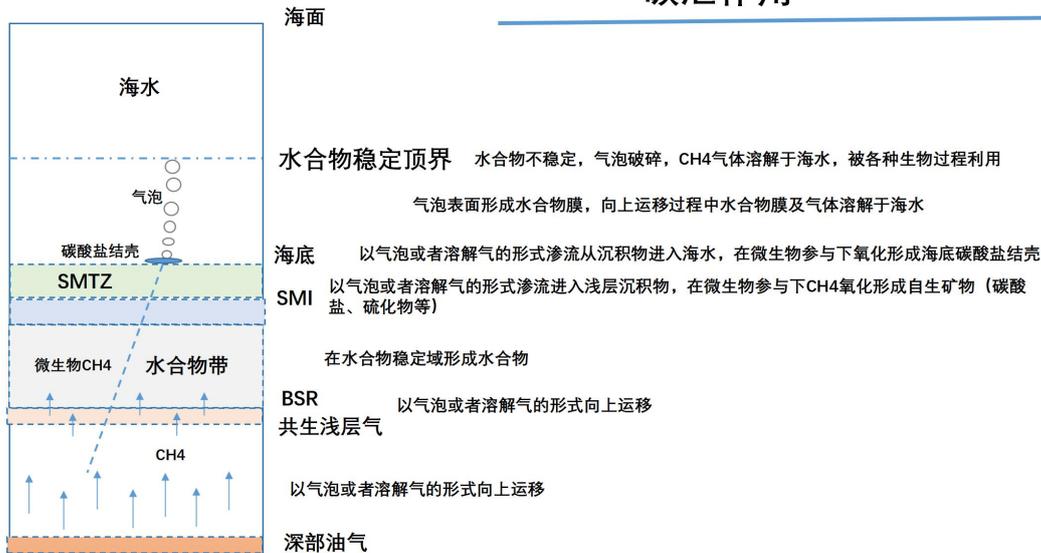
北京大学

天然气水合物广泛分布于大陆斜坡沉积物和永久冻土中，且以海域天然气水合物为主，据估算其碳当量超过已经发现的石油天然气。天然气水合物系统包括气源、水合物储层及其上覆地层和海水。天然气水合物的气源除了原位微生物成因外，还有大量从深部油气藏运移来的热成因气，及水合物储层中被微生物改造的从深部迁移而来的重烃生成的甲烷等。鉴于天然气水合物的巨大储量，水合物藏是最大的碳汇。顺着气烟囱等从地层中运移进入海水中的甲烷等的一部分，在近海底沉积物中在微生物参与下被硫酸根氧化，并进一步形成自生碳酸盐矿物将碳固化；还有一部分在海水中被微生物利用；很少有机会能进入大气。



天然气水合物系统

碳汇作用



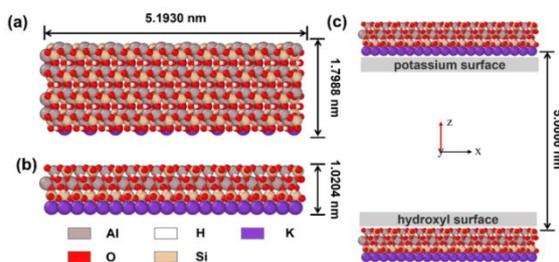
2.6 Molecular-Scale Insights into Nanoconfined Water-CO₂ Interactions in Geological CO₂ Storage and Utilization

章凯强/牛建杰 教授
北京大学

Within shale nanopores, nanoconfined water could aggregate in the form of “water film” and “water bridge”, which has significant impacts on hydrocarbon recovery and CO₂ storage, and is controlled by the nanopores substrate factors, including nanopore types, nanopore sizes, water molecule concentrations. However, a large amount of CO₂ fluid will be injected during the geological CO₂ storage, but its impact on the nanoconfined water aggregation morphology has not been deeply revealed. Here, typical water film (10 vol%) and water bridge (30 vol%) scenarios in nanopores are determined. The water/n-octane/CO₂ systems are constructed in water film and water bridge scenarios respectively, and the CO₂ molecules are gradually increased (meaning that n-octane is gradually decreased) to investigate nanoconfined water-CO₂ interactions as well as the hydrocarbon recovery and geological CO₂ storage in nanopores. Our results confirm the competitive adsorptions of nanoconfined water and CO₂ reduce the adsorbed water amount and derive the new water bridge with CO₂ additions, either in water film (75.50 mol.% CO₂) or water bridge (5.85 mol.% CO₂) scenarios. Such a phenomenon indicates the substrate surface shifts from water-wet to partially CO₂-wet, with lower fluid molecule diffusions and illite-water-CO₂ sandwich-structured adsorption layer. The above changes will affect hydrocarbon recovery and CO₂ storage from different perspectives. Overall, our work investigates the mechanism of CO₂ effects on distributions and aggregations of nanoconfined water molecules in nanopores, which also provides molecular-scale insights into the nanoconfined water-CO₂ interactions in the processes of geological CO₂ storage and utilization.

研究方法

● 纳米孔隙模型



矿物类型: 伊利石 ($K[Si_7Al](Al_4)O_{20}(OH)_4$)

尺寸: 5.1930 nm × 1.7988 nm × 5 nm

力场: ClayFF

Cygan et al. *The Journal of Physical Chemistry* (2003)

Sample atom ^{e2}	x ^{e2}	y ^{e2}	z ^{e2}
K ^{e2}	0.0000 ^{e2}	0.5000 ^{e2}	0.5000 ^{e2}
Al ^{e2}	0.5000 ^{e2}	0.1667 ^{e2}	0.0000 ^{e2}
Si ^{e2}	0.4191 ^{e2}	0.3280 ^{e2}	0.2688 ^{e2}
O1 ^{e2}	0.3487 ^{e2}	0.3100 ^{e2}	0.1063 ^{e2}
O2 ^{e2}	0.4984 ^{e2}	0.5000 ^{e2}	0.3131 ^{e2}
O3 ^{e2}	0.6715 ^{e2}	0.2246 ^{e2}	0.3350 ^{e2}
OH ^{e2}	0.4191 ^{e2}	0.0000 ^{e2}	0.1006 ^{e2}

晶胞参数:

a = 5.193 Å, b = 8.994 Å, C = 10.204 Å,

α = 90°, β = 101.77° γ = 90°

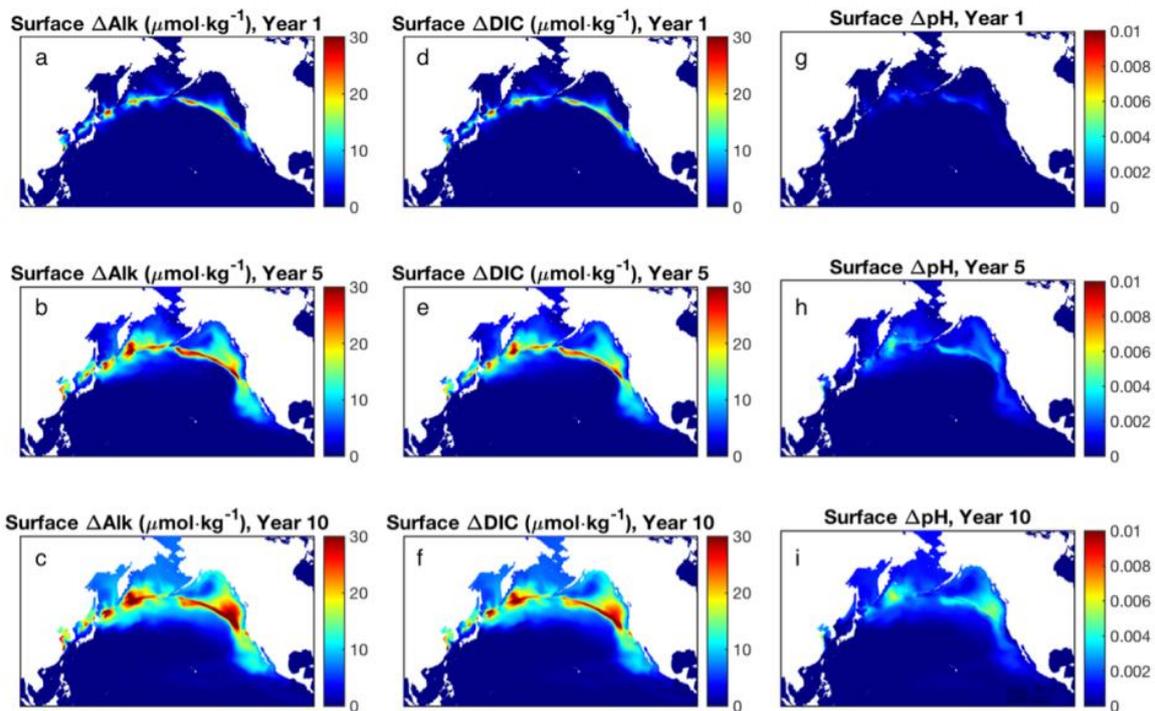


2.7 利用加速碳酸钙溶解进行国际航运业碳减排的潜力研究

东思嘉 助理教授

南京大学

海洋通过海底碳酸钙溶解中和不断增多的大气 CO_2 ，这一地球化学反应是海洋调控大气 CO_2 浓度的主导性负反馈机制。通过加速的碳酸钙溶解 (AWL)，这一离岸碳封存方法可以将 CO_2 以 HCO_3^- 的形式在海洋中储存上万年。加速灰岩风化可以针对点源排放进行碳捕捉和封存，此前该方法在沿海发电厂中的应用受所需海水流量及相应能耗过大的限制而无法大量投入实际应用。本研究基于实验和模拟结果，提出了针对海洋航运业的碳减排和封存方案，旨在解决海洋航运业占据的 3% 全球碳排放，并使货轮达到国际航运组织制定的 IM02050 减排标准，通过模拟对比不同反应器设计和物料参数对于反应效率和能耗需求的影响，提出了实现 50% 减排要求的最优方案。实验及模拟结果显示，持续运行该离岸碳封存方案 10 年之后，海表碱度与溶解无机碳将上升 $<1.4\%$ ，海气 CO_2 通量变化 6.3，满足国际航运组织对于酸性气体吸收设备的所有排放要求。

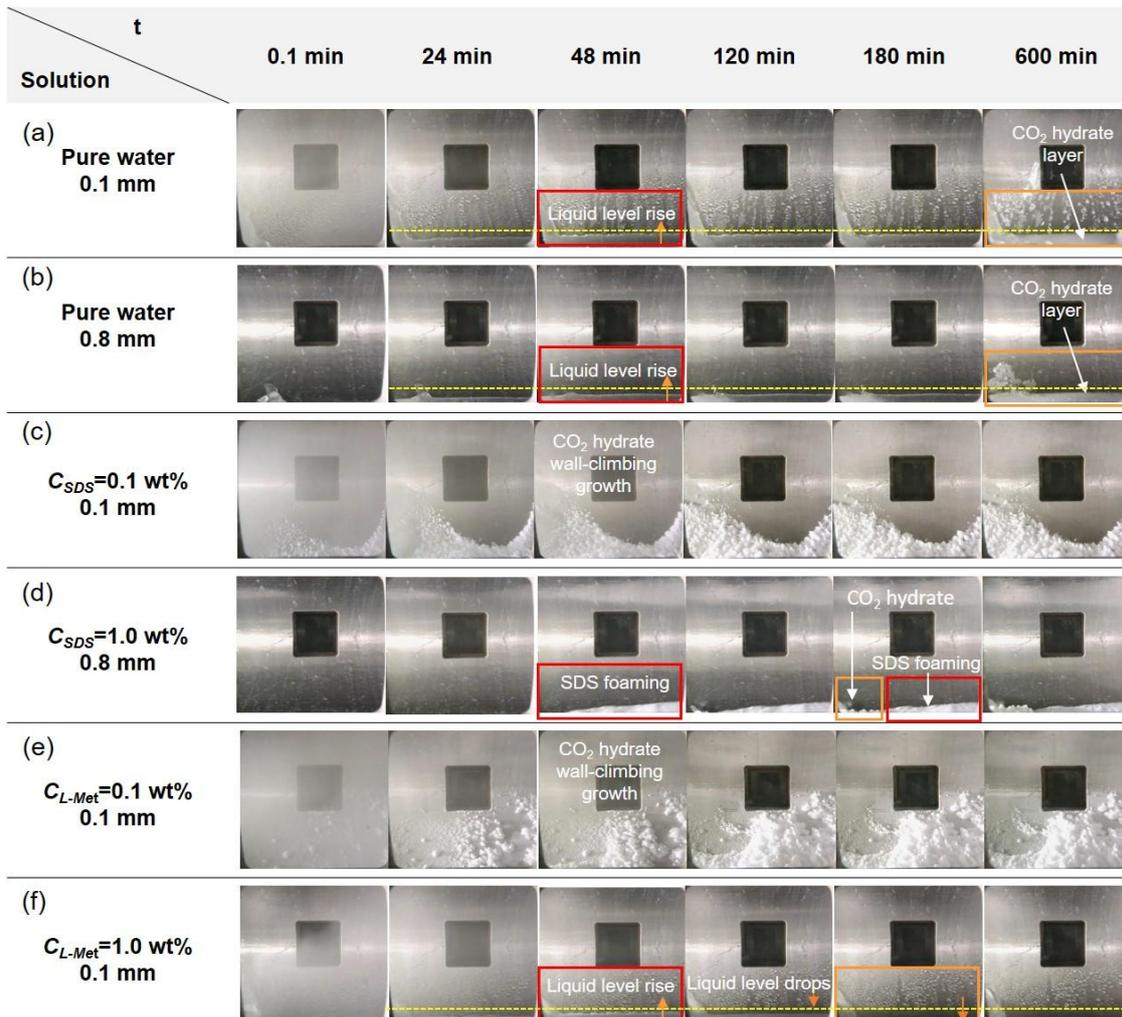


2.8 水合物法捕集具高温水汽的烟道气中 CO₂ 时不同催化剂的适应性研究

张鹏 研究员

中国科学院西北生态环境资源研究院

火电厂、化工厂等 CO₂ 点源释放出的烟道气中不仅含有 CO₂/N₂ 混合气体而且含有高于 100° C 的水汽。水合物法处理烟道废气过程中,除了应用常规反应促进剂 SDS 外,最近新出现了一种氨基酸促进剂 L-Met。因此针对两种促进剂在高温水汽环境条件下的具体适应性,本研究通过采用向反应釜内间歇式注入 110° C 的 640ml 或 160ml 纯水及催化剂溶液的方法,增大气/液接触面积、提升水合物形成反应效率,进而对不同促进剂的反应机制进行全面对比、分析。实验结果显示:浓度为 0.1 wt.% 的 SDS、L-Met 表现出的形成反应促进能力最强,但 SDS 倾向适用于 0.1mm 孔径的喷头, L-Met 适合 0.8mm 的; L-Met 的反应促进作用范围较 SDS 的小,因而 L-Met 易于促进水合物快速成核,而 SDS 的作用范围较大,易于促进水合物的大批量生长在使用 L-Met 的反应体系中,最终形成的水合物外观呈分离的球状,而使用 SDS 生成的水合物最终呈粗粒形大块状;当考虑到有高温水汽存在的环境背景时,两种催化剂的联合使用将会起到最佳的反应促进效果。本研究为未来水合物技术在处理烟道废气中 CO₂ 的应用方面提供理论基础与实验数据方面参考。



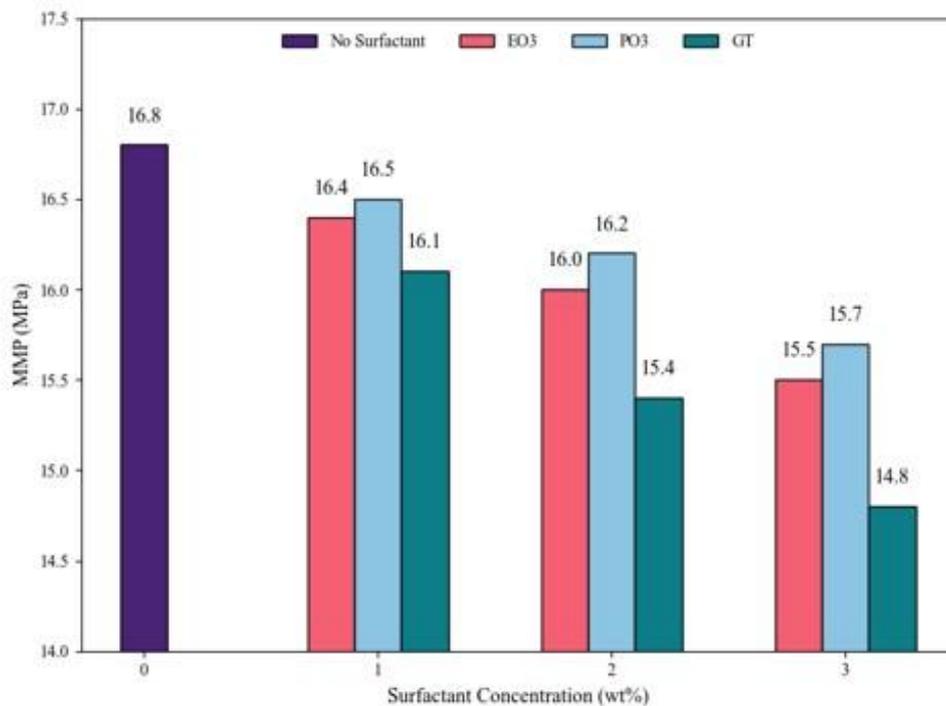
3 专题二：海底 CO₂ 驱油与封存协同理论与技术

3.1 醇与表面活性剂强化 CO₂-油混相机理的实验及分子模拟探索

刘树阳 副教授

中国石油大学（华东）

CO₂驱强化采油（CO₂-EOR）是重要的 CCUS 技术，在提高石油采收率的同时可以进行碳封存助力实现碳中和目标。相比非混相驱，CO₂混相驱具有更高的采收率和更大的 CO₂储存潜力，但是我国很多油藏的最小混相压力（MMP）较高，限制了其广泛应用。针对该问题，本研究结合实验和分子动力学模拟，研究表面活性剂与醇类强化 CO₂-油体系混相机理。通过高温高压 PVT 实验分析了乙醇降低 CO₂-油体系 MMP 的影响规律，利用分子动力学模拟阐明乙醇在降低 MMP 中的微观机理和优势。通过实验研究明确了选用的表面活性剂（EO3、PO3 和 GT）均能有效降低 MMP，进一步揭示了乙醇复配表面活性剂对 CO₂-油体系的降混效果及机理，结果表明 GT 与 5 wt%乙醇复配的降混效果最佳，MMP 降低幅度达 27.9%。本研究发现为我国油藏实现 CO₂混相驱提供了新见解，并为选择合适的醇类与表活剂强化 CO₂-EOR 效果提供了理论指导。

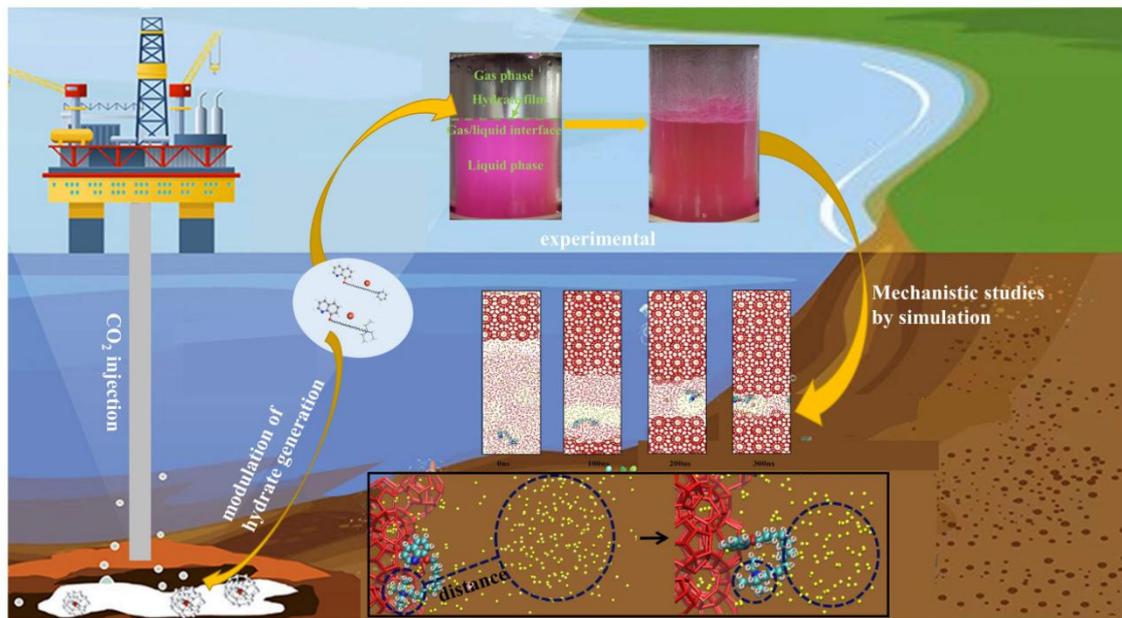


3.2 海底二氧化碳封存机理与调控方法研究

李星泊 讲师

天津商业大学

二氧化碳水合物 (CO_2 hydrate) 是一种前景广阔的二氧化碳捕集与封存技术, 与水分子结合后可实现高效气体封存。二氧化碳水合物笼状结构的成核和生长涉及复杂的多相和多组分过程。事实证明, 引入添加剂是调节多相界面上二氧化碳水合物成核和生长的有效方法。然而, 通过界面调节选择合适的添加剂仍存在不确定性。本研究通过实验研究了具有不同基团的添加剂对 CO_2 水合物生长的影响。通过整体生长动力学研究以及液滴气液界面研究两种形式对不同工况下 CO_2 水合物的生长情况进行了分析讨论。并且利用分子动力学模拟方法将它们性能与传统的添加剂进行了比较。结果表明, 添加剂的引入改变了二氧化碳分子的聚集, 从而影响了二氧化碳水合物的界面生长。在中高温条件下, 与水分子相互作用较小的柔性亲水基团可促进二氧化碳水合物的形成。此外, 在固液界面上, 添加剂分子可以与 CO_2 分子交换位置并从小笼中逃逸, 使得二氧化碳水合物继续生长。而具有刚性较强的添加剂分子基团更易与水形成氢键, 会阻碍 CO_2 水合物的生成。这项研究还表明, 亲水性基团的增强阻碍了二氧化碳水合物笼的形成, 而疏水基团的简单构象则促进了水合物笼的形成。这些发现为今后使用基于水合物的方法封存 CO_2 提供了重要指导。



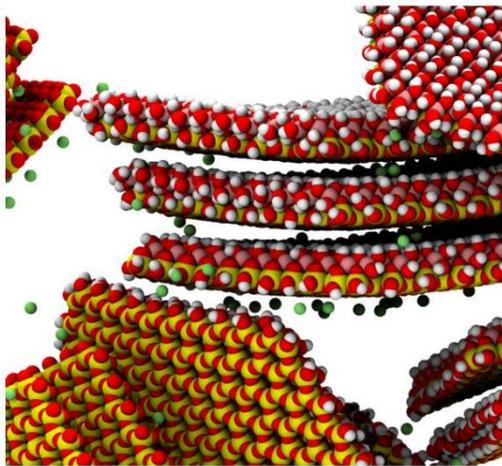
3.3 黏土基质纳米多孔网络中二氧化碳的扩散与吸附

庞姜涛 讲师

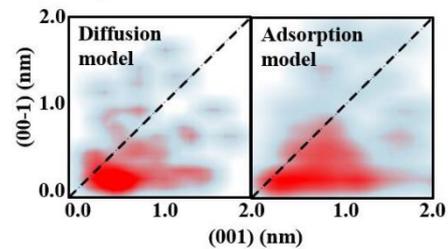
中国地质大学（武汉）

碳捕集与封存（CCS）是一种极具前景的全球减碳战略。在 CCS 实施的背景下，理解二氧化碳（CO₂）在纳米尺度下的复杂分子扩散和吸附行为尤为关键。然而，传统的分子模型通常仅使用板状的狭缝孔模型，而忽略了相互连接的纳米孔的复杂性。在本研究中，我们使用了具有大量纳米孔（主要孔径 $r < 2$ nm）的高岭石层状结构堆叠模型，通过分子模拟量化了 CO₂ 分子在纳米多孔网络中的空间中吸附偏好、扩散性和滞留时间，并展示了其中的分布关联：CO₂ 分子的运动主要发生在中心区域和硅氧表面邻近区域，从较大的纳米孔向较小的纳米孔扩散；CO₂ 更倾向于占据较小的纳米孔。随着孔径的增大，扩散系数增加，而滞留时间减少。与典型的狭缝模型相比，这种现象与纳米多孔网络中孔的形状和相互连接性有关。本研究在纳微视角弥补了传统狭缝模型的局限性，有助于我们理解地下黏土沉积物中 CO₂ 的复杂分子行为，并为整个 CCS 项目期间在分子层面的定量评估技术开发提供了新的思路。

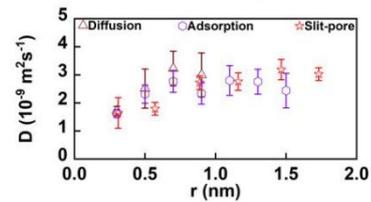
(A) Kaolinite matrix with interconnected nanopores



(B) CO₂ distance to kaolinite surfaces



(C) CO₂ diffusion in clay matrix



4 专题三：海底碳封存选址、监测与评估

4.1 粤西近海咸水层封存关键技术研究

吕言新 副研究员

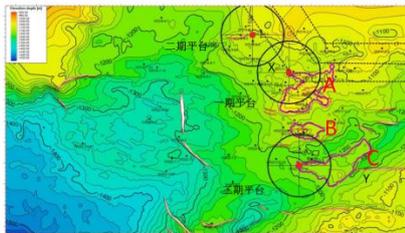
南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)

本报告围绕粤西咸水层二氧化碳封存关键技术开展研究，重点分析了该区域的封存潜力及其目标优选，提出了有效的评价方法。通过对咸水层特征的深入研究，评估了其作为二氧化碳封存的适宜性。其次，探讨了海域盆地常见的三种咸水层封存形式：构造封存、长距离辅助运移+构造封存、平缓层封存，揭示了二氧化碳在咸水层中的迁移行为及三种封存形式的差异性，为实际封存工程提供了理论支持。最后，针对二氧化碳封存断层构造区微震活动规律新认识，研究了微震活动规律，提出了新的认识，为未来粤西 CCS 项目的设计、实施和监测提供了重要的参考框架，有助于推动这一技术的广泛应用。本研究为粤西地区的二氧化碳封存提供了技术支撑，具有重要的理论价值和实际应用前景。



近海沉积盆地碳封目标优选研究

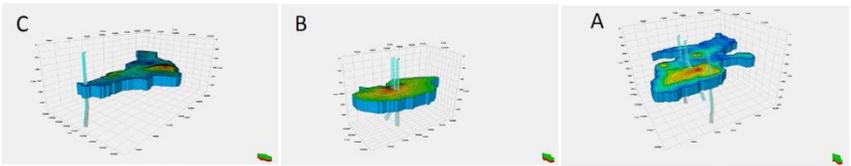
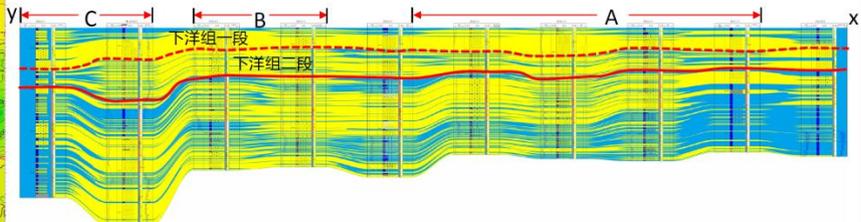
- 识别三个圈闭目标区。结合构造面积、盖层厚度、砂地比、封存量和距离生产设施情况，A/C均为适宜的封存靶区。DOE方法有效封存容量分别为1亿吨、9240万吨。



乌石凹陷下洋组顶界面构造图

碳封目标优选表

	平均盖层厚度/m	平均地层厚度/m	砂地比%	距离平台设施/km	封存量/万吨	是否存在油气显示
A	27.2	389.3	78.2	在平台附近	10190.52	是(油斑、油迹)
C	38.5	477.5	61.2	离一期平台9km	9240.16	否
B	13.5	346.9	82.3	离一期平台5km	3475.40	是(油侵)

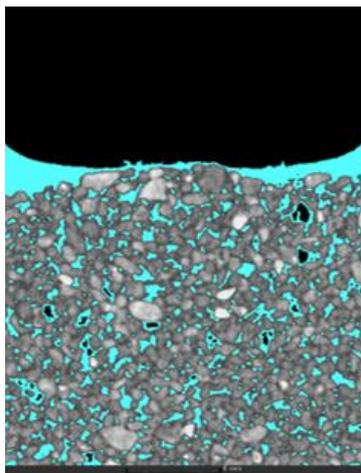


4.2 数字岩心技术在海底碳封存微观机理研究中的应用

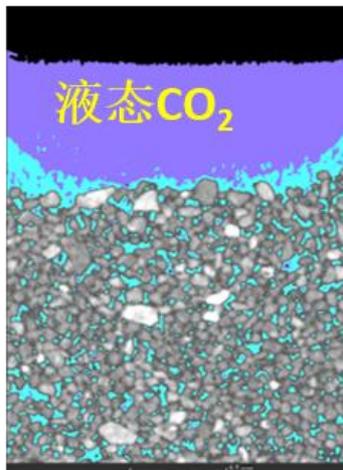
李承峰 高级工程师

中国地质调查局青岛海洋地质研究所

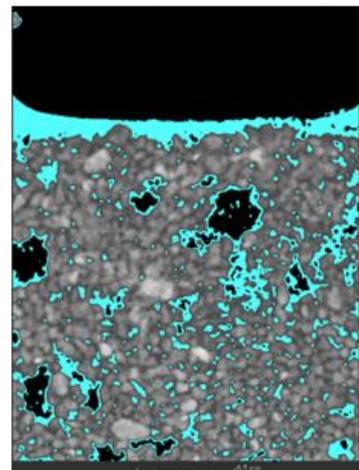
我国的海域地质条件优越，地壳较为稳定，沉积盆地广泛分布，地层厚度较大，同时也存在较多的构造地层圈闭，这些都为 CO₂ 海洋封存提供了良好的条件。海洋沉积物的岩石类型主要以砂岩和玄武岩为主，砂岩孔隙结构、渗透性等物理参数是评价 CO₂ 封存有效性的关键指标。数字岩心技术的发展，为从孔隙尺度观测海洋沉积物微观结构特性、研究储层渗透性等物理特性创造了条件。本研究主要聚焦海底砂岩的孔隙结构表征、孔隙内 CO₂ 流体与 CO₂ 水合物固体赋存形态以及 CO₂ 在沉积物中的运移规律等方面基础科学问题，利用高分辨 X 射线 CT 成像技术和低温 SEM 成像技术，通过室内物理模拟实验，在线观测了 CO₂ 注入运移路径，分析了沉积物内部空间结构演化特征，并探讨了 CO₂ 形态、含量对沉积物渗透率的作用规律。



注入前



注入液态CO₂



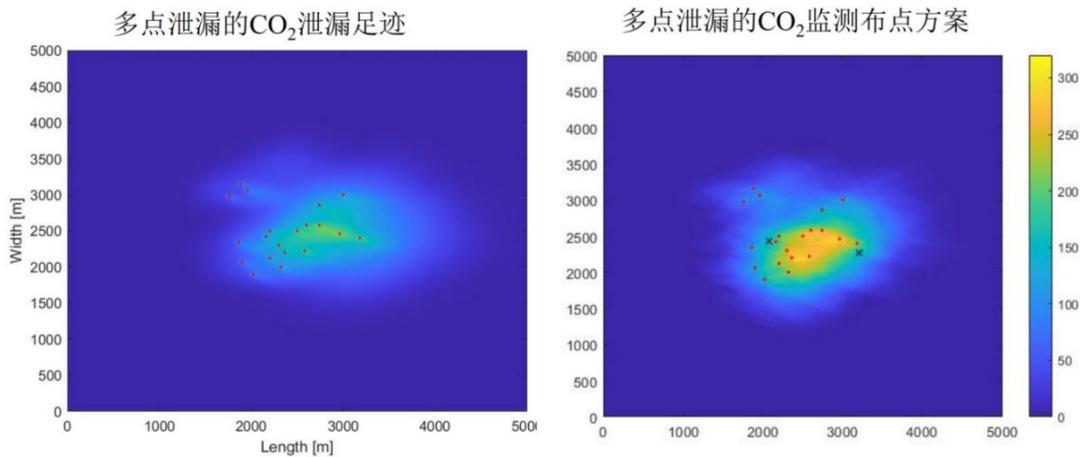
放空

4.3 基于微地震和化学 CO₂海底地质封存泄漏监测网络布点优化

宋学行 高级工程师

中国科学院上海高等研究院

沿海地区化石能源依赖度较高、碳排放量大但缺乏陆域 CO₂地质封存适宜场地，CO₂海底地质封存是实现碳中和的潜在技术路径。为避免对社会生产生活造成重大影响，对于发生概率极低的 CO₂海底地质封存泄漏情景仍需实施长期监测。针对典型海洋环境，本项研究首先建立了 CO₂泄漏诱发微地震的监测网络布点优化方法；然后建立了海水中 CO₂运移扩散模型，分析海水流动等对 CO₂运移扩散的影响，并针对 CO₂浓度监测传感器网络开展布点优化；最后结合海上监测环境测算封存监测体系经济性。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。

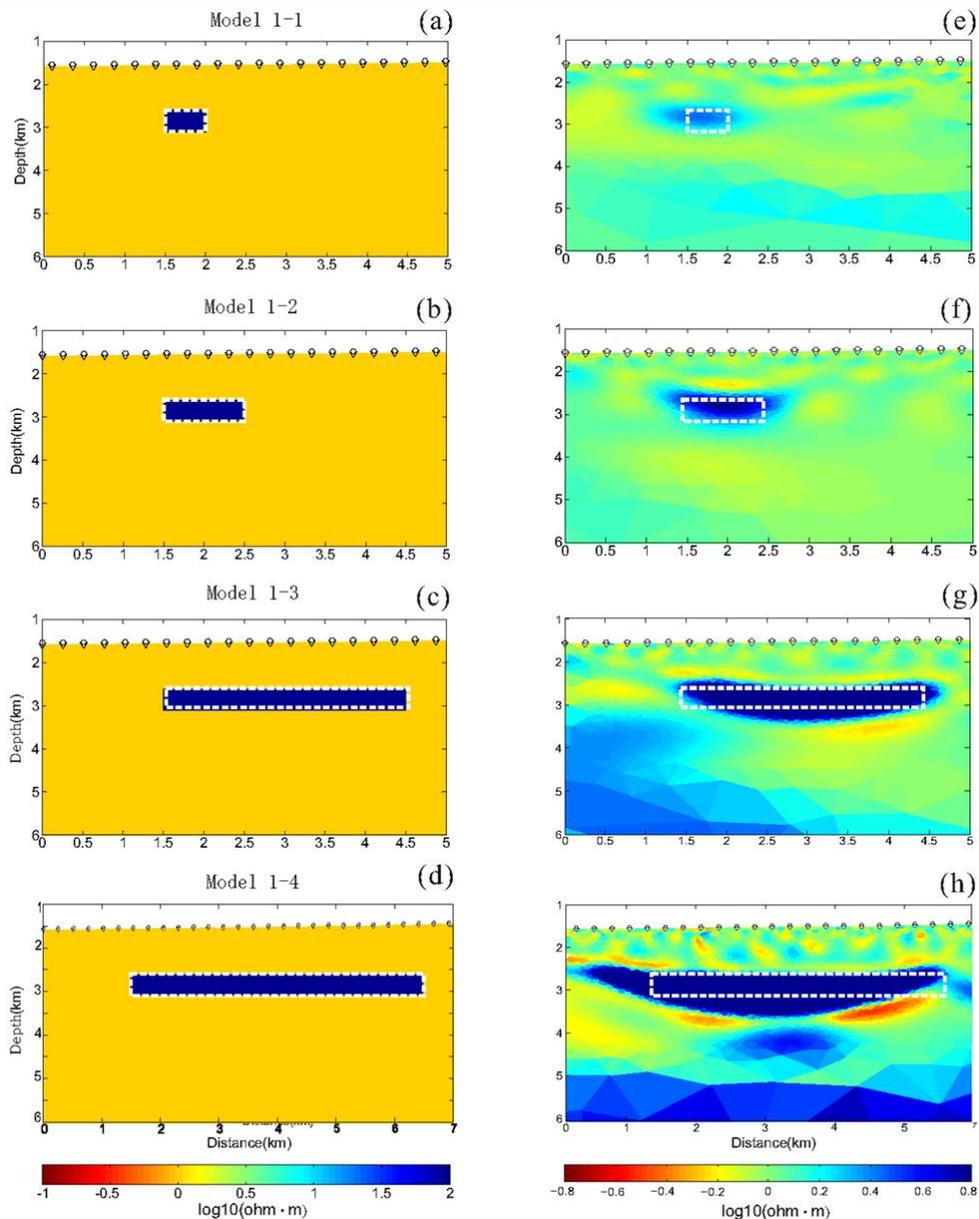


4.4 海洋离岸咸水层 CO₂封存羽流运移识别的海洋可控源电磁法响应特征

邱宁 副研究员

中国科学院南海海洋研究所

报告通过对海洋 CSEM 在离岸 CO₂封存中羽流运移监测中的可行性进行分析,为离岸海上 CO₂封存工程的监测工作提供科学依据和参考,同时本项研究对于离岸海上 CO₂注入监测和地质封存也具有重要的实际指导意义。根据前人研究发现,离岸海上 CO₂封存项目中羽流运移的特点和影响因素是非常值得考虑的因素。我们将通过对理论模型和实际应用案例的分析,讨论海洋 CSEM 模拟深部咸水层中不同的离岸海上 CO₂封存羽流运移情况(不同注入量或扩散长度、埋深等),分析使用不同发射频率情况下电场响应特点,海洋 CSEM 电场 E_y 幅值和相位随偏移距的变化特点,以及对于电阻率成像结果对比分析。



4.5 我国海域二氧化碳地质封存适宜性评价

陈建文 研究员

中国地质调查局青岛海洋地质研究所

二氧化碳地质封存适宜性指在封存潜力、工程技术、社会经济及地质安全性等条件约束下适宜二氧化碳地质封存的优劣程度。国际上，Bachu (2003)、Oldenburg (2005) 对丹麦 (Anthonsen 等 (2014)、Vangkilde 等 (2009) 开展了不同级别适宜性评价及其方法研究，其中影响较高的是国际能源署温室气体项目 (IEAGHG, 2009)，将评价指标划分为决定性指标、必要性指标和理想性指标 3 类。我国学者沈平平 (2009)、霍传林 (2014)、郭建强等 (2014) 开展了诸多研究，建立适宜性评价指标体系。但这些研究未能系统考虑适用海域盆地的二氧化碳地质封存适宜性评价体系。本次工作在系统总结我国海域地质碳封存的地质条件的基础上，通过广泛调研、咨询和研讨，创新性我国海域二氧化碳地质封存适宜性评价指标体系。提出的指标体系由关键指标和必要指标组成，两者耦合决定海域盆地和区带的二氧化碳地质封存适宜性。关键指标是开展海域二氧化碳地质封存的关键约束指标，是否满足关键指标的约束决定了海域二氧化碳地质封存的适宜性，由地震活动和可实施性两个指标组成。必要指标代表了二氧化碳地质封存基础地质条件的优劣，由封存潜力、地质条件和工程条件 3 个一级指标构成和若干个二级指标构成。



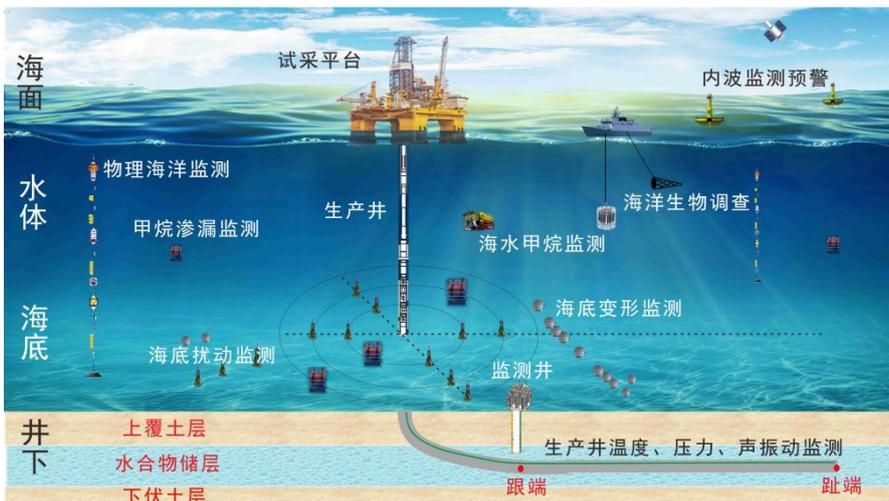
5 专题四：海洋碳封存风险监测与核算方法

5.1 南海天然气水合物试采环境监测关键技术及其在海底碳封存领域的应用展望

梁前勇/董一飞 正高级工程师

广州海洋地质调查局

海底碳封存是我国实现“双碳”战略目标的重要途径，但是在CO₂注入和封存过程中会面临气体泄漏带来的海底地质灾害及生态环境破坏等风险，因此，开展封存区地质环境监测与评价是实现安全环保封存的必要举措，具有重要的现实意义。中国地质调查局在我国2017和2020年两轮海域天然气水合物试采中，自主创新形成了覆盖试采全过程的环境风险防控技术，研发了开采井中流体运移监测、监测井温压原位监测、沉积物-水界面甲烷/CO₂渗漏监测、海底变形监测以及内孤立波监测预警等关键设备，建立了大气、水体、海底、井下“四位一体”环境监测体系，实现了对温度、压力、甲烷及CO₂含量、海底变形、内孤立波等11个要素的监测，有效保障了两轮试采环境安全，也为海底碳封存环境监测提供了一定程度的技术积累。针对海底碳封存过程中对海洋环境的潜在影响，在现有环境监测技术体系的基础上，依托注入井及监测井，构建更为完善的“从陆地到海洋、从井下到海面”的封存区海洋综合环境智能监测体系，对碳封存过程中次生地质灾害、水体系统污染、海洋生物损害等关键环境问题开展实时监测及风险预警，为实现绿色安全的海底碳封存提供技术支撑。



安全防控中心

5.2 二氧化碳地质封存监测技术标准起草中的几个问题

李琦 教授

中国科学院武汉岩土力学研究所

二氧化碳封存项目的首要前提为确保二氧化碳泄漏概率最小化。在向地层注入二氧化碳之后，二氧化碳会因为浓度梯度等因素向外运移和扩散，同时增加扩散区域的地层压力从而改变储层环境。这种储层环境的改变可能会导致稳定地层出现不稳定的变化，如地层局部压力增加或出现复杂的矿化作用，从而致使部分二氧化碳沿不稳定通道运移最终导致泄漏的发生。因此，为确保注入地层的二氧化碳按预期被长期密封在海底深部地质空间、不发生地层变形和泄漏、以及不对环境和人类生存空间构成威胁，需要对注入海底地层二氧化碳的封存过程和运移空间进行持续性监测，以及时检测到可能的异常，从而启动封存纠正或补救措施。目前，可以应用于CCUS项目的监测技术众多，针对CCUS工程项目的监测技术，缺乏有效的行业规范进行专业指导，因此针对CCUS工程的特点，在我们牵头编制二氧化碳地质封存监测技术标准的过程中，需要考虑至少以下几个方面的内容：①监测阶段及目标、监测类别、监测技术以及监测指标；②监测工作一般流程、监测方案设计要求、监测布点原则与要求、阶段监测工作要求、监测资料解释要求以及监测仪器管理要求；③报告编写与评审，包括成果报告编写要求、报告评审以及资料归档。

CCUS监测技术筛选与优化方法

◆建立海洋CO₂封存地质监测技术筛选优化方法，基于泄漏情景分析、风险的MMV（测量、监测和验证）分析与成本效益等对监测技术筛选与优化，提出离岸CCUS项目监测方案



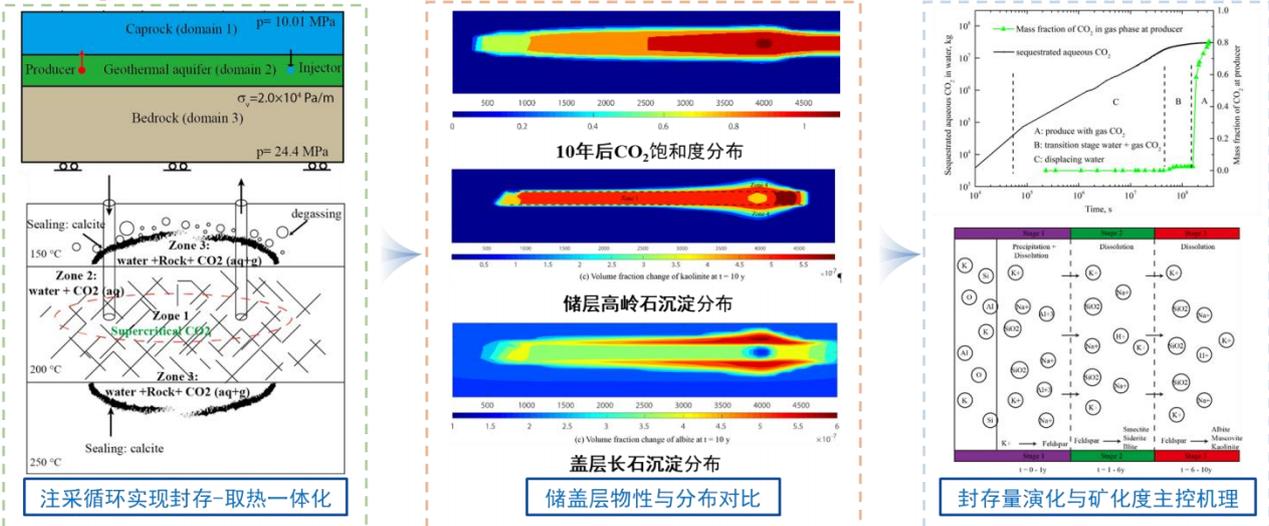
5.3 二氧化碳咸水层封存长时反应运移与封闭性评价

甘泉/贾思达 教授

重庆大学

二氧化碳咸水层地质封存中存在极为复杂的二氧化碳水岩反应过程，通过与不同类型的岩石矿物反应从而实现二氧化碳的矿化封存，同时影响二氧化碳的运移分布。因此需要能够建立一个考虑动态水岩反应与岩石物性演化耦合模型，从而能够准确预测封存潜力以及运移泄露规律。在咸水层封存工作当中，通过建立一个全耦合热流固化多场耦合模型评价利用超临界二氧化碳作为取热工质，基于研究动态矿物质的溶解沉淀行为对于储盖层的孔渗性演化影响，发现储层中的溶解沉淀行为可以划分为三个过渡区域，在十年的封存中储层的 Ph 值从 7 降低到 4-4.5 之间，由于方解石的快速溶解。近井区域由于排水作用的高浓度二氧化碳导致反应过程受到抑制。盖层中由于 Na^+ , K^+ and Ca^{2+} 提供了充足的离子来源产生了石英与次生黏土矿物的沉淀，保证了盖层的封闭性。持续的二氧化碳注入导致了裂缝与基质的渗透率提高了 1.4 倍与 1.2 倍，由于溶解与热卸压效应。同时，基于微观数字岩心开展盖层岩心三维重构与二氧化碳多相流，实现了盖层中的二氧化碳突破压力预测，揭示了盖层渗透性与突破压力的相关性。

提出CO₂地热协同取热封存概念，解决裂隙长时水岩反应时空规律复杂问题，实现地质封存定量与盖层密闭性评价

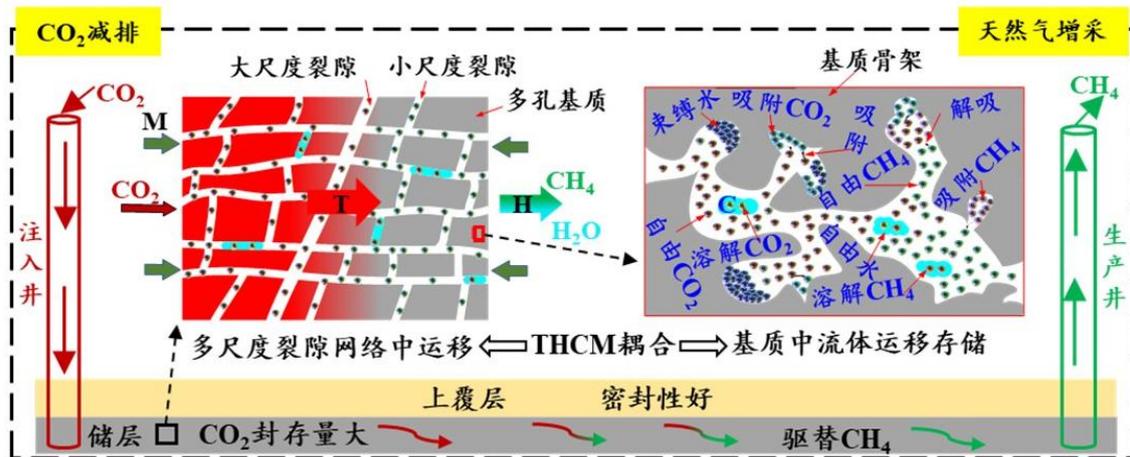


5.4 海洋枯竭气藏二氧化碳封存注入能力评价

陈敏 研究员

同济大学

随着全球气候变化问题的日益严重，二氧化碳（CO₂）封存技术作为一种有效的温室气体减排手段受到了广泛关注。枯竭气藏由于其存储容量大、封闭性好、储层特征已知、远离人口稠密区、现有基础设施再利用以及潜在的增强气体回收能力，成为CO₂地质封存的理想场所，具备广阔的应用前景。海洋枯竭气藏的CO₂封存是一个复杂的相变、多相多组分多场耦合渗流过程。本项研究基于建立的井筒-储层联合多场耦合模型，从储层特性、压力条件、相行为以及注入方式等方面，研究海洋枯竭气藏的CO₂封存注入能力，研究结果可为碳减排量核算提供参考。



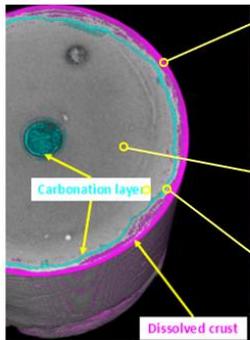
5.5 离岸封存富 CO₂ 环境固井水泥石反应层孔隙结构演化规律与微观力学强度变化特征分析

张力为 研究员

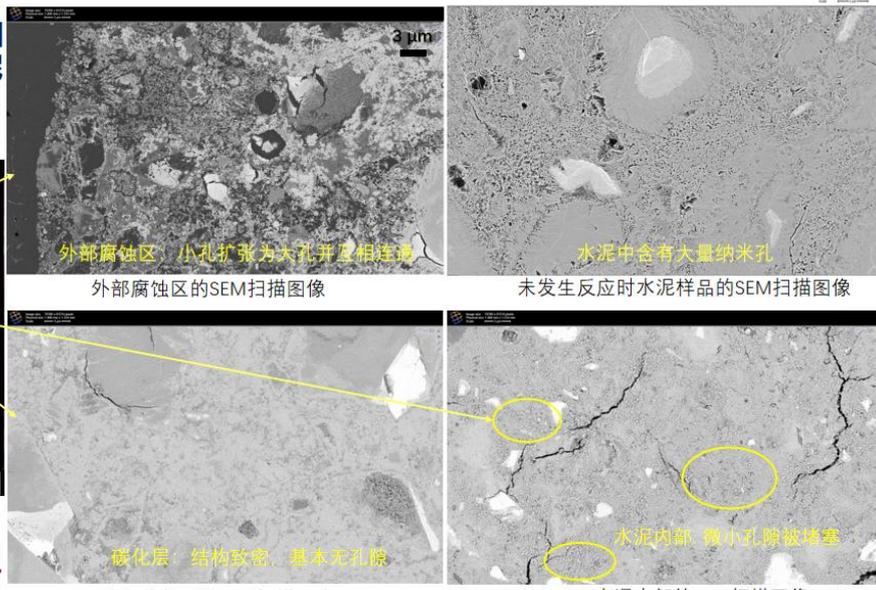
中国科学院武汉岩土力学研究所

本工作研究了暴露于高浓度二氧化碳溶液（溶液上方 CO₂ 分压为 17 MPa）中 14 天的井筒水泥样品各反应区的孔隙结构演变。通过高分辨率扫描电子显微镜、QEMSCAN 和 CT 扫描等先进表征方法，揭示了涉及硬石膏/石膏填充水泥内部纳米孔隙的二氧化碳-水泥反应新机制。硬石膏/石膏是由于 pH 值降低导致含硫水泥水化产物（包括钙矾石（AFt）和单硫型水化硫铝酸钙（AFm））中硫酸根离子释放而形成的。基于实验结果，提出了与以往模型不同的包含四个反应区的二氧化碳-水泥反应模型。该模型为理解由于二氧化碳-水泥反应导致的水泥中矿物的时空分布提供了一个全面的框架，解释了诸如硬石膏和石膏等反应产物的形成，并最终解释了水泥内部纳米孔隙的填充机理。本研究表明，二氧化碳腐蚀引起的主要破坏发生在水泥的最外部区域。由于硬石膏/石膏填充了水泥内部的纳米孔隙，内部完整性得以维持，二氧化碳穿透水泥的风险较低。

纳米级分辨率SEM扫描结果——发现水泥内部“未反应区”实际发生了反应



高分辨率SEM扫描首次揭示了水泥内部在CO₂腐蚀后形成了沉淀，堵塞了水泥中原有的纳米孔



致密碳化层的SEM扫描图像

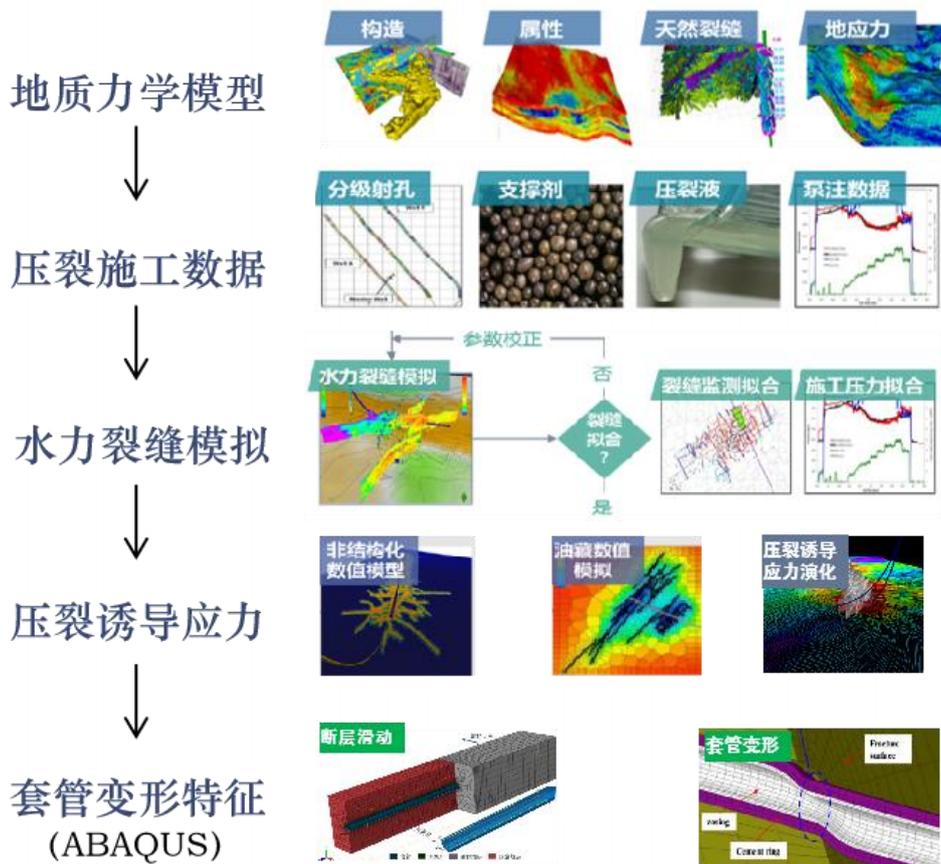
纳米孔被堵塞后，CO₂向水泥内部的入侵会进一步被抑制

5.6 CO₂前置压裂诱发断裂失稳机制及对策

魏晓琛 副教授

西南石油大学

CO₂前置压裂诱发断裂失稳机制浅析 在页岩油储层的开发中，CO₂前置压裂技术凭借其低至超低黏度促进复杂裂缝网络形成，以及高压缩性提升流体返排效率和降低地层伤害的双重优势，显著增强了后续滑溜水的增能效果及返排效率。然而页岩油储层往往发育大量走滑断裂和伴生断裂，压裂诱发断裂失稳往往导致流体泄露及套管变形等问题。基于地质工程一体化思路，深入讨论断裂及断裂周边地应力突变范围及量值，厘清水力裂缝在走滑断裂带扩展特征，阐明压裂诱发断裂失稳机制并构建断裂封闭性的动态评价方法。基于当前技术的挑战与局限，本研究提出了针对性的改进建议，以期进一步优化CO₂前置压裂技术在页岩油储层开发中的应用效果。

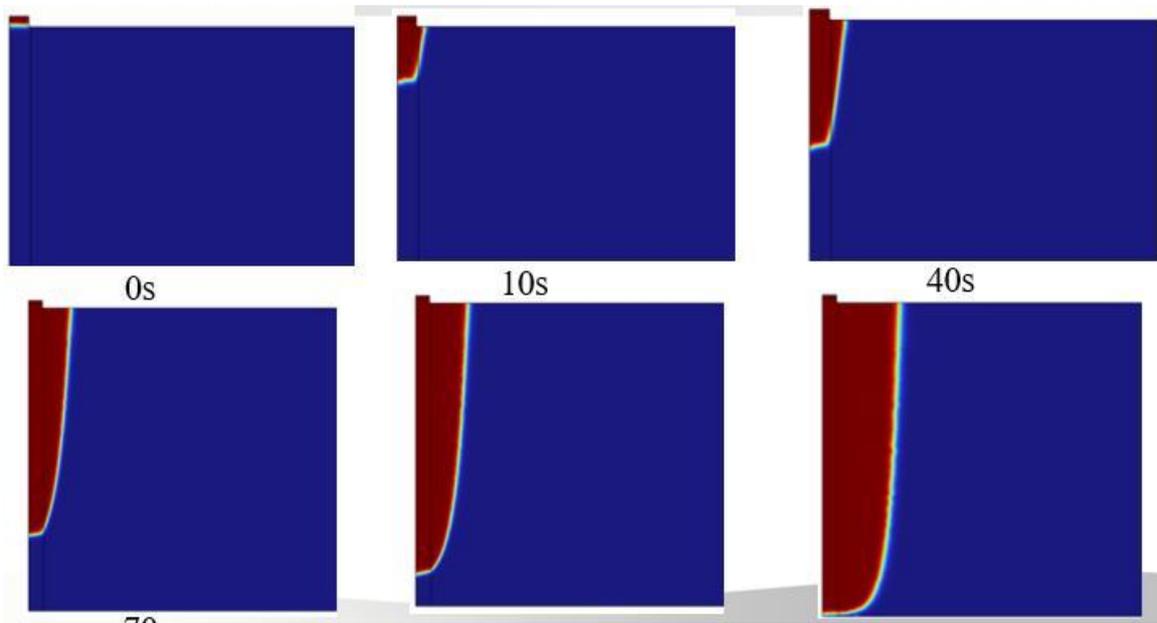


5.7 基于界面跟踪理论的井-储层耦合两相流模型与应用

朱前林 副研究员

中国矿业大学

提出基于界面跟踪方法模拟井-储层系统两相流过程的理论，并模拟揭示密度、粘度对井-储层系统两相流过程影响，为海洋碳封存风险监测提供理论基础。

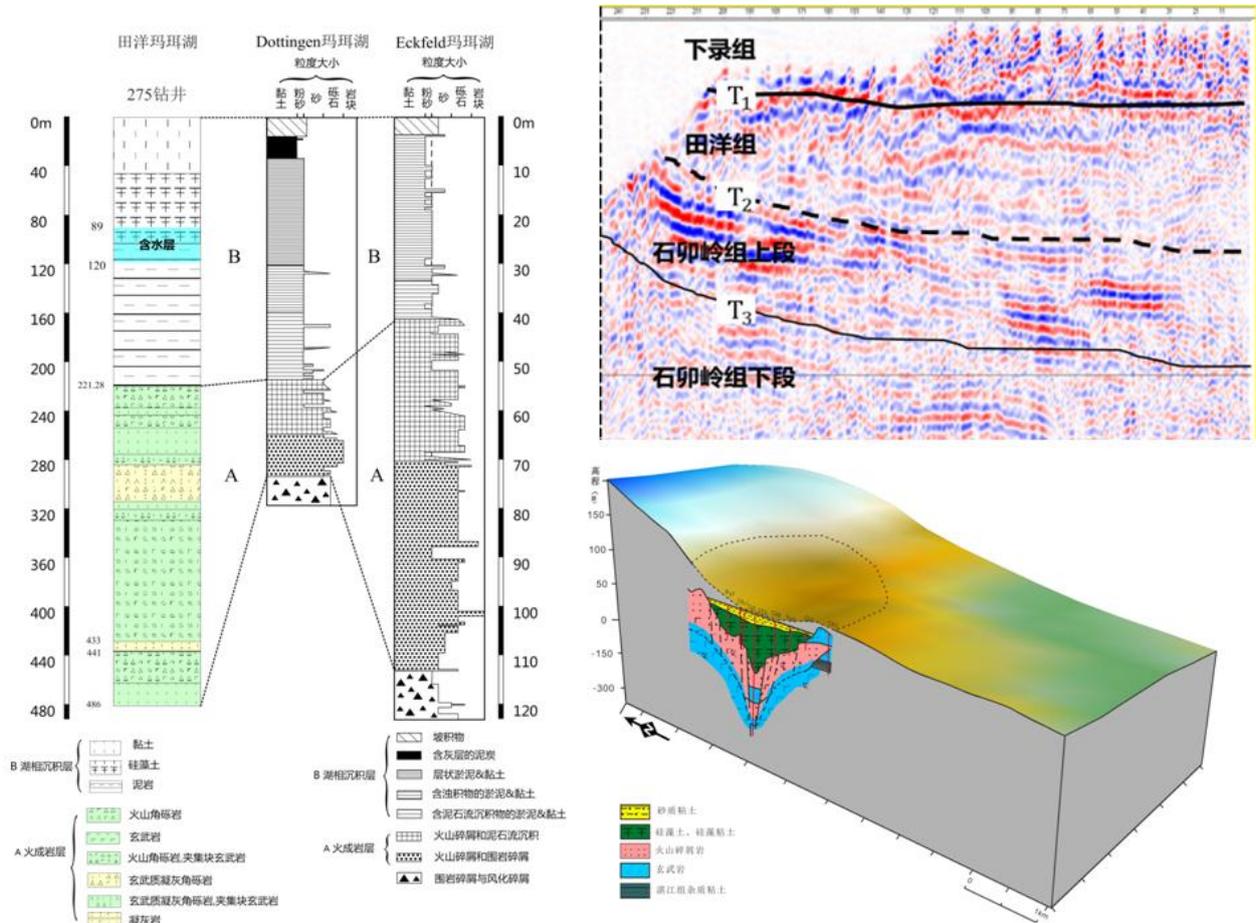


5.8 玄武岩 CO₂ 矿化封存备选场地雷州半岛田洋火山断陷盆地地球物理勘查和潜力评价

邱宁 副研究员

中国科学院南海海洋研究所

多孔玄武岩富铁富镁，相较于砂岩，具有较好的矿物捕集能力，可快速且高效地将二氧化碳（CO₂）转化为固体碳酸盐矿物。在玄武岩 CO₂ 矿化封存过程中，CO₂ 被注入地下储层，与玄武岩中的镁、钙等矿物反应，形成稳定的碳酸盐矿物，如镁铁碳酸盐，这些碳酸盐矿物能够长期储存 CO₂，并防止其逸出到大气中。玄武岩 CO₂ 矿化封存成为新一类封存方式越来越受学术界和工程研究关注。本研究在玄武岩 CO₂ 矿化封存实验备选场地雷州半岛田洋地区为开展综合地球物理探测，结合地质露头、钻探岩心和岩石物理资料等，利用多道反射地震和大地电磁数据，分析玄武岩分布、地层结构和物性参数特征，为玄武岩 CO₂ 矿化封存实验提供重要物性基础参数，也为 CO₂ 矿化封存实验选址和注入设计提供重要支持。

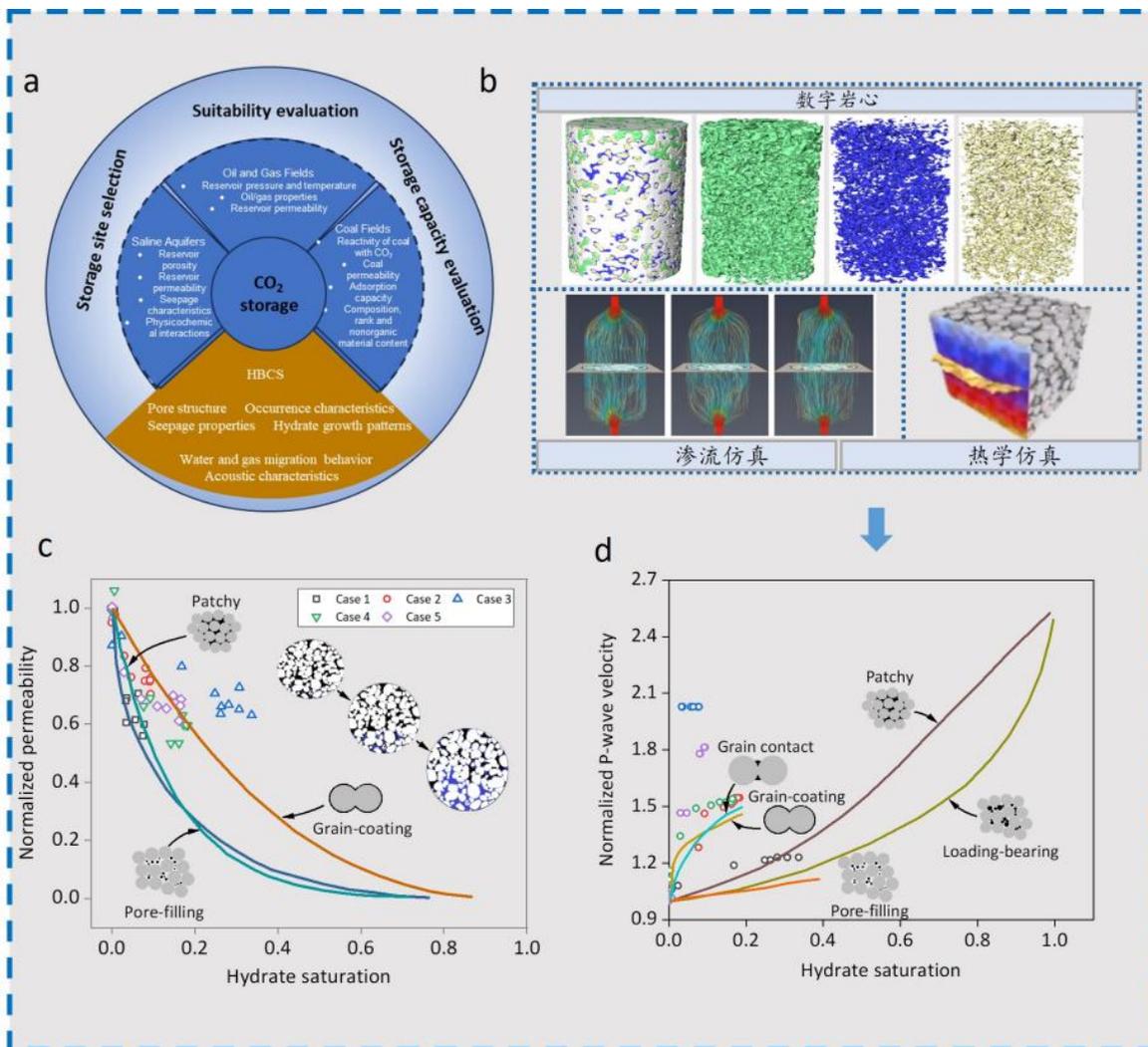


5.9 CO₂水合物生成微观机制与动态参数响应特征

吕超 讲师

西安科技大学

基于水合物生成动力学，通过 CT 扫描技术、声波技术和数值模拟，阐明了 CO₂水合物生成期间多孔介质孔隙结构特性及渗流演化机理，揭示了 CO₂水合物的孔隙习性，为掌握多孔介质中水合物形成机制提供科学基础，分析了水合物生成过程中关键物性的响应特征，建立了水合物相变特征与关键物性参数之间的动态分析模型，为 CO₂水合物法封存提供科学支撑。



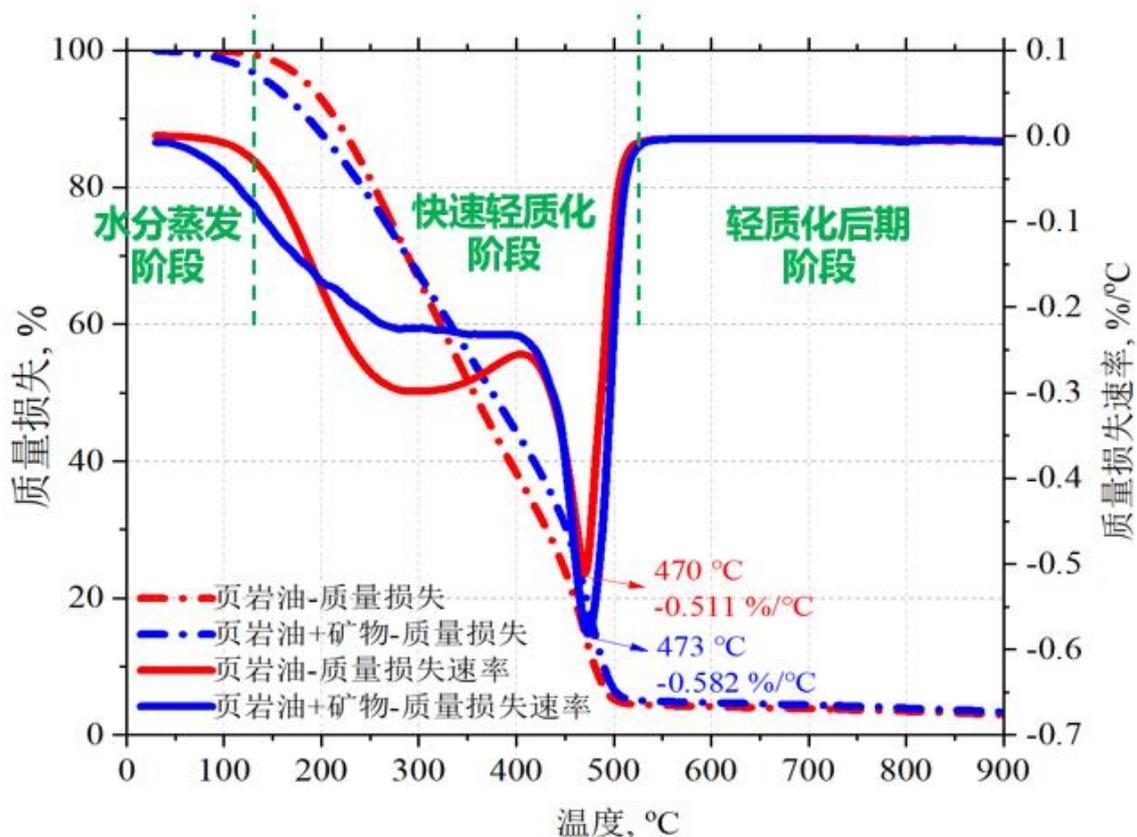
6 专题五：OCCUS 岩石物理与流体表征、模拟

6.1 页岩油藏高温超临界 CO₂ 开发及封存可行性实验研究

周翔/四郎洛加 副教授

西南石油大学

针对中低成熟度页岩油热演化程度低、重质组分为主、原油黏度高，导致现有技术无法效益开发的难题。本研究开展了高温超临界 CO₂ 环境中原位轻质化页岩油开发及封存一体化技术研究，探明了不同注气介质 (CO₂、N₂、空气)、升温速度 (5、10、20°C/min)、储层岩石对页岩油轻质化的影响规律，遴选了注气介质 (CO₂) 及升温速度 (10°C/min)，探究了中低成熟度页岩油轻质化效率及轻质化组分演化规律。采用数值模拟研究方法，明确了研究区块封存规律及潜力，探明了碳封存过程中离子变化规律、碳封存规律、封存量等。研究成果对我国中低成熟度页岩油的高效开发及碳封存奠定理论基础。



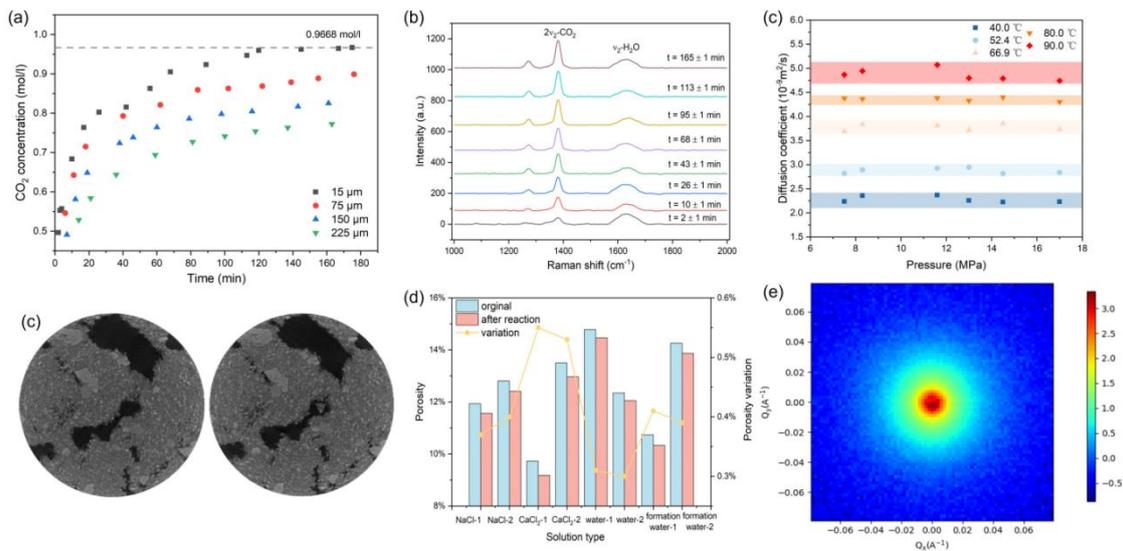
升温速率20°C/min页岩油轻质化失重/失重率曲线

6.2 离岸 CO₂ 矿化封存流体物性与孔隙结构特性研究

王朋飞 助理教授

南方科技大学前沿与交叉科学研究院

CO₂ 矿化封存作为一种永久处理碳排放的技术，对我国实现“双碳”目标具有重要意义。该技术通过将 CO₂ 注入玄武岩储层中，使其生成次生碳酸盐矿物以达到封存作用。探究矿化过程中 CO₂、储层流体以及玄武岩之间的复杂相互作用，是准确评估封存效果的重要依据。本研究主要对储层流体物性与玄武岩孔隙特征进行表征。首先，测量储层流体在封存条件下的密度和界面张力，并利用拉曼光谱技术定量计算 CO₂ 在储层流体中的溶解度与扩散系数，探究 CO₂ 在封存过程中的运移规律；其次，结合小角中子散射与 X 射线 CT 技术，多尺度观察矿化反应前后玄武岩孔隙结构变化，有效评价封存容量与封存效率。本研究结合多种互补性技术对 CO₂ 矿化封存过程进行探究，为安全高效封存提供了理论依据。



(a) CO₂ concentration with time at different depths from the gas-liquid interface; (b) Raman spectra of CO₂ dissolved in reservoir fluids at different time; (c) Diffusion coefficient of CO₂ in reservoir fluids as a function of pressure; (d) CT slices of the basalt before and after mineralization reaction; (e) Porosity variation of the basalt after mineralization process; (f) Small-angle neutron scattering pattern of the basalt.

6.3 海上CO₂封存井筒完整性评价方法与软件开发

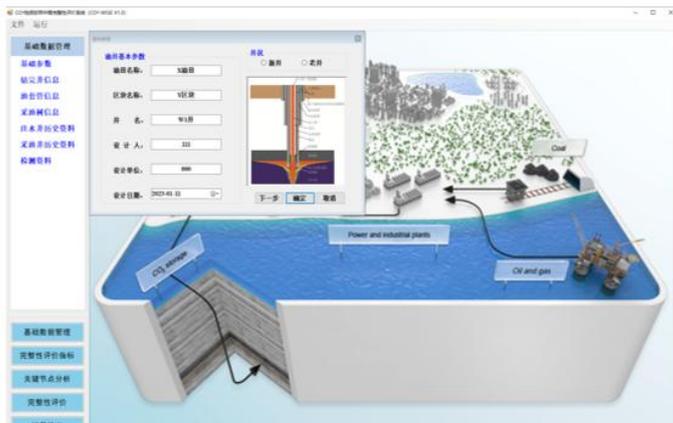
谭永胜/景萌 助理研究员

中国科学院武汉岩土力学研究所

海上CO₂封存井筒完整性评价方法不完善的难题，梳理海上井筒泄漏途径，建立海上CO₂封存指标体系；CO₂地质封存井筒完整性数值模拟结果表明：CO₂井筒温度应与储层温度相同，避免井筒进入储层过程中产生相变，地层诱发产生水合物，可注性变差；CO₂封存井筒轴向应力>径向应力>环向应力，且井筒内壁最容易失效；水泥环弹性模量和泊松比增加，两个胶结面接触力增大，屈服强度增加对井筒失效风险先减小后不变；套管、水泥环厚度增加，第一、二胶结面接触压力降低。编制了CO₂封存井筒完整性评价软件，实现了CO₂井筒完整性评价、老井可利用性评价等功能，为实现中国双碳目标提供技术基础和理论依据。

海上CO₂封存井筒完整性评价软件

海上CO₂地质封存井筒完整性评价软件



主要功能

- 井筒温压预测
- 井筒应力预测
- 井筒安全校核
- 水泥环腐蚀预测
- 井筒完整性评价
- 老井可利用性评价

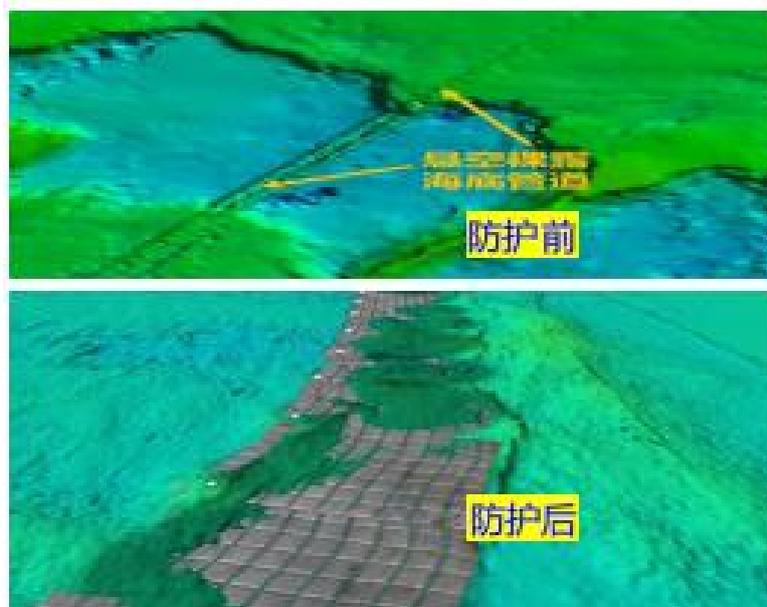
7 专题六：海洋 CO₂ 管道输送安全保障技术

7.1 海洋 CO₂ 管道结构安全及工程对策

刘锦昆 正高级工程师

中石化石油工程设计有限公司

海洋 CO₂ 管输是实施离岸碳捕集、利用与封存（CCUS）的必要路径和关键环节。报告分析了海洋 CO₂ 管道的环境特点和安装工艺，借鉴海洋油气管道设计技术，从路由选择、结构强度、在位稳定、腐蚀控制、结构检测维护等方面，提出了保障海洋 CO₂ 管道结构安全的工程对策。海洋 CO₂ 管道在海上安装、运行服役过程中受到波浪、潮流、海冰等海洋环境及海床土体的空间变异性等多重因素影响，将承受较大的应力，产生较大的变形和振动，诱发管道失效甚至断裂。风暴潮、极端波浪引发的海床土液化失稳、冲刷、海底滑坡等海洋地质灾害会导致管道下沉、弯折、悬空，也是导致管道结构失效的关键诱因，安装混凝土连锁排、覆盖仿生水草、泵送自流动泥浆状固化土等技术是保障管道在位稳定性的有效措施。高含盐的外部海洋环境以及超临界 CO₂ 中杂质气体组分会对管道造成严重的外腐蚀与内腐蚀问题，提出了采用专用缓蚀剂、设置外防腐涂层、安装牺牲阳极块等内、外腐蚀控制技术。建议加强复杂荷载工况下海洋 CO₂ 管道结构模拟技术、内外压力及弯矩联合作用下的管道止屈及止裂技术、适应海洋 CO₂ 管道的智能检测和监测技术、在役海洋油气管道改输 CO₂ 管道评估与保障等工程技术研究，加快 CO₂ 输送管道研究成果向工程技术转化，促进我国海洋 CO₂ 管道高质量建设和运行。



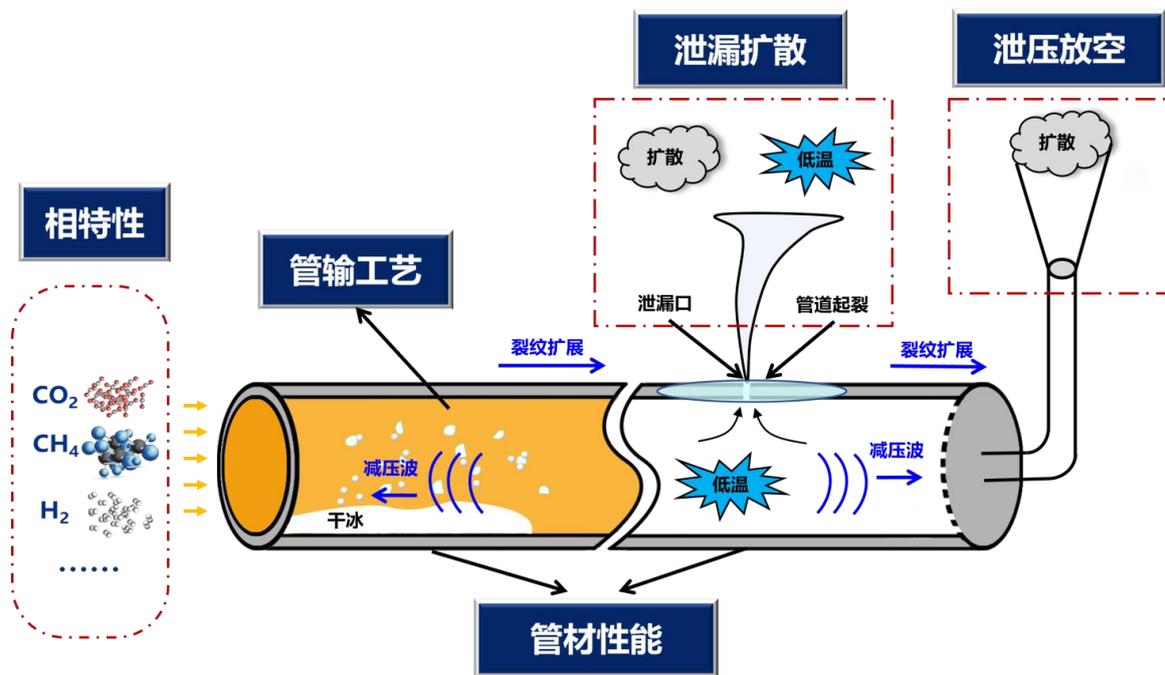
工程防护效果（边缘冲刷降低60%）

7.2 海洋 CO₂ 管道安全运行关键技术研究进展

胡其会 副教授

中国石油大学（华东）

基于海洋 CCUS 特点，分别介绍含杂质 CO₂ 复杂相特性计算、海上碳源超重力捕集、CO₂ 管道输送水力热力计算模型、减压波预测、韧性止裂、腐蚀控制、泄压放空以及泄漏扩散等方面的研究进展，为海洋 CO₂ 管道安全运行提供参考建议。

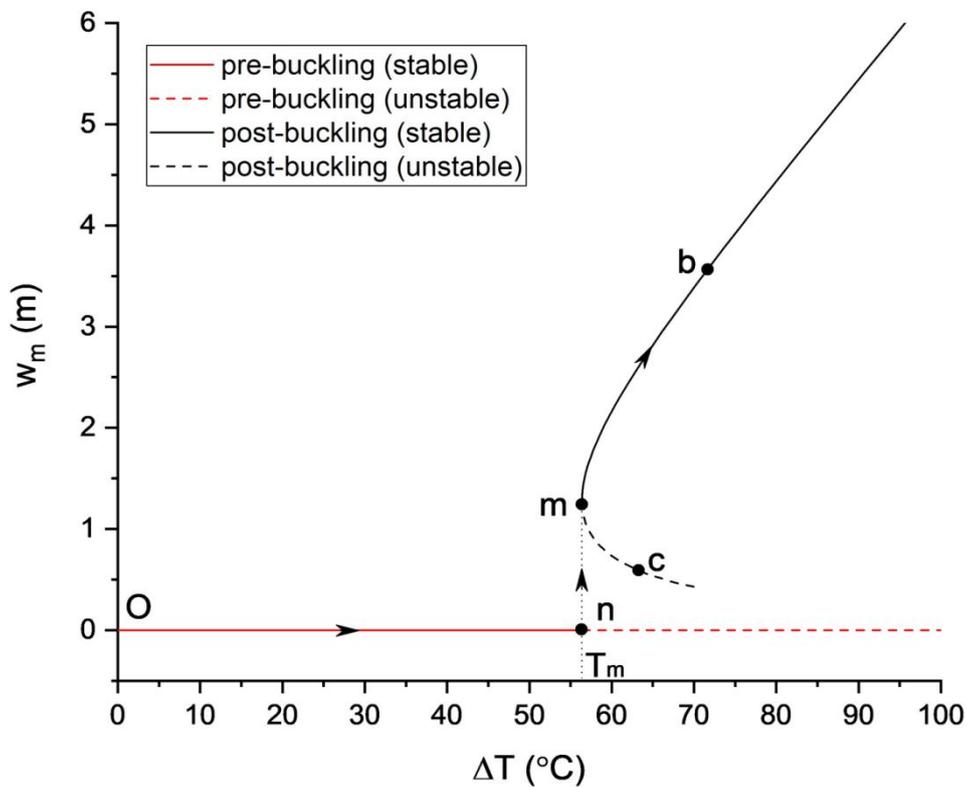


7.3 夹层管道整体屈曲理论模型研究

王臻魁 研究员

浙江大学海洋学院

海底管道是油气、二氧化碳汇聚、转输和外输的主要通道，是海洋油气开发的重要组成部分和关键装备。复合管由于具有良好的抗压保温性能，成为替代传统单层管用于深海油气输送的潜在方案。利用热传导方程推导了夹层管横截面温度分布的解析解。考虑不均匀温度分布和不同层的不同材料特性，基于欧拉-伯努利梁理论，提出了模拟夹层管隆起屈曲的理论模型，分别求解了内管、夹心层和外管的轴向压力和弯矩。最后，提出了用于夹层管隆起屈曲分析的简化温度分布模型。

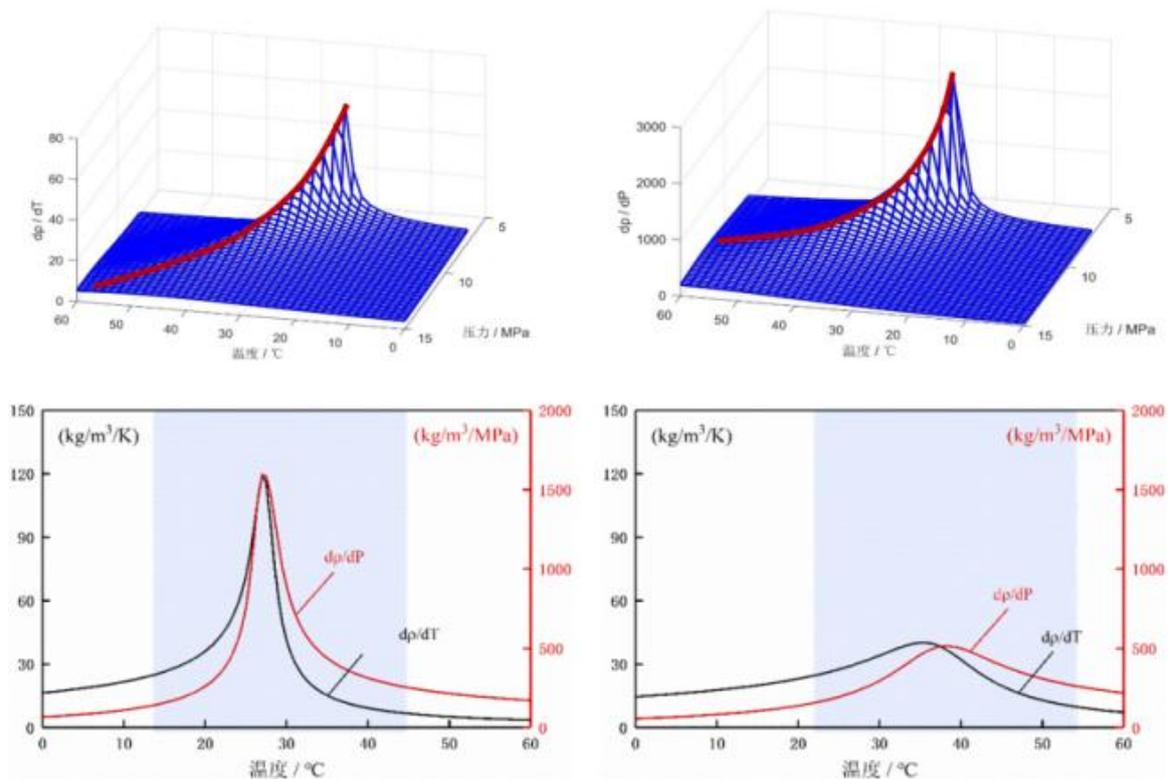


7.4 含杂质 CO₂ 准临界判据及其在 CCUS 管输技术中的应用

李萌 中级工程师

中石化石油工程设计有限公司

管道输送是未来碳捕集、利用与封存（CCUS）项目中 CO₂ 的主要输送方式，其中超临界输送技术效率最高、成本最低，具有良好的市场应用前景。在近临界区可观察到 CO₂ 随温度或压力变化出现剧烈的物性异变现象，需避免工况进入该范围。为此，以密度为基准参数，分析了 CO₂ 的准临界性质，针对现有准临界温度关系式无法有效指导 CO₂ 管道操作管理问题，考虑杂质影响、温压变化、管材性能及相关支撑加固措施，提出适用于管输含杂质 CO₂ 的准临界判据，为 CO₂ 超临界管输安全控制方案的制订提供依据。结果表明，杂质使管输 CO₂ 表现出更强的“类气体”性质，在较低温度下即可发生物性异变，为保障管道平稳运行，可采用较高的输送压力，本项研究提出的含杂质 CO₂ 准临界判据实用性较强，能够为工程应用提供更具针对性的指导。

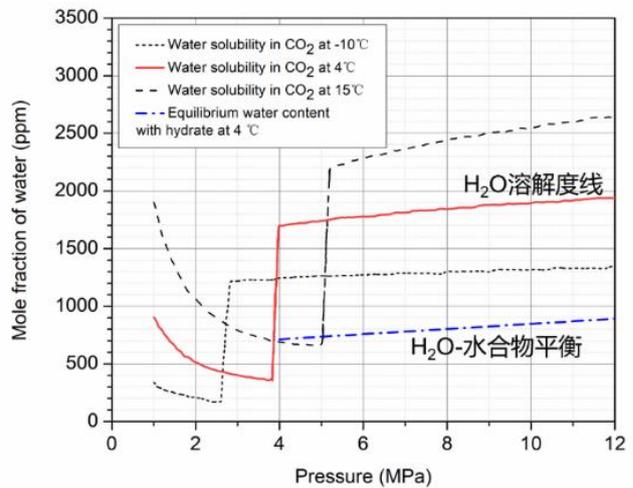
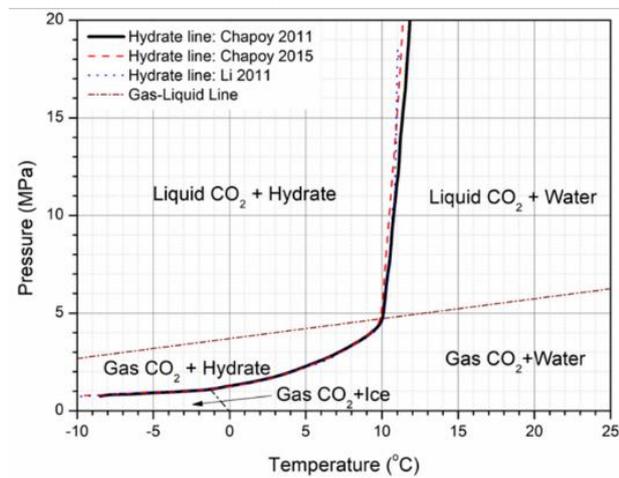


7.5 海洋 CO₂ 管道输送流体的含水量阈值确定准则探讨

王子明 副教授

厦门大学

管道输送是经济高效的 CO₂ 长距离运输方式, 然而长期运行过程中面临水合物阻塞和腐蚀等安全风险, 严控含水量是当前确保 CO₂ 管输系统稳定运行的有效举措之一。本报告针对典型 CO₂ 管道运行工况, 重点分析了 CO₂ 水合物形成与腐蚀发生的临界条件, 系统梳理国内外关于含水量阈值的推荐建议及设置依据。基于经济性与安全性的权衡, 讨论了深度脱水预处理策略在大规模 CO₂ 输送场景下所面临的技术经济困境, 以及潜在的 CO₂ 管道安全运输策略, 为海陆大规模 CO₂ 管道输送的工艺选择、施工、运行提供参考。



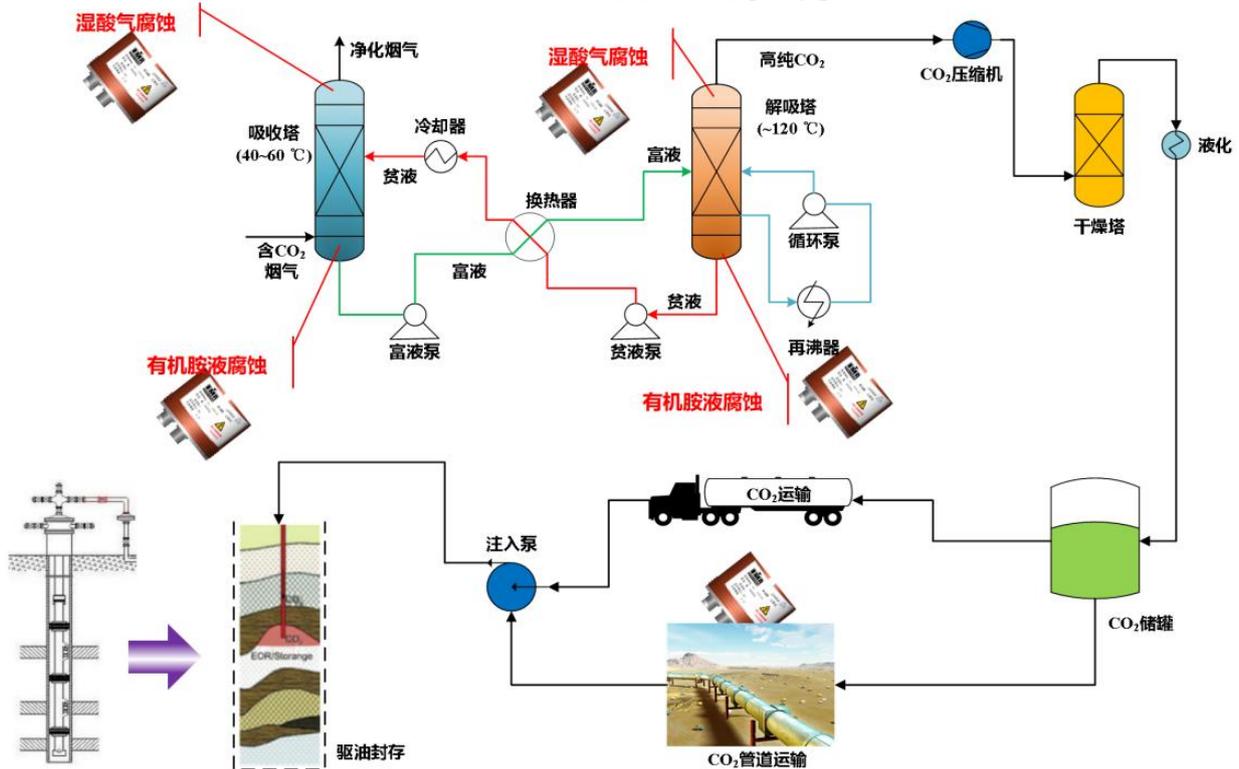
7.6 CCUS 系统腐蚀在线监测及泄漏预警技术研究

台闯 正高级工程师

中国科学院金属研究所

通过阐述 CCUS 技术应用中各个环节存在的腐蚀环境、腐蚀因素、腐蚀结果及风险辨识。试图探索适合于 CCUS 系统的腐蚀在线监测及泄漏预警技术，为未来 CCUS 系统运维提供有力的技术支撑。通过分析、研究目前主流腐蚀在线监测及泄漏预警技术的特点及应用局限，提出开发适用于 CCUS 系统的腐蚀在线监测技术思路和建议。目前，适合 CCUS 系统的腐蚀在线监测及泄漏预警技术较少，成熟度较低。新一代超声测厚、光纤光栅、电场感应以及声表面波等技术有望应用于 CCUS 系统运维领域。在我国“双碳”战略目标指引下，加快 CCUS 系统运维过程中腐蚀在线监测及泄漏预警技术的创新与发展，势在必行。

CCUS 工艺流程简介

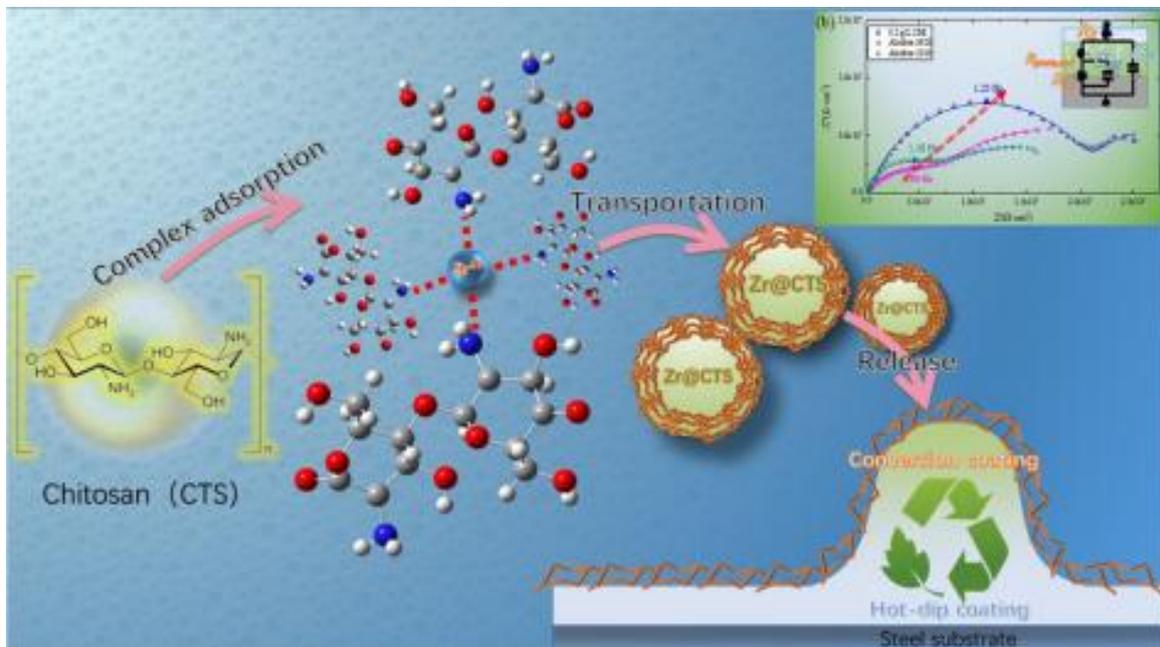


7.7 CO₂长距离输送管道腐蚀防护技术及实践

潘杰 工程师

中石化石油工程设计有限公司

化学转化膜是一种极具发展潜力的金属材料表面腐蚀防护与处理方法，因其较好的耐蚀性和对涂层结合力的提升，广泛应用于交通、农业、五金和海洋工程中。CCUS系统的长距离CO₂管道面临着严苛的局部内腐蚀环境，本研究通过多维物化表征手段和微区电化学技术证明了一种纳米晶转化膜能够有效在输送管线钢表面形成一种薄膜，且对管输介质中析出的饱和碳酸微液滴具有良好的钝化效果。此外，本报告还将介绍国内首条示范工程管道运营一年以来的基本情况和智能化阴极保护系统的应用实践。

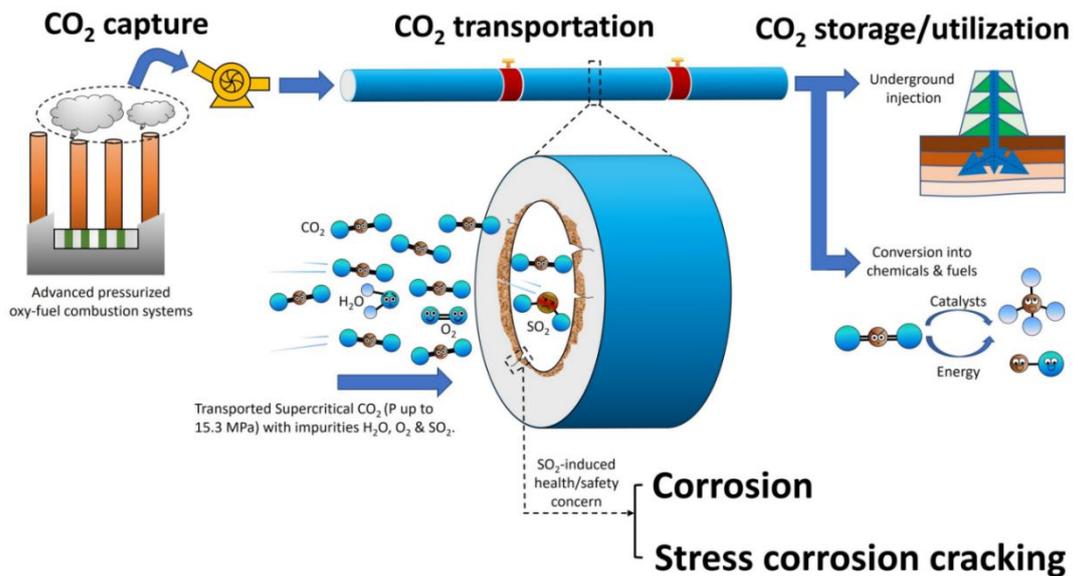


7.8 超临界 CO₂ 运输管道的腐蚀及应力腐蚀研究

李开洋 讲师

华北电力大学

双碳背景下，超临界 CO₂ 的管线钢运输是碳捕捉、碳收集过程中的重要一环。然而，所捕捉的 CO₂ 中往往含有 H₂O, O₂, H₂S, SO₂ 等杂质气体。这些气体可能会在运输过程中引发碳钢的腐蚀，但很多腐蚀作用机制和机理并不明确。因此，本研究系统开展了如下工作：分析不同杂质对腐蚀的作用机理，以及杂质如何通过协同作用进一步加剧腐蚀；提出杂质的临界含量，以控制腐蚀；开展应力腐蚀开裂检测，并对可能的发生机理进行分析；提出利用原位电化学噪声分析腐蚀机理；建立长期腐蚀预测模型。本研究旨在为理解低温超临界 CO₂ 腐蚀行为及腐蚀控制提供理论基础和技术依据。



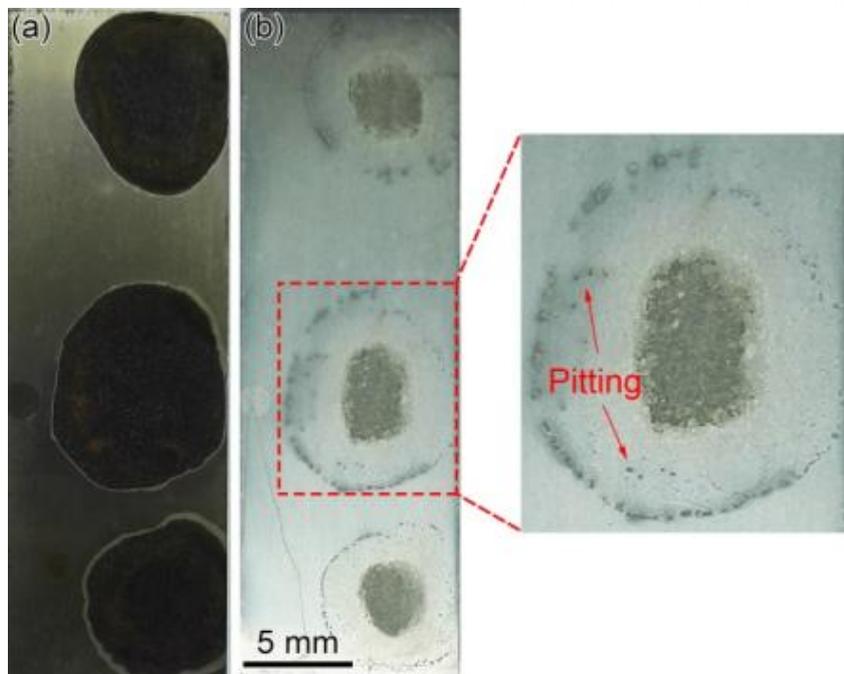
- **Kaiyang Li, Yimin Zeng***. Advancing the mechanistic understanding of corrosion in supercritical CO₂ with H₂O and O₂ impurities. *Corrosion Science*. 2023;213:110981.
- **Kaiyang Li, Yimin Zeng*, Jingli Luo***. Influence of H₂S on the general corrosion and sulfide stress cracking of pipeline steels for supercritical CO₂ transportation. *Corrosion Science*. 2021;190:109639.
- **Kaiyang Li, Yimin Zeng***. Long-term Corrosion and Stress Corrosion Cracking of X65 Steel in H₂O-saturated Supercritical CO₂ with SO₂ and O₂ Impurities. *Construction and Building Materials*. 2023;362:129746.
- **Zeng Yimin*, Li Kaiyang**. Influence of SO₂ on the corrosion and stress corrosion cracking susceptibility of supercritical CO₂ transportation pipelines. *Corrosion Science*. 2020;165:108404.
- **Li Kaiyang, Han Xue, Zeng Yimin***. Effect of Cr on Corrosion Performance of Steels in Supercritical CO₂ Environments. AMPP-2022-18049. *AMPP 2022*.
- **Li Kaiyang, Zeng Yimin***. Corrosion Behaviors of Carbon Steels and Cr-Bearing Steels in Supercritical CO₂. PR-280-002-2021. *Steel Properties & Applications Conference*.
- **Li Kaiyang, Zeng Yimin*, Luo Jingli**. Effect of Impurity SO₂ on Corrosion and Stress Corrosion Cracking of X65 Steel in Supercritical CO₂ Streams. *CORROSION 2019*.
- **Zeng Yimin*, Li Kaiyang, Luo Jingli, Arafin Muhammad**. Impacts of Impurities on Corrosion of Supercritical CO₂ Transportation Pipeline Steels, *CORROSION 2018*. (Highlighted by *Materials Performance Magazine*)

7.9 超临界二氧化碳环境中管道内壁液滴凝聚及其腐蚀行为

魏亮 副研究员

上海大学

在超临界 CO₂ 输送过程中，由于温度和压力的细小波动，溶解在超临界 CO₂ 相中的 H₂O 会在管道内部冷凝，导致腐蚀问题。我们确定了超临界 CO₂ 相中水的冷凝过程以滴状冷凝为主，暴露角度会显著影响超临界 CO₂ 相中水在钢表面的冷凝行为以及腐蚀过程；通过液滴临界半径计算模型和实验验证准确得出了含有饱和水的超临界 CO₂ 相中液滴在碳钢表面冷凝液滴的最大尺寸；揭示了超临界 CO₂ 相中的液滴内不同基体区域之间的微电偶腐蚀机制。

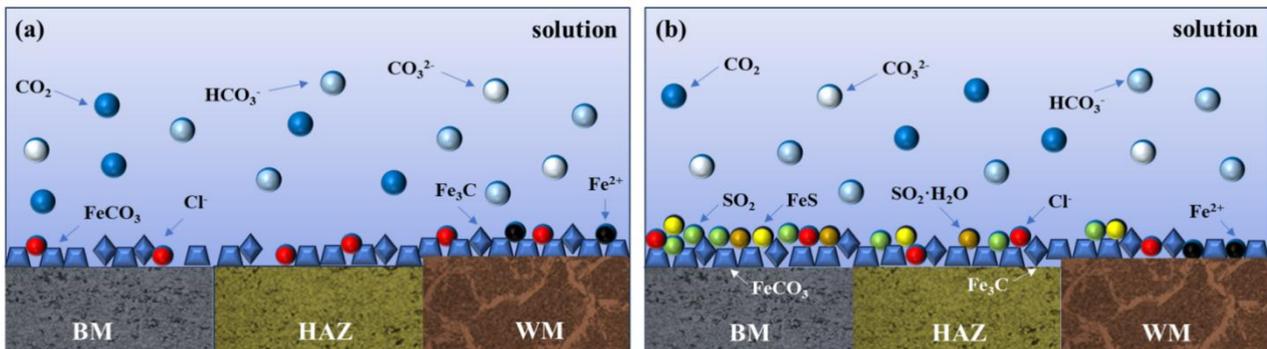


7.10 SO_2 及其水合物对 X65 钢焊接接头在 CO_2 溶液中的选择性吸附及腐蚀机理研究

向勇 教授

中国石油大学（北京）

碳捕集、利用和封存（CCUS）已被证明是减少 CO_2 排放和实现化石燃料低碳利用的有效方法。然而，从燃煤发电厂捕获的 CO_2 中的杂质气体会加剧运输管道及其焊接接头的内部腐蚀。本研究通过电化学和形态学分析研究了 CO_2/SO_2 饱和水溶液中焊接接头不同区域的腐蚀机理。结果表明， SO_2 及其水解具有一定的吸附性能，并倾向于吸附在母材区域表面并生成 FeS 产物。该区域可形成致密的腐蚀产物膜，有效降低腐蚀速率。由于选择性吸附增加了焊接接头不同区域之间的电位差，进一步加剧了电偶腐蚀，最终导致焊接接头腐蚀失效。



8 专题七：海底碳封存相关设备研发

8.1 海底地震仪与 OCCUS 现场监测设备

杨挺 教授

南方科技大学

OCCUS 在场地选择、稳定性和安全性评估等方面都离不开海底监测设备，而相关设备的研发目前应该还处在初期阶段。长期在海底进行连续天然地震观测的被动源 OBS 与这些设备在很多方面具有一致性，例如，多传感器、低功耗、可靠性和减小海底环境的影响等等，因此，被动源 OBS 作为离岸 CCSU 监测设备的初始研发平台。在这一报告中，我将通过介绍南科大最新一代的磐鯤 OBS 的性能特点及面临的挑战，并讨论将其改造为离岸 CCSU 现场监测设备的可行性。

高性能的海底地震探测设备：磐鯤



投放



回收

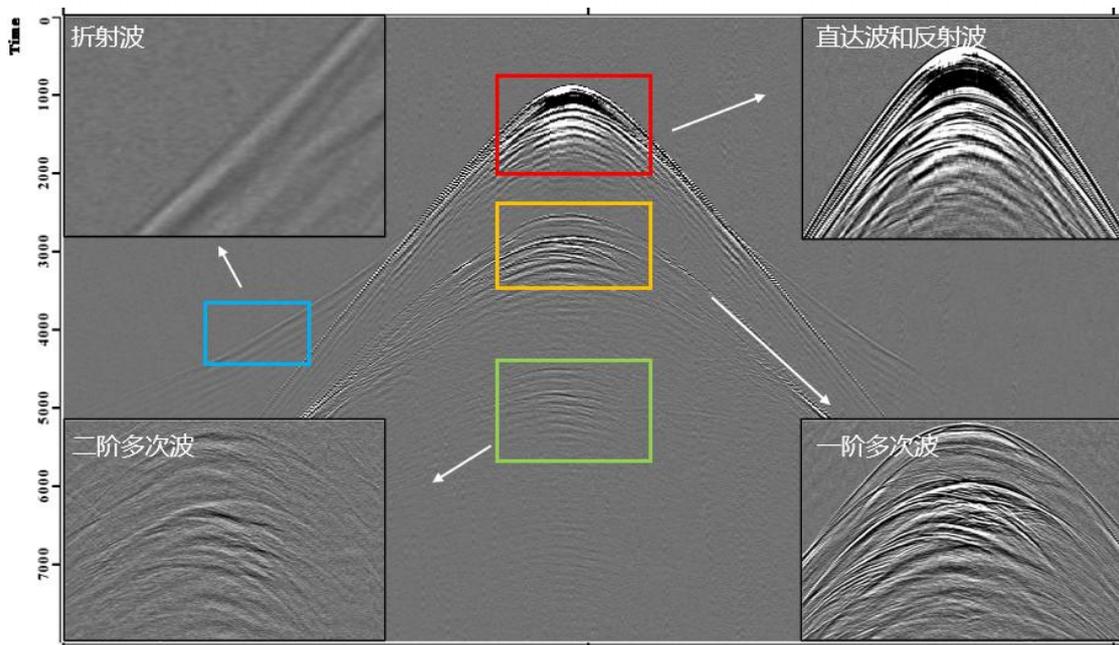
- 分体式：降低底流影响，提高水平分量数据质量
- 屏蔽地震计：进一步减小底流影响
- 真正的宽频带：Trillium 100Hz -120s
- 地震计与仪器主体定时、自动分离：节省船时
- DPG：同时获得海底细微压力变化

8.2 新型低频宽带海底地震仪的研发与应用

刘思青 高级工程师

广州海洋地质调查局

海底碳封存是一项将二氧化碳永久存储于海底地质构造中的技术。在封存过程中，应确保其过程的安全、有效，并且不会对环境造成不利影响，主要包括碳泄露的监测、地质构造储层稳定性的评估、周围环境影响评估等，这种监测不仅限于封存初期，而是贯穿整个封存周期，甚至是封存后的一段时间也需要继续进行。海底碳封存通常发生在较深的地层中，封存过程伴随微小地震的发生，使用低频宽带海底地震仪可有效探测深部地质结构、监测微小变化并进行储层长期稳定性评估。基于上述需求，广州海洋地质调查局联合广州威拓电子科技有限公司开展新型低频宽带海底地震仪（LB-OBS）自主研发技术攻关，该项目依托广东省自然资源厅海洋发展专项重点项目“天然气水合物高分辨率震电联合物性探测关键技术”，近期已完成大量功能性试验、数据采集试验，取得了非常好的成果。项目以最新研发的LB-OBS的功能性测试和海底采集测试为例，验证了LB-OBS在实际生产应用中的可行性，突破了高信噪比数据稳定采集、低频至3Hz、高设备回收率以及PP波及PS转换波特征清晰等攻关难点。一方面，通过LB-OBS锚系在2200米水深海域多批次投放和回收，顺利完成了自研LB-OBS的水下声学测距、声学释放熔断、状态查询、数据采集、增益验证等功能性测试；另一方面，经过充分的释放通讯、熔断测试以及对释放脱钩系统的大幅度改进，圆满完成LB-OBS在全部站位的成功回收。测试结果表明：项目研发的LB-OBS低频、高分辨率数据质量良好，PP波及PS转换波特征清晰。基于此，本研究认为LB-OBS的研发是推动国产技术装备更新迭代、优化升级的典范，也为后续LB-OBS的市场化推广应用、高质量服务我国深海能源资源开发、海洋地质碳封存监测和深部地球科学研究增添了有力信心。

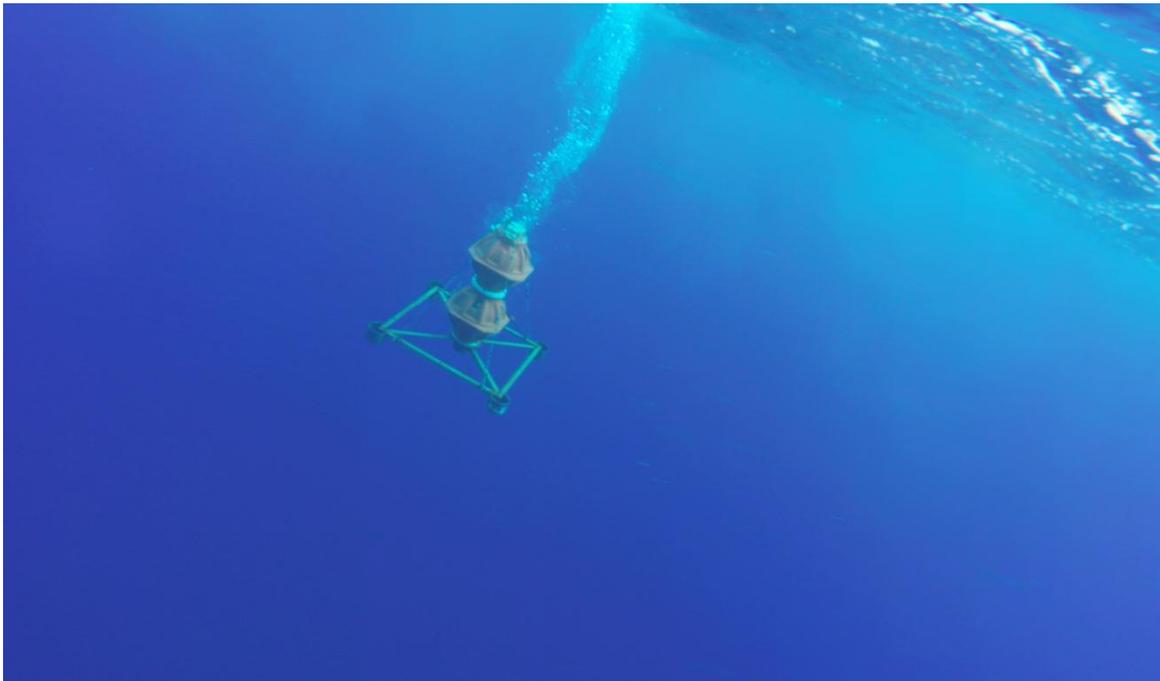


8.3 海底地震仪装备技术

王元 高级工程师

中科院地质与地球物理研究所

为研究深部壳幔结构、海底地震活动性和实现地震海啸预警，需要在海底布设海底地震仪开展地震观测。深海海底地震仪因涉及地震传感器、深水水听计、声学换能器与耐压封装等先进国际技术，我国高性能深海海底地震仪长期是空白。对此，中国科学院地质与地球物理研究所通过多年持续核心技术攻关和多次深海试验验证，解决了数字调零宽带地震传感技术、全海深陶瓷压电水听传感技术、软硬协同优化低功耗采集技术和万米高可靠性释放回收技术等关键技术难题，自主成功研发了包括便携式海底地震仪、宽频带海底地震仪与实时海底地震仪等系列海底地震探测装备（统称为 IGG-OBS）。实验结果表明：自主研发的 IGG-OBS 仪器装备达国际先进水平；近年来在多个科考航次中发挥支撑作用，总计投放达 1400 余台次，综合回收率大于 90%；通过在洋中脊、海山、俯冲带等多种复杂海底区的实际观测，数据质量合格率 >98%，具备复杂构造成像能力，已进入实质性应用阶段，为我国深海科考、大洋调查及近海灾害预警监测等提供了关键技术支撑。



8.4 我国海底地震仪的研发进展

牛领辉 高级工程师

北京港震科技股份有限公司

经过了 20 余年的发展，我国海底地震观测系统研制方面已经取得了巨大的科技成果，形成了多种多样的观测形态。按照通讯方式分为有缆式和无缆式，有缆式可通过光纤缆给地震仪供电和进行数据传输，可以保证海底地震仪的长期工作和数据实时回收，这种类型的设备主要有光缆串接式、接驳节点式、浮标式海底地震仪；无缆式一般是临时观测，多在深海观测，这种类型的设备主要有沉耦架沉浮式、分体沉浮式、底座式、埋入式等。虽然我国研制出了适应深海和近海岸的地震监测设备，解决了系统低功耗、小体积、大容量存储、高守时精度、地震计自动分离装置等问题，突破了水下方位定向、大角度调平功能等技术难点，但是在工程实施和海洋地震监测台网系统建设方面还有较多不足，目前还存在数据实时性不足、未形成台网化布局等问题，随着海上风电的大规模建设，国内相关研究团队已经在研究通过风电平台、石油钻井平台等基础进行近海海洋地震的监测系统设计研究。另外，随着海底光缆的施工成本降低，可以围绕海岛周边和重要海域进行进行海底光缆观测网的建设，可通过光电复合缆将多台海底地震仪串联起来形成的传感器观测链，地震仪从光电复合缆获取电力，并将数据实时传输至近岸基站或海岛中心台站。这样的海底观测系统建设可实现实时、长期的海底地震监测台网。未来随着海洋地震监测仪器的研制和应用的发展，可根据不同的海域深度和观测需求，可采用不同的观测方式的海洋地震监测仪器形成临时、中长期观测站网，将全海域的监测信息收集回来，进行海洋地震监测分析，还可应用于在海洋基础科学研究、海洋灾害预报预警、资源与能源勘探开发利用、航海与军事海洋环境保护等领域，为科研和生产提供资源与能源的开发与利用，为海洋预报、海洋防灾减灾、海洋科学理论重大突破提供试验平台和技术支撑。

走向深蓝



北极科考



埋入式 OBS
深度 100-200 米

节点式 OBS
深度 1000-2000 米

沉浮式 OBS
深度 6000-7000 米

- 1、埋入式海底地震仪主要用于我国大陆架地区的海底地震观测。通过布放设备将地震仪埋入大陆架海洋底部，使地震仪记录不受海洋水流的干扰，确保在宽频带内有好的记录环境。
- 2、节点式 OBS 是集声振检测为一体的多分量实时立体海底观测系统。该系统集成了一个 3 分量宽频带地震仪（120s-80Hz），两个 4 分量水听器，一个 9 分量航姿参考单元。
- 3、沉浮式海底地震仪由采集记录器、地震计、常平架、释放机构、密封舱、电池、信标机、水声通讯电路和沉耦架组成；具有低功耗、质量轻、结构简单等特点，便于海上投放和回收作业。



埋入式 OBS 及其布放回收系统示意



节点式 OBS 多分量实时观测系统



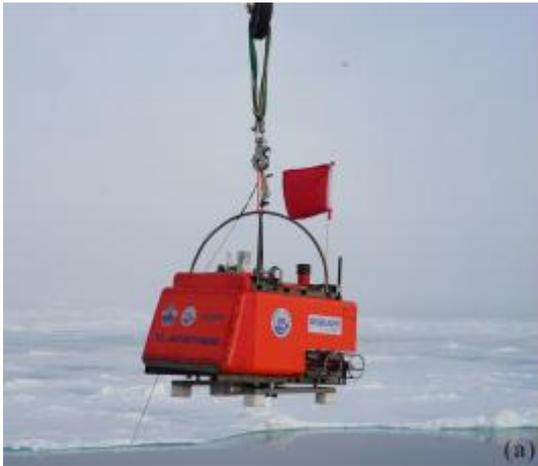
沉浮式海底地震仪

8.5 北冰洋密集冰区海底地震探测

牛雄伟 研究员

自然资源部第二海洋研究所

海底地震仪 (Ocean Bottom Seismograph, OBS) 是探测深部壳幔结构的重要设备。中国第 12 次北极科学考察在被密集浮冰覆盖的北冰洋加克洋中脊, 完成了国际首次大规模主动源 OBS 探测, 成功回收 43 台 OBS 中的 42 台, 其中 5 台分体式 OBS 均成功回收。本项研究介绍了针对该航次中面临的 OBS 回收定位难题研发的一款新型分体式 OBS。其主要特点为 (1) 集成超短基线信标和声学应答系统, 实现双重定位保障; (2) 使用分体式结构增强地震计与海底的耦合, 有效提高信噪比; (3) 选用国产地震计和浮力材料, 实现核心部件国产化。分体式 OBS 在北冰洋加克洋中脊的低水平地震背景噪音能量, 且记录的远震波形、两个近源微地震波形和三分量主动源地震记录均具有清晰可见的震相信息, 表明该种 OBS 能够满足冰下海底勘探需求。

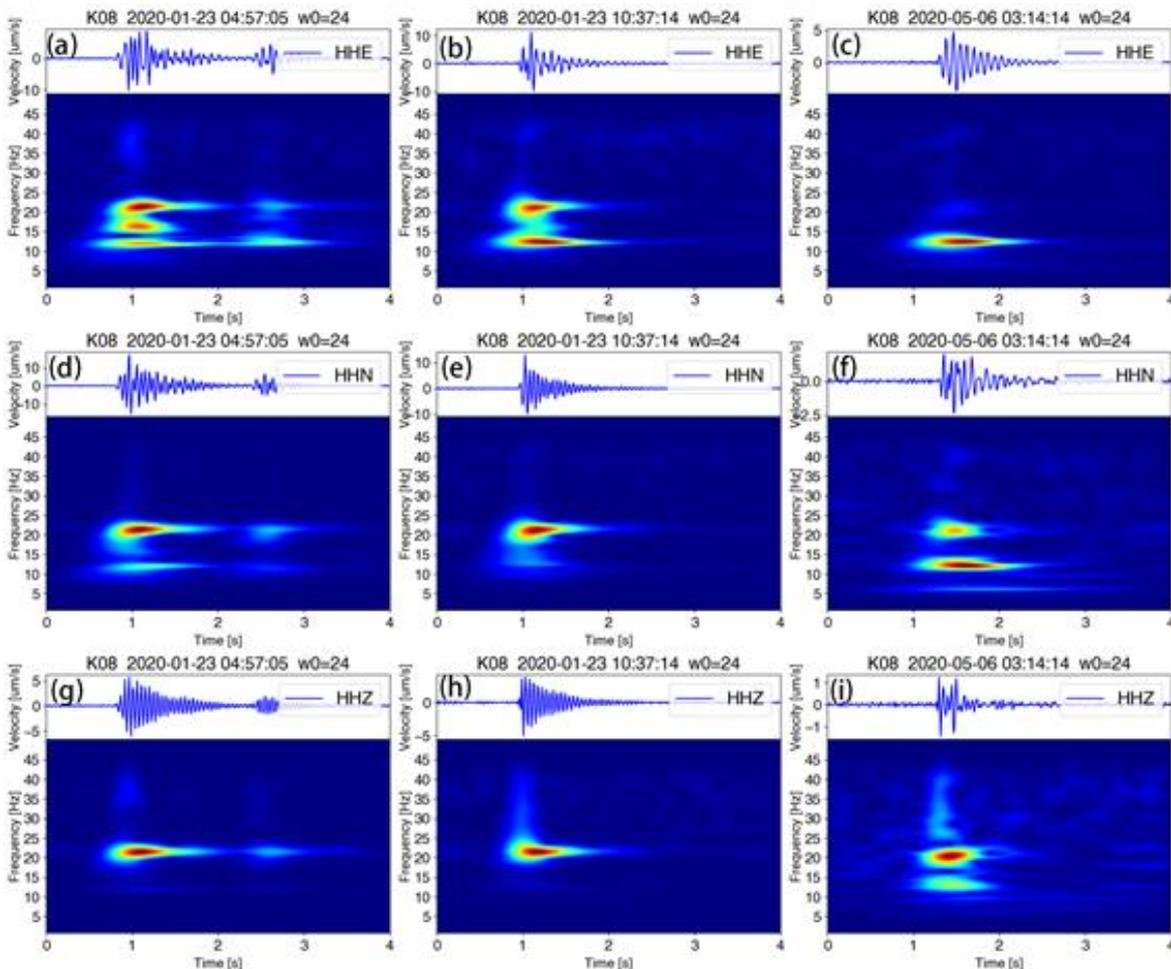


8.6 基于宽频带海底地震仪的海底气体逃逸监测

王宜志 讲师

南方科技大学

宽频带海底地震仪 (OBS) 是长期放置在海底进行地震观测的设备, 它不仅记录地震事件, 还可以记录来自海底的其它地质活动过程引起的震动。由于受到温度、压力变化等因素影响, 海底的天然气水合物或封存的其他气体在沉积层中以弹性膨胀和拉伸断裂交替循环的方式生长并从海底沉积层溢出, 导致海底地质结构的破裂和变形, 引起海底微小震动, 被 OBS 记录到, 这类信号称为短时效事件 (SDEs)。本研究对 2019 年 10 月—2020 年 5 月在中国南海西北次海盆布放的宽频带海底地震仪的数据进行了分析, 通过长短时窗均值比算法拾取了大量的随机短时效事件 (R-SDE), 对其进行了特征分析并使用该信号对该区域的浅层地质活动过程进行研究。R-SDE 信号的溯源分析表明该信号主要来自于该区域海底沉积层的气体逃逸引起的震动, 通过对 OBS 数据中拾取的 R-SDE 的数量多少分析了海底气体逃逸的活跃程度和时间分布, 并通过 R-SDE 信号的反方位角和入射角的优势方向统计, 推测其主要来自 OBS 布放位置的西北部。这一研究表明长期布放的宽频带海底地震仪可以用于海底气体泄露的监测。利用海底广泛分布的 OBS 可以估计全球海底气体逃逸通量, 为全球海底碳排放的准确评价提供依据。



9 专题八：海洋生物固碳及零碳生物化学品的开发技术

9.1 CO₂驱动微藻光合固碳联产高蛋白或高油脂调控技术及碳迁移机理

魏东 教授

华南理工大学

本研究以亚椭圆胶球藻 C-169 为研究对象，首先建立了优化的碱液化学吸收 CO₂-光合固碳偶联技术体系，并对其光合固碳性能进行系统评价；进而优化了影响胶球藻光合固碳及储碳产物（蛋白质或油脂）生产的关键因子，建立了优化固碳工艺；采用多组学分析技术，阐明了光合细胞内碳代谢通路解析与碳分配调控机制，构建了光合碳代谢通路及其调控模式，创建 CO₂化学吸收-微藻高效光合固碳偶联新技术。研究开发的高效固碳工艺可同时实现最高的固碳速率及蛋白质/或油脂产率，为碳减排和解决粮食危机提供了有效解决途径。全面解析了微藻细胞内光合碳的分配模式以及决定碳流分配的关键代谢分支点，为精准调控微藻细胞高值化产物的定向合成提供了理论依据。

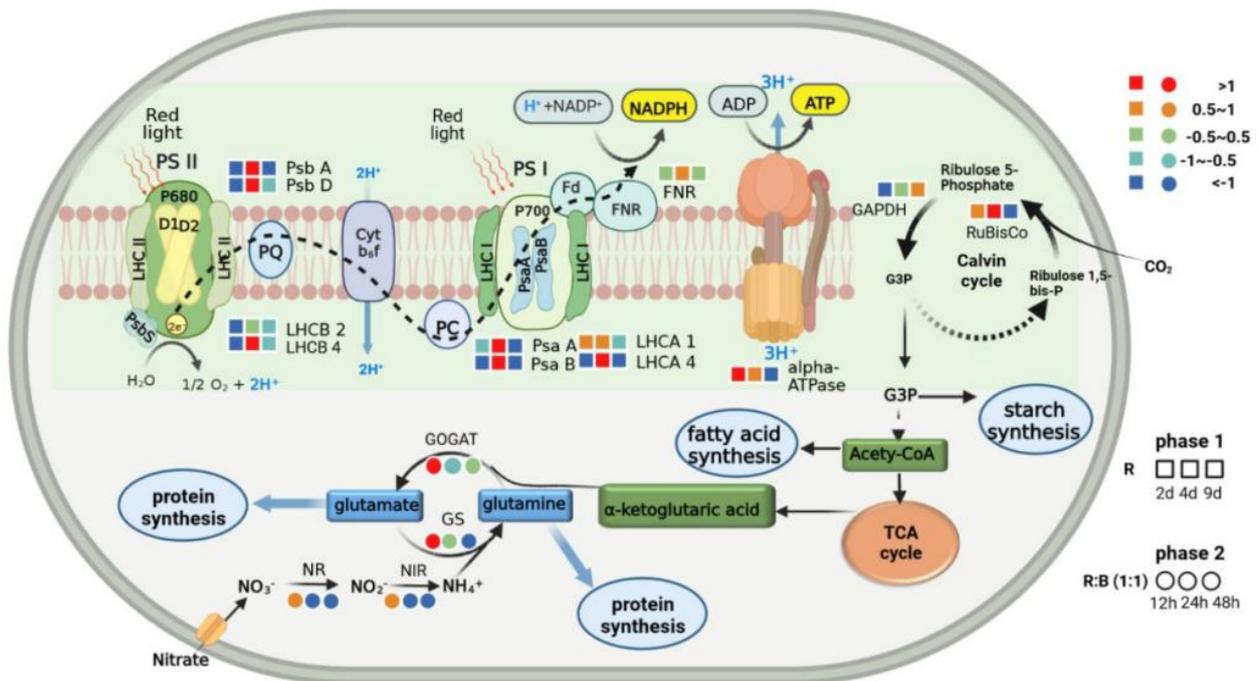


图 15 两阶段培养下与光合作用和氮代谢相关基因的时序性表达规律

红色和橙色的方框和圆圈代表上调，蓝色代表下调，绿色代表相对没有变化

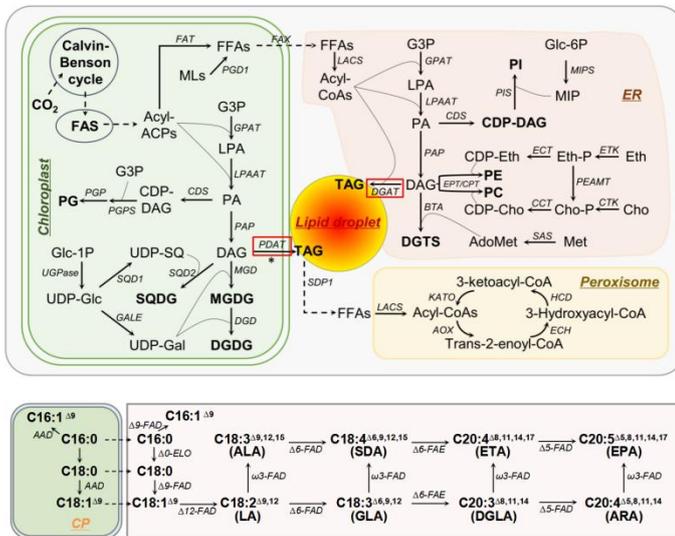
9.2 代谢重塑固碳海洋微藻合成高值产物

刘进 教授

南昌大学

光合生物是地球上的天然碳汇。在众多光合生物中，藻类这一群碳-氧循环的重要参与者固定了地球上超过 40% 的 CO₂，是地球上至关重要的初级生产力。藻类尤其是单细胞真核微藻，与高等植物相比，具有明显的优势特点，包括光能转化 CO₂ 效率高、生长快、环境适应性强、可通过多营养模式培养、不与粮争地等，因而被誉为理想的光驱细胞工厂，有潜力在绿色可持续的负碳途径中发挥重要作用。光驱动微藻固定的 CO₂ 通过卡尔文循环生成 3-磷酸甘油醛，进入到多种代谢途径，最终合成各种产物，包括优质蛋白、淀粉、油脂、长链多不饱和脂肪酸、高值类胡萝卜素等。微藻光合作用的高效性和高值产物的多样化使得它们在 CO₂ 绿色高值化利用中有着重要的应用潜力。海洋微拟球藻基因组注释相对完善、遗传工具丰富，是有潜力的光驱真核底盘。本报告主要介绍海洋微拟球藻脂质代谢与类胡萝卜素生物合成，以及通过合成生物学等手段赋能该藻高值产物合成。

微拟球藻脂质代谢



微拟球藻
(*Nannochloropsis oceanica*)

- 脂肪酸从头合成
- 膜脂合成
- 脂肪酸去饱和、延长
- 膜脂周转
- 甘油三酯组装
- 脂滴生成
- 甘油三酯降解
- 脂肪酸降解
-

9.3 Micro 级浮游植物的沉降特征和机理——实验室和野外研究

郝镭 副研究员

自然资源部第二海洋研究所

浮游植物沉降是海洋有机碳转移和埋藏的关键环节，其沉降速率 (Sv) 对碳通量的影响至关重要。然而，浮游植物 Sv 受群落结构和生理状态调控，表现出高度可变性，目前对其与海洋生物地球化学过程的关系了解有限。近期研究表明，长江口浮游植物群落的 Sv 呈现显著的时空差异，特别是在磷耗竭的冲淡水锋面区域，Micro 级浮游植物（即 20-200 微米的浮游植物）贡献了最高的沉降速率。不同粒级的浮游植物 Sv 顺序为 Micro > Nano > Pico。然而，Sv 与溶解无机磷 (DIP) 呈显著负相关，与藻类的粒级结构关系不明显。在各类环境因子中，Sv 与限制性营养盐的相关性最高。野外磷加富实验显示，DIP 浓度升高会导致 Sv 迅速下降，甚至出现负值，暗示营养盐限制可能是浮游植物沉降的“开关”，当营养盐超过一定阈值时，沉降将极为缓慢或停止。在实验室中，通过新型高清影像设备对多种 Micro 级硅藻的沉降机制进行分析，结果显示其 Sv 主要受细胞生理状态调节，且与硅质外壳和胞外物质浓度无显著相关。研究还发现，脂类变化可解释约 80% 的沉降速率变异，尤其在营养盐限制条件下，过剩的光合作用能量通过脂类积累来耗散，硬脂浓度升高导致浮游植物密度增加，从而提高 Sv。该研究揭示了营养盐供给对硅藻沉降的关键调控作用，为理解海洋生物碳泵机制提供了新的见解，并为开发藻类捕集技术提供了潜在方向。

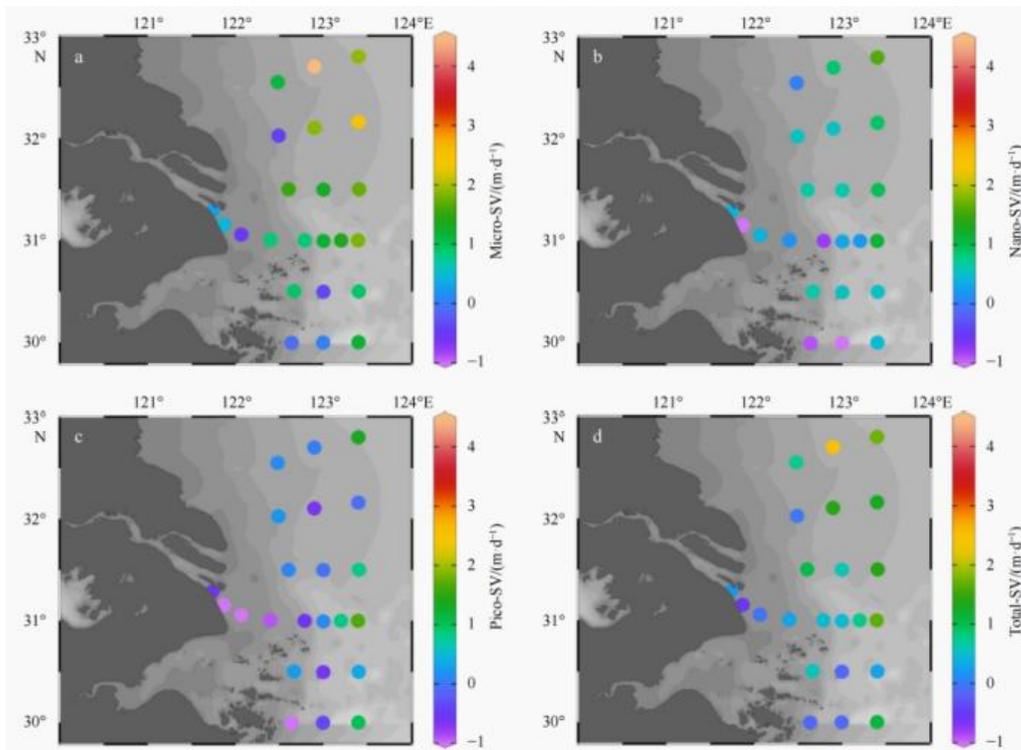


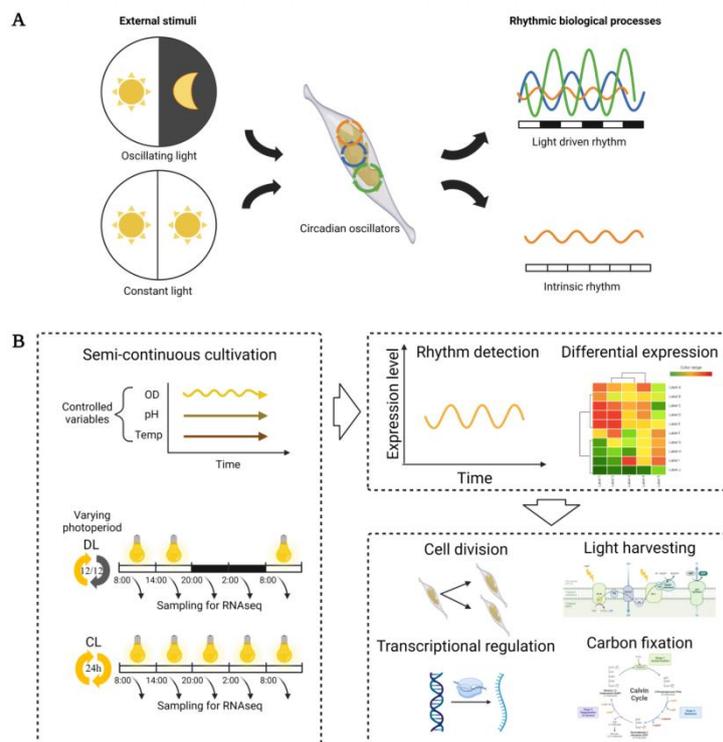
Fig. 5. Spatial distribution of surface micro- (a), nano- (b), pico- (c), and total- (d) SV in the surveyed area.

9.4 浮游植物光合固碳的昼夜节律生物钟分子调控

傅维琦 研究员

浙江大学

Circadian clocks exist in all types of organisms and coordinate key biological processes, e.g. photosynthesis in phytoplankton (microalgae) and land plants. We asked whether a circadian rhythm sustains in phytoplankton when living under constant illumination without environmental cues. Here, we report the first transcriptomic architecture of persistent oscillatory gene expression in the model marine diatom, *Phaeodactylum tricornutum* living under constant illumination and temperature without environmental cues. We show that cyclic expression of a considerable number of genes involved in light harvesting and carbon fixation sustained after 24 hours of constant illumination, which could pose additional constraints on cell growth under constant light conditions. Over long-term adaptation to constant illumination (free-running conditions), the majority of the rhythmic genes identified under diel light conditions lose their oscillatory expression in the absence of external entrainers, and the genes potentially controlled by persistent circadian clocks are primarily involved in transcriptional regulation and cell division. We find constant illumination leads to an increased average expression of transcription factors and cell division genes, while genes involved in the Calvin-Benson cycle and pigment biosynthesis are kept at low expression levels, which plays a role in the down-regulation of photosynthetic efficiency. By manipulation of the dark rest period, we confirm a fine-tuned light/dark cycle could dramatically improve photosynthetic efficiency in microalgae. Our results unveil a novel persistent circadian rhythm on photosynthetic regulation in marine phytoplankton and provide critical insights into the interaction between environmental signals and inheritable internal circadian clocks in diatoms.

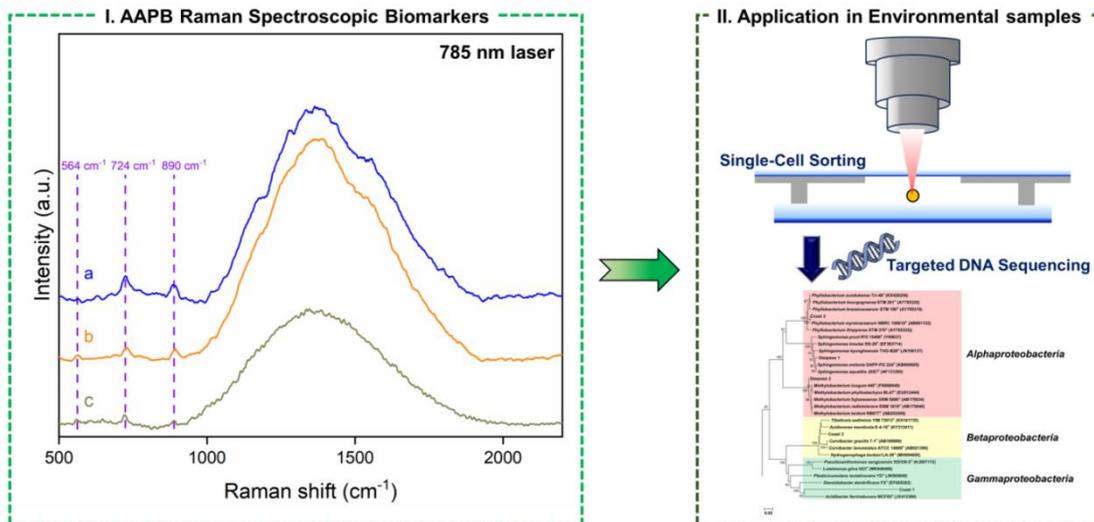


9.5 基于基因组与单细胞拉曼光谱的好氧不产氧光合细菌资源开发研究

徐林 副教授

浙江理工大学

好氧不产氧光合细菌（AAPB）是一类具有好氧异养生存通性，能利用光能进行光合作用补充自身能量需求特性的异养微生物。AAPB 独特的光能利用能力使其在水圈物质循环过程中扮演着重要角色。赤杆菌科细菌是 AAPB 的代表类群，具有数量多、分布广等特征，多数分离自真光层海水或湖水，部分具有光合功能，是研究海洋细菌进化机制的良好材料。本研究基于赤杆菌科模式株，在分类理论、资源挖掘和进化机制中取得了一系列新认识。主要工作如下：（1）通过比较基因组学和系统发育学分析，将该科划分为 16 个属，发现同属类群的 AAI 通常高于 70% 和进化支长通常低于 0.4，据此提出了属级分类单位的新指标及阈值。（2）构建基于细菌叶绿素 a 的拉曼光谱检测方法，获得了具有光合类群特征峰的单细胞，并发现它们均含有光合基因及较多编码代谢氨基酸和无机离子的独有基因。（3）针对该科光合类群，发现了其 PGC 基因排列方式保守，其 GC 含量也与自身基因组 GC 含量相一致，PGC 系统发育与基因组系统发育聚类关系相似，表明 PGC 进化历程与基因组进化历程类似。（4）祖先基因组推演显示光合类群的共同祖先共有 2400 个同源基因，转录组测序发现光照下的无/含蔗糖组有 560 个基因存在表达量差异，无蔗糖组上调表达的基因有 209 个，其中所属于光合基因簇的 *bchLY*、*pufLM*、*pufE* 和 *acsF* 表达量都发生上调。本研究完善了赤杆菌科分类体系，建立了基于细菌叶绿素 a 的拉曼光谱检测方法，溯源了赤杆菌科光合类群进化历程，为全面认识 AAPB 的储碳机制奠定了基础。



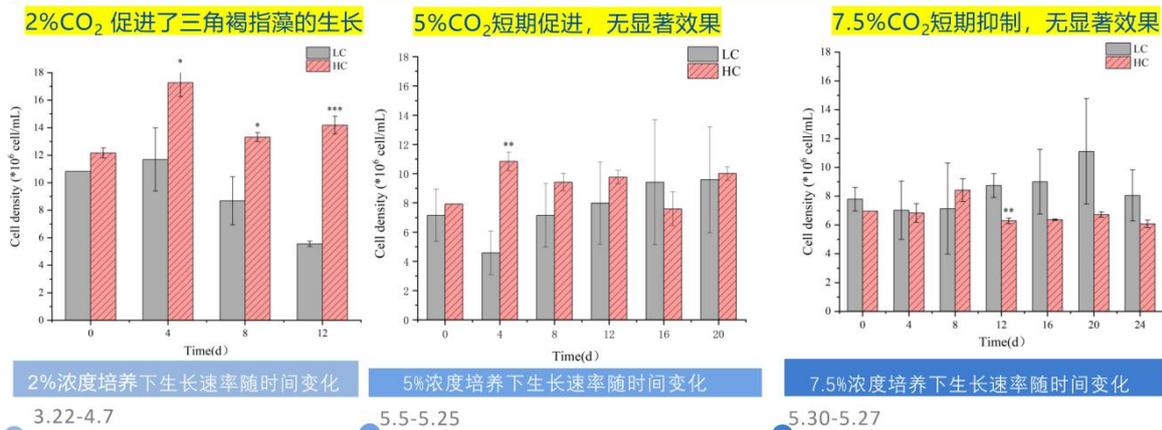
9.6 三角褐指藻油脂及多不饱和脂肪酸生产对高浓度 CO₂ 的响应

高光 副教授

厦门大学

利用工业废气中的高 CO₂ 培养微藻，既能有效固定 CO₂，又可收获微藻用于生物能源或生物制品。以往此领域的研究多集中于使用小球藻等淡水藻类，对具有高生产力的海洋硅藻的研究较为缺乏。本研究针对硅藻对高浓度 CO₂ 不耐受的现状，首次采用逐步升高 CO₂ 浓度的方式 (2%-5%-7.5%) 驯化三角褐指藻 (*Phaeodactylum tricornutum*)，实验周期 341 天，探究三角褐指藻对高浓度 CO₂ 的生理学响应，并在不同 CO₂ 浓度下耦合氮限制诱导油脂、脂肪酸的生产，揭示最佳碳氮诱导策略，探究高浓度 CO₂ (HC) 培养三角褐指藻油脂、脂肪酸生产的最优条件。结果表明，在每个 CO₂ 浓度下培养的前期，2%和 5%CO₂ 促进了三角褐指藻的生长，7.5%CO₂ 对生长没有显著影响；HC 促进了脂质的积累，提高了总脂含量和产率，且随着 CO₂ 浓度的增加，HC 对总脂产率提高的效应更加显著。培养过程中在 5%和 7.5%CO₂ 条件下分别耦合氮限制进行诱导实验的结果表明，短时间的氮限制诱导 (6、12、24 小时) 对三角褐指藻生长没有显著效应，氮限制提高了总脂含量和产率，与 HC 的耦合导致了总脂含量的进一步提升。5%和 7.5%CO₂ 显著提高了三角褐指藻二十碳五烯酸 (EPA)、二十二碳六烯酸 (DHA) 的含量和产率，与氮限制的结合导致了 EPA、DHA 含量的进一步提高。对于 EPA，5%CO₂ 耦合氮限制诱导 24 小时和 6 小时分别是获得最高含量 (24.65 ± 0.58 μg/mg DW) 和产率 (94.25 ± 6.49 fg/cell/h) 的最佳组合；对于 DHA，7.5%CO₂ 耦合氮限制诱导 6 小时达到最高含量 2.41 ± 0.03 μg/mg DW，7.5%CO₂ 处理 6 小时得到最高产率 8.93 ± 0.60 fg/cell/h。本研究的结果在利用三角褐指藻进行生物固碳、生产油脂及多不饱和脂肪酸等方面，提供了必要的实验数据和理论支撑。

/ 生理数据 / 细胞浓度

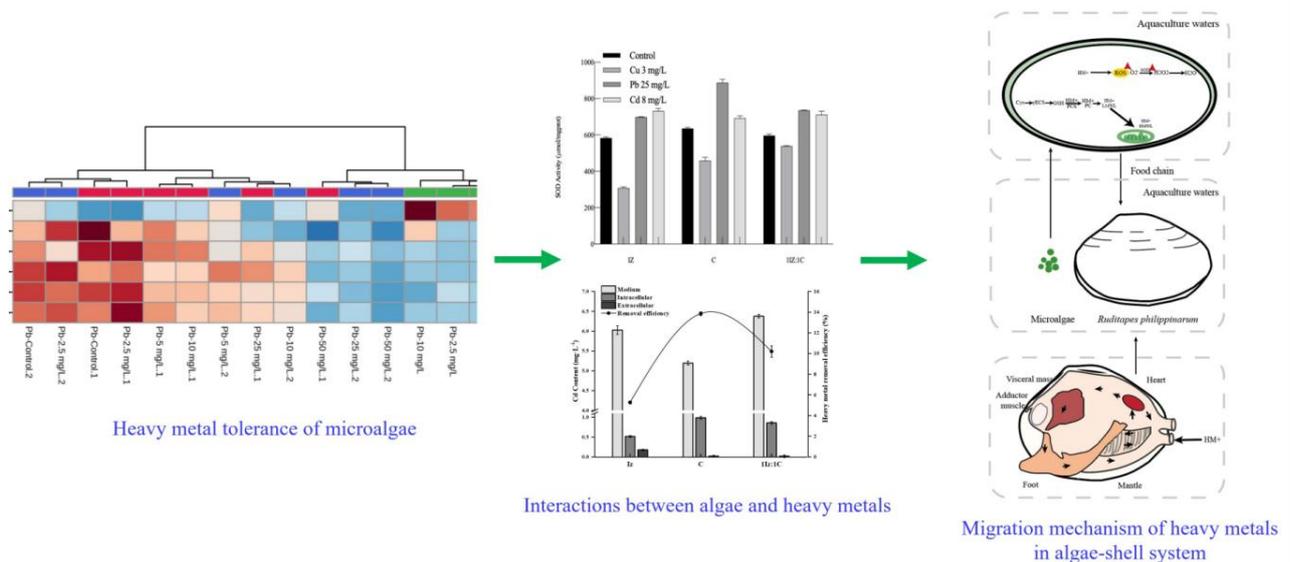


9.7 饵料微藻响应养殖水体污染物的特征及在贝类体系迁移机制

程鹏飞 教授

宁波大学

贝类是典型的水产养殖产品，但因其广泛的摄食行为与特殊的生态地位，成为水体污染物质如重金属等影响的主要对象。微藻是贝类常用饵料，不仅有助于提高贝类产量和品质，还能吸附、富集重金属，减少养殖水体碳排放，发挥调节水质功能。然而在自然养殖水体中往往是多种微藻复合存在。本报告主要讨论养殖水体饵料微藻耐受、富集及转换重金属的特征，探究饵料微藻在养殖过程的可能碳减排路径，评价藻-贝体系迁移重金属的机制，以期为改善养殖水体生态环境，提高养殖贝类产品品质提供理论基础。

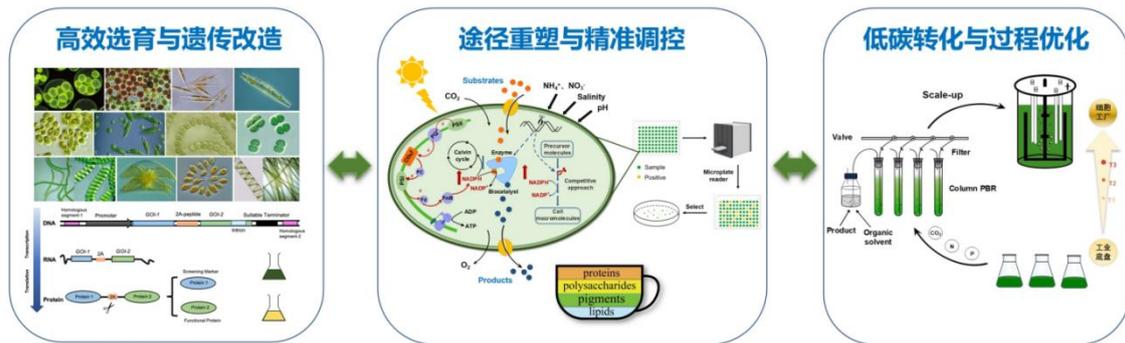


9.8 光驱固碳微藻作为未来食品潜力与挑战

范建华/程鹏飞 教授

华东理工大学

微藻利用太阳能固定 CO₂ 并转化为有机物，以不到高等植物 1% 的生物量为地球提供了超过 50% 的初级生产力和氧气，是光合固碳效率最高的生物类群。通过微藻固碳合成化合物技术的攻关和突破，实现直接利用微藻固定 CO₂，有望建立以 CO₂ 为原料、以太阳能为能源，规模化生产高值产品的未来新兴绿色生物制造产业，对于解决当前面临的粮食安全、蛋白短缺等问题具有重要战略意义。微藻作为一种新的未来食品来源，因而也越来越受到人们关注。随着微藻生物技术的发展，微藻产品，如藻粉、植物基蛋白、色素、多糖、多不饱和脂肪酸等高价值化合物，在功能特性和营养价值等方面表现出许多令人感兴趣的优势，正在逐渐渗透传统食品市场。然而，微藻作为未来食品来源仍存在诸多问题亟待解决，生产成本高、产品接受度低、安全性未知等挑战是目前制约实际应用的瓶颈，需要各领域人士的共同努力，推动微藻食品的发展。



光驱固碳绿色细胞工厂的构建与应用

10 专题九：深远海 CCUS 海洋牧场设计与技术研发

10.1 海藻碳汇牧场构建技术，助力实现国家双碳目标

连宇顺 教授
河海大学

规模化的海藻碳汇牧场，将有助于实现国家双碳目标，应对全球气候变化问题。因此国内外目前正在积极发展海洋碳汇牧场的构建技术，海藻养殖产业呈现出由近岸向离岸、海藻牧场和海上风电同场的发展趋势。为了构建安全可靠的深水系泊式海藻碳汇牧场，需要探究和把握离岸深水复杂海况下系缆服役力学性能、系泊式海藻牧场的动力响应和碳汇经济效益评估。本项研究将探究高强聚乙烯纤维缆绳应用至海藻牧场的可行性，提出系泊式海藻牧场的设计分析流程，构建并验证了海藻数值模型，探究了缆绳淹没深度和海藻养殖间距对海藻牧场动力特性的影响。此外，基于海藻牧场的全寿命周期碳汇和，对系泊式海藻碳汇牧场进行了经济效益评估，本项研究的成果可为规模化系泊式海藻碳汇牧场的建设提供重要参考。

典型成果

- 2021年指导学生团队Kelp Farm Career 获马斯克基金会的XPRIZE最高奖。
- 2024年海藻碳汇牧场构建技术方案，入围Xprize全球碳去除技术的Top100。

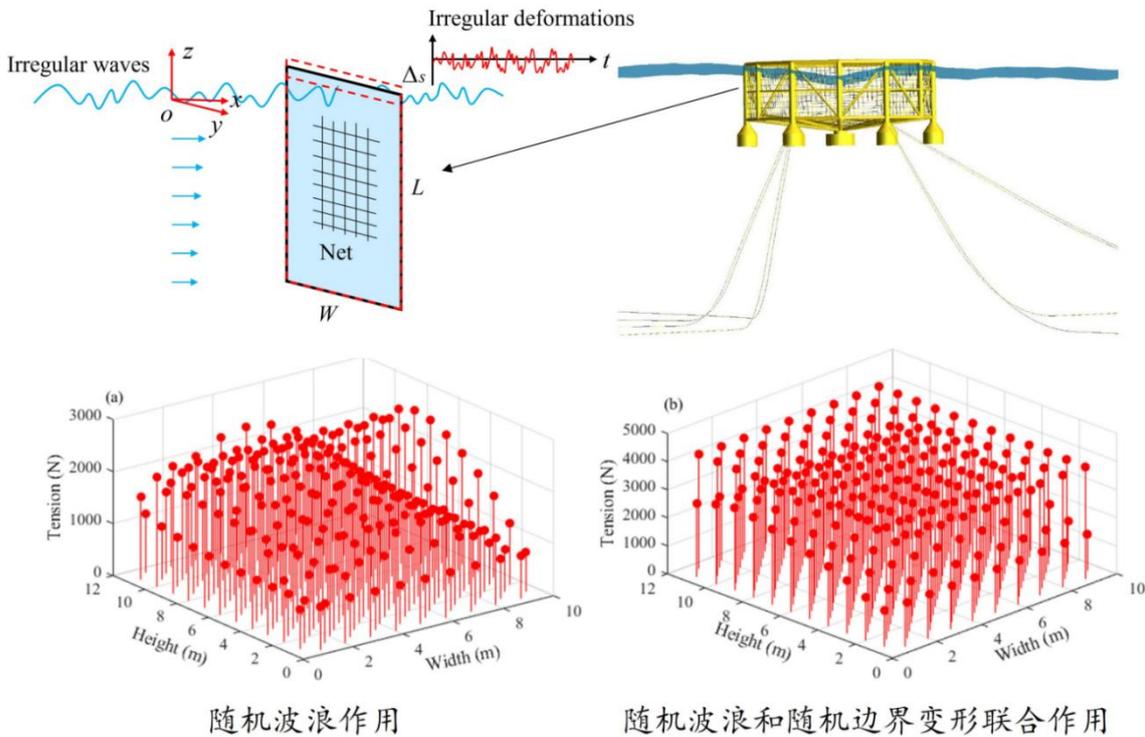


10.2 随机波浪与随机边界变形成合作用下网衣的动力特性研究

谢武德 讲师

山东大学(威海)

开展深远海养殖是海水养殖产业发展的必然趋势。在深远海波浪更大、海流更急，对养殖网箱的安全有更严格的要求。本研究采用集中质量法模拟大面积网衣的三维非线性运动，采用势流理论刻画外界随机波浪场，基于 Morison 公式和 Screen 模型计算网衣受到的水动力载荷，详细分析了随机波浪和随机边界变形成合作用下网衣的动力响应特性。研究表明：网箱框架结构的随机弹性变形将使网衣的运动响应变得更加复杂，频率更加丰富，网线张力变大，更容易发生破坏。



11 专题十：深海物质能量循环与碳封存

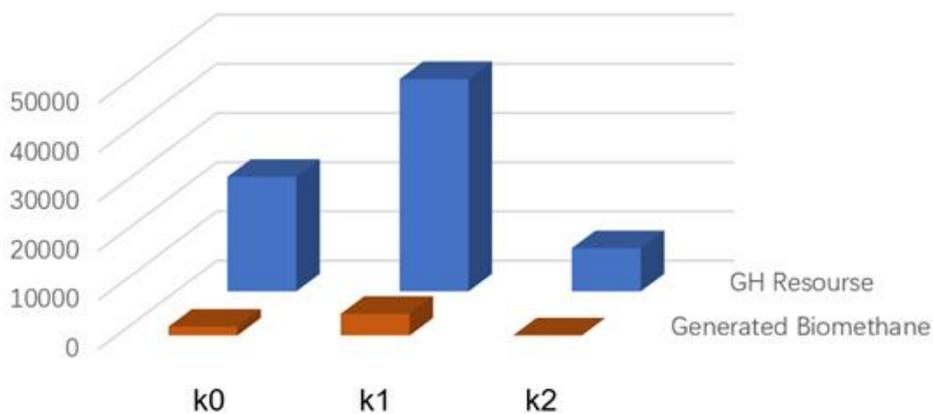
11.1 南海白云凹陷生物气生成与天然气水合物成藏的不确定性分析

苏丕波/程怀/朱作文 正高级工程师

广州海洋地质调查局三亚南海地质研究所

天然气水合物被认为是 21 世纪理想清洁能源之一，具有资源丰富的优势。大量研究表明，天然气水合物矿体的气体主要来源于海底沉积物有机质产生的生物成因气和热成因气，但由于起源不同，两者对水合物成藏的贡献大小尚不明确，直接影响到水合物资源潜力评价与后续勘探找矿部署。本研究利用 PSM 定量模拟生物成因气生成模式的不确定性及其对南海白云凹陷天然气水合物空间分布和资源评估的影响。模拟结果显示，（1）生物气的生成受热状态和有机物类型的显著影响，在较浅的沉积物中，当有足够的甲烷气体时，低温是发生气体水化的主要原因之一，这可能是天然气水合物堆积层上覆沉积物的导热性较高、沉积物埋藏速度较慢或其他地质过程造成。（2）天然气水合物资源受生物成因气生成量的显著控制。除烃源岩或沉积物的热条件外，有机质的性质是另一个重要的生气控制因素。一般来说，低温产甲烷菌由于其需要的能量较少而可以生成更多的甲烷气体；而高温产甲烷菌产生甲烷气体需要的能量较多，因此产生沼气的量较少。（3）生物成因气成熟模型是控制天然气水合物聚集位置和资源量的关键因素。K0、K1 和 K2 三种可能的生气模式在不同的时间产生不同的沼气的量，最终产生不同的天然气水合物资源量。此外，生物气源岩中各种甲烷菌的保存也会改变成藏位置。

Comparison of Generated Biomethanes and Gas Hydrate Resources (Megatons)

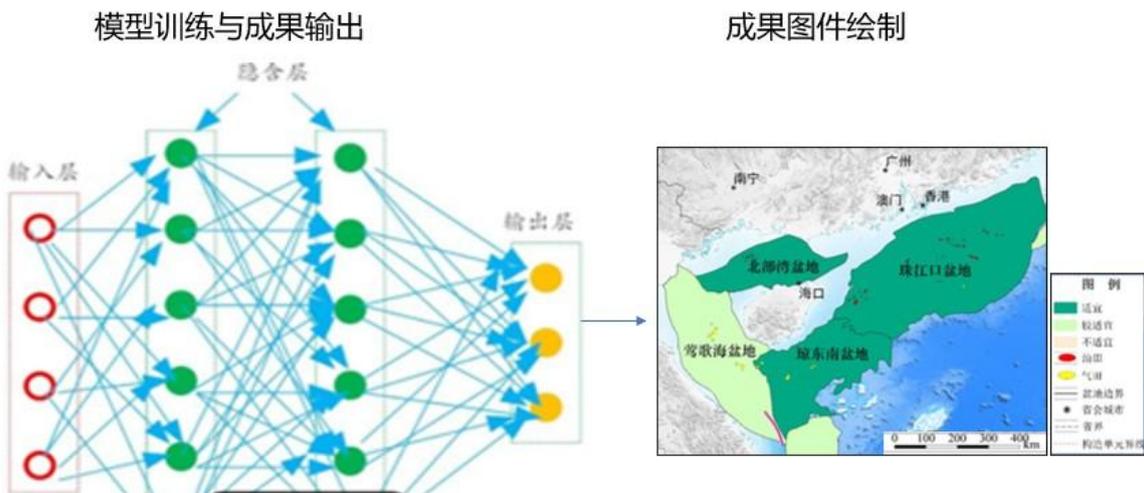


11.2 基于机器学习的盆地尺度 CO₂ 封存选址评价

付玉通 高级工程师

广州海洋地质调查局三亚南海地质研究所

二氧化碳 (CO₂) 地质封存是一种有效的减缓气候变化的技术, 其关键步骤之一是选择合适的封存地点。前人已开展大量的盆地尺度 CO₂ 封存选址研究, 积累了丰富的资料数据和研究成果。利用机器学习方法, 对盆地尺度的 CO₂ 封存选址进行评价: 首先, 通过收集地质、地球物理、地球化学和生产数据等开源数据, 建立了一个综合数据集; 然后, 采用数据预处理技术, 包括数据清洗、特征选择和数据标准化, 以提高模型的准确性和效率; 在模型训练阶段, 本研究比较了多种机器学习算法, 包括人工神经网络 (ANN) 和极端梯度提升 (XGBoost), 通过交叉验证和参数优化, 选择了最优模型, 并使用独立的测试数据集对训练好的模型进行验证, 验证结果表明, XGBoost 模型在预测精度和泛化能力方面表现最佳; 最后, 将训练好的模型应用于我国南部海域的盆地尺度 CO₂ 封存选址评价中, 必选出了适宜 CO₂ 封存的盆地。模型能够准确地识别出具有高封存潜力的区域, 展示了机器学习在 CO₂ 地质封存选址中的应用潜力。

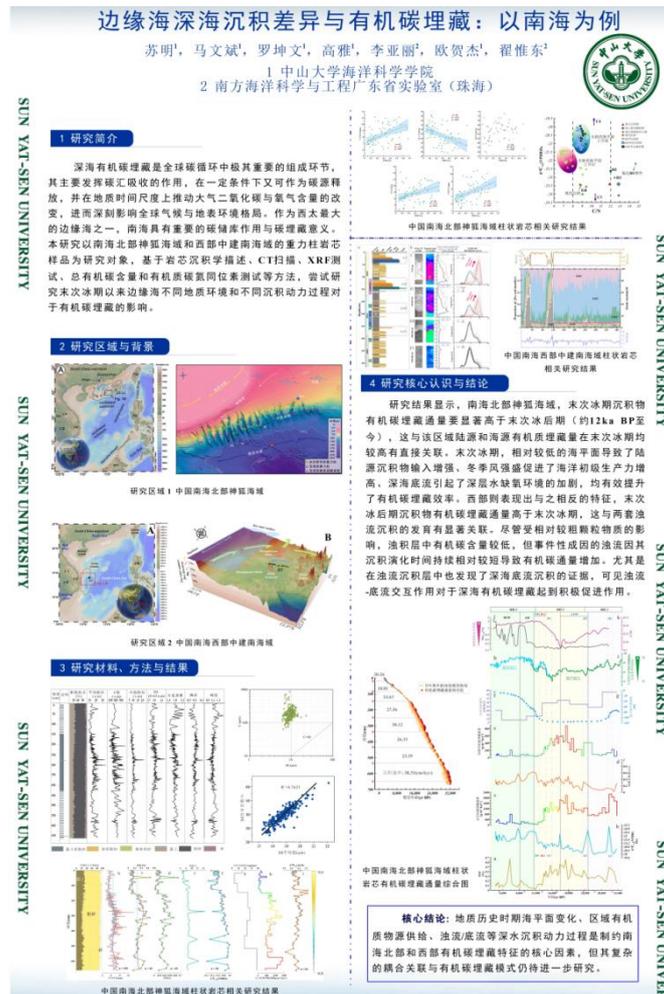


11.3 边缘海深海沉积差异与有机碳埋藏：以南海为例

苏明 教授

中山大学

本研究以南海北部神狐海域和西部中建南海域的重力柱岩芯样品为研究对象，基于岩芯沉积学描述、CT扫描、XRF测试、总有机碳含量和有机质碳氮同位素测试等方法，尝试研究末次冰期以来边缘海不同地质环境和不同沉积动力过程对于有机碳埋藏的影响。研究结果显示，南海北部神狐海域，末次冰期沉积物有机碳埋藏通量要显著高于末次冰后期（约12 ka BP），这与该区域陆源和海源有机质埋藏量在末次冰期均较高有直接关联。末次冰期，相对较低的海平面导致了陆源沉积物输入增强、冬季风强盛促进了海洋初级生产力增高、深海底流引起了深层水缺氧环境的加剧，均有效提升了有机碳埋藏效率。西部则表现出与之相反的特征，末次冰后期沉积物有机碳埋藏通量高于末次冰期，这与两套浊流沉积的发育有显著关联。尽管受相对较粗颗粒物质的影响，浊积层中有机碳含量较低，但事件性成因的浊流因其沉积演化时间持续相对较短导致有机碳通量增加。尤其是在浊流沉积层中也发现了深海底流沉积的证据，可见浊流-底流交互作用对于深海有机碳埋藏起到积极促进作用。因此，地质历史时期海平面变化、区域有机质物源供给、浊流/底流等深水沉积动力过程是制约南海北部和西部有机碳埋藏特征的核心因素，但其复杂的耦合关联与有机碳埋藏模式仍待进一步研究。

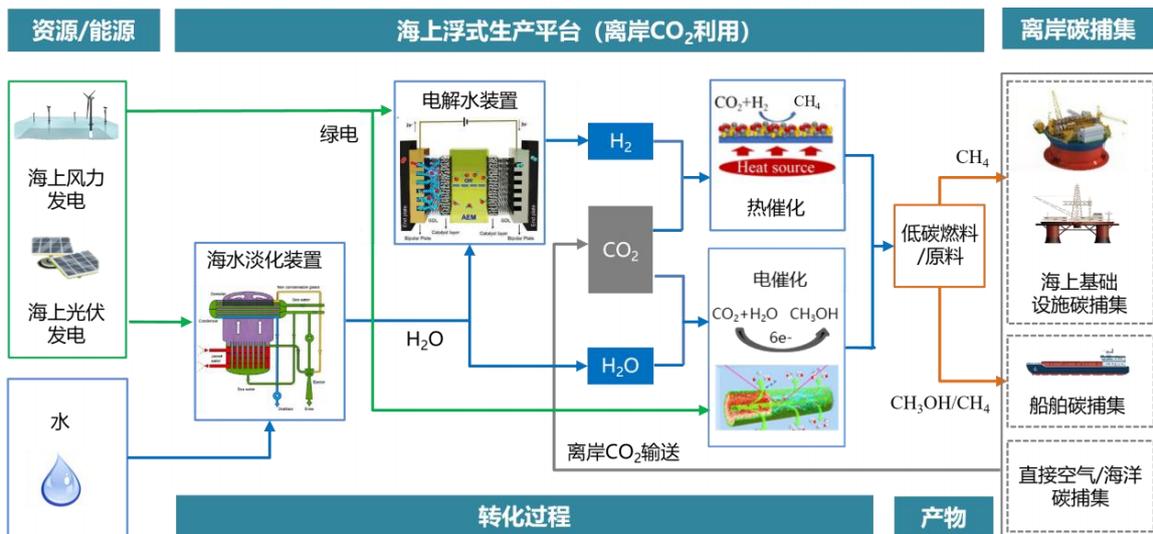


11.4 离岸 CO₂ 捕集与转化利用技术研究

余伟胜 工程师

中国海洋工程装备技术有限公司

全球海事与油气行业碳中和目标的设立以及海上可再生能源产业的快速发展，催生了离岸 CO₂ 捕集和 CO₂ 化学利用技术（offshore CO₂ capture and chemical utilization, OCCCU）的研发应用需求。基于 OCCCU 技术与船舶运输、海洋油气及海上可再生能源产业链之间的匹配度分析，明确了离岸 CO₂ 捕集技术和离岸 CO₂ 化学利用技术重点发展方向，评估了离岸固定式、移动式、分布式 CO₂ 捕集技术和离岸 CO₂ 还原性化学转化利用技术发展现状与创新路径。并结合典型应用场景，提出了基于浮式生产平台的 CO₂ 加氢制甲烷和 CO₂ 电催化制甲醇技术路线。通过海洋工程与化学工程的跨领域耦合，OCCCU 技术能够有效推动海上油气、船舶运输等不同行业的低碳协同发展，同时为海洋可再生能源开发与利用提供可行技术路径和商业化基础，更可为培育海洋领域新质生产力注入大量创新和绿色元素

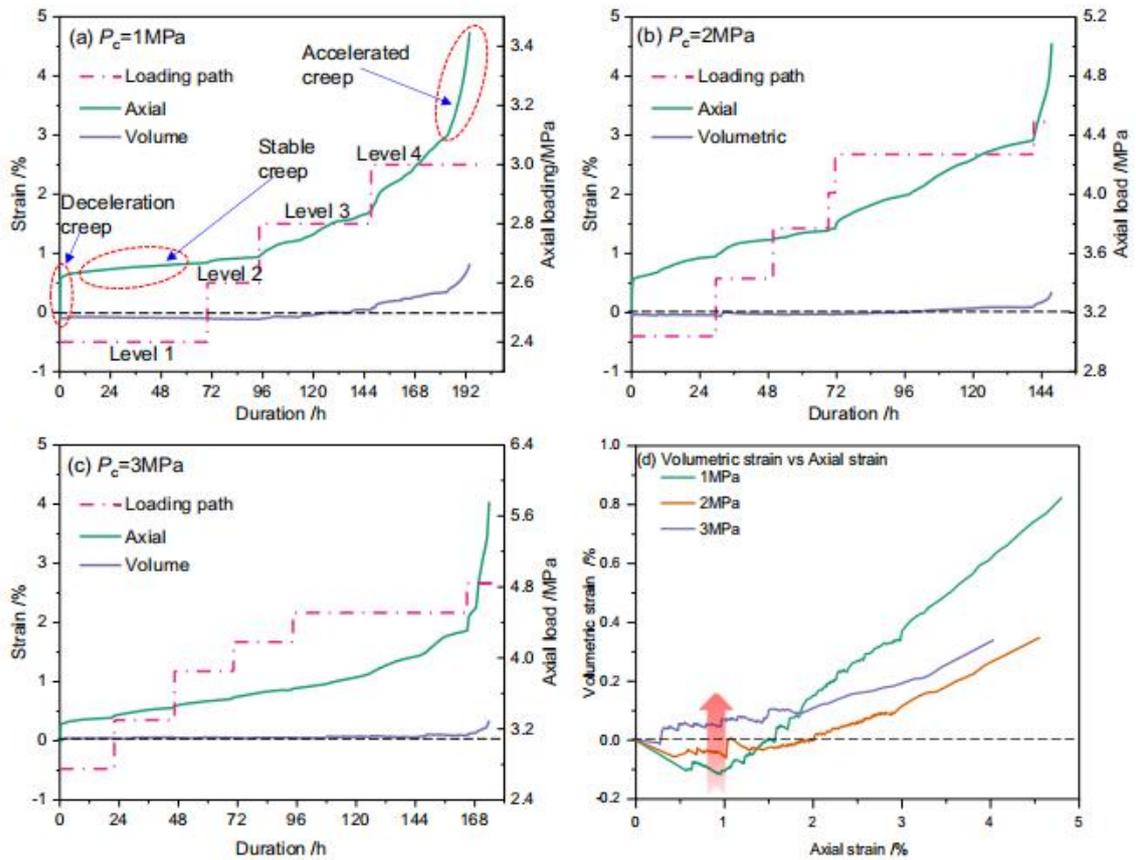


11.5 天然气水合物对深海甲烷循环的阀门效应初探

李彦龙 研究员

崂山实验室

本报告将简要阐述全球甲烷水合物分布对水体、大气中甲烷浓度的调节作用，综述极地水合物系统冷泉系统季节性休眠对水体重甲烷浓度的调控机制。探讨利用声学响应行为分析水合物地层蠕变行为的方法及其启示意义。



11.6 海上二氧化碳地质封存技术路径——从浅海到深海

李鹏春/邱宁 副研究员

中国科学院南海海洋研究所

海洋是地球上最大的活跃碳库，碳封存潜力巨大。沿海经济发达区带密集，碳排放源集中、排放强度大，对大规模海洋地质碳封存需求强烈，因此，海上地质碳封存正在成为沿海发达国家和地区碳封存的主要路径，海洋地质碳封存技术、产业正在加速迭代，将成为全球 CCUS 和实现“双碳”目标的重要支撑。北海、墨西哥湾、珠江口等都在相继探索海上 CCUS 项目集群。目前中国第一个海上碳封存项目——“恩平 15-1” CO₂ 封存示范项目已投入运行，同时多个海上咸水层封存和 CO₂ 驱油提高采收率项目也已启动，我国沿海的区域海洋地质碳封存集群发展趋势已凸显。目前随着碳中和目标的持续推进，海洋地质碳封存技术也在不断拓展和创新中，已从近岸浅海封存扩展到深海，包括深海碳封存、水合物固碳等，然而海洋地质 CO₂ 封存技术体系和发展路径的系统研究仍较欠缺。本项研究通过借鉴和分析国内外先进经验和技术进展，针对我国海洋地质碳封存技术体系，将依据封存地质层位属性，划分海上咸水层封存、海上油气田封存、海底火山岩矿化封存及海底浅层沉积物封存等四类子技术，评估测算其固碳潜力，分析中长期发展愿景目标，初步探讨海洋碳封存的技术体系和整体发展路径。



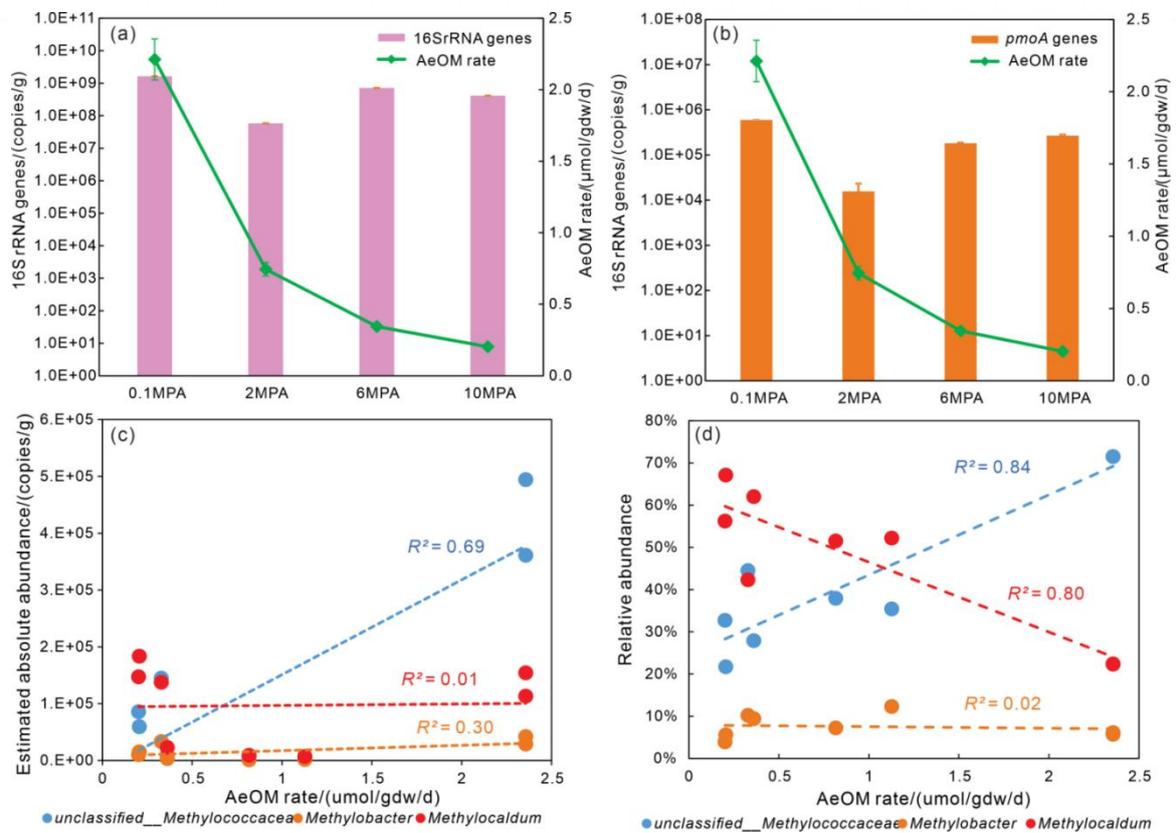
注：根据自然资源部标准地图服务系统GS(2019)4346号的标准地图制作，底图边界无修改。

11.7 深海好氧甲烷氧化菌的生理特性及其驱动的甲烷“汇”潜力研究

李晶 副研究员

中国地质调查局青岛海洋地质研究所

海底好氧甲烷氧化菌驱动的甲烷“汇”过程是海洋甲烷迁移转化的重要环节之一，在海洋碳循环中扮演着重要角色。以南海水合物区浅表层沉积物为例，开展了基于微生物富集培养的室内模拟实验，研究发现深海好氧甲烷氧化菌具有独特的生理特性，揭示了深海高压影响下的甲烷生物“汇”特性。



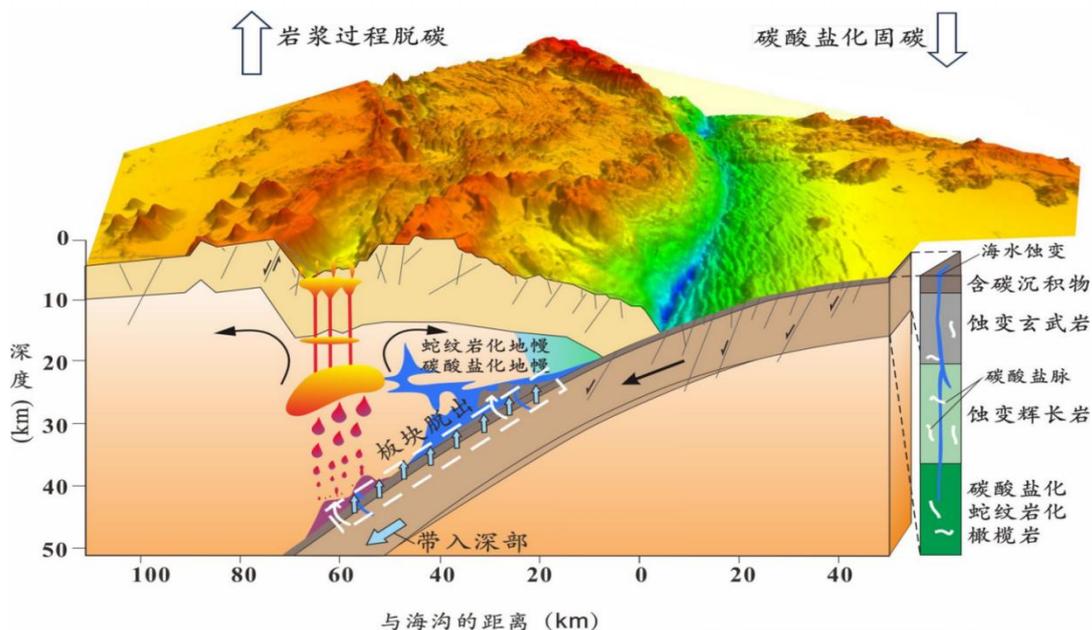
12 专题十一：极地多圈层碳循环

12.1 深渊俯冲系统多圈层碳循环的研究现状与挑战

赵明辉 研究员

中国科学院南海海洋研究所

多圈层碳循环涉及大气圈、水圈和岩石圈之间的碳转移，在控制地球气候宜居性方面发挥着至关重要的作用。21世纪初，科学界就认识到地球内部（地幔/地核）可能是巨大的碳库，地球上90%以上的碳可能储藏在地球深部（Dasgupta & Hirschmann, 2010）。碳可以通过多种方式和途径实现能量物质循环，而俯冲过程和岩浆作用是地表系统和地球内部之间碳循环的主要途径。俯冲带多圈层深部碳循环过程主要包括：地表碳主要以碳酸盐矿物和有机碳的形式通过板块俯冲被带入地球深部（碳输入通量）（Kelemen & Manning, 2015; Plank & Manning, 2019; 刘勇胜等, 2019），而深部碳以变质脱碳、流体溶解、富水熔融等作用，促使碳脱离俯冲板片，以含碳酸盐熔体和CO₂气体等形式返回地表（碳输出通量）（Kerrick & Connolly, 2001; Poli, 2015; 魏春景和郑永飞, 2020）。碳再循环效率（即释放碳通量与输入碳通量的比值），可以改变大气中CO₂的浓度，控制地球不同含碳储库通量，影响全球气候的长期和短期变化，在塑造宜居地球的过程中极为关键（Duncan et al et al., 2017; 朱日祥等, 2021; 徐义刚等, 2024; 沈树忠等, 2024）。然而，受限于深海探测技术与采样技术的限制，“挑战者深渊”俯冲过程中，碳的输入/折返形式、迁移机制和输入/输出通量等方面，存在着严重的认知误差。“挑战者深渊”系统是俯冲带的端元案例，为中国科学家团队在国际地球科学领域取得领先优势和重大突破提供了机遇和舞台。未来可开展多学科联合攻关，在以下几方面开展研究：（1）如何准确约束碳循环通量？（2）如何示踪碳循环路径与过程？（3）计算模拟俯冲碳输入的归宿及脱碳机理如何？从而建立多学科数据相互约束的、完整的碳循环过程地质模型，服务于地球宜居性这一世界前沿科学问题。

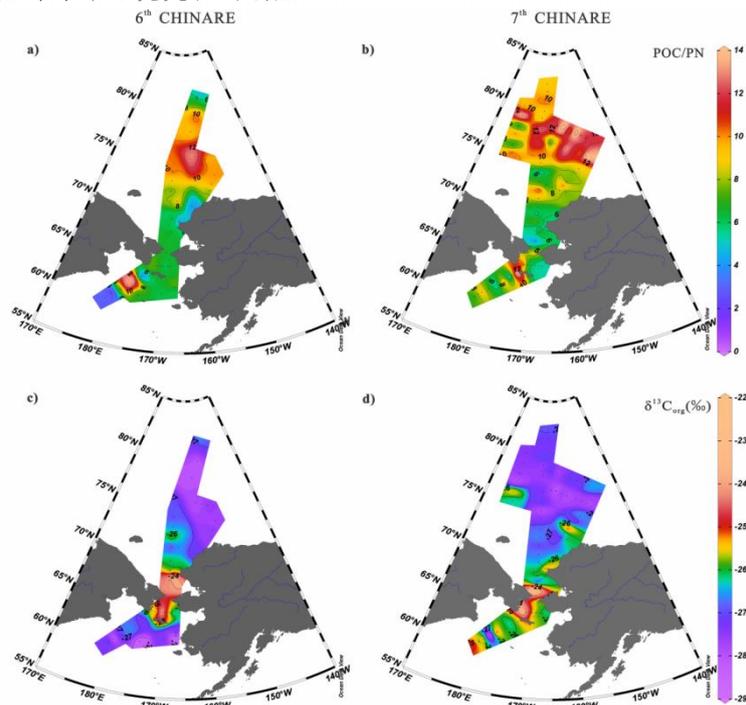


12.2 海冰运输与北冰洋盆地区表层水体颗粒有机质组成与来源

于晓果 研究员

自然资源部第二海洋研究所

全球变暖背景下，北冰洋海冰的分布面积及厚度逐年减退，深刻影响着北极海域物质与能量的传输，以及生态系统的变化。北冰洋海盆初级生产力低，其表层海水颗粒有机质的来源一直存在争议。一方面，其颗粒物具有较轻的碳同位素组成和较高的 C/N 比值 (>12)，具有陆源有机质来源为主特点；同时，其远离陆地、河口，陆源有机质的来源与输运机制有待进一步探讨。另一方面，现场观测发现，盆地区冰下藻类勃发，海洋初级生产力增高。海冰作为北冰洋生态环境中的重要组成部分，不仅可以作为载体，将近岸陆源物质输运至北冰洋盆地区，其中的冰藻也是盆地区的初级生产力的重要组成部分。了解盆地区颗粒有机质的组成与来源，特别是海冰对颗粒有机质的贡献，有助于我们更加深入了解北冰洋高纬度区域的沉积作用过程、碳循环，以及其海冰中有机质对海洋环境变化的响应。本研究依据不同海洋环境条件下的第七次（2016 年 8 月，表层水温相对高，盐度低，海冰分布面积较少）和第 9 次（2018 年 8 月，表层水温相对正常，盐度略高，海冰分布面积较多）中国北极科学考察（以下分别简称为 7 北和 9 北）期间所采集的 15 个站位的冰芯样品，结合 5 北（2012 年）、6 北、7 北和 9 北（2018 年）海盆区进行了颗粒物浓度、颗粒有机碳含量及其稳定同位素分析，以及扫描电镜观测。结果表明，冰芯上部和底部颗粒物具有不同的组成和来源。海冰上部（自冰面向下 60–80cm 深度范围内）颗粒物浓度低（一般 $<27\%$ PDB），具有陆源有机质特征；而海冰底部（10–60cm）颗粒物浓度高（最高可达 12.3mg/L），颗粒物以硅藻为主，含部分甲藻胞囊，具有较重的碳同位素组成（ $\delta^{13}\text{C}$ 值： $-12.2\text{--}26\%$ PDB），具有海洋自生来源的特征。北冰洋表层海水颗粒物颗粒物中结合 TOC/TN (wt%) 多 >15 等特征，与北冰洋盆地区颗粒有机质具有很好的可比性。此外，7 北所采集相邻区域的冰芯长度普遍短于 9 北，其中的颗粒物浓度亦相对较低，推测可能与 2016 年研究区内海冰融化较早，采样时已过海冰中颗粒物集中向水体中释放期有关，反映了冰芯中颗粒有机质含量对海洋环境变化的响应。



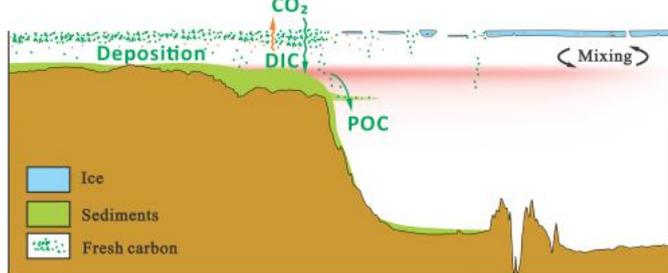
12.3 晚更新世以来北冰洋有机碳的埋藏与释放

叶黎明 副研究员

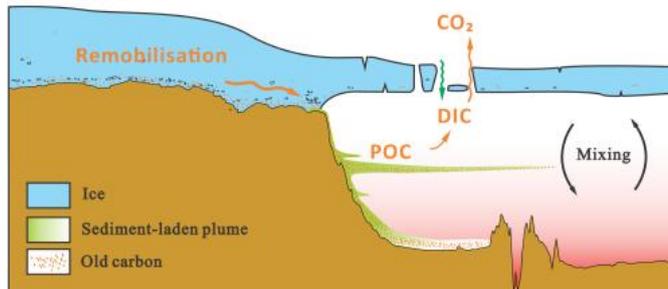
自然资源部第二海洋研究所

北冰洋吸收大气 CO_2 的能力同时受控于有机碳的埋藏和释放，调查晚更新世以来北冰洋初级生产力、有机碳运输、埋藏和降解程度的时空变化，有助于解析气候转型期北冰洋的源汇特征及其对全球变化的驱动作用。结果表明，陆源和海相有机碳在上层水体中的动力分选是调节其空间分布、降解程度和气候反馈的一级因素。易悬浮的部分陆源有机碳会在水体和最上层沉积物中遭受强烈降解，并在数百年内返回气候系统，而快速沉降的海相有机碳有更大的概率被埋在沉积物中并经历持续性降解，这部分有机碳在千年时间尺度上可以有效地增强北极地区的碳汇能力。然而，埋藏在北冰洋和北欧海北部的有机碳主要源于冰川剥蚀的陆地和陆架沉积物，而非初级生产力。再迁移有机碳的降解可显著增加海水中溶解无机碳 (DIC) 含量，可以达到现有 DIC 库存的 15~26%。如此巨量 DIC 的释放对海洋吸收大气 CO_2 的能力构成了挑战，有潜力将北冰洋和北欧海北部转变为碳源。我们的研究结果为北冰洋和北欧海北部在调控大气 CO_2 浓度中的作用提供了新见解，强调了对北极碳释放及其广泛的气候影响进行更精确研究的迫切需求。

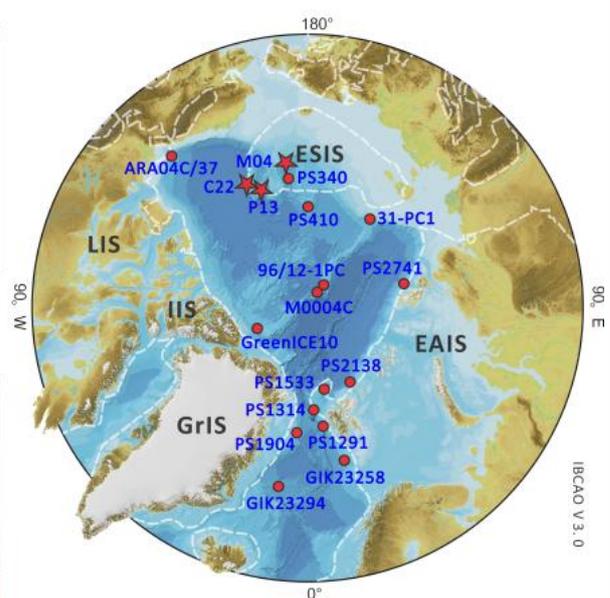
a) Modern/Interglacial period



b) Glacial period



c) Geographic setting and core Locations

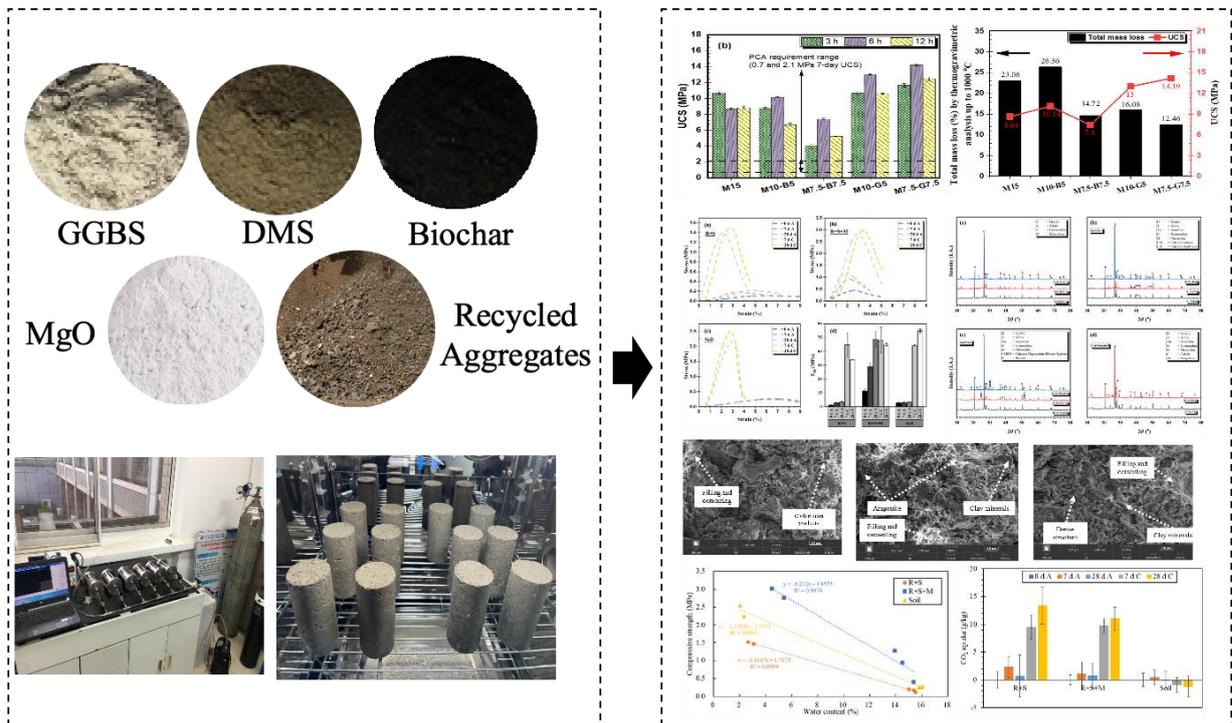


12.4 疏浚海洋土稳定与 CO₂ 固化：助力碳减排与资源循环的新思路

侯赞璐 博士后

中国科学院武汉岩土力学研究所

随着环保意识的增强和资源回收需求的增长，疏浚海洋土壤（DMS）作为一种重要资源受到广泛关注。在实现“双碳”目标的背景下，本研究探索了在稳定 DMS 过程中实现碳减排与资源循环的可行性，并提出了一种创新方法，以提升 DMS 的稳定性和 CO₂ 固化效果。研究采用含补充胶凝材料（SCMs）的反应性镁（rMgO）在不同环境条件下对 DMS 进行稳定化处理。实验结果表明，处理后的 DMS 达到了建筑应用所需的抗压强度（0.7 - 2.1 MPa）。通过部分用生物炭和粒化高炉矿渣（GGBS）替代 rMgO，显著提升了土壤的工程性能和 CO₂ 吸收能力。其中，生物炭增加了孔隙率，提高了 CO₂ 吸收和延展性，而 GGBS 则提高了干密度和强度。这些改进降低了系统的碳足迹和能耗，同时增强了环保效益。结合再生骨料和 MgO 的使用，进一步增强了 DMS 的机械稳定性和 CO₂ 固化能力，碳封存效率达到 27 克/千克。研究表明，MgO 和固废材料的联合使用不仅巩固了 DMS 的稳定性，还促进了 CO₂ 封存和废物回收的双重效益，为实现碳减排和资源循环提供了有力支持。



13 专题十二：OCCUS 国内外标准的研究和制定

13.1 海域二氧化碳地质封存目标区优选调查

曹珂 高级工程师

中国地质调查局青岛海洋地质研究所

二氧化碳地质封存是实现碳达峰碳中和的兜底技术，海域二氧化碳地质封存具有封存潜力大、安全性高、环境风险小等特点，得到多国政府、工业界、学术界的高度关注。我国海域地壳稳定性好、沉积盆地分布广、地层厚度大、构造地层圈闭多，二氧化碳地质封存潜力巨大，但尚未开展系统的选区工作。为进一步开展我国二氧化碳地质封存选区调查，支撑我国实现碳达峰碳中和，拟制定海域二氧化碳地质封存目标区优选调查规范，规定海域二氧化碳地质封存目标区优选调查工作的目的任务、调查内容、设计书编制与审查、调查方法和技术要求、潜力计算和目标区优选方法、数据库建设及成果报告编制要求等方面的技术要求。

分类要素	类型		
	I类	II类	III类
区域碳封存地质条件	区域构造、地层、沉积及地球物理解译结果等表明区域碳封存地质条件有利	区域构造、地层、沉积及地球物理解译结果等表明区域碳封存地质条件较有利	区域构造、地层、沉积及地球物理解译结果等表明具备区域碳封存地质条件
地质构造落实程度	构造和断裂落实程度高，构造稳定、经历的强烈构造运动次数少、断裂不发育	构造和断裂落实程度中等，构造较稳定、破坏性断裂不发育	构造和断裂落实程度低
圈闭落实程度	圈闭落实程度高，可靠程度高	圈闭落实程度中等，可靠程度中等	圈闭落实程度低，可靠程度中低
储层地质条件	储层地质条件好，分布稳定，孔隙度、渗透率高、连通性好、孔隙水水文地质条件好	储层地质条件中等，分布较稳定，孔隙度、渗透率中等、连通性中等、孔隙水水文地质条件较好	储层地质条件不好，分布不稳定，孔隙度、渗透率低、连通性差、孔隙水水文地质条件差
盖层地质条件	盖层地质条件好，厚度大，分布稳定，封盖性好	盖层地质条件一般，厚度中等，分布较稳定，封盖性较好	盖层地质条件差，厚度小，分布不稳定，封盖性差
储盖组合条件	储盖组合条件好，空间配置关系好	储盖组合条件中等，空间配置关系中等	储盖组合条件差，空间配置关系差

13.2 二氧化碳地质利用与封存项目监测范围确定技术指南

李琦 教授

中国科学院武汉岩土力学研究所

目前，我国针对二氧化碳地质利用与封存项目中的环境风险管理研究停留在初步的风险识别阶段，主要是对可能造成的风险进行分析但缺少针对二氧化碳地质利用与封存项目风险管理空间范围的确定。地质利用与地质封存项目的监测范围需要考虑可能会受到注入活动影响的地上和地下空间，由于复杂的地下条件与地下空间的不可见性，以及仅有少数几个试点工程，缺乏实际工程资料的支撑，因此需要更多的工作以完善支撑《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南（试行）》中关于环境风险管理范围的确定。同时，现有标准多是针对二氧化碳地质利用与封存项目监测方法的制定，当前很多二氧化碳地质利用与封存项目都需要监测，监测范围大小需要界定，但缺少系统性监测区域标准。《二氧化碳地质利用与封存监测范围确定技术指南》将成为我国第一个对二氧化碳地质利用与封存项目的监测范围的行业标准。此标准的发布将会引导国内二氧化碳地质利用与封存监测范围的深入研究，为我国未来二氧化碳地质利用与封存项目的开展提供风险评价依据，有效解决目前二氧化碳地质利用与封存项目实践过程中面临的相关技术规范缺乏等亟待解决的问题，减少利益相关方的各种顾虑，确保二氧化碳地质利用与封存项目的顺利开展。

标准范围与主要内容

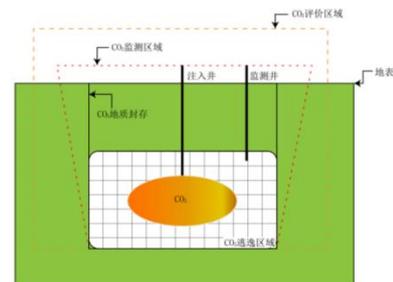
3. 基本原则

二氧化碳地质利用与封存的监测时间范围需包括注入前、注入中、场地关闭及关闭后。监测时间需要考虑到所使用的方法和技术，以及被采样介质的性质和测量的类型。依据有关监测技术方法和标准（HJ 2.2、HJ 610、HJ/T 166），确定监测频率。

监测的空间范围通常包括因二氧化碳封存可能产生影响的区域，即审查区域。其主要确定原则为：

- (1) 监测范围可通过二氧化碳在地下的运移行为来确定；
- (2) 监测范围需覆盖海底和地下的所有注入场所、相关工业设备、考虑周边的井、断裂等可能通道的存在。

基于以上原则确定的监测区域需覆盖二氧化碳逃逸区域，并依据有关监测技术方法和标准确定不同要素的监测范围。

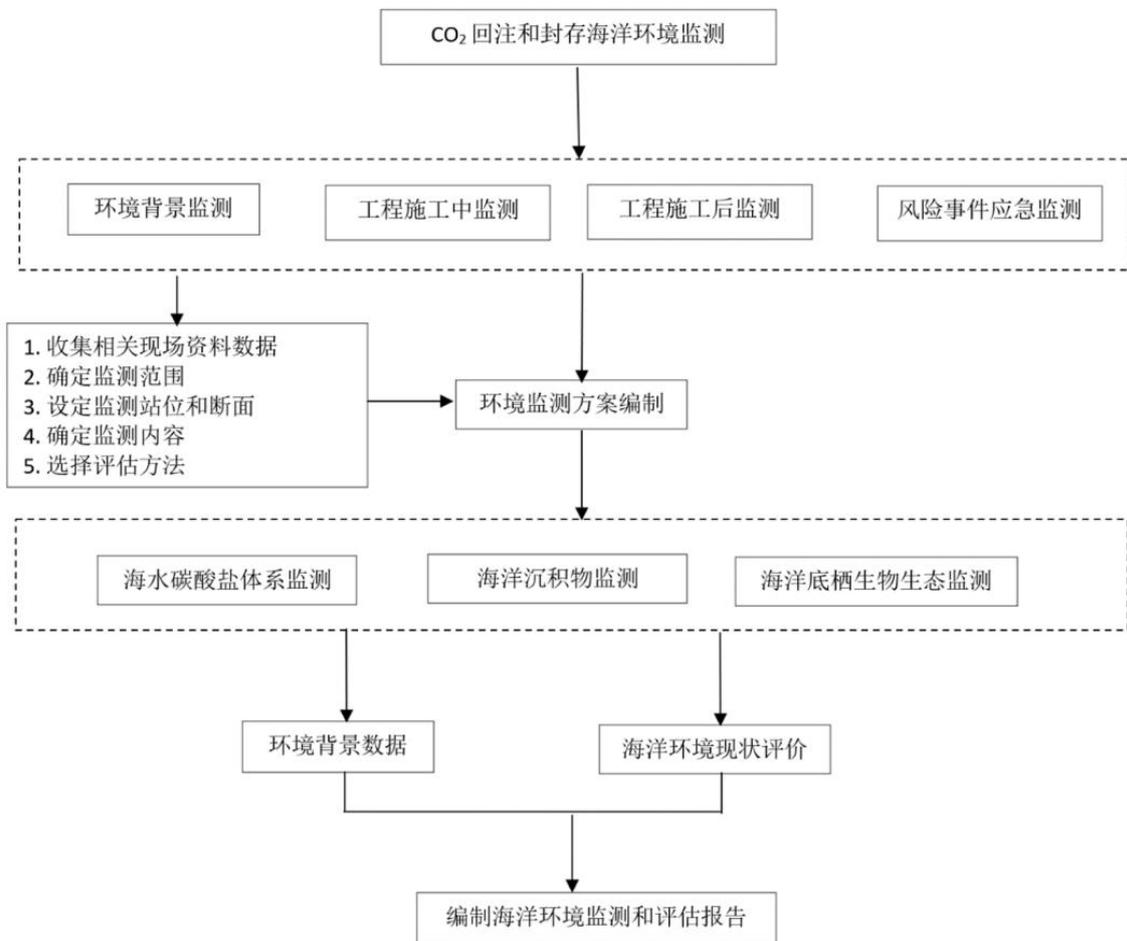


13.3 《海上二氧化碳回注工程生态环境监测与评价指南》制定思路和探讨

唐宏 工程师

自然资源部南海生态中心

海上二氧化碳地质封存潜力巨大，可为碳达峰碳中和目标的实现提供重要支撑。可是海上二氧化碳封存工程的开展势必会影响复杂的海洋生态环境，为确保工程不会对海洋生态系统造成不可逆的伤害，进行全面的生态环境监测与评价至关重要。尽管国际上海洋碳封存项目已经开展多年，但相关的海洋生态系统监测和评价工作，可供参考的资料相对较少，且尚未形成系统性的规范或标准。因此，我们通过参照国内法律法规和标准规范，结合海区海-气二氧化碳交换通量监测成果，总结国内首个海上二氧化碳回注工程项目典型油气工程的二氧化碳背景监测经验，立足生态环境监测实际，从监测方案设计、外业调查开展、数据处理分析、生态环境评价和报告编制等方面进行技术指标探讨，编写了《海上二氧化碳回注工程生态环境监测与评价指南》初稿，并将在随后的工作中逐步完善该指南。指南可为海上二氧化碳地质封存的生态环境监测工作提供科学、规范、可操作的指导方案，确保项目在保护海洋生态系统的前提下开展，为碳达峰碳中和目标的实现贡献力量。



13.4 搭建平台，让中国海洋技术标准快速走向世界

马乐天/冯旭文 副研究员

自然资源部第二海洋研究所

海洋技术既是海洋理论研究成果的应用，也是深化研究的条件和手段，势必成为全球科技竞争的重要前沿。海洋技术发展的过程需要实现跨行业、跨技术领域的学科交叉。近年来，其发展呈现出两方面的热点：一方面是传统海洋装备的智能化升级，另一方面是新兴技术的快速应用。在此过程中，基于共识的标准则为新观念和新技术的实践提供了必要支撑。海洋技术国际标准是在国际市场上扩大技术优势的重要途径，各海洋大国无不高度重视，并积极借助国际标准化平台融入海洋技术的全球发展。海洋技术国际标准包括基础共性、关键技术和行业应用三部分。顺应热点需求，由我国提出、经国际标准化组织（International Organization for Standardization, ISO）技术管理局批准的海洋技术分委会（ISO/TC8/SC13，以下简称SC13）于2014年正式成立，主席和秘书处均落户于中国。依托这一发展契机，分委会着力于实现标准在海洋观测、海洋开发、海洋环境保护等领域中的协同互动作用，同时充分发挥标准在推进海洋装备制造产业有序发展中的指导、规范、引领和保障作用。结合“海洋强国”的国家发展战略，我国致力于把SC13打造成既推动专业领域国际合作，又助力中国海洋技术和装备产业成长的平台。从国际合作的层面出发，SC13将在已有的20个成员国和6个工作组的基础上，吸纳更多国家的海洋技术专家参与国际标准的制修订工作，并积极搭建国际海底管理局等国际组织与产业界之间的桥梁；从推进国际标准制订的层面出发，在已出版16项国际标准和6项标准提案获得立项通过的前提下，SC13将在潜水器、深海资源开发、海洋环境保护、海洋观测仪器装备、海洋调查、海水淡化、滨海蓝碳等技术成熟度合适的领域继续拓宽标准类型，使其应用领域更系统化、使用群体更加广泛。未来，我国将完善海洋技术标准化领域的战略规划，积极有序参与国际标准组织治理，促进国内国际标准互联互通，推动我国具有自主知识产权的先进海洋技术通过标准化形式“走出去”。



14 学生口头报告

14.1 地质碳封存中纳米限域水-CO₂相互作用的分子尺度见解

牛建杰 博士研究生

北京大学

纳米孔隙内的水分子通常以“水膜”和“水桥”形式存在，其聚集形态主要受到水分子浓度、孔隙尺寸、孔隙类型等因素影响，且对油气回收和CO₂封存至关重要。然而，地质碳封存过程中将引入大量CO₂流体，但其对纳米限域水聚集形态的影响还未被深入研究和理解。基于此，本研究设计了一系列典型的水膜（10 vol%）和水桥（30 vol%）情景，在不同情景中填充水-CO₂-正辛烷流体，并调整CO₂分子浓度，以研究纳米孔隙中纳米限域水-CO₂相互作用及其对油气回收和CO₂地质封存的影响。研究结果显示，纳米限域水和CO₂的竞争吸附将导致吸附态水分子减少，并在水膜（75.50 mol.% CO₂）和水桥（5.85 mol.% CO₂）情景中均可促进新水桥的形成。此外，该纳米限域水-CO₂相互作用还导致基质表面从水润湿转变为部分CO₂润湿、CO₂和烃类流体自扩散系数降低、伊利石-水-CO₂的“三明治”吸附层形成，这些变化将从流体赋存和传质等不同角度影响油气回收和CO₂封存。总的来说，这项研究揭示了CO₂对纳米限域水分布和聚集的影响机制，这也为地质CO₂储存和利用过程中纳米限域水-CO₂相互作用提供了分子尺度的见解。

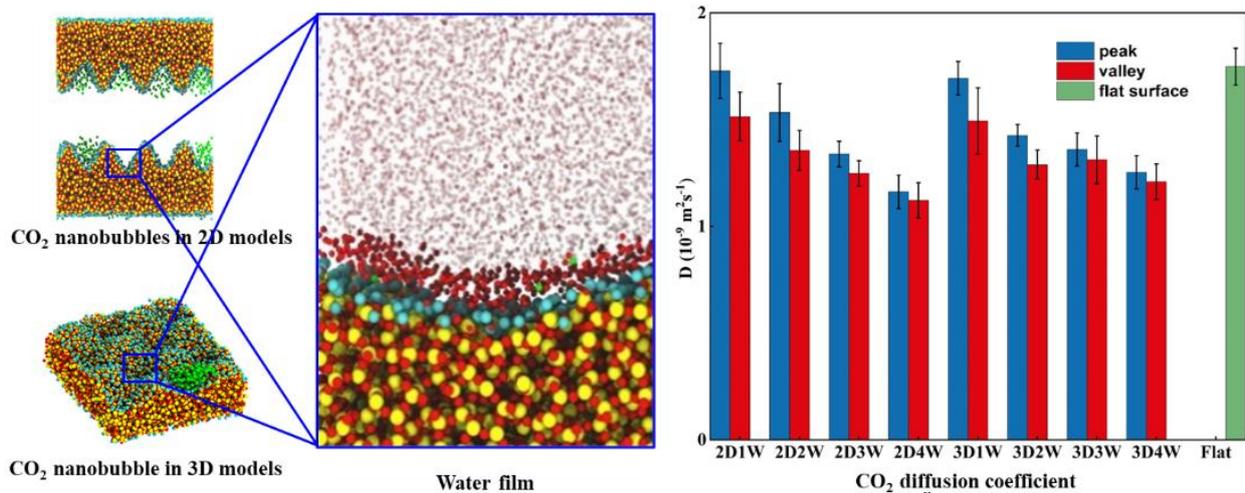


14.2 二氧化硅微孔表面纳米级粗糙度对 CO₂ 分子行为影响的研究

徐宏业 研究生

中国地质大学（武汉）

碳捕集、利用与封存（CCUS）是实现碳中和的有效途径。在碳封存中，储层沉积物表面的纳米级粗糙度会影响 CO₂ 的分子行为，从而影响封存的有效性及安全性。在本研究中，我们构建了具有不同表面粗糙度的一系列地质模型。研究表明：在凹陷的纳米谷区域（含 2D 沟槽及 3D 凹陷），CO₂ 的扩散系数低于突出的纳米峰区域（含 2D 及 3D 构型），导致纳米谷区域的 CO₂ 摩尔浓度较高。我们还观察到，在沉积物表面，CO₂ 分子倾向于沿表面平行排列；当它们移动到距离表面超过 0.4 nm 的位置时，会出现偏离平行状态，此时有一层水膜夹在其中。此外，随着表面粗糙度的增加，出现数量更多但体积更小的 CO₂ 纳米气泡，大多数位于 2D 沟槽或 3D 凹陷中，本研究的发现加深了我们对纳米级粗糙度影响 CO₂ 吸附过程的理解，据此可以延伸出更多针对碳地质封存的有效性、CO₂ 矿物化的认知。

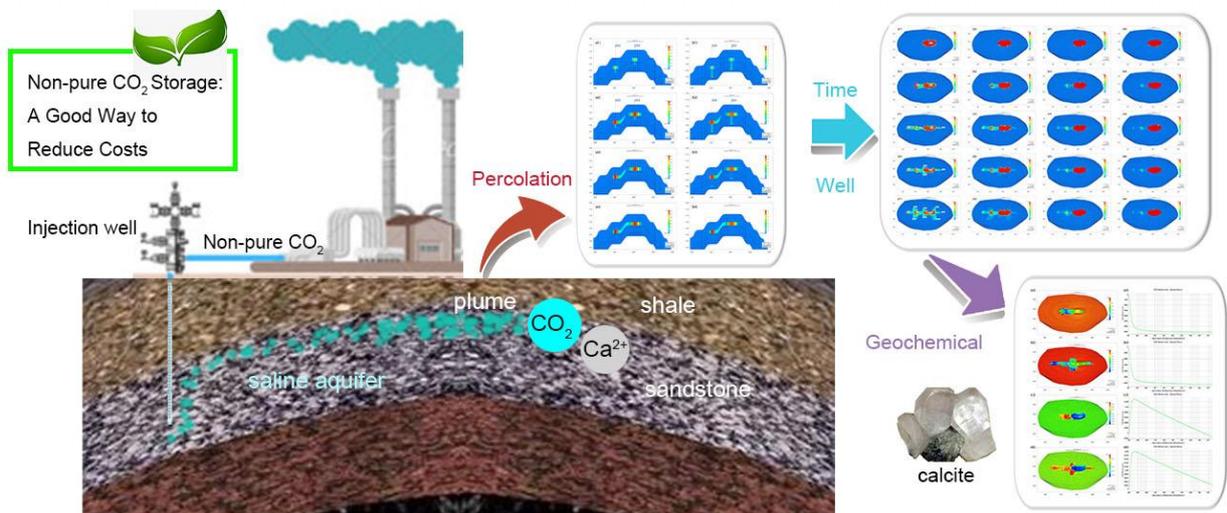


14.3 含杂质二氧化碳咸水层封存过程模拟和泄露风险评估

刘星志 硕士研究生

中国地质大学（北京）

CO₂地质封存是减少温室气体浓度、推进碳中和战略的重要手段。由于捕获CO₂耗费较高，直接注入工业烟道气是减少成本的一个可能的方法。CO₂羽流在咸水层中的运移和演化以及地下复杂的气-水-岩矿化反应是CO₂封存中的关键问题，而封存气体组分和浓度的不同以及注气井网的设计会对这些问题造成影响，并可能带来一些安全问题。本项研究采用渗-化耦合数值模拟的方法，以波兰某咸水层为例，进行纯CO₂和非纯CO₂地质封存的对比性模拟研究，分析羽流体形态演化和地球化学反应特征。设计了不同的注气井网，以讨论注气方案和注气量带来的影响。本项研究还分析了矿化曲线的影响因素，采用多种方法评估纯CO₂和非纯CO₂的封存安全性并计算泄漏率。研究结果表明：气体注入地层后将向圈闭中心流动并聚集，运移速度与地层倾角相关。注气井网对羽流运移的趋势和最终的形态几乎都无太大影响。非纯CO₂羽流所占据的面积更大，运移速率也更快。矿化速率和矿化量曲线随着注入组分、注气量、井位等外部条件而改变，曲线形态受到气体运移、pH等因素的控制。注入纯CO₂和非纯CO₂时反应特征差距非常大，这主要与组分和浓度有关。在考虑扩散的情况下，CO₂会向上和向下扩散，向上穿过盖层是其主要的泄露途径。注入气体为非纯CO₂时，其泄露率远高于纯CO₂。研究揭示了渗-化场共同作用下CO₂羽流体的运移趋势，具体分析了气-水-岩矿化反应的控制因素，对非纯CO₂封存的安全性进行了评估，同时讨论了注气方案和注气量的影响。研究结果可为实际CO₂地质封存工程特别是非纯CO₂封存的构想提供一些有价值的参考。



14.4 协调创新网络视角下湛江推进 CCUS 粤西集群建设的机制与路径研究

冯凯龙 博士研究生

同济大学海洋资源研究中心

在全球应对气候变化的背景下，碳捕集、利用与封存（CCUS）技术被视为关键解决方案之一。湛江作为粤西地区的核心城市，致力于推进 CCUS 粤西集群建设。本研究从协调创新网络的视角出发，研究了湛江在推进 CCUS 粤西集群建设中的机制与路径。通过分析区域内各利益相关者的合作模式、创新资源的整合及政策支持，本研究探讨了推动 CCUS 集群发展的关键因素和实施路径。研究结果表明，建立高效的创新网络、强化区域合作及优化政策支持是实现粤西 CCUS 集群建设目标的关键。此研究为其他地区在推进 CCUS 技术应用和集群发展提供了有益的借鉴。



14.5 海底 CO₂地质封存监测过程中可控源电磁正演模型建立

唐文科 博士研究生

中国地质大学（武汉）

CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage: 碳捕集、利用与封存) 作为实现净零排放和向净零排放未来过渡的关键技术之一, 受到全球广泛关注。其中 CO₂ 监测作为 CCUS 技术的重要组成部分, 贯穿整个生命周期。为确保高效安全地在海底封存 CO₂, 需要在封存前、封存期间和封存后对 CO₂ 的潜在运移空间进行勘探、评估和监测, 预测泄漏风险以及运移分布范围。地球物理方法可获得海底储层和盖层的相关数据, 有利于掌握地层中 CO₂ 流体的运移信息和封存潜力更新信息。支撑每一种监测方式的相关技术都有其优缺点, 应综合考虑技术适用局限性、技术集成与降本增效、风险评估与方案优化等带来的挑战。海底岩层中大大小小的裂缝可以作为 CO₂ 流体的运移通道, 甚至是封存空间, 而电磁信号对通过裂缝的 CO₂ 流体相对敏感, 根据电阻率差异可区分不同的流体及其量的变化, 获取 CO₂ 储存位置以及储层电阻率, 估算 CO₂ 饱和度, 监测 CO₂ 运移和封存量变化。虽然电磁的分辨率较低但使用成本也低, 因此, 通常将地震和电磁方法相结合来评估海底地层结构、流变性、岩性和 CO₂ 的运移情况。当 CO₂ 不断注入储层内部时, 会引起电阻率、介电常数、孔隙度等发生改变, 随着注入时间增加, 形成的 CO₂ 流体会从深部向上运移, 不同深度的储层, 温压条件不一致, 其相态也会发生变化。本报告采用 CO₂ 封存相关地质、地球物理、岩石物理资料建立不同电阻率地层模型, 开展海洋可控源电磁法 (MCSEM) 分析不同深度、层数、储层形状和电阻率的响应规律。图 2 所示为简单的高阻板状体 CO₂ 储层模型图, 通过正演响应分析及反演不断迭代优化初始模型直至拟合差满足要求为止, 如图 4。但 CO₂ 流体电阻率会随着深度、温压条件等的变化而发生改变, 后续还需研究不同深度、层数、形状、时间的多种储层模型, 根据对不同储层组合模型响应分析, 为 CO₂ 封存储层评价提供理论借鉴依据。

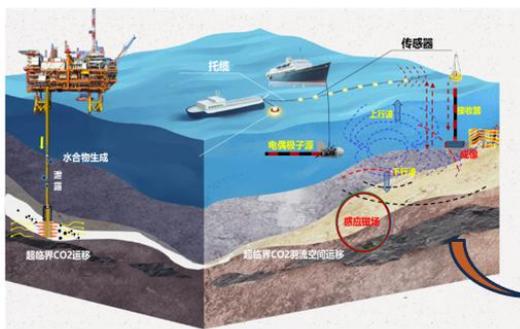


图 1·海底碳封存电磁法监测示意图

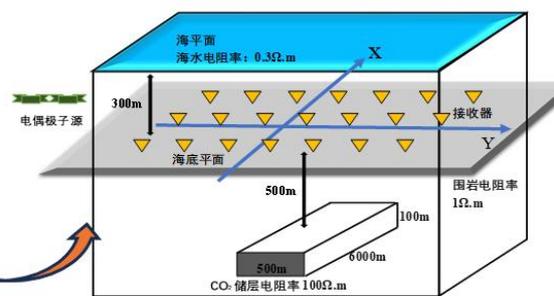


图 2·高阻板状体 CO₂ 储层模型图

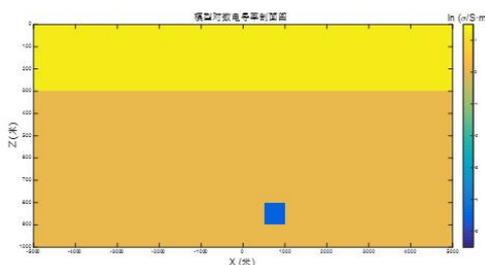


图 3 y=0m 测线电导率剖面示意图

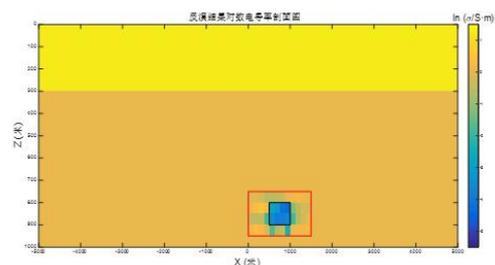


图 4 y=0m 剖面反演结果

14.6 CO₂矿化封存潜力与选址

马馨蕊 硕士研究生

中国海洋大学

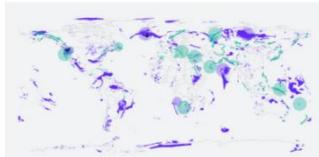
二氧化碳矿化封存作为一种将 CO₂ 转化为固体碳酸盐岩的固碳方式，是实现永久碳固化也是最安全稳定的封存方式，自提出以来就受到关注。国内外学者提出具有矿化封存潜力的岩石主要为火山岩，火山岩中的橄榄石、辉石等矿物与 CO₂ 发生化学反应可快速形成稳定的碳酸盐矿物，同时火山岩中有较高的孔隙条件，有利于二氧化碳的运移和反应。但我国海域沉积盆地中，火成岩分布相比于碎屑岩分布还不广泛，因此了解这种广泛分布的碎屑岩储层矿化封存潜力是必要的。碎屑岩储层作为我国近海沉积盆地中重要的构造封存储层，沉积岩中含有长石类、粘土类等矿物，这类矿物在地层条件下也能发生 CO₂-水岩反应，具有重要的矿化封存潜力。本项研究以沉积岩中的砂岩为例，系统总结了该岩性中矿化封存的国内外进展、关键影响因素、主要矿物、固碳潜力和效率，并结合我国近海沉积盆地的碎屑岩储层发育情况，提出碎屑岩矿化封存潜力，以期为我国海域沉积盆地碳封存潜力精细评价和示范工程建设提供参考。



4. 潜力与选址评价

• 地层岩石的分布

玄武岩 < 砂岩



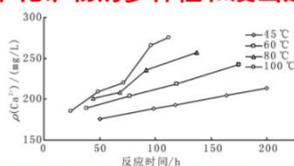
玄武岩的全球分布(Hélène Pilorgé et al., 2021)



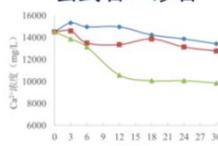
海域正在进行与计划的CO₂封存地点

• 可矿化矿物的多样性和浸出速率

玄武岩 > 砂岩



玄武岩中Ca²⁺随时间变化(李晓媛等, 2013)



砂岩中Ca²⁺随时间变化(刘小天等, 2018)

玄武岩-矿物利用率高，封存速率快

砂岩-对砂岩类型要求高，岩石可利用
率相对较低，封存速率慢

岩性	全球分布情况	我国分布情况	可矿化矿物
玄武岩	海底或火山区域	雷州半岛、松辽盆地、华东地区	橄榄石、辉石、斜长石和玻璃
砂岩	河流相、陆相湖盆地	各沉积盆地	长石、黏土矿物、碳酸盐胶结

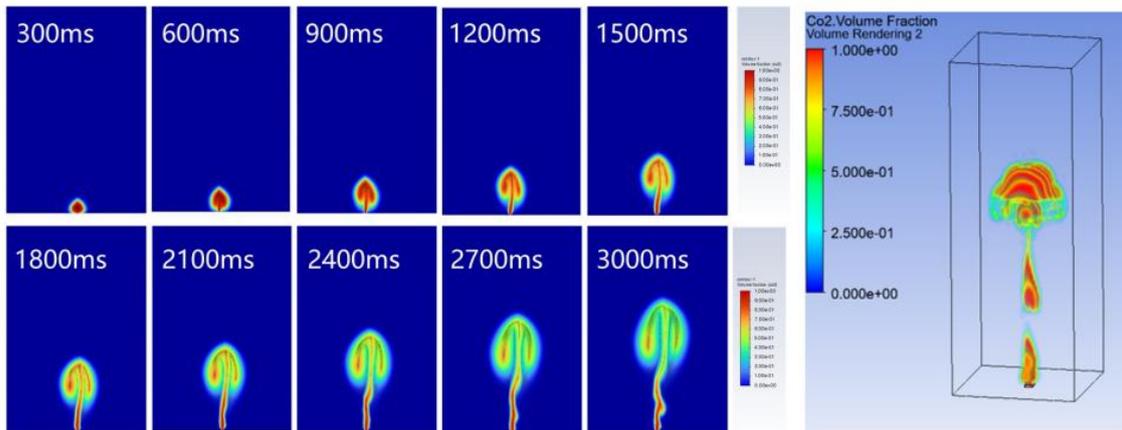
14.7 基于机器学习的 CO₂海底封存快速泄漏评估研究

高凤涛 硕士研究生

中国科学院上海高等研究院

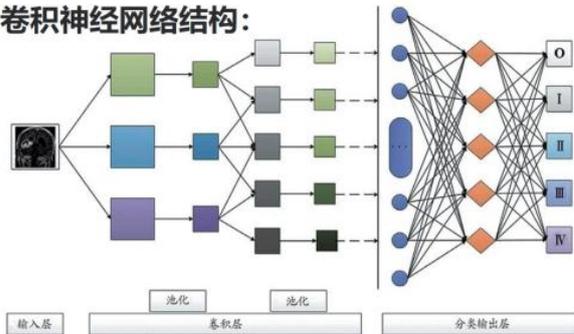
面对沿海地区碳排放量高、陆上封存场所有限的困境，CO₂离岸封存无疑是一种有效的解决手段。CO₂海底地质封存的快速泄漏虽然发生概率极低，但明晰海水中 CO₂ 扩散运移规律对于 CO₂ 快速泄漏量评估至关重要。基于渤海、南海典型海洋环境数据，开展了流体动力学仿真分析，利用 VOF 模型模拟了 CO₂ 气泡群特性，并用欧拉-欧拉模型分析了 CO₂ 在海水中的运移扩散特征；开发了基于卷积神经网络的海底 CO₂ 泄漏量评估算法，搭建了物理信息神经网络模型进行流体运移反问题求解。根据数值模拟获得的不同海洋环境下 CO₂ 泄漏时的气泡形态、分布范围，反演得到海底泄漏的裂缝宽度、泄漏速度，从而计算泄漏量。CO₂海底地质封存的快速泄漏评估，将完善离岸地质封存监测体系，进而促进封存工程应用。

CO₂泄漏运移模拟 (Fluent) 2D/3D模型

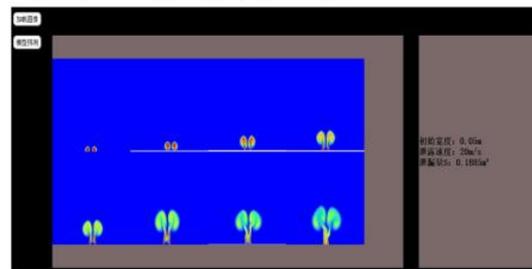


机器学习实现CO₂泄漏量测算

卷积神经网络结构:



输入: CO₂泄漏时序图像



输出: 裂缝长度 $\{x_i\}_{i=1}^n$, 泄漏初始速度 v

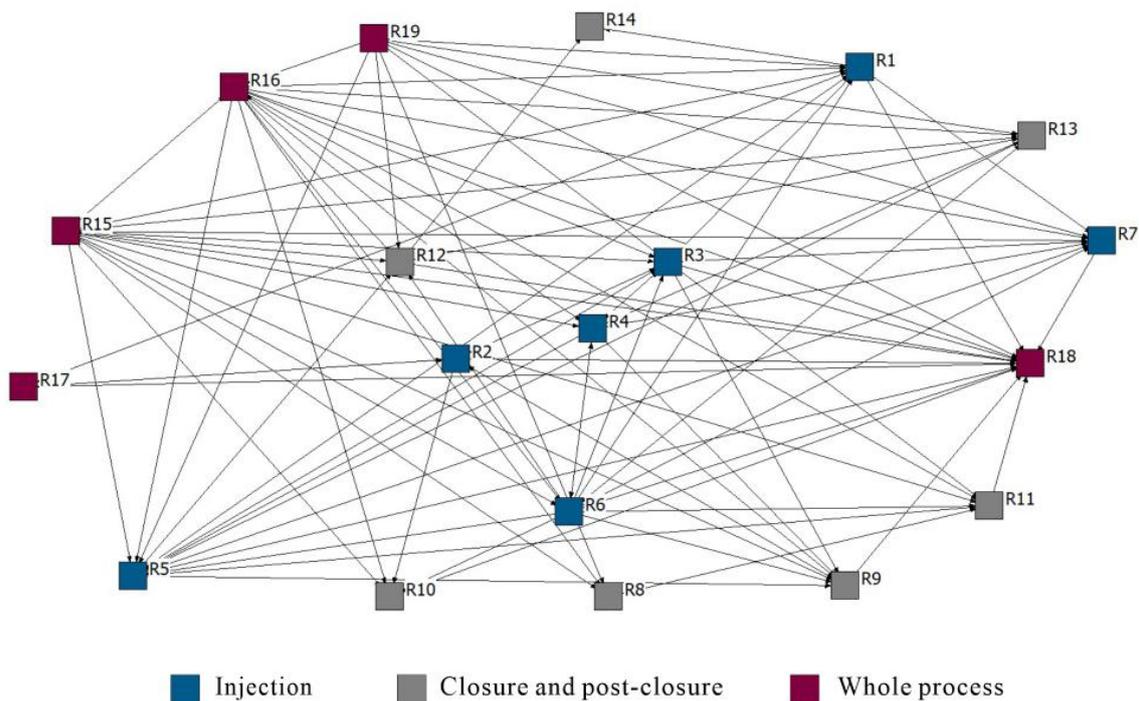
$$\text{泄漏量 } S = \sum_{i=1}^n \frac{\pi x_i^2 v}{4} t$$

14.8 二氧化碳地质封存技术风险定量评价及传递机制——基于社会网络分析的研究

景萌 博士研究生

中国科学院武汉岩土力学研究所

储层长期密封是二氧化碳地质封存（CCS）成功缓解气候变化的关键前提，然而，地质系统的复杂性使得 CCS 的实施面临各种技术风险，准确识别和分析这些风险及其相互关系，对于优化注入过程、确保安全存储和建立公众信心至关重要。本研究全面综述了 CO₂ 地质封存的风险识别方法并选取风险清单法成功识别出 19 个相关技术风险，通过构建结构矩阵来阐明风险之间的关系，同时采用社会网络分析方法对风险进行量化。结果表明，关键初始风险包括火山喷发破坏、未发现的地质构造（如断层）和地震破坏等，而关键失效风险则包括实际储碳量低于预期和 CO₂ 注入效果不佳，此外，注入井周围的机械破坏、CO₂ 井筒腐蚀以及区域过压为核心传递风险。针对这些风险，提出了相应可行的缓解措施，在此基础上，结合各因素之间的有向关系构建了三条传递链以揭示风险在整个生命周期中的复杂关系。研究结果有助于有效管理 CCS 风险，并指导制定长期注入和监测计划，从而促进安全和可扩展的 CCS 技术的广泛应用。

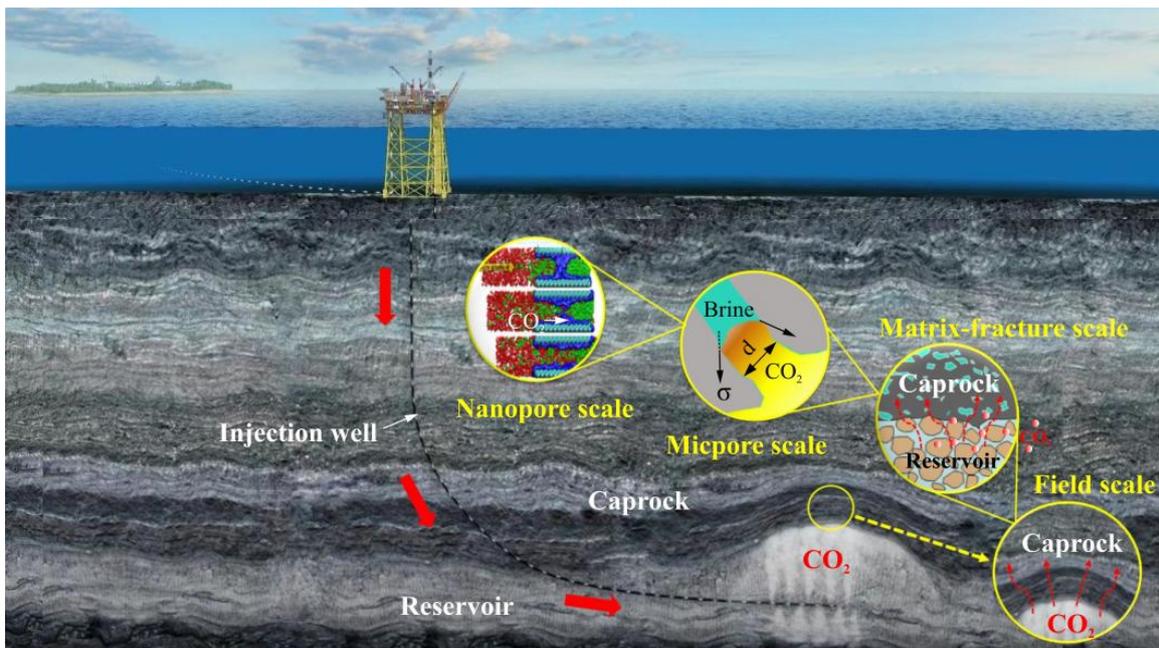


14.9 海底碳封存盖层密闭性泄漏风险及评价方法

陈博文 博士研究生

中国科学院武汉岩土力学研究所

海底 CO₂ 地质封存是我国实现“双碳”目标重要组成部分，但 CO₂ 注入海底储层可能诱发盖层泄漏风险，严重威胁海洋生态环境，因此开展海底盖层密闭性评价是实施海洋碳封存战略的重要内容。本研究先简要介绍了典型海底 CO₂ 地质封存示范工程的盖层特征，阐明了海底盖层密闭机理、泄漏机制和评价方法，分析了突破压力测试方法及海底盖层密闭性的安全界限值。研究表明：海底盖层具有毛细封闭、压力封闭、烃浓度封闭和水合物封闭等密闭机理；毛细封闭和水合物封闭只封闭 CO₂ 游离相，浓度封闭只封闭 CO₂ 扩散相，而压力封闭可阻滞 CO₂ 游离相和水溶相；突破压力是评价海底盖层密闭性最直观的评价指标；当突破压力小于 1 MPa，盖层发生扩散泄漏；当突破压力为 1-20 MPa，盖层发生渗透泄漏；当突破压力大于 20 MPa，盖层发生裂隙泄漏。

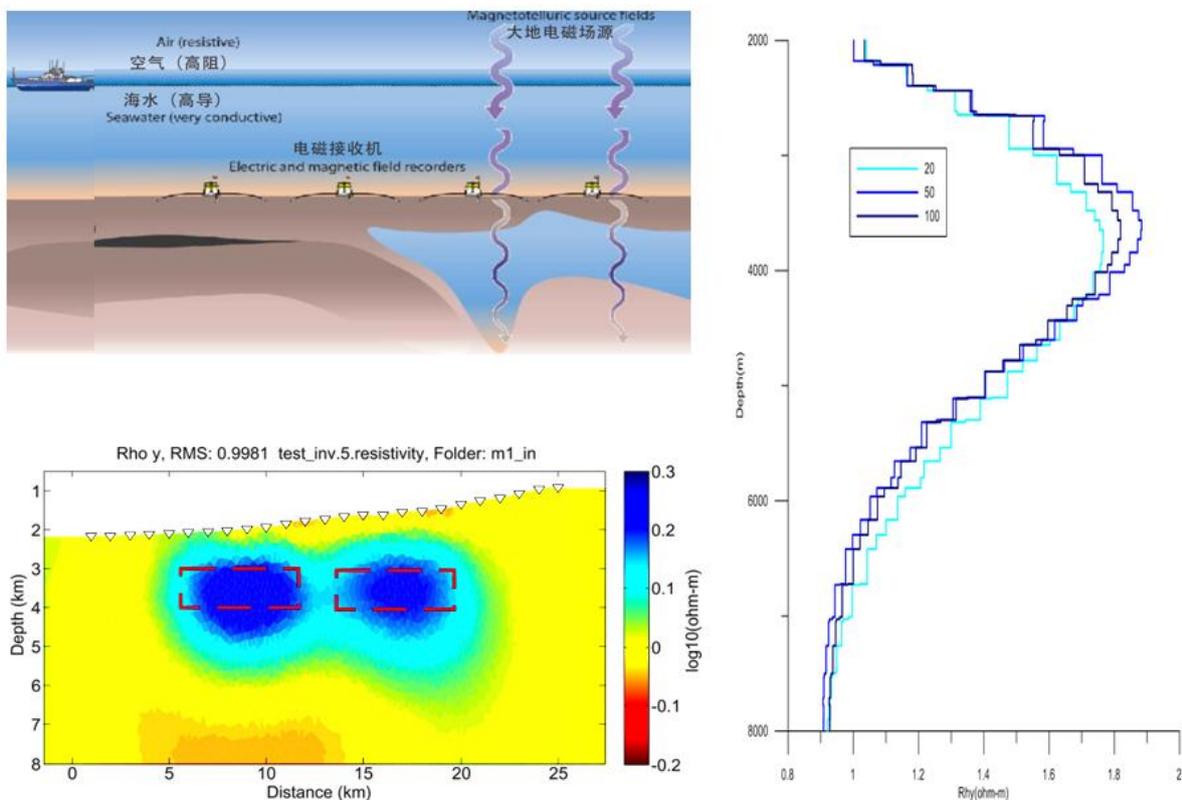


14.10 图像引导的海洋可控源电磁法对海底 CO₂ 封存储层建模监测分析

蔡齐 硕士研究生

中国科学院南海海洋研究所

全球气候变化确实是一个紧迫的问题，温室气体排放的增加导致全球温度上升，极端天气事件增多，以及海平面上升等严重后果。海底 CO₂ 封存技术是一种将二氧化碳从大气中移除并储存在地下深处的解决方案。这种技术通常涉及将 CO₂ 注入地下的地质层，如枯竭的油气田、深盐水层等。当 CO₂ 被注入地下储层时，如果 CO₂ 开始向上泄漏，根据阿尔齐公式岩石的电阻率会发生显著变化。而海洋可控源电磁法由于对高阻分辨率高，对高阻体比较敏感，不受碳酸盐高阻层屏蔽等特点，可以很好的分辨出地下介质的高阻情况，因此研究海洋可控源电磁法对 CO₂ 监测具有重大意义。本研究提出了一种图像引导的海洋可控源电磁法对海底 CO₂ 封存储层监测地质建模的方法。首先，我们加入一系列地震数据与测井数据建立不同的地电模型，设置一系列的气体饱和度梯度模型，使用图像引导反演的方法，对海洋可控源电磁数据计算归一化异常，进而分析不同饱和度 CO₂ 对反演结果的影响。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，该方法能够很好地监测 CO₂ 封存层是否泄露的情况。未来的研究可以进一步探索如何优化建模方法的参数设置，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。

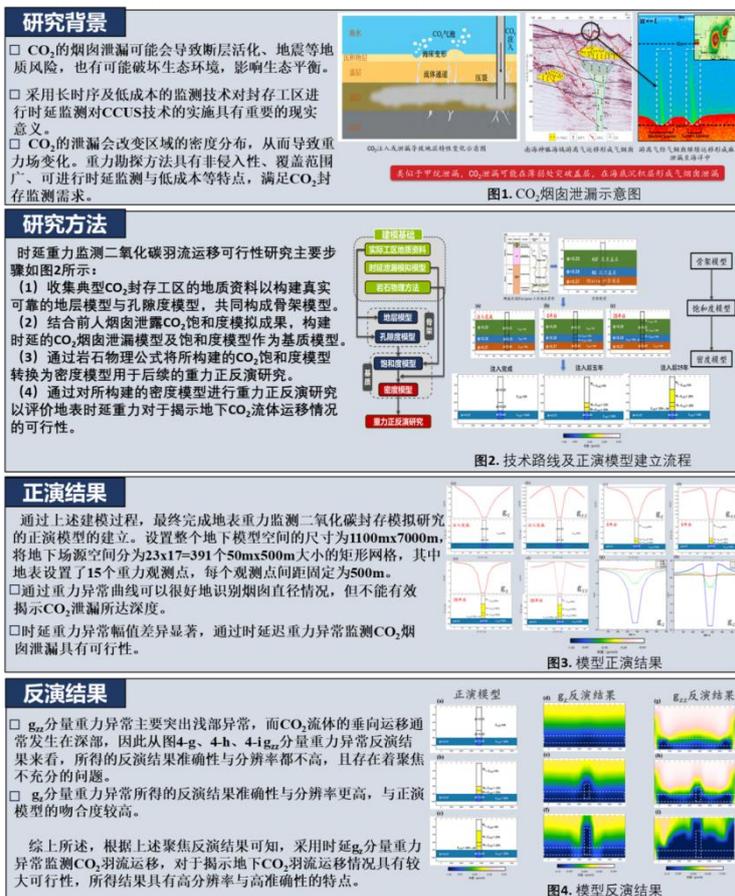


14.11 时延重力监测二氧化碳羽流运移可行性研究

刘彬 硕士研究生

中国科学院南海海洋研究所

二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 技术是我国实现“双碳”目标的重要组成部分,但CO₂的泄漏可能会导致断层活化、地震等地质风险,也有可能破坏生态环境,影响生态平衡。同时考虑到CO₂注入后需要花费大量时间对封存区进行监测,因此采用长时序及低成本的监测技术对封存工区进行时延监测对CCUS技术的实施具有重要的现实意义。CO₂的注入将影响地层纵波速度及电阻率的变化,地震勘探与电磁勘探方法在CO₂封存羽流运移监测应用较为广泛且有效,但采用地震与电磁勘探方法进行长期监测涉及施工难度大且成本高等问题。重力勘探利用重力仪测量地球表面微小的重力变化,当CO₂被注入地下储层时,如果CO₂开始向上泄漏,会改变该区域的密度分布,从而导致重力场的变化。重力勘探方法具有非侵入性、覆盖范围广、可进行时延监测与低成本等特点,满足CO₂封存监测需求。但目前有关重力勘探方法监测CO₂封存泄漏的可行性研究较少,需要相关模拟研究支撑评价重力勘探方法的可行性。本研究通过结合岩石物理方法、挪威Sleipner工区地层资料、前人烟囱泄露CO₂饱和度模拟成果进行地质密度建模和重力正反演研究,评价地表时延重力对于监测CO₂流体垂向运移沿烟囱泄漏与揭示地下CO₂流体运移情况的可行性进行评估。研究结果表明,采用时延分量重力异常监测CO₂封存,对于揭示地下CO₂羽流垂向运移情况具有较大可行性,所得结果具有高分辨率与高准确性的特点。说明了将重力勘探方法作为二氧化碳封存工区的长时序实时监测技术、纳入封存区基线调查工作具有较大的价值与可行性。

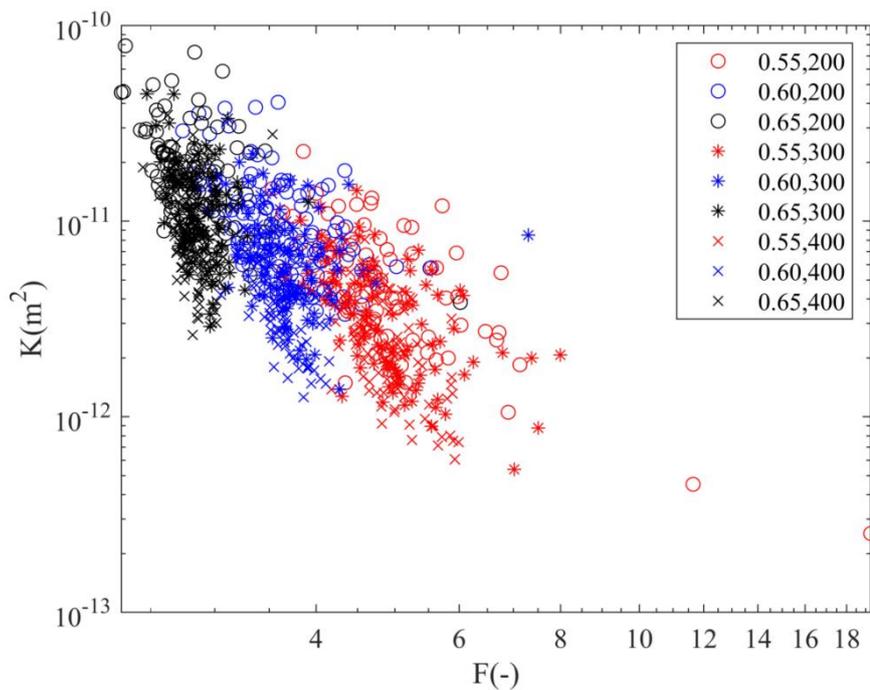


14.12 孔隙几何非均质性对岩石输运性质影响的研究

蒋云茂 本科生

成都理工大学

二氧化碳的地下储层，岩石的渗透性是重要的评价指标。地下流体空间储层广义地可以分为裂隙型和孔隙型，其中，裂隙型岩石的渗透率与裂隙的几何形态的关系已经进行了大量的研究。但是，对于孔隙型的研究是缺乏的。我们通过线性布尔模型人工生成具有不同几何结构的孔隙岩石，利用格子玻尔兹曼方法和有限元方法进行渗透率和电导率计算。通过分析不同尺度的岩石且具有相同几何结构的孔隙型岩石的渗透率（ K ）和地层因子（ F ）的量化关系。我们发现，岩石尺寸对于 K - F 曲线的影响是微弱的，岩石孔隙的几何非均质性对于 K - F 曲线的影响是显著的。最后，我们通过数据拟合的方法，得出了 K - F 曲线与孔隙几何非均质性的数学模型，该模型可以通过岩石结构和电导率数据得到渗透率的数值。

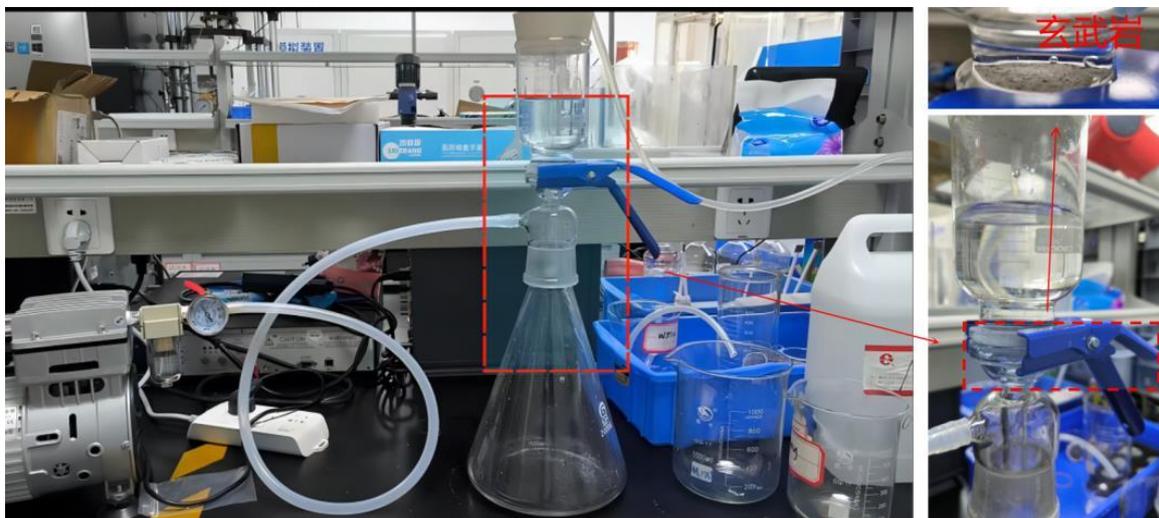


14.13 含 CO_2 海水增强渗流作用下玄武岩溶解规律及离子协同沉积效应研究

王茜茜 研究生

厦门大学

二氧化碳等工业排放物是导致全球气候变暖现象的主要原因。碳捕集、利用与封存技术（CCUS）被认为是实现碳达峰、碳中和的有效手段，该技术通过将 CO_2 注入诸如沉积盆地深处的多孔咸水层及枯竭的油气田等地质储层中，实现长久封存。然而，该技术大规模应用面临着 CO_2 泄漏、可圈闭储层有限、风险评估与监测成本高昂等问题。玄武岩矿化技术是一种新兴的将 CO_2 注入到地层玄武岩中，通过与岩石发生化学反应生成碳酸盐矿物而实现永久固碳的技术，其可行性得到了美国 Wallula 项目和冰岛 Carbfix 项目验证。玄武岩在海洋地层分布广泛，且矿化过程中需要大量水溶液以维持反应进行。因此，深海环境中的玄武岩为 CO_2 原位矿化提供良好条件。目前针对玄武岩 CO_2 原位矿化技术的加速机制及工程应用的可能性仍有待研究。本报告将利用一种设计的抽滤过流装置，模拟和加速深海玄武岩 CO_2 原位矿化过程，探究影响玄武岩溶解速率的关键因素，提出了通过调控海水渗流加速活性岩层高效溶解的高效矿化方法。此外，搭建小型实验室模拟矿化沉积装置，开展 pH 值调控条件下 CO_2 原位及准原位矿化测试研究，旨在提高海底玄武岩多种溶出离子协同矿化的反应速率，验证酸碱分区诱导矿化的可行性，为海洋 CO_2 矿化封存选址选层提供依据，并为深海环境中 CO_2 准原位高效矿化技术提供理论基础。

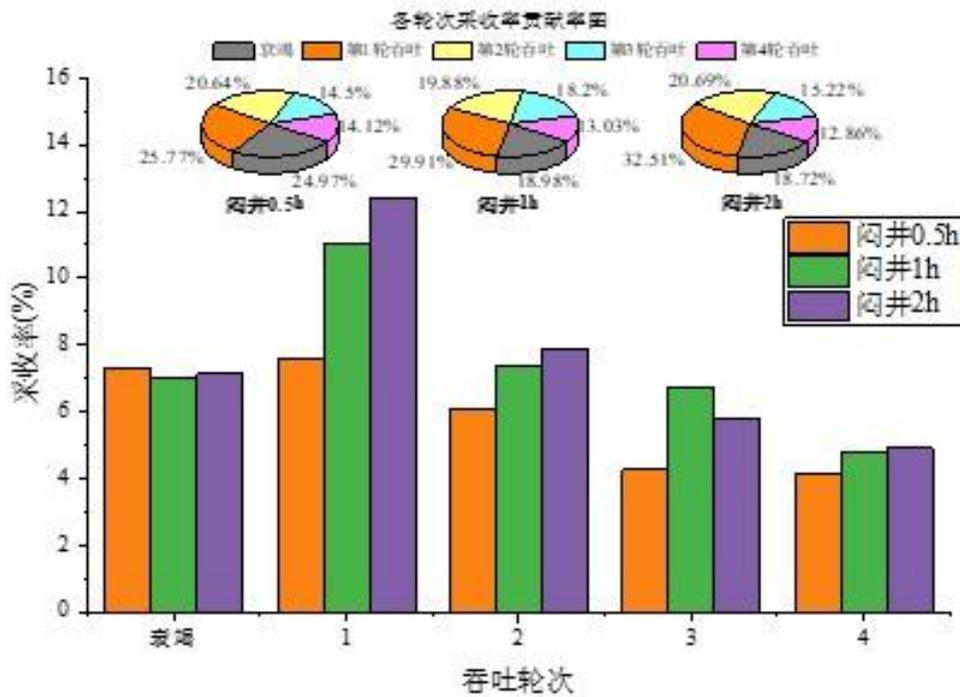


14.14 稠油注超临界 CO₂ 渗流规律及提采机理实验研究

四 郎 洛 加 硕 士 研 究 生

西 南 石 油 大 学

在稠油开发领域，CO₂吞吐技术在提高采收率的同时还可以达到封存 CO₂ 的目的。为探究研究区块稠油注 CO₂ 作用机理与吞吐开发参数，针对 50℃ 地面条件下平均黏度为 1585mPa·s 的稠油，采用高温高压 PVT 设备与长岩心吞吐实验装置，开展 CO₂ 在稠油中的扩散、稠油超临界 CO₂ 萃取和高温高压长岩心吞吐实验研究。实验结果表明：1) CO₂ 在稠油中的扩散系数与注气温度、压力呈正相关关系。2) 随萃取次数的增加，中轻质组分 C6~C12 大幅降低，中-重质组分 C14+ 含量逐渐上升，尤其在前三轮萃取尤为显著。3) 通过吞吐实验研究，优选闷井时间为 1-2h，优选压降速度为 50kPa/min。研究成果有助于明确中深层稠油注 CO₂ 提采机理，同时指导研究区块现场注 CO₂ 开发注采参数设计，为后续 CO₂ 吞吐规模化推广应用提供了参考依据。

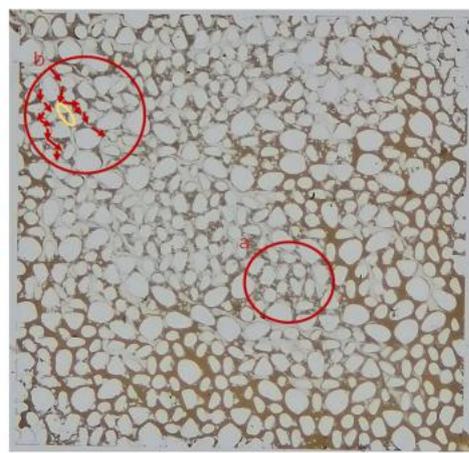
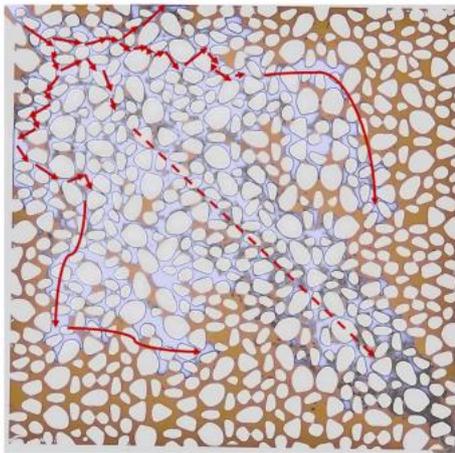


14.15 致密封存体超临界 CO₂ 微观渗流规律研究

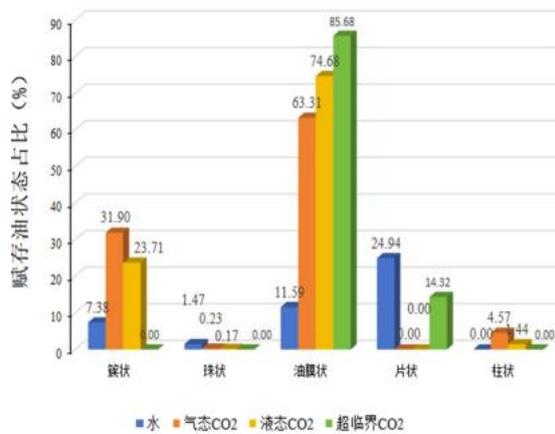
李欢 硕士研究生

西南石油大学

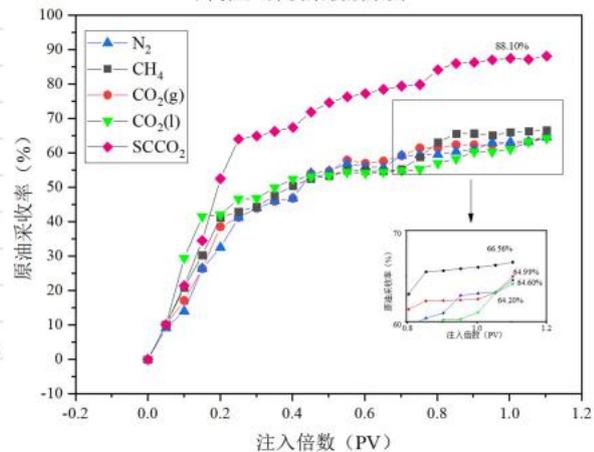
针对低渗砾岩油藏中微观渗流机理与剩余油赋存规律尚不明确、注入介质尚待优化的问题，以新疆油田致密砾岩油藏为研究对象，采用自主研发的高温高压微观可视化物理实验模型，开展不同注入介质、注气相态条件下，低渗砾岩油藏微观可视化驱替实验研究。实验结果表明：1) 低注入压力条件下，气窜导致了水驱采收率高于气驱采收率 1.92%。2) 气相状态下，不同注气介质驱替特征及驱替效果相似，CO₂ 气驱效果相对较好；超临界 CO₂ 驱油效果远高于气态及水。3) 水驱剩余油多以片状赋存，其次是油膜状；气驱剩余油多以油膜状赋存。研究成果有助于明确低渗砾岩油藏注介质开发作用机理，同时指导油田现场注介质开发。



不同残余油赋存状态占比图



不同注入介质采收效果图

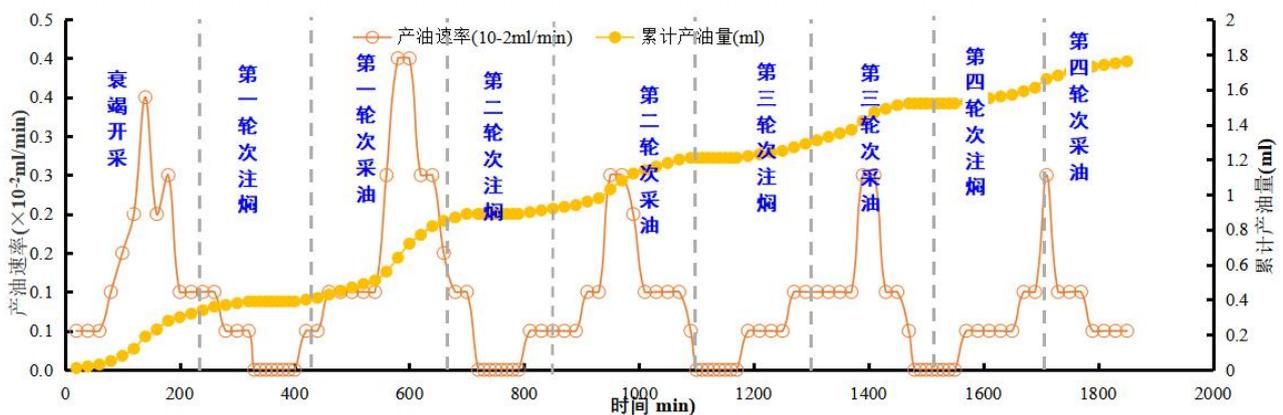


14.16 致密砾岩油藏注 CO₂ 补能提采实验研究

康益 硕士研究生

西南石油大学

CO₂ 补能提采驱替机理是降低原油界面张力，减少驱替阻力，降低原油粘度；使原油体积膨胀，萃取和汽化原油中的轻质烃；使原油膨胀降黏、解堵增注、改善油水流动性比以及与表面活性剂协同作用产生泡沫等。而且 CO₂ 容易达到超临界状态，此时 CO₂ 密度近于液体，而粘度近于气体，扩散系数介于气体和液体之间，是液体的几百倍，具有较强的溶解性。CO₂ 驱的主要作用是降低原油渗流阻力、降低启动压力梯度，以达到补充能量、提高驱替效率，提高油田开发效益的目的。目前致密砾岩油藏的主要特点是地层压力低、供液能力不足、无有效能量补充。并且开发过程中存在采收率较低、井间剩余油认识不明、压力无法保持等问题。针对以上问题开展注 CO₂ 吞吐补能方式筛选实验研究，研究表明 CO₂ 扩散和溶于原油中，在压力降低时会逐渐析出实现补能，介质注入量与吞吐轮次正相关，单轮次换油率随注入轮次减小，注 CO₂ 吞吐开发优化吞吐轮次为 3-4 轮次；优选焖井时间为 2h。实验研究成果能为致密砾岩油藏注 CO₂ 补能提采提供现场理论支撑，为同类型油藏注 CO₂ 开发提供借鉴。

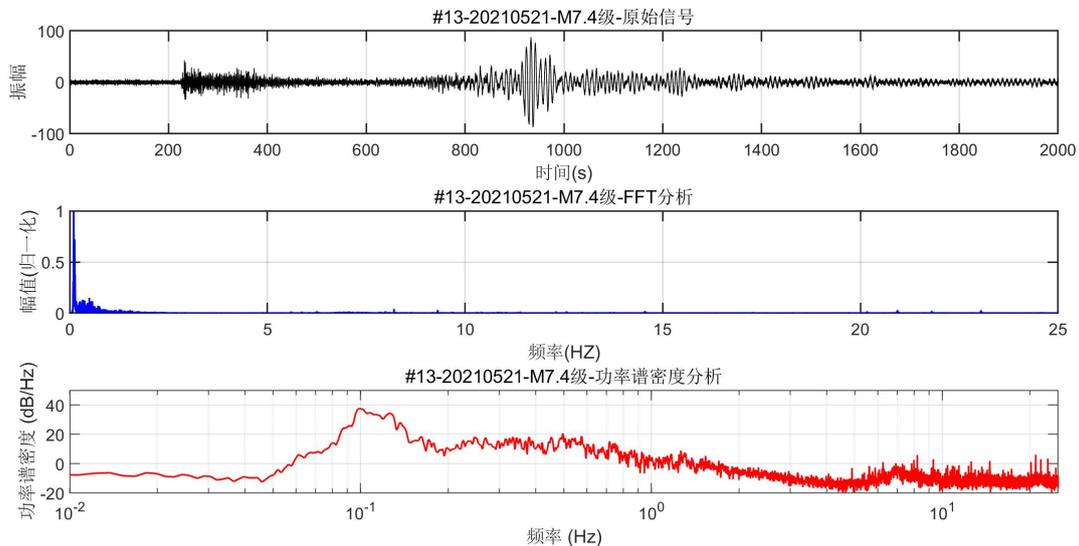


14.17 “海豚”移动式海洋地震仪的研制与应用

侯斐 博士研究生

中国地质大学（武汉）

由于天然地震观测台站分布不均匀和海底地震仪高使用成本，使得覆盖地球表面 70% 的海洋区域缺乏地震射线覆盖，给进行全球规模的地震层析成像带来了很大的困难。基于此现状，国际上研发了一种新型海洋地震监测设备-浮潜式海洋地震仪 (MERMAID)，其工作模式与剖面浮标类似，可悬浮于水下设定深度随洋流漂移，并且记录天然地震信号。报告介绍了自主研发的移动式海洋地震仪的研制工作和于 2020 年至 2022 年先后进行的三次海试情况，以及对设备记录到的地震数据进行分析。经过海试验证，国产“海豚”地震仪已具备实际使用的条件，达到国际上第二代海洋地震仪 (MERMAID) 的水平。

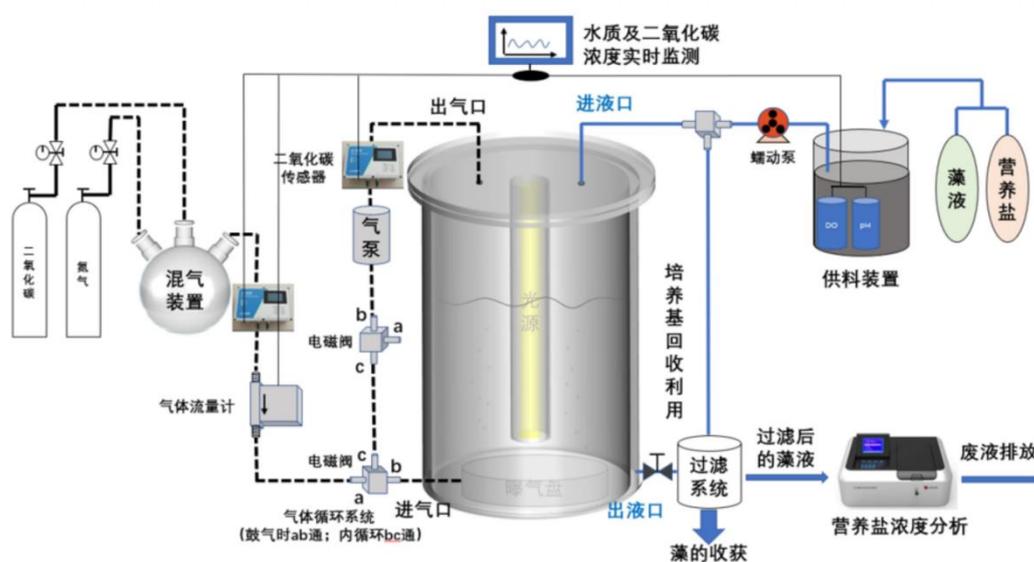


14.18 微藻固碳增汇设备研发与培养条件优化

莫雨楠 硕士研究生

浙江大学海洋学院

随着现代化的不断推进以及对能源的大量消耗，人类对化石燃料的需求不断上升，温室效应和废弃物处理已然成为严峻的环境问题。微藻是一种固碳效率高、生长速率快、生长周期短的光合微生物。由于其能合成各种具有独特功能的生物活性物质，已被广泛的应用于医药、化妆品、饵料、生物燃料、环境监测等领域。为增强微藻固碳能力同时降低微藻的培养成本，优化光照、营养盐浓度等微藻培养条件并研发自动化培养微藻装置是进行可持续生产藻类原料的理想途径，因为可以节省藻类培养所需的大量能源和营养物质，并可显著减少相关的生命周期负担。前期已有的研究表明，红光和蓝光是两种能够对小藻生长产生显著影响的光色，通过混合红蓝两色光进行培养可以使小藻的生物量从 0.4 g L^{-1} 的初始接种浓度生长达到 1.3 g L^{-1} ，干重增长达 3.25 倍；通过切换培养小藻过程所用光源的光色（两日蓝光三日红光），可以使小藻相对于白光培养条件下增产 20%。本项研究在前期研究成果的基础上，为进一步提高小藻生物量积累和营养物质去除率，首先，开发和建造了一套可控红蓝光强度的微藻培养装置，并在控光装置内用 500 ml 锥形瓶培养小藻，对影响小藻生长的环境因子（光照方式、营养盐比例）进行优化；然后，为降低反应器成本及探究培养小藻的最优红蓝光切换频率及营养盐条件，开发及改造 20 L 柱状鼓泡式光生物反应器扩大悬浮培养小藻，为利用反应器规模化培养微藻提供数据支持。主要研究成果如下：（1）在微藻初始细胞密度为 0.05 g L^{-1} 、通气速率为 $0.2 \text{ L air L}^{-1} \text{ culture min}^{-1}$ (vvm)、白光强度为 $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、氮磷比例为 39:1，小藻的最大生物量、生长速率和生物量生产率分别为 1 g L^{-1} 、 0.33 d^{-1} 、 $0.1 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 。微藻对培养基中的硝酸盐、磷酸盐的去除率分别达到 99.9%、99.47%，显著高于前期成果。（2）随着微藻培养条件（即初始细胞密度、营养盐比例、和红蓝光切换频率）的改变，藻细胞的化学成分也会发生变化。在优化的微藻最适生长条件下培养小藻 11 天，小藻的细胞组分其中蛋白质含量和叶绿素 (a+b) 含量分别为 35.32%、 2.3125 mg L^{-1} 。（3）本试验设计和构建的 20 L 自动化生物反应器培养小藻 (*C. vulgaris*) 具有一定的可行性及可操作性。优化的 3 个环境影响因子（初始细胞密度、蓝红光照切换频率、营养盐比例）也适用于柱状光生物反应器中培养小藻，并最终获得 0.84 d^{-1} 的最大比增长率。



15 展板报告

15.1 超深海沉积层中自生碳酸盐的碳同位素特征及其对深部碳循环的意义

刘永欣 博士研究生

中国海洋大学

本研究报道了国际大洋钻探计划 (IODP) 386 航次在水深大于 7000 米的 M0084 站位发现了一种自生碳酸盐矿物。我们利用同步辐射软 X 射线分析了日本海沟沉积物中自生碳酸盐和周围沉积物的元素分布, 以及自生碳酸盐碳和周围颗粒有机碳的碳同位素特征 (^{14}C 和 ^{13}C)。自生碳酸盐矿物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比间隙水中溶解无机碳 (DIC) 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值低, 表明除 DIC 以外, 自生碳酸盐在超深海沉积物中具有其他的碳源。然而, 自生碳酸盐的 ^{14}C 年龄与相同沉积深度的 D014C/P014C 年龄更接近, 同步辐射软 X 射线测试对自生碳酸盐的钙元素和碳元素分布的研究结果不一致, 这些研究结果表明 OC 衍生的自生碳酸盐是超深海沉积层的主要碳酸盐汇。此外, 我们的机器学习分析表明俯冲带上方的沉积层中可能会沉淀更多的自生碳酸盐, 从而对俯冲带的碳埋藏和长时段尺度上的深部地球碳循环产生深远影响。



超深海沉积层中自生碳酸盐的碳同位素特征及其对深部碳循环的意义

刘永欣¹, 刘明志¹, Michael Strasser¹, Ken Ikehara², Joel Johnson³, 罗敏⁴, 徐立⁵, 陶仁彪⁶, 关勇⁷, 包悦^{1,2*}

* 中国海洋大学海洋地质地球科学学院青岛实验室, 青岛 266100; ¹ 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋生物生态与环境科学研究所, 青岛 266237; ² 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; ³ 日本海洋科学数据研究中心, 日本东京; ⁴ 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210014; ⁵ 上海海洋大学海洋地质研究所, 上海; ⁶ 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210014; ⁷ 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210014



1. 前言

自生碳酸盐的起源和演化是了解深海碳循环的独特地质记录档案。由于受碳酸盐补偿深度的影响, 超深海沉积环境中自生碳酸盐矿物的地球化学特征和碳源尚不清楚。在国际大洋发现计划 (IODP) 第 386 航次期间, 我们在水深超过 7000 米的日本海沟沉积物中发现了些许自生碳酸盐矿物, 我们通过测试日本海沟沉积岩芯中自生碳酸盐矿物、颗粒有机碳 (POC)、溶解无机碳 (DIC) 和溶解有机碳 (DOC) 的稳定性和放射性碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}$ 和 ^{14}C) 特征, 确定自生碳酸盐的碳来源。同时, 本研究通过分析孔隙水中的地球化学参数, 研究影响自生碳酸盐形成的主要控制因素。最终对超深海沉积物中自生碳酸盐的主要碳源以及生长模式展开探究, 并讨论其对地球深部碳循环的潜在影响。

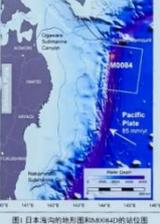


图1 日本海沟的地理位置和M0084站位分布图

2. 结果与讨论

2.1 自生碳酸盐的沉积学特征和微观形态

- IODP 386航次采集的沉积物岩芯中, 在M0084D-sec26-(14-19 cm) 层位发现了大约5*3厘米的琥珀色自生碳酸盐矿物, 初步判定是六水合碳酸钙矿物, 也称之为ikaite。

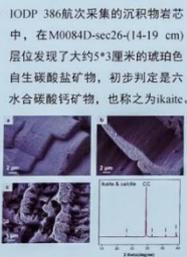


图2 (a-c) 自生碳酸盐的SEM图像; (d) 自生碳酸盐的XRD扫描图

- 通过XRD测试表明琥珀色的自生碳酸盐矿物为亚稳相ikaite和方解石的混合物。虽然亚稳相ikaite在 $> 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和大气压力下有可能转化成方解石或其他晶型碳酸钙矿物, 但在日本海沟原位沉积层中ikaite占主导地位。

2.2 超深海沉积层中自生碳酸盐的碳来源

- 这些自生碳酸盐矿物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -7.52 至 -2.88‰ 之间, 低于孔隙水中 DIC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 表明在超深海沉积物中自生碳酸盐矿物具有额外的碳源。
- 自生碳酸盐矿物的 ^{14}C 年龄与同一沉积层位的 $\text{D}0^{14}\text{C}/\text{P}0^{14}\text{C}$ 年龄比较接近, 两者可以推断日本海沟中的自生碳酸盐的主要碳来源是有机碳。

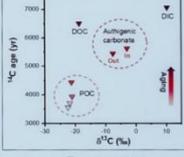


图3 $\delta^{13}\text{C}$ 和 ^{14}C 年龄关系图

2.3 自生碳酸盐对深部碳循环的影响

- 在超深海环境中, 甲烷的厌氧氧化可导致孔隙水的碱度增加。总的来说, 相对偏高的碱度、 Mg^{2+} 浓度和甲烷含量有利于自生碳酸盐的沉淀, 而 pH 的变化对形成自生碳酸盐影响不大。

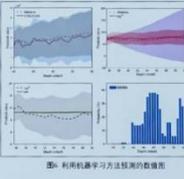


图4 利用机器学习方法预测的数据图

- 通过机器学习方法预测了更深层孔隙水中的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、碱度、pH 值、甲烷含量, 以及甲烷/乙烷+丙烷 ($\text{C}_1/(\text{C}_2 + \text{C}_3)$) 的变化趋势, 进而计算出深层沉积物中形成自生碳酸盐矿物的概率可达 40%。

3. 总结

本研究在碳酸盐补偿深度以下的日本海沟岩芯中发现了些许自生碳酸盐矿物。通过碳同位素的数据, 我们推测超深海环境中自生碳酸盐的碳来源主要是海洋有机碳。地震触发的浊流沉积引入的大量 POC 通过扩散或溶解过程转化成溶解碳, 促进了超深海沉积物中自生碳酸盐的形成。此外, 机器学习模型的预测结果表明俯冲带中的自生碳酸盐通量可能比目前报道的通量大。在超深海沉积环境中, 有机碳来源的自生碳酸盐影响总碳酸盐的积累和埋藏, 并且是地球深部碳循环的一个重要环节。目前, 针对海沟深部地区碳酸盐的相关研究较少, 未来有必要进一步计算自生碳酸盐在俯冲带中的埋藏通量。

基金项目支持:
国家自然科学基金 (42076037, 92058207); 山东省自然科学基金 (ZR2021JQ12)

15.2 激光拉曼光谱技术在海底碳封存流体监测中的应用

孟庆国 正高级工程师

中国地质调查局青岛海洋地质研究所

海底碳封存是减少全球温室气体排放的重要途径之一。CO₂注入海底封存区域，必然伴随着复杂的物理和化学的迁变过程。有必要研发适用于海底碳封存流体监测的技术方法，在封存前、封存期间和封存后对海底流体进行有效监控，研究掌握CO₂迁变路径，为高效安全地封存CO₂提供有效支撑。激光拉曼光谱技术是一种无损高效的分析技术，目前在深海探测等诸多领域得到广泛应用。碳封存过程中CO₂迁变过程较为复杂，可能存在气态、液态、溶解态以及超临界等多种形态，还可发生解离或矿化反应，特定条件下还可水合固化为气体水合物。本项研究从海底碳封存涉及的二氧化碳形态变化出发，综合文献和实验数据，对比分析了气态、液态、固态水合物、离子态及超临界等不同形态CO₂的拉曼光谱特征，发现依据CO₂的特征拉曼谱线可以很好区分不同形态的CO₂，拉曼光谱可有效监控碳封存流体中CO₂迁变过程，初步验证了拉曼光谱技术在CO₂海底封存监测中可行性。激光拉曼光谱技术有望与当前可用于海底碳封存监测相关技术深入融合，实现与拉曼分布式光纤传感器等相关监测技术和研究方法的集成应用，在注入地层CO₂的运移特征识别和研究方面提供有力技术支撑。




激光拉曼光谱技术在海底碳封存流体监测中的应用

孟庆国, 孙建业, 李承峰, 卜庆涛, 郝锡萃

自然资源部天然气水合物重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 青岛, 266237

Background

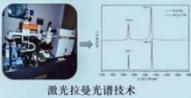
海底碳封存是减少全球温室气体排放的重要途径之一。CO₂注入海底封存区域，必然伴随着复杂的物理和化学的迁变过程。有必要研发适用于海底碳封存流体监测的技术方法，在封存前、封存期间和封存后对海底流体进行有效监控，研究掌握CO₂迁变路径，为高效安全地封存CO₂提供有效支撑。

Objective

- ▲ 厘清海底碳封存过程中CO₂的迁变过程，明确涉及流体的相态和组成。
- ▲ 研究不同形态CO₂的拉曼光谱特征并探讨拉曼光谱技术在CO₂海底封存监测中的应用可行性。

Methods

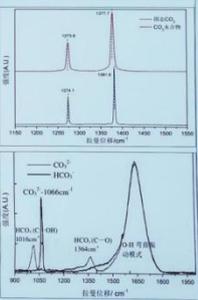
- ▲ 基于自行研制的微型透明可视高压反应釜，通过控制系统的温度、压力等条件，模拟海底碳封存过程CO₂的不同相态。
- ▲ 利用激光拉曼光谱在线分析技术对不同相态CO₂进行测定，对比分析不同相态CO₂的拉曼特征。



激光拉曼光谱技术

Results and Discussion

- ▲ 海底碳封存过程中CO₂迁变过程较为复杂，可能存在气态、液态、溶解态以及超临界等多种形态，还可发生解离或矿化反应，特定条件下还可水合固化为气体水合物。综合文献和实验数据，对比研究了气态、液态、固态水合物、离子态及超临界等不同形态CO₂的拉曼光谱特征。
- ▲ CO₂的典型拉曼光谱特征是费米共振双峰。费米双峰产生的机理不同，~1285cm⁻¹的峰对应于CO₂分子的对称伸缩振动模式，而~1388cm⁻¹则为CO₂分子弯曲振动模式的倍频峰。
- ▲ 结果显示，不同相态CO₂的特征拉曼位移差异明显，拉曼光谱能够很好识别CO₂迁变过程。



不同相态CO₂拉曼光谱特征

序号	CO ₂ 相态	拉曼位移/cm ⁻¹		实验条件	来源	
		对称伸缩模式	弯曲振动倍频			
1	气态	1285.4	1388.4	3.0MPa, 4.0°C	本实验	
2	液态	1281.3	1386.1	4.5MPa, 2.0°C		
3	固态	1274.1	1381.8	常压, -150°C		
4	水合物	1273.8	1377.7	常压, -150°C		
5	超临界	1283.9	1387.7	14MPa, 95°C		文献[1]
6	离子态	HCO ₃ ⁻	1016		常温常压	文献[2]
		CO ₃ ²⁻	1364			

Key Findings

- ▲ 海底碳封存过程可能涉及气态、液态、固态水合物、离子态及超临界等不同形态的CO₂，拉曼光谱可以有效识别、监控碳封存流体中CO₂的迁变过程。
- ▲ 激光拉曼光谱技术有望与当前海底碳封存监测相关技术深入融合，实现与拉曼分布式光纤传感器等相关监测技术和研究方法的集成应用，在注入海底地层CO₂的运移特征识别和研究方面提供有力技术支撑。

References

1. Zhang, X., Li, L. F., Du, Z. F., Hao, X. L., Cao, L., & Luan, Z. D., et al. Discovery of supercritical carbon dioxide in a hydrothermal system. Science Bulletin, 2020, 65(11): 958-964.
2. 田晓霞, 张鑫, 刘昌岭, 孟庆国, 陶军. 溶解无机碳的拉曼光谱定量分析可行性研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(10): 2631-2636.

Contact details: mengqing@126.com

15.3 南黄海盆地烟台拗陷二氧化碳封存地质条件分析

骆迪 副研究员

中国地质调查局青岛海洋地质研究所

海域地质碳封存作为 CCUS 的应用场景之一，是沿海地区实现碳减排的有效途径。山东省是中国碳排放量最大的省份之一，尤其是沿海地区，仅青岛市 2020 年碳排放总量达 6700 万吨，开展海域碳封存需求巨大。南黄海盆地烟台拗陷毗邻山东省，是山东省沿海离去实现碳封存的重要选择，而前期碳封存潜力评价结果表明，烟台拗陷是南黄海盆地封存潜力最大的区域。为了选取合适的封存场址，评估该区域封存条件至关重要，本研究从构造圈闭特征和储层条件等方面，深入分析了烟台拗陷开展碳封存的地质条件，为碳封存选区评价提供重要依据。



南黄海盆地烟台拗陷二氧化碳封存地质条件分析

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

1 中国地质调查局青岛海洋地质研究所 2 海洋地质封存山东省工程研究中心 3 青岛市海洋地质碳封存重点实验室 4 青岛市海洋地质碳封存工程研究中心

引言

离岸碳封存作为CCUS的应用场景之一，是沿海地区实现碳减排的有效途径。山东省是中国碳排放量最大的省份之一，尤其是沿海地区，仅青岛市2020年碳排放总量达6700万吨，开展离岸碳封存需求巨大。南黄海盆地烟台拗陷毗邻山东省，是山东省沿海地区实现碳封存的重要选择。前期碳封存潜力评价结果表明，烟台拗陷是南黄海盆地封存潜力最大的区域，本文深入分析了烟台拗陷开展离岸碳封存的适宜性和基础地质条件，为碳封存选区评价提供重要依据。

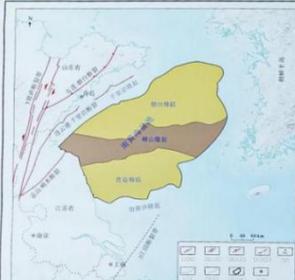


图1 烟台拗陷区域图 (Yuan,2023)

烟台拗陷二氧化碳封存适宜性

1. 离岸最近，距山东省沿海城市约100千米(图1)；
2. 地温梯度介于 2.4~3.0°C/100m，大地热流值介于 61~66mW/m²，属于“冷盆”；
3. 500年来南黄海盆地共发生18次6级以上地震，其中16次在盆地西南部（青岛拗陷和崂山隆起西部），烟台拗陷仅有2次记录。**从地震活动性来看，烟台拗陷的稳定性好。**
4. 南黄海盆地二氧化碳封存潜力平均为155.25Gt，其中，青岛拗陷平均为46.83Gt，烟台拗陷为99Gt，**封存潜力约为青岛拗陷的2倍。**

烟台拗陷二氧化碳封存基础地质条件

烟台拗陷发育多种类型构造圈闭

自中生代以来，烟台拗陷经历多期构造运动，区域应力场改变，地层变形强烈，发育多种类型的构造圈闭(图2)，为二氧化碳地质封存提供有效的存储空间。

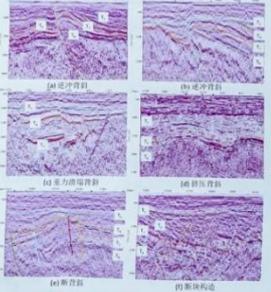


图2 圈闭类型图 (Luo, 2024)

烟台拗陷发育4套储盖组合(图3、图4)

1. 下盐城组优质储碳层与其上覆上盐城组泥岩
2. 三垛组河流相砂岩与上部的泥岩
3. 戴南组和三垛组形成的储盖组合
4. 阜宁组内部储盖组合

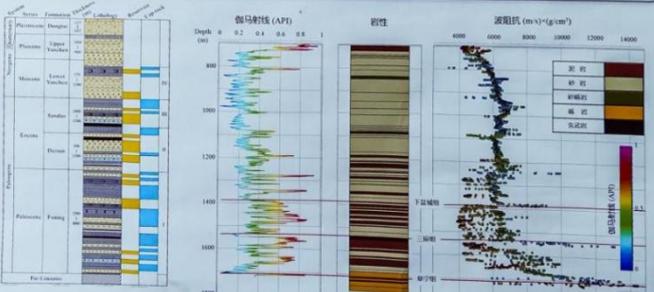


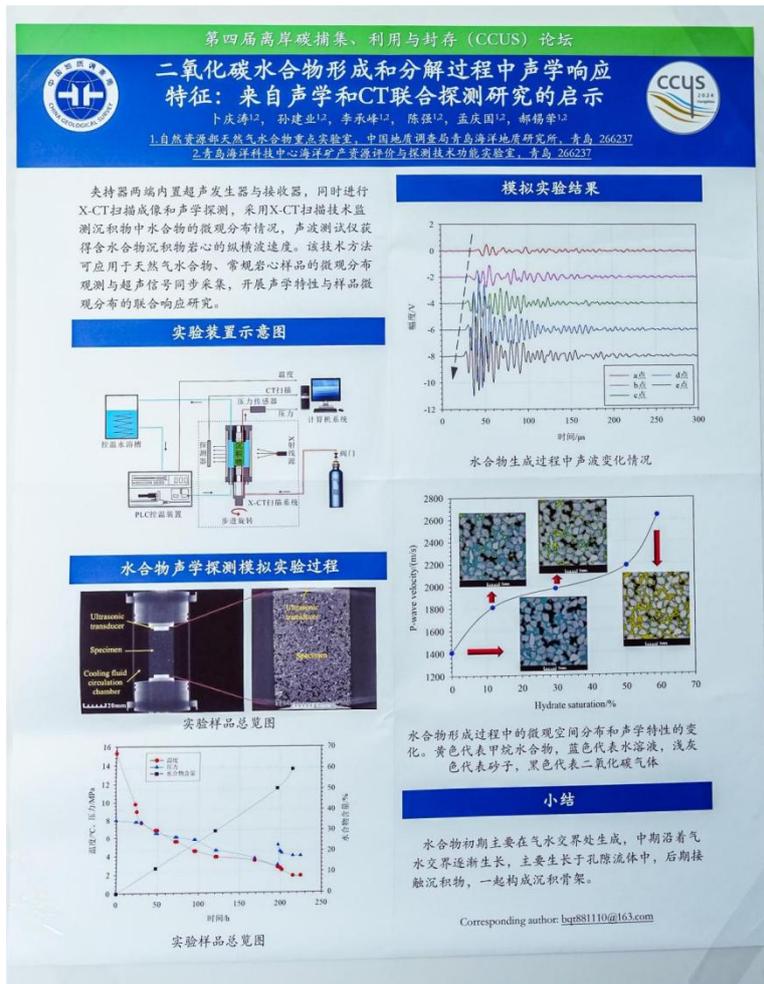
图3 岩性柱状图 (Yuan,2023) 图4 下盐城组优质储碳层测井分析 (Luo, 2024)

15.4 二氧化碳水合物形成和分解过程中声学响应特征：来自声学和 CT 联合探测研究的启示

卜庆涛 副研究员

中国地质调查局青岛海洋地质研究所

水合物的声学特征是水合物地球物理勘探和水合物资源评估的重要参数。水合物的微观分布对含水储层的声学响应有重要影响。虽然可以通过 X 射线计算机断层扫描 (X-CT) 等手段确定微尺度水合物分布, 但很难获得同一样本的声学参数。在本研究中, 我们为含二氧化碳水合物的沉积物开发了一套集成了孔隙尺度可视化和超声波测试系统的实验系统。在同一水合物样品中可同时实现 X-CT 观察和声学检测, 这为在天然气水合物样品声学测试过程中同步监测微观分布提供了一个新概念。在砂质沉积物中进行了水合物形成和解离实验, 在实验过程中检测了含水合物沉积物的声学特征, 同时进行了 X 射线计算机断层扫描。研究发现, 水合物早期主要在气水界面形成, 中期主要在孔隙流体中形成, 后期与沉积物接触。这项研究还发现, 水合物解离阶段分为三个阶段。水合物在解离过程早期与沙粒接触的地方开始解离。在这一阶段, 影响水合物声波速度的主要因素是水合物微观分布的变化。在中期阶段, 大量水合物分解, 此阶段影响水合物声波速度的主要因素是水合物含量的变化。在水合物解离的后期, 水合物的分布形态主要是孔隙填充型, 此阶段水合物的微观分布是影响声波速度的主要因素。该实验装置的开发解决了确定微尺度水合物分布与储层声学特性之间定量关系的难题。

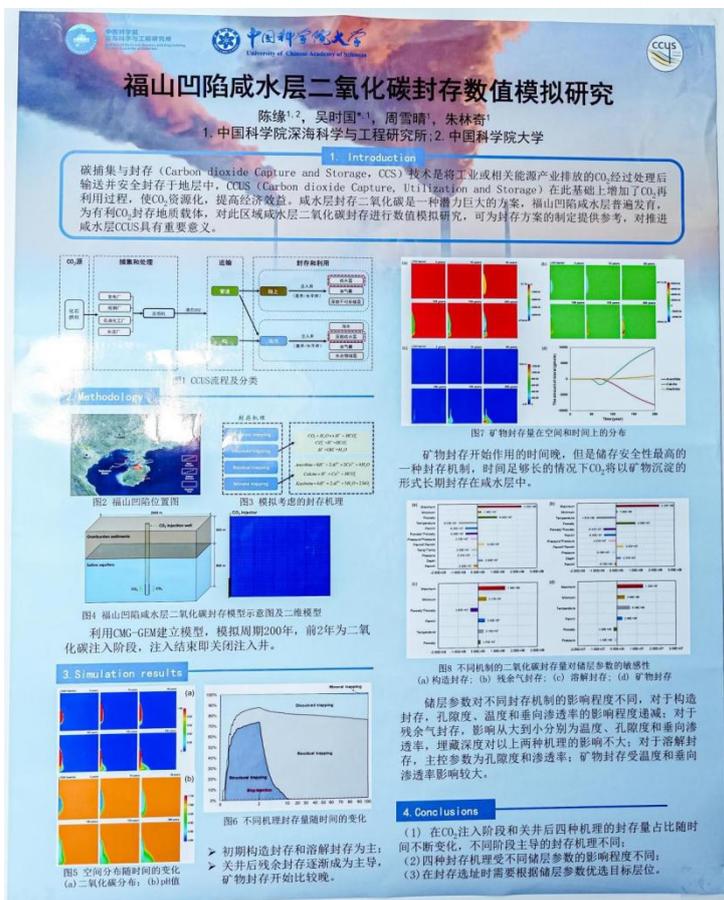


15.5 福山凹陷咸水层二氧化碳封存数值模拟研究

陈缘 博士研究生

中国科学院深海科学与工程研究所

碳捕集与封存 (Carbon dioxide Capture and Storage, CCS) 技术是将工业或相关能源产业排放的 CO_2 经过处理后输送并安全封存于地层中, CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) 在此基础上增加了 CO_2 再利用过程, 使 CO_2 资源化, 提高经济效益。咸水层封存二氧化碳是一种潜力巨大的方案, 福山凹陷咸水层普遍发育, 为有利的 CO_2 封存地质载体, 本项研究对此区域封存二氧化碳进行数值模拟研究, 建立了咸水层二氧化碳封存二维模型, 考虑了四种封存机制, 分析了二氧化碳注入咸水层后的运移规律及四种封存机制对总封存量的贡献。此外, 对咸水层物理性质、地层水性质和操作参数进行了敏感性分析, 确定各参数对二氧化碳封存的影响。模拟结果表明, 不同机理封存的二氧化碳量随时间的变化不同。对封存效果影响显著的物理参数主要有孔隙度、渗透率、地层温度和咸水层深度, 不同参数对各个机理的影响程度不同。地层水矿化度升高会增加构造封存和残余气封存的二氧化碳量, 但对溶解封存和矿物封存相反的效果。对于操作参数, 井底压力和注入速率存在阈值, 需在合适范围内进行调节, 以保证封存效果。注入位置决定了起主导作用的封存机制, 咸水层中部和底部注入有助于提高二氧化碳封存的安全性。此外不同注入井井型对各个机理的影响也有所差异。福山凹陷实际注入层位的模拟结果表明, 当目标层埋深较深时, 低渗透盖层有助于二氧化碳的封存。本项研究可为目标层选择和封存方案制定提供参考, 对推进咸水层安全高效的 CCUS 具有重要意义。

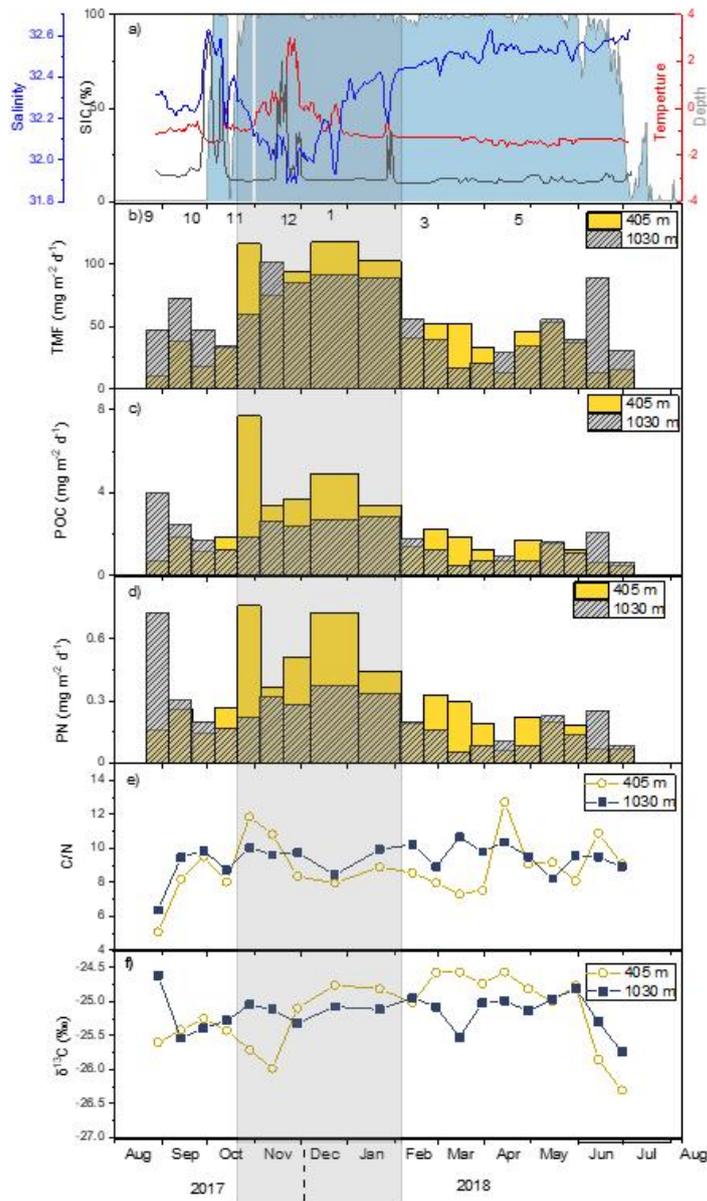


15.6 基于脂肪酸探究西北冰洋北风深海平原冬季颗粒有机碳的组成与转变

吴嘉琪 博士研究生

自然资源部第二海洋研究所

沉降颗粒有机碳 (POC) 是异养生物重要的食物来源, 不同来源的 POC 对高营养级生物有不同的影响。由于光照的限制, 北极冬季 POC 通量通常远低于夏季。然而, 最近的研究显示在西北冰洋北风深海平原, 冬季 POC 的通量与夏季相当。我们通过分析布放于北风深海平原一套双层捕获器中沉降颗粒物中的脂肪酸以及结合相关温盐数据, 解析西北冰洋北风深海平原冬季 POC 的组成及其在水柱中的转变。

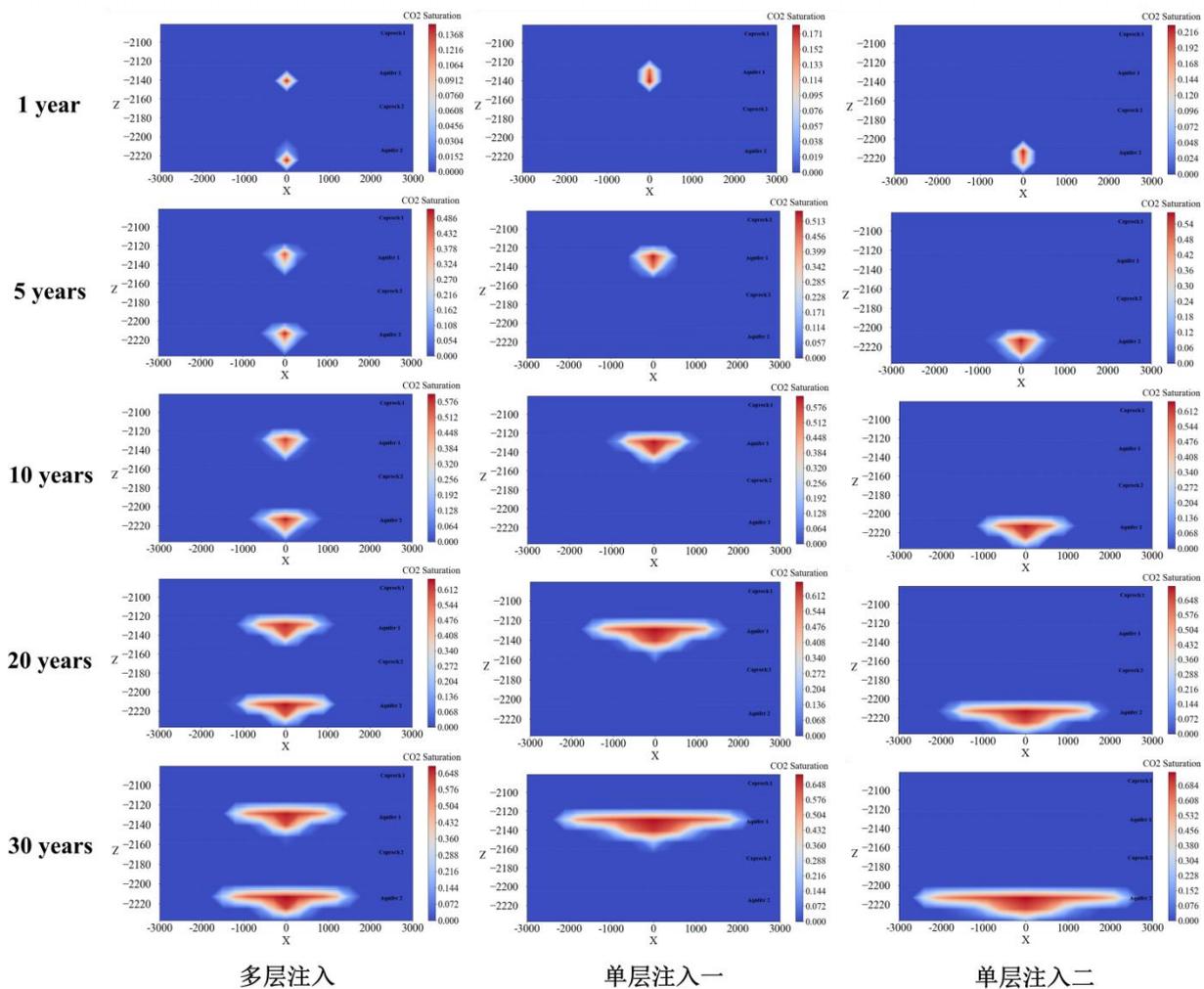


15.7 单层及多层注入条件下 CO₂ 海洋地质封存模拟对比分析研究

莫福涛 硕士研究生

浙江大学

中国海洋沉积盆地的 CO₂ 地质封存区域通常具有储层厚度较小、渗透特性差异显著以及储盖层交错分布的特点，这使得传统的 CO₂ 单层注入储层方法效率较低。为了研究 CO₂ 多层注入技术在海洋沉积盆地储碳应用中的可行性，本研究选取东海陆架盆地丽水凹陷作为储碳目标区域。通过使用 TOUGH-FLAC 耦合模拟器构建储碳地质模型，并以 CO₂ 饱和度、孔隙水压力、储盖层位移以及库仑失效应力（CFS）作为评价指标，本研究分别对单层和多层注入条件下的 CO₂ 运移特征进行了研究。数值模拟结果显示：（1）在相同的注入速率下，深部储层中 CO₂ 的迁移距离大于浅部储层；（2）与单层注入相比，多层注入条件下储层中的孔隙水压力较低且增长缓慢，导致储层垂直位移较小；（3）多层注入条件下储盖层的 CFS 值较低，表明 CO₂ 突破盖层产生泄漏的风险相对较小，从而使得场地具有更好的安全性。



15.8 海洋可持续发展背景下中国战略性关键金属的深海勘探与开采：思考与展望

陈子恒 硕士研究生

上海海洋大学

战略性关键金属指的是那些对现代社会至关重要，但供应安全面临高风险的稀有金属、稀土金属、稀散金属以及其他金属种类（例如铜、金、钴、镍、稀土元素等）。这些金属广泛应用于新型电池、新能源汽车、特种玻璃及其制品的开发制造，以及国防和军事工业等领域。深海盆地的多金属结核、海山以及岛屿斜坡上的富钴结壳，还有海底热液系统的多金属硫化物，都是战略性关键金属的重要来源。它们为中国未来确保战略金属供应链的安全提供了必要的保障。目前，人类对深海金属矿产资源的勘探与研究正不断深入，各大国对战略性关键金属原材料的需求和竞争也在不断增长。因此，发展深海采矿业将成为中国海洋经济高质量发展的重要趋势之一。然而，大规模的深海矿产资源开发活动可能会对海洋生态系统造成长期且不可逆转的破坏，带来一系列持续性的环境挑战，这与海洋可持续发展的理念相悖。本研究主要探讨了我国大洋战略性关键金属的勘探技术背景与现状、未来潜在的发展趋势与研究热点。结合并借鉴陆地采矿的“绿色矿山”理念与先进模式，本研究提出中国在未来应持续并深入实施大洋战略性金属矿产开发理论的研究工作，并应大力推进深海采矿方法的创新以及深海地质环境修复治理技术的开发，以提高资源开发利用效率，突破技术瓶颈，开启商业化开采时代的大门。

海洋可持续发展背景下的中国战略性关键金属的深海勘探与开采：思考与展望

陈子恒
上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海, 201306

1. 研究背景

战略性关键金属是指为当今社会发展所必需但安全供应存在高风险的稀有金属、稀土金属、稀散金属以及其他部分种类的金属（如Cu、Au、Co、Ni、REE等），被广泛应用于新型电池、新能源汽车、新型玻璃及其制品等的开发制造以及国防军事工业等领域。分布于深海盆地的多金属结核、海山以及岛屿斜坡上的富钴结壳以及海底热液系统的多金属硫化物是战略性关键金属的重要来源，同时也将为中国未来维持战略金属的安全供应链提供必要保障。

2. 研究现状与意义

□ 各大国对战略性关键金属材料的需求与竞争在日益增加；
□ 发展深海采矿业将是未来海洋经济高质量发展的一大重要经济增长点。

3. 存在的问题与挑战

□ 大规模的深海采矿会产生沉积物羽流，破坏底栖生物的栖息地，从而破坏海洋生态系统食物网；
□ 深海采矿过程产生的人为噪音会对鲸类等海洋哺乳动物的繁衍、捕食以及信息交流等产生干扰；
□ 深海采矿会降低海山的生产力水平，对鲸类等远洋生物的栖息地和生物量产生负面影响。

4. 思考与展望

矿产	消费量/万吨	对外依存度
铜	1117	75%
镍	119	91%
钴	6.5	96%
锰	1246	90%

部分中国战略性关键金属的对外依存度（来源：中国有色金属工业协会，2018）

□ 要保证新时代国民经济高质量发展，深海采矿时代的到来大势所趋；
□ 遵循可持续发展的基本原则，结合并借鉴当今陆地采矿行业的“绿色矿山”理念与先进模式，例如绿色采矿工艺与先进尾矿处理技术的伊敏模式，资源高效开采和矿区集中连片治理的鄂尔多斯模式，特殊地区生态修复的霍林河模式以及绿色勘察示范的锡林郭勒模式等，于未来的深海采矿业领域中践行习近平新时代中国特色社会主义思想，推动深海采矿业绿色发展；
□ 我国未来应持续并深入贯彻落实大洋战略性金属矿产开发领域的理论与技术研究工作；
□ 大力推进深海采矿方法的革新与深海地质环境修复治理技术的开发，同时降低环境污染，提高资源利用效率，降低矿山成本，从而推进采矿行业的可持续发展；
□ 提高资源开发利用效率，突破技术瓶颈，以期开启商业化开采时代的大门。

5. 作者简介

作者：陈子恒（1998.6），男，安徽蚌埠人，硕士研究生毕业（2024年6月，师从宫尚桂副教授），硕士阶段从事冷泉沉积地球化学研究，博士阶段意向从事海底资源及其成矿作用研究（热液系统），E-mail: cher_so2025@163.com

欢迎交流！

15.9 基于分子动力学模拟的 CO₂ 在不同封存环境下的溶解度差异研究

林群 硕士研究生

西南石油大学

在碳中和背景下，碳捕集、利用与封存（CCUS）技术成为应对全球气候变化的重要途径之一，特别是在离岸封存的情境中，二氧化碳（CO₂）在海水中的溶解度是关键影响因素。现有研究主要集中于 CO₂ 在一价盐溶液中的溶解行为，然而对于含二价盐（如 Mg²⁺）的盐水环境的研究相对较少。本研究利用分子动力学模拟方法，借助 LAMMPS 软件，系统探讨了 CO₂ 在不同盐度下的含 MgCl₂ 盐水中的溶解行为。研究表明：（1）在相同温度和盐度条件下，CO₂ 在含 MgCl₂ 的盐水中的溶解度较仅含 NaCl 的盐水下降低约 20%；（2）随着盐度从 1mol/kg 提升至 5mol/kg，CO₂ 在 NaCl 溶液中的溶解度下降了 22%，而在 MgCl₂ 溶液中的溶解度下降幅度更大，达到 33%；（3）通过径向分布函数和氢键分析发现，Mg²⁺ 的存在显著影响了水分子之间的氢键结构，导致更多氢键断裂，从而削弱了 CO₂ 的溶解能力。镁离子的强水合作用是导致溶解度差异的重要原因。该研究为 CO₂ 在复杂离岸盐水体系中的行为提供了新的理论依据，能够为 OCCUS 地球系统科学的研究、蓝色经济发展以及相关工程实践提供重要参考。

第四届 离岸碳捕集、利用与封存论坛
THE FOURTH OFFSHORE CARBON CAPTURE, UTILIZATION AND STORAGE FORUM

基于分子动力学模拟的 CO₂ 在不同封存环境下的溶解度差异研究
 林群¹
 1. 西南石油大学, 四川 成都, 610500

介绍

在碳中和背景下，碳捕获、利用与封存（CCUS）技术成为应对全球气候变化的重要途径之一，特别是在离岸封存的情境中，二氧化碳（CO₂）在海水中的溶解度是关键影响因素。现有研究主要集中于 CO₂ 在一价盐溶液中的溶解行为，然而对于含二价盐（如 Mg²⁺）的盐水环境的研究相对较少。本研究利用分子动力学模拟方法，借助 LAMMPS 软件，系统探讨了 CO₂ 在不同盐度下的含 MgCl₂ 盐水中的溶解行为。

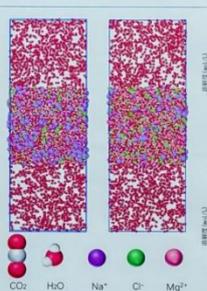


图1 分子模拟图 (左 NaCl, 右 NaCl+MgCl₂)

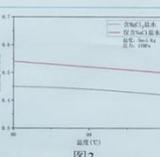


图2 同一盐度、压力下界面张力随温度变化

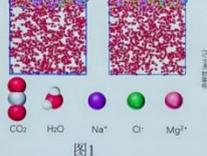


图3 同一盐度、压力下 CO₂ 溶解度随温度变化

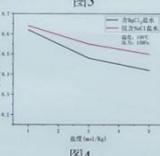


图4 同一温度、压力下不同盐度的 CO₂ 溶解度变化

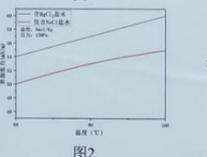


图5 H₂O 中 H 原子与 CO₂ 中 O 原子径向分布函数

结果与讨论

- 盐度 5mol/kg、压力 15MPa 时，升高温度会降低 CO₂ 的溶解度；
- 温压条件一定时，盐度越高界面张力值越高，溶液盐度的增加对 CO₂ 的溶解具有抑制作用。随着盐度从 1mol/kg 提升至 5mol/kg，CO₂ 在仅含 NaCl 盐水中的溶解度下降了 22%，而在含有 MgCl₂ 盐水中的溶解度下降幅度更大，达到 33%；
- 在相同温度和盐度条件下，含 MgCl₂ 盐水的界面张力大于仅含 NaCl 盐水的界面张力，其 CO₂ 的溶解度较仅含 NaCl 盐水的溶解度下降最低约 20%；
- 通过径向分布函数和氢键分析发现，含有 Mg²⁺ 的径向分布函数第一峰值更低，且影响了水分子之间的氢键结构，导致更多氢键断裂，从而削弱了 CO₂ 的溶解能力。

结论

盐度与温度都会影响 CO₂ 的溶解度，在一定压力下，盐度与温度越高，CO₂ 溶解度越低。Mg²⁺ 对气液间 IFT 增加的贡献率大于 Na⁺，Mg²⁺ 的加入会降低 CO₂ 的溶解度。

参考文献及其他信息

[1] 周守为, 李建平, 朱军龙, 等. CO₂ 海洋封存的思考与新路径探索[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(4).
 [2] 林元华, 邓宽海, 宁华中, 等. 二氧化碳在地质层水中的溶解度测定及预测模型[J]. 中国石油大学学报(英文版), 2021, 45(1): 117-126.
 [3] Adam A M, Bahamon D, Al Kobaisi M, et al. Molecular dynamics simulations of the interfacial tension and the solubility of brine/H₂CO₂ systems: Implications for underground hydrogen storage[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 78: 1344-1354.

基金项目: 四川省国际合作创新项目“玄武岩地层 CO₂ 加速矿化封存机制与关键技术” (编号: 2023YFH0005)

15.10 CO₂捕集、驱油与封存项目碳减排量核算标准化研究

张琦 工程师

中国石油新疆油田分公司实验检测研究院

CO₂捕集、驱油与封存是中国当前技术发展水平和商业化程度最高的CCUS项目类型，但减排量核算标准的缺失阻碍了其规模化发展。为锻造产业竞争优势，新疆维吾尔自治区积极开展相关标准化研究。在核算边界和基准线情景上，探索将捕集、运输、驱油封存3个环节进行模块化划分，分别甄别基准线情景，便于多个运营方分配减排效益。根据工程实际识别了6个排放源并规定了核算数据获取方法。对于放空和逸散的量化这一难点，运用进出口差减法代替了捕集与运输阶段的监测以避免过高的核算成本，在驱油与封存阶段通过浓度与流量实测量化了地面设施设备的排放，尤其针对无组织逸散给出了仪器选择、采样与测定、结果与计算的指导。对于安全有效性如何保障这一难点，探索风险监控机制，规定对周边4种环境风险受体开展定期监控与环境影响修复，当影响界定为轻度及无影响时才能开展核算。相关标准化工作旨在推动区域内CO₂捕集、驱油与封存项目效益的量化与产业化发展。



CO₂捕集、驱油与封存项目碳减排量核算标准化研究

王兴华, 张琦, 宋涛涛, 王雨, 林莉莉

中国石油新疆油田分公司实验检测研究院, 克拉玛依, 834000

新疆维吾尔自治区油气田环保节能工程研究中心



背景

CO₂捕集、驱油与封存是中国当前技术发展水平和商业化程度最高的CCUS项目类型，但减排量核算标准的缺失阻碍了其规模化发展。新疆维吾尔自治区积极开展相关标准化研究，自治区地方标准《二氧化碳捕集、驱油与封存项目碳减排量核算技术规范》即将发布，是当前国内进程最快的CCUS全流程碳核算标准，标准旨在推动区域内CO₂捕集、驱油与封存项目效益的量化与产业化发展，锻造地区产业竞争优势。

标准制定过程



2023年10月28日

2023年4月，依托新疆油田公司科研课题，形成标准草案，地方标准正式立项



2023年9月

2023年9月，CCUS地方标准（草案）通过专家开题论证审查



2024年6月

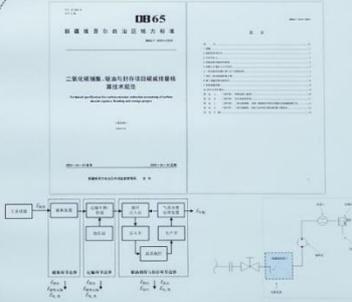
2024年6月，完成公开征求意见，标准（征求意见稿）通过专家技术审查会



2024年9月

2024年9月，标准（送审稿）通过市场监督管理局组织的专家技术审查会，即将发布

地方标准



地方标准《二氧化碳捕集、驱油与封存项目碳减排量核算技术规范》报批稿封面、目录、核算边界示意图、逸散监测示意图

CCUS碳减排量监测核算研究工作

封、驱、捕全流程核算方法学

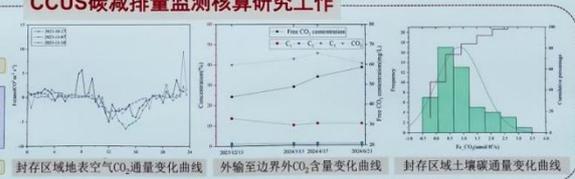


全流程碳减排量核算

环境风险评估研究

碳减排核算报告

环境风险评估报告



封存区域地表空气CO₂通量变化曲线

外输至边界外CO₂含量变化曲线

封存区域土壤碳通量变化曲线

标准摘要

1. 在核算边界和基准线情景上，探索将捕集、运输、驱油封存3个环节进行模块化划分，分别甄别基准线情景，便于多个运营方分配减排效益；
2. 根据工程实际识别了6个排放源并规定了核算数据获取方法。对于放空和逸散的量化这一难点，运用进出口差减法代替了捕集与运输阶段的监测以避免过高的核算成本，在驱油与封存阶段通过浓度与流量实测量化了地面设施设备的排放，尤其针对无组织逸散给出了仪器选择、采样与测定、结果与计算的指导；
3. 为了保障项目的安全有效性，探索风险监控机制，规定对周边4种环境风险受体开展定期监控与环境影响修复，当影响界定为轻度及无影响时才能开展核算。

16 专题总结及未来发展建议

16.1 专题一：OCCUS 工程技术地球系统科学理论

该专题探讨了与地理科学相关的多个议题，包括利用海洋体系进行二氧化碳封存、水净化过程以及海洋循环体系等。为了解决这些问题，我们必须尽可能减少人类对地球的干预，节约资源，并运用自然规律来应对二氧化碳问题和 CCUS 挑战。通过地球系统科学理论的支持，为 CCUS 的未来发展提供科学依据，解决关键科学问题，并致力于构建人类与自然的和谐共生关系。

未来发展建议：

(1) 未来 CCUS 多考虑地球系统科学理论支撑及构建长时间尺度、界面型的技术体系。

16.2 专题二：海底 CO₂ 驱油与封存协同理论与技术

二氧化碳驱油并非一个新颖的话题，过去我们主要关注于提升采油技术，并从油气资源的角度进行研究。然而，随着国家对“双碳”战略的日益重视，合理利用海底二氧化碳驱油与封存技术，实现大规模需求与工程的协同运作，已成为未来发展的关键方向。该领域已经引起了同行的关注，包括来自学校、企业研究院以及学生的投稿，大家期望通过本次会议平台，在这一方向上做出贡献。

未来发展建议：

- (1) 加强跨学科合作，推动二氧化碳驱油技术与环境科学、地质学等领域的融合；
- (2) 推动政策研究，为二氧化碳驱油与封存技术的商业化应用提供政策支持和指导；
- (3) 建立行业标准，确保二氧化碳驱油项目的实施质量和环境安全。

16.3 专题三：海底碳封存选址、监测与评估

我国首个海域二氧化碳地质封存示范工程正在实施中，以满足沿海省市实现碳达峰和碳中和的战略需求。接下来，一系列新的示范工程将启动预研究阶段。在二氧化碳有效灌注到海底以下地质体，并确保封存过程的安全稳定性方面，选址和监测技术至关重要。本专题集中讨论了与海洋二氧化碳地质封存场地选址相关的理论、技术、监测方法和评价标准，旨在识别影响灌注有效性和安全稳定性的关键问题，并确定未来研究的攻关方向，以支持我国海洋地质碳封存示范工程的研究与实施。本专题的专家们针对海域咸水层封存的选址问题、选址效果的评价方法以及封存结果的监测技术等重大科学问题进行了深入探讨，并达成了以下共识：

- (1) 海洋地质碳封存对双碳目标实现具有重要意义。我国沿海省市同全球发达国家沿海地区一样，人口密集、工业和商业极为发达，在陆域难以找到合适的封存场地；同时，因海域封存潜力大、安全性高、环境风险小等特点，海洋地质碳封存是沿海省市和地区实现碳中和的重要选择。
- (2) 我国沿海省市已开始重视海洋地质碳封存示范工程预研究。我国海域首个海洋二氧化碳地质封存示范工程——恩平 15-1 示范项目顺利实施并积累许多经验，中海油与广东省以及国外两家大型商业石油公司合作正在论证千万吨级示范工程——大亚湾 CCS/CCUS 项目的选址；中石化与上海市以及国内多家企业正在开展东海陆架盆地 CCS/CCUS 示范工程选址预研究；青岛海洋地质研究所在青岛市发改委和科技局的支持下正开展南黄海烟台拗陷 CCS 项目的选址研究；湛江湾实验室在广东省发改委支持下与相关单位合作正在开展北部湾盆地二氧化碳地质碳封存潜力评价和示范工程选址预研究；中海油研究院总院和天津分公司正在研究渤海海域开展 CCUS 项目的预研究。上述表明，既恩平 15-1 示范项目之

后，我国多个海洋二氧化碳地质封存示范项目已进入预研究阶段。

(3) 海洋地质碳封存监测越来越受到重视。如何认定所实施的示范项目是安全的，有效的判断手段便是监测，以及海洋地质碳封存是否具有长期稳定性关系到示范工程的成败。

未来发展建议：未来应侧重低成本、长周期、高精度的监测技术和设备研发。

16.4 专题四：海洋碳封存风险监测与核算方法

本专题聚焦于海洋碳封存的风险监测与核算方法，从多个视角深入分析了海洋碳封存的风险评估、监测技术以及核算计量方法，提供了丰富的 CCUS 视角和最新的研究成果。本专题从微观机制到技术标准，不仅展示了海洋碳封存领域的最新科研成果，也强调了风险监测与核算方法在确保碳封存项目安全性和有效性中的关键作用。

未来发展建议：

- (1) 通过风险评估确定海洋碳封存中需要关注的监测问题；
- (2) 通过监测活动提供实时数据来观察和验证潜在风险；
- (3) 通过核算方法以监测结果为基础提供封存效果的量化证据。

16.5 专题五：OCCUS 岩石物理与流体表征、模拟

本专题聚焦于离岸复杂油气藏中二氧化碳 (CO₂) 的高效利用与安全封存所面临的挑战，包括 CO₂ 封存安全性难以科学预测及有效控制、盖层稳定性力学影响机制不明确、微/纳米尺度储层流体渗流规律难以定量表征等问题。研究内容涉及复杂油气藏 CO₂ 驱油 (气) 及封存机制、油气藏/咸水层 CO₂ 封存安全性评价、CO₂ 地质封存泄漏风险及监测技术、注 CO₂ 井筒完整性、多因素耦合力学影响机理、盖层稳定性主控因素、CO₂ 相态影响、封存过程对储层物性演化影响等多个方面。本研究旨在探索复杂油气藏 CO₂ 高效利用与安全封存的理论与技术，为我国 CO₂ 驱油封存项目提供技术支撑。

专题内容包括岩石物理性质研究、流体流动模拟、封存效果评估等多个方面，通过多角度、多层次的研究，为离岸碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术的发展提供坚实的理论基础和实验支持。专家们探讨了不同岩石类型对 CO₂ 封存效果的影响，以及 CO₂ 矿化流体物性与孔隙结构特征变化规律及井筒完整性评价等。利用先进的物理模型实验装置及数值模拟技术，对 CO₂ 对储层的作用、不同相态 CO₂ 的注入、扩散和储存过程以及封存进行了详细的实验及模拟分析。研究揭示了离岸非常规油藏中注 CO₂ 开发及利用过程中的作用机理、相行为特征、渗流规律、储层演化特征等；预测了 CO₂ 在地下储层中的封存特征及长期封存过程中的井筒完整性，为制定有效的封存策略提供了科学依据。

未来发展建议：

- (1) 加强跨学科合作：鼓励地质学、化学、工程学等不同领域的专家进行更紧密的合作，以促进技术的综合创新和应用；
- (2) 提升模拟技术：投资于更先进的模拟软件和硬件，以提高对复杂地质条件和流体行为的预测准确性；
- (3) 强化现场试验：增加实地测试的频率和规模，以验证实验室研究结果的实际应用效果，并从中获取宝贵的数据。

16.6 专题六：海洋 CO₂ 管道输送安全保障技术

针对离岸碳捕集、利用与封存 (CCUS) 管道的安全议题，本专题深入分析了海洋二氧化碳 (CO₂) 输送管道在结构安全性、流动安全性和材料抗腐蚀性等方面所遭遇的技术难题及应对策略。重点聚焦了以下几方面：

- (1) 系统分析了海洋 CO₂ 管道结构安全隐患，认为海床溶蚀、船锚冲击、管道屈曲扩展是影响海底管道安全性的关键因素，详细探究了柔性管道屈曲规律，强调了海底管道的检测维护是极具挑战性的课题。
- (2) 全面梳理了海洋 CO₂ 管道流动安全的关键技术，建立了管道流动安全预测的多维度模型，并针对杂质气体、含水量等影响管道输送安全和稳定性的关键因素进行了深入探讨，认为为确保海洋 CO₂ 管道安全性和经济性，须进一步构建合理的流体状态准则或判据。
- (3) 围绕 CO₂ 管道腐蚀机理，分别从杂质气体影响管道腐蚀、多种杂质气体协同作用、以及单个凝结液滴腐蚀微观机制等方面开展系统研讨，并借鉴油田系统的先进腐蚀在线监测技术探讨其应用于 CO₂ 管道的适用性；同时，介绍了中石化在胜利油田-齐鲁石化 CCUS 工程全流程腐蚀控制措施的成功经验，以及中石化在干热岩等新兴领域面临的技术挑战。

在讨论环节，我们针对 CO₂ 管道止裂环的应用、杂质气体的影响以及模型预测、海底管道腐蚀监测等问题进行了热烈的讨论。本专题为 OCCUS 论坛贡献了 CO₂ 管道安全的前沿技术和经验做法，并指出了该领域发展的技术挑战。

未来发展建议：

- (1) 关注结构安全：发展管道泄漏内外压力与弯矩联合作用下的屈曲控制及止裂技术；
- (2) 关注流动安全：发展多杂质流体瞬态水力热力计算及管道运行安全数智化控制技术；
- (3) 关注材料腐蚀：发展管输 CO₂ 腐蚀动态模拟、原位表征与长输管道内外腐蚀监测技术；
- (4) 针对海洋 CO₂ 管道安全问题继续加强基础研究工作，注重安全性与经济性相匹配的新技术发展。

16.7 专题七：海底碳封存相关设备研发

针对海底碳封存的地震仪器设备自主研发与工程化应用问题，本专题深入探讨了适用于海底碳封存泄漏监测和微地震监测的海底地震仪器技术、OBN 碳封存微震监测技术，以及 OBS+DAS 新型实时微震监测设备所面临的挑战和解决策略。

未来发展建议：

- (1) 发展海底地震节点（OBN）、特别是海底飞行节点（OBFN）是海底碳封存微震或泄漏监测的试验验证的高效装备；
- (2) 发展海底地震仪（OBS）装备技术，特别是实时化 OBS 装备技术是海底碳封存监测的核心装备；
- (3) 自研中高频带地震检波器，并集成至 OBS 或 OBN，为海底碳封存设备自主研发提供我国自主技术支撑。

16.8 专题八：海洋生物固碳及零碳生物化学品的开发技术

离岸碳捕集、利用与封存技术的发展依赖于基础研究的突破和工程技术的持续进步。专题八专注于海洋生物固碳机制以及低碳生物化学品的开发技术，包括碳的生态捕集与封存（CCS）和碳的捕集与利用（CCU）这两大应用领域。

未来发展建议：

- (1) 加强生态碳汇（CCS）的计量及其核算方法的标准化。推动海洋浮游植物碳汇进入蓝碳清单，扩大蓝碳的内涵和外延。据测算，全球浮游植物的光合固碳效率提升 10%，可额外获得海洋碳汇 400 亿吨以上，相当于 2021 年全年的工业碳排放量；
- (2) 进一步推动包括海藻养殖，微藻基产品开发等海洋生物低碳高值化应用。开发微藻液肥，促使农业碳汇和海洋碳汇有机结合；同时加强高附加值微藻精炼和生物化学品的开发技术，整合 OCCUS 产业化链

提高经济效益。

16.9 专题九：深远海 CCUS 海洋牧场设计与技术研发

规模化的深远海 CCUS 碳汇牧场对于实现国家的双碳目标和应对全球气候变化问题具有重要作用。因此，国内外正积极研发海洋碳汇牧场的构建技术。深远海 CCUS 碳汇牧场的发展趋势表现为从近岸向离岸扩展，以及海藻牧场、高值贝类牧场与海上风电的联合布局。本专题汇集了关于海洋牧场、网箱养殖设施、海藻养殖设施在风浪流作用下的动力响应特性的研究资料。特别地，本专题旨在构建一个安全可靠的深水系泊式海藻碳汇牧场，介绍了在离岸深水复杂海况下系统服役力学性能的研究现状、系泊式海藻牧场的动力响应特性、以及碳汇经济效益评估。本专题探讨了将高强聚乙烯纤维缆绳应用于海藻牧场的可行性，并提出了系泊式海藻牧场的设计分析流程。此外，本专题构建并验证了海藻牧场的数值模型，并研究了缆绳淹没深度和海藻养殖间距对海藻牧场动力特性的影响。基于海藻牧场的全寿命周期碳汇，本专题还进行了经济效益评估。本专题的研究成果将为规模化系泊式深远海 CCUS 碳汇牧场的建设提供重要的参考依据。

未来发展建议：

- (1) 深入研究海藻牧场在极端海洋环境下的稳定性和安全性，确保牧场能够抵御强风、巨浪和复杂海流的影响；
- (2) 探索更高效的海藻种植和收获技术，以提高牧场的生产效率和经济效益；
- (3) 加强海藻碳汇的长期监测和评估，确保牧场的碳吸收和储存能力达到预期目标；
- (4) 考虑牧场对海洋生态系统的影响，确保牧场的可持续发展不会对海洋生物多样性造成负面影响。

16.10 专题十：深海物质能量循环与碳封存

专题内容主要涉及自然科学领域的知识点，涵盖了从微观到万年级的时间尺度。此外，还有两个与打标 OCC 紧密相关的部分，包括中央南海所采用的多种方法来确定服装系统的运营，以及营销部的通讯流程和智能轻重投放策略，这些内容对于稳定内部处理状态和实现目标至关重要。尽管报告数量不多，但它们对 CCUS 标准化工作具有重要意义。

未来发展建议：

- (1) 未来能够建立相关标准，并将这些成果转化为正式的标准；
- (2) 加强跨学科合作，促进自然科学与工程技术的融合，以确保 CCUS 技术的全面性和实用性；
- (3) 制定明确的时间表和里程碑，确保标准化工作的有序进行，并及时更新和修订标准以适应技术进步和市场需求的变化。

16.11 专题十一：极地多圈层碳循环

本专题内容涵盖了极地岩石圈、水圈、冰冻圈等多个圈层中的碳循环过程，以及深渊俯冲系统中多圈层碳循环的研究，这些内容偏向自然科学基础研究领域。研究的时间尺度包括构造尺度、万年尺度以及现代过程。此外，还有两个报告专注于与 OCCUS 紧密相关的疏浚海洋土稳定与二氧化碳固化问题，以及地质封存的注入模拟。本次 OCCUS 专题内容丰富，涉及范围广泛。极地作为地球气候系统的关键组成部分，其多圈层相互作用，尤其是对碳循环的影响，是当前科学研究的前沿领域之一。

未来发展建议：

- (1) 提升观测技术，特别是在极端环境下的数据采集能力，以便更精确地监测和分析极地碳循环的动态变化；
- (2) 加大对新技术和新材料的研究投入，如在海洋疏浚土稳定与 CO₂ 固化方面，探索更多高效、环保的材料和方法。

16.12 专题十二：OCCUS 国内外标准的研究和制定**未来发展建议：**

- (1) 构建一套关于碳捕集、利用与封存（CCUS）的标准体系，明确未来需要制定的标准，特别是那些与安全风险紧密相关的标准应优先考虑；
- (2) 鼓励更多的机构将研究成果转化为标准，这包括行业标准、清单标准乃至国际标准；
- (3) 充分利用计划中的五个工作组等资源，期望在下一届会议上能看到更多研究成果转化为标准。



主办单位

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

承办单位

自然资源部第二海洋研究所

协办单位

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
海洋油气高效开发全国重点实验室、海洋天然气水合物全国重点实验室
浙江大学海洋学院、青岛海洋地质研究所、北京怀柔实验室
北京港震科技股份有限公司、杭州市西湖区科学技术协会
中国海洋学会海底科学分会、中国海洋工程咨询协会海底勘查与开发分会
浙江省海洋学会、自然资源部海底科学重点实验室