

# 二氧化碳海洋封存的技术和研究现状

张海滨<sup>1</sup>, 卢迪<sup>1</sup>, 王永昌<sup>1</sup>, 田文爽<sup>1</sup>, 沈国飞<sup>2</sup>, 宋学行<sup>2</sup>, 魏伟<sup>2</sup>

(1. 海油总节能减排监测中心有限公司, 天津 300452; 2. 中国科学院上海高等研究院 中国科学院低碳转化科学与工程重点实验室, 上海 201210)

**摘要:** 全球变暖的问题正变得日益严峻, 碳减排碳中和已成为国际社会的共识和努力目标。作为 CO<sub>2</sub> 减排的重要方式之一, 二氧化碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)近年来备受关注并且发展迅猛。CO<sub>2</sub> 海洋封存作为其中一种最具潜力的减排方式, 了解其发展现状对进一步研究 CO<sub>2</sub> 封存具有重要的参考价值。本文介绍了 CO<sub>2</sub> 海洋封存的方法和封存机理, 总结了该技术在国内外研究进展。此外, 文章还概述了我国在 CO<sub>2</sub> 海洋封存上的巨大潜力和库源匹配上的优势, 以及海洋封存对环境可能造成的影响。最后, 指出推进 CO<sub>2</sub> 海洋封存技术的研究并开发相应的能力, 将有助于加速推进碳减排进程、尽快实现碳中和目标。

**关键词:** 二氧化碳捕集、利用和封存; 海洋封存; 研究进展; 海洋环境; 海洋酸化

**中图分类号:** X701 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2024)4-0108-14

**DOI:** 10.11759/hyhx20230801001

进入新世纪以来, 全球变暖的趋势日益加剧, 极端气候事件成为“新常态”, 气候变暖的影响也越来越显著, 人类社会和自然环境遭到了严重的威胁<sup>[1]</sup>。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)在2023年发布的报告中明确指出, 2011年至2020年, 全球地表温度比1850年至1900年升高了1.1℃<sup>[2]</sup>, 这对世界的生态系统及人类未来的可持续发展构成了严峻的挑战。科学界普遍认为, 全球变暖的主要原因在于人类活动排放的温室气体不断增多<sup>[3]</sup>。其中, 二氧化碳(CO<sub>2</sub>)的过度释放对于加剧全球变暖这一过程起到至关重要的作用。由于过度消耗和滥用化石能源, 这种影响也越来越明显。美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)莫纳罗亚大气基线观察站发现, 2022年5月大气环境中的CO<sub>2</sub>含量已经突破数百万年的极限, 达到4.21×10<sup>-4</sup>的历史新高, 相较于工业化前其含量水平提升超过了50%。如果在未来几十年内人类无法削减化石能源的利用和温室气体的排放, 2100年空气中的CO<sub>2</sub>浓度预计将达到惊人的5.70×10<sup>-4</sup>, 全球平均气温将上升约1.9℃<sup>[4-6]</sup>。CO<sub>2</sub>与其他温室气体一起, 吸收了原本会逃逸到太空中的热量, 并将其重新辐射回地面, 导致地球的温度持续增加, 从而引发一连串极端天气事件, 如极端的雨季、洪涝灾害、强烈的台风等。随着世界的不断变暖, 厄尔尼诺现象的出现次数也在不断上涨, 这给人

类的家园带来了直接的、甚至不可逆转的破坏。持续增加的温室气体排放还会造成南北极的冰川融化甚至消失, 导致海洋水位上涨, 从而给地球带来巨大的威胁, 包括物种的毁灭、濒临消亡<sup>[7-10]</sup>。

因此人类必须从政治、经济、技术、法律等各个方面积极主动地寻求长期有效的解决方案, 携手深化国际合作, 实现CO<sub>2</sub>减排的目标。为了缓解温室气体对地球气候的影响、减少CO<sub>2</sub>的排放, 世界各国一方面应减少传统化石燃料的使用, 另一方面也要积极开发和利用风能太阳能等新能源, 并寻求新的限制温室气体排放的途径, 在减少CO<sub>2</sub>的排放量的同时保证经济的快速发展<sup>[11-13]</sup>。二氧化碳捕集、利用和封存(CCUS)技术是指将CO<sub>2</sub>从工业过程、能源消耗或大气中分离后加以利用或直接封存(图1), 这是一项切实可行的减排方法, 被认为是未来大规模减少CO<sub>2</sub>排放、减缓全球变暖的主要途径之一<sup>[14-16]</sup>。

收稿日期: 2023-08-01; 修回日期: 2023-11-10

基金项目: 中海油能源发展股份有限公司重大科技专项“CCUS一体化低成本技术研究及应用”

[Foundation: Major Science and Technology Projects of CNOOC Energy Development Co., Ltd, Research and Application of Low-cost Integrated CCUS Technology]

作者简介: 张海滨(1983—), 男, 山东潍坊人, 博士, 高级工程师, 主要从事CCUS技术、双碳数字化等方面的研究, E-mail: zhanghb11@cnooc.com.cn; 沈国飞(1982—), 通信作者, 男, 江苏东台人, 博士, 副研究员, 主要从事CCUS方向的模拟计算研究, E-mail: shengf@sari.ac.cn

目前, 国际社会上的传统能源研究机构如国际能源署(International Energy Agency, IEA)、石油输出国组织(Organization of the Petroleum Exporting Countries, OPEC)等, 以及一些国际能源协调机制如国际能源

论坛(International Energy Forum, IEF)、联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)等, 都一致认为 CCUS 技术将成为人类社会未来的主要碳减排技术, 应当加大投入并将之付诸实践<sup>[17]</sup>。

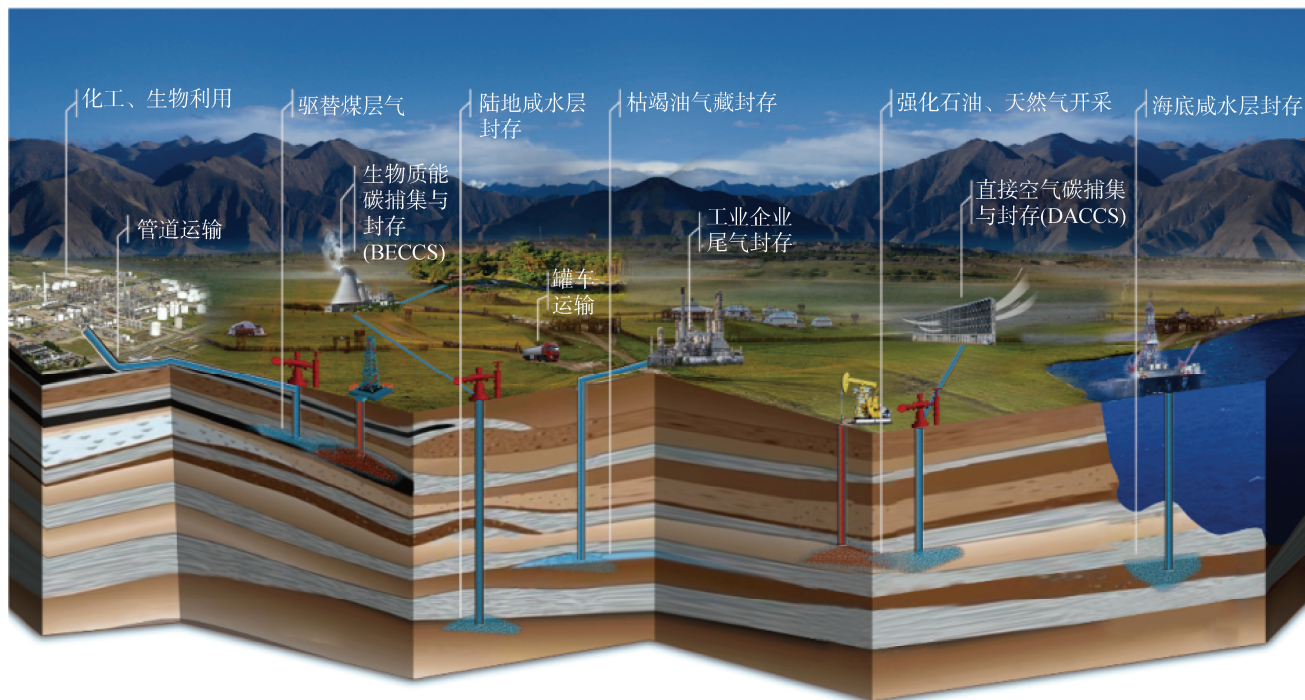


图1 CCUS 技术及主要类型示意图<sup>[14]</sup>

Fig. 1 Schematic of possible CCUS systems

CO<sub>2</sub> 的封存方法有很多种, 如生物封存、矿化封存等, 但主要还是以陆地封存和海洋封存为主<sup>[18-19]</sup>, 而 CO<sub>2</sub> 海洋封存被认为是最具发展潜力的一种实现 CO<sub>2</sub> 减排的方法<sup>[20]</sup>。本文介绍了 CO<sub>2</sub> 海洋封存的方法和封存机理, 概述了该技术在国内外的研究进展, 并指出 CO<sub>2</sub> 海洋封存可能造成的环境影响, 同时也对我国 CO<sub>2</sub> 海洋封存前景提出了展望。

## 1 CO<sub>2</sub> 海洋封存技术

海洋碳封存是一种碳减排理念, 不但封存潜力巨大, 而且比陆地碳封存更加安全可靠。目前海洋封存 CO<sub>2</sub> 主要包括三种形式: 一是将 CO<sub>2</sub> 压缩后直接注入深海 1 500 m 以下, 以气态、液态或者固态的形式封存在海洋水柱之下, 其中固态 CO<sub>2</sub> 的封存效率最高<sup>[21]</sup>; 二是将 CO<sub>2</sub> 注入到海床巨厚的沉积层中, 封存在沉积层的孔隙水之下, 即海洋沉积物封存; 三是 CO<sub>2</sub> 置换强化开采海底天然气水合物进行封存。

### 1.1 海洋水柱封存

海洋水柱封存方法是将捕获的 CO<sub>2</sub> 以一定的方式注入到海洋中, 依靠海水中的 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 等游离的离子, 通过一系列物理和化学反应将 CO<sub>2</sub> 溶解和吸收, 最终实现海洋水柱封存。CO<sub>2</sub> 主要以 4 种无机碳形式存在于海水之中, 其中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 占据了 95% 的比例, 它与 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 和溶解态的 CO<sub>2</sub> 构成了一个比较稳定的、巨大的缓冲系统。在不断增大的深度条件下, CO<sub>2</sub> 受到的压力会越来越大, 其密度也会变得比海水稠密, 最终会进入到重力稳定状态, 并存在于负浮力区(Negative Buoyancy Zone, NBZ)。

在海洋水柱封存中, CO<sub>2</sub> 所处的状态主要取决于 CO<sub>2</sub> 所注入的深度。当 CO<sub>2</sub> 注入到海洋的浅水区时, 它通常是气态的。在水深小于 500 m 时, 连续注入的 CO<sub>2</sub> 会形成大量的羽状流。这些羽状流中含有大量的 CO<sub>2</sub> 气泡, 其中一部分会慢慢溶解在周围的水体中, 另一部分在完全溶解前会逐渐上浮并最终释放到大气中<sup>[22]</sup>。CO<sub>2</sub> 在海水中的溶解度受到所处区域纬度

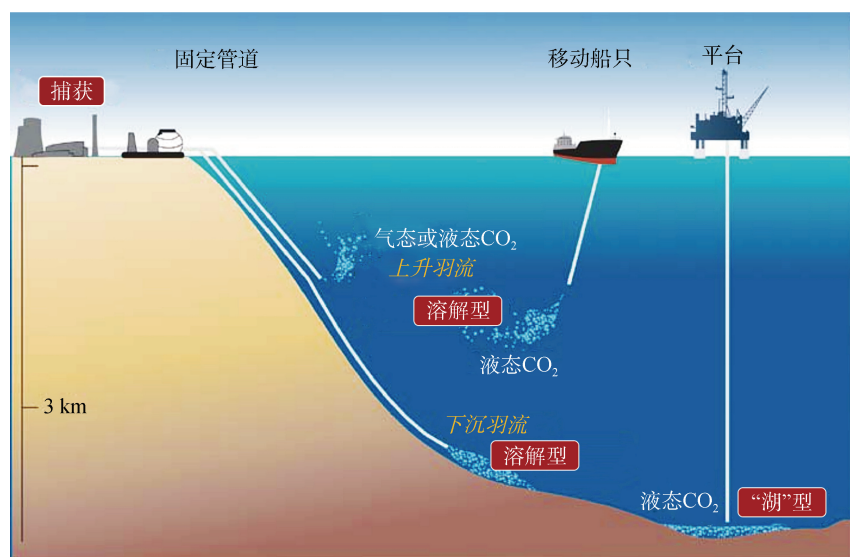
图2 CO<sub>2</sub>海洋水柱封存示意图<sup>[23]</sup>

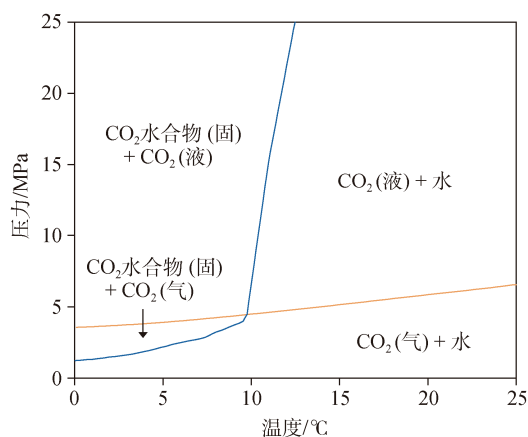
Fig. 2 Overview of ocean water column concepts

和水温的影响,特别在高纬度海区,CO<sub>2</sub>的溶解性会更加明显,因为这里的海水温度较低,且密度较大。另外,洋流可以强化CO<sub>2</sub>与海水的混合作用、加速海水对CO<sub>2</sub>的溶解,从而提升碳封存的效果。当水深大于500 m小于2 500 m时,CO<sub>2</sub>以正浮力的液态形式存在,注入的CO<sub>2</sub>仍会形成富含CO<sub>2</sub>液滴的羽流<sup>[24]</sup>。但是在大部分海域,CO<sub>2</sub>液滴表面将会与周围海水发生化学水合反应,在液滴表面形成一种类似固体的水合物,这样就会增加CO<sub>2</sub>液滴的密度、减缓CO<sub>2</sub>液滴上浮的速度,进而增强CO<sub>2</sub>在海水中的溶解。随着深度的增加,CO<sub>2</sub>密度也会逐渐增加。在3 000 m水深的条件下,CO<sub>2</sub>的密度会明显大于周围海水,CO<sub>2</sub>会逐渐下沉到海底形成液态CO<sub>2</sub>湖泊(图2)。碳湖表面会形成CO<sub>2</sub>水合物覆盖层,这更有利于封存CO<sub>2</sub>。

## 1.2 海洋沉积物封存

海洋沉积物封存是通过将CO<sub>2</sub>注入到海底的多孔床层中,在沉积物层的高压和低温的条件下,使CO<sub>2</sub>形成晶体状的水合物(图3),从而实现CO<sub>2</sub>在海底沉积物层内的有效封存(图4)<sup>[26-27]</sup>。Koide等最早提出将CO<sub>2</sub>封存到深海沉积物中,并经过大量的研究针对不同深度的海域提出了相应的理论建议<sup>[28]</sup>。他们将海床划分为三个深度范围,浅水区海床(<300 m)、深海海床(300~3 700 m)和超深海床(>3 700 m)。他们认为CO<sub>2</sub>在海底沉积物中是安全的,即使有少量的CO<sub>2</sub>从海底渗出,也会分散并溶解到海水中去。在水深约300 m以下深海区域的沉积层中,环境温度通常会低

于5℃,此时存在水合物形成区(Hydrate Formation Zone, HFZ),CO<sub>2</sub>会形成一种在海水中性质稳定的CO<sub>2</sub>水合物盖层。由于晶状水合物在海水中的溶解速率极低,因此可以有效地降低CO<sub>2</sub>对海洋生态系统的影响。此外,CO<sub>2</sub>水合物的产生不仅可以显著降低沉积层的孔隙度,甚至还会堵塞沉积层的孔隙,增强沉积层的密闭性,从而提升其封藏的能力并改善封存的效果<sup>[29-30]</sup>。海洋沉积物的岩石类型主要以砂岩和玄武岩为主,其中高渗砂岩能够有效封存CO<sub>2</sub>,而深海域玄武岩和高深砂岩中富含的钙、镁等物质元素则可以与CO<sub>2</sub>反应生成稳定的碳酸盐,而且这种反应速率很快,甚至95%以上的CO<sub>2</sub>在不到两年的时间里就可以被矿化为碳酸盐矿物<sup>[31-35]</sup>。将CO<sub>2</sub>

图3 CO<sub>2</sub>及水合物相示意图<sup>[25]</sup>Fig. 3 Phase diagram of CO<sub>2</sub> hydrate



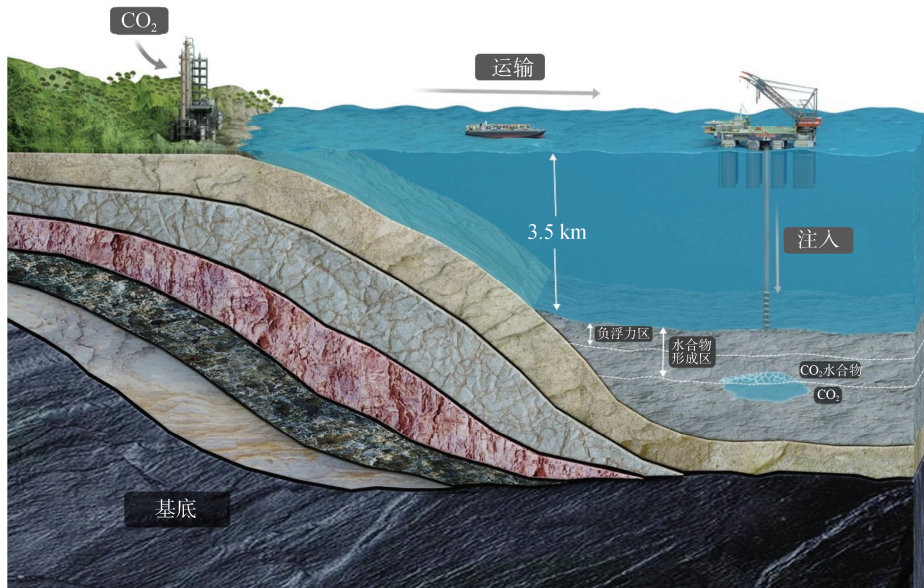


图4 CO<sub>2</sub>海洋深海沉积物封存示意图<sup>[36]</sup>

Fig. 4 Schematic of carbon sequestration in deep-sea sediments

液体注入到至少 3 000 m 的深海和几百米的海底沉积物中进行封存，由于那里的孔隙液浓度比较低，而且 CO<sub>2</sub> 还可以形成水合物，这可以保证 CO<sub>2</sub> 的永久储藏<sup>[27]</sup>。

### 1.3 CO<sub>2</sub> 置换天然气水合物封存

CO<sub>2</sub> 的封存也可以与可燃冰开采相结合，即在一定的温度和压强下在天然气水合物储层中注入 CO<sub>2</sub> 置换出甲烷(图 5)<sup>[37]</sup>。可燃冰指的是天然气水合物，是天然气和水在高压低温条件下生成的一种长得像冰块的物质，因为这种“冰块”是可以点燃的，所以俗称为可燃冰。可燃冰是一种清洁能源，1 m<sup>3</sup> 的可燃冰能释放 164 m<sup>3</sup> 的甲烷，按油气标准当量约相当于 0.16 t 原油，其储量大、热值高，有望成为未来石化燃料的理想替代能源<sup>[38-39]</sup>。虽然有丰厚的储量，但可燃冰在开采时，很容易因为甲烷气体泄漏逃逸加剧温室效应，进而污染大气环境。此外，开采之后可燃冰的减少和消失会削弱海底的地面强度，进而会改变沉积物的工程力学性质。此举可能会导致海底软化，进而诱发地质灾害如海底滑坡甚至塌方等，破坏海底构造以及海洋钻井平台、通讯电缆等设施<sup>[40]</sup>。

1993 年, Ebinuma 等<sup>[41]</sup>发表了关于 CO<sub>2</sub> 开采可燃冰的报道。1996 年, Ohgaki 等<sup>[42]</sup>提出一种新的想法, 即使用 CO<sub>2</sub> 来置换海底水合物沉积层中 CH<sub>4</sub>。相关研究表明, 该技术的应用在热力学和动力学方面不

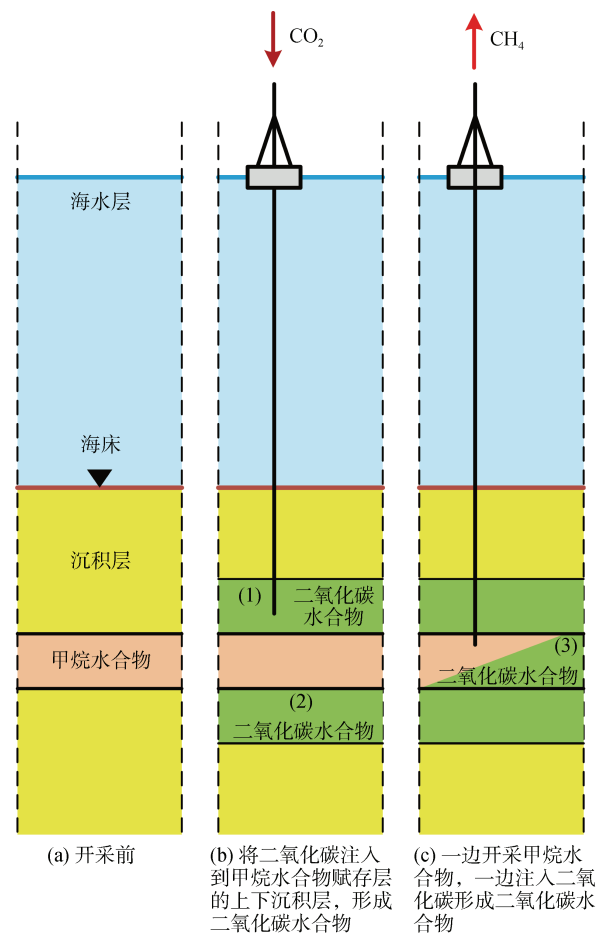


图5 CO<sub>2</sub> 封存置换甲烷示意图

Fig. 5 Schematic of CO<sub>2</sub> storage and methane replacement

存在问题,并且 $\text{CO}_2$ 置换可燃冰中 $\text{CH}_4$ 的过程并不需要额外的能量<sup>[43-44]</sup>。 $\text{CO}_2$ 置换法可以让可燃冰在地底打破晶体笼状结构,使甲烷逃逸出来,然后把它们从地底用管道输送到地面。 $\text{CO}_2$ 置换天然气水合物有很大的经济和环保优势,由于在相同的温度压力条件下, $\text{CO}_2$ 水合物稳定性优于可燃冰,当 $\text{CO}_2$ 置换开采 $\text{CH}_4$ 时,既能提升 $\text{CO}_2$ 的资源利用率,促进天然气的开采,保证海底水合物沉积层的稳定性,又能利用海洋存储空间大、潜力大的特点,最大化实现 $\text{CO}_2$ 的封存,一举实现经济价值和环保价值。

## 2 $\text{CO}_2$ 海洋封存研究进展

$\text{CO}_2$ 封存是CCUS技术的关键环节之一。 $\text{CO}_2$ 海洋封存是将 $\text{CO}_2$ 封存到海底以下的地质储层中(图6),

该技术具备多项优势。全球海洋面积占据了地球表面积的71%,是陆地面积的两倍有余,因此该技术对温室气体减排的潜在贡献巨大。海洋是地球上最大的活跃碳库,在封存 $\text{CO}_2$ 方面拥有巨大的开发潜力,其碳储量约是陆地的20倍、大气的50倍<sup>[22, 29]</sup>。在千年尺度上, $\text{CO}_2$ 在海洋与大气中大致保持着平衡。当大气中 $\text{CO}_2$ 的浓度持续在 $3.50 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$ 范围内时,海洋海水理论上可吸收2300~10700 Gt的 $\text{CO}_2$ 。释放到大气中的 $\text{CO}_2$ 最终会有80%将被封存在海洋中<sup>[22, 45]</sup>,然而由于密度跃层对深海与海洋表面海水的阻隔,导致海洋自然吸收过程相对缓慢,需要几千年才能与碳酸盐沉积物达到平衡<sup>[46]</sup>。 $\text{CO}_2$ 海洋封存是加速海洋吸收 $\text{CO}_2$ 的过程,也是一个有效可行的封存方案。

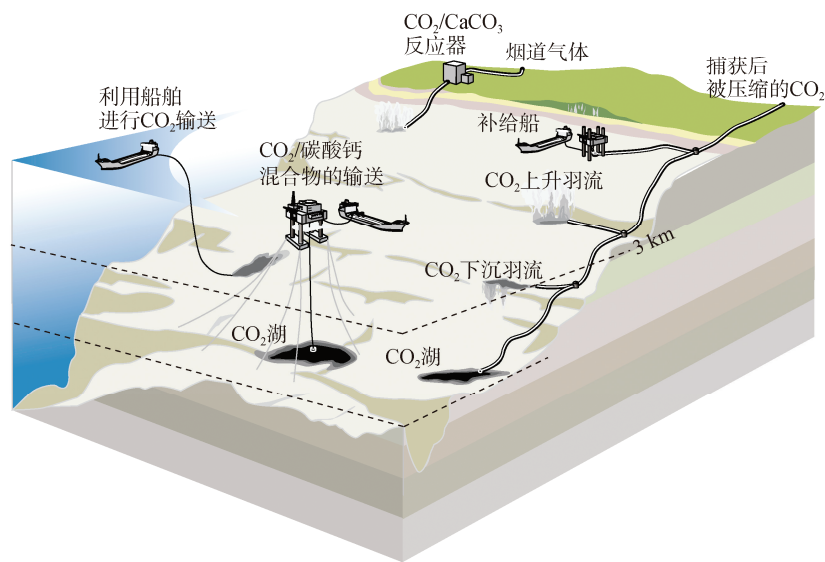


图6 海洋封存技术示意图<sup>[22]</sup>

Fig. 6 Ocean storage methods

Marchetti 是首个尝试实现 $\text{CO}_2$ 海洋封存的科学家,他的工作为海洋封存 $\text{CO}_2$ 的研究和发展奠定了基础。1977年, Marchetti<sup>[47]</sup>提出将 $\text{CO}_2$ 在适当的燃料转换点收集后,通过一定方式压缩后注入到地中海,然后海底洋流会将 $\text{CO}_2$ 转移至大西洋深层海水中,使其在几个世纪内无法与大气接触。Hirai等<sup>[48-49]</sup>通过实验研究发现,液态 $\text{CO}_2$ 在特定条件下以一定速度注入到相应深度的深海可以实现完全溶解,其溶解速率受到外部环境因素的影响,如周边海水的流速,海水压力、温度等。Ametistova等<sup>[50]</sup>研究发现,将 $\text{CO}_2$ 注入深海域或超深海域可以极大地减少对海洋环境的影响。Shindo等<sup>[51-54]</sup>研究发现,当压力超过35 MPa

后,液态的 $\text{CO}_2$ 会保持长期稳定;在特定位置注入的 $\text{CO}_2$ 将会沉积在海底,从而形成一个巨大的海底湖泊。基于热力学相平衡考虑,可以合理地假设, $\text{CO}_2$ 将在海水/液体 $\text{CO}_2$ 界面形成水合物。Goldthorpe<sup>[55]</sup>指出,捕获的 $\text{CO}_2$ 可以永久储存在深海海沟中,在3000 m深处, $\text{CO}_2$ 会变成比海水密度更大的液体,这会导致它自然地沉落到海底,在理想情况下会沉入某种洞中,形成一个水下湖泊,并且在很长一段时间内, $\text{CO}_2$ 可能会固化。Goldthorpe通过计算认为在印度尼西亚群岛以南地区、位于地表以下6000 m的巽他海沟是一个很好的储存位置,它可以容纳19000 Gt液化 $\text{CO}_2$ ,这超过了目前所有已知的全球化石燃料储量可产生的 $\text{CO}_2$ ;

其他包括琉球海沟或波多黎各海沟也可能是很好的 CO<sub>2</sub> 储存地点,不过他同时也承认,在真正实施之前仍需要做更多的研究,尤其是要防止 CO<sub>2</sub> 顶部扩散或导致海洋酸化增加<sup>[55]</sup>。

虽然深海封存理论上潜力巨大,但是封存成本比较高,在技术可行性和对海洋生物的影响上还需

要更进一步的研究。在过去的几十年里,世界各国对 CO<sub>2</sub> 海洋封存方法进行了深入的探索和发展,不仅在理论方面取得了长足的进步,而且在技术层面也得到了大幅提升(图 7)。当前,正在进行 CO<sub>2</sub> 的海底封存研究与实践的主要还是美国、日本、澳大利亚和欧盟等发达国家。

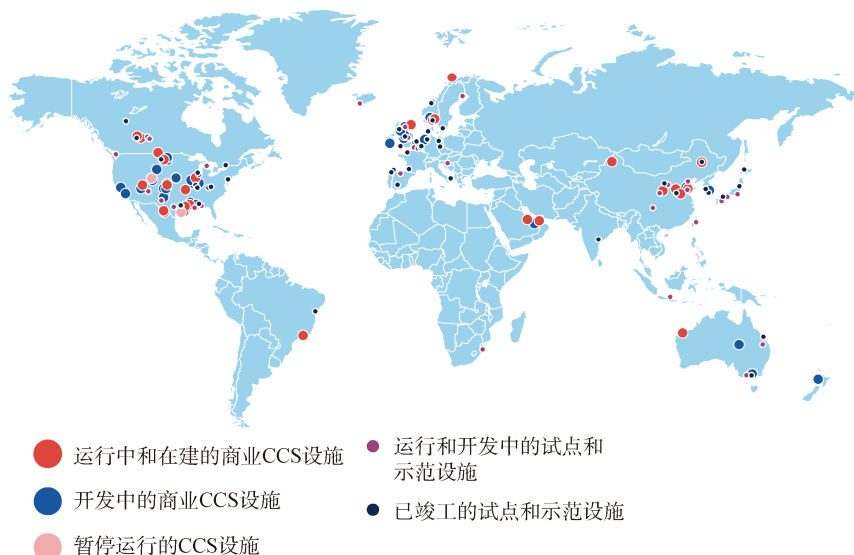


图 7 全球不同发展阶段的 CCS 设施示意图<sup>[56]</sup>

Fig. 7 World map of CCS facilities at various developmental stages

## 2.1 国外 CO<sub>2</sub> 海洋封存进展

挪威是较早开展 CCS 技术研究及实践的国家之一。挪威 Equinor 公司的 Sleipner 封存项目(位于挪威大陆架南部的北海海域)是 CO<sub>2</sub> 海底地质封存运行时间最长、最为成熟的案例<sup>[57]</sup>。该项目从 1996 年 8 月开始运行,其 CO<sub>2</sub> 来自气田天然气伴生气,项目将伴生的 CO<sub>2</sub> 分离出来后直接注入附近区域地质层海床下 1 000 m 处,目前注入量可达到每年 100 Mt<sup>[56-60]</sup>。Snøhvit 封存项目则位于挪威大陆架北部的巴伦支海海域,该项目将气田生产的天然气输送至挪威北部沿岸 Melkøya 岛上的工厂里,然后将它们转化为液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG),再将从 LNG 中分离出来的 CO<sub>2</sub> 输送回 Snøhvit 气田区域海床下 2 600 m 的砂岩层进行封存。该项目自 2008 年起开始运行,每年通过该项目封存的 CO<sub>2</sub> 约为 0.70 Mt<sup>[56, 61-62]</sup>。

美国埃克森美孚(Exxon Mobil)于 2021 年宣布计划进行“Houston Ship Channel Project”项目,该项目旨在捕集位于得克萨斯州休斯顿地区的发电、炼油和化工厂产生的 CO<sub>2</sub>,并通过专门的管线系统将其安全、高效地运输到墨西哥湾进行离岸封存。项目拟分为两个阶段实施:一

期目标是到 2030 年,期望能实现每年 50 Mt 的 CO<sub>2</sub> 封存量;二期是到 2040 年,通过该项目可实现每年降低 CO<sub>2</sub> 排放 100 Mt 的目标。该项目如果能顺利实施,将会成为目前全球已规划 CCUS 项目中最大规模的项目<sup>[63-66]</sup>。

日本若小牧港 CCS 示范项目在 2016 年到 2019 年投产使用,该项目位于日本北海道的沿海炼油厂内。项目从炼油厂氢气生产设施中捕集 CO<sub>2</sub>,捕集系统每年捕集至少 0.1 Mt 的 CO<sub>2</sub>,随后将这些 CO<sub>2</sub> 注入到近海岸深部地质储层中储存并进行监测。2019 年底,该项目按计划实现了 CO<sub>2</sub> 累计封存 0.3 Mt 的目标并停止注入,目前的监测并没有发现 CO<sub>2</sub> 出现逃逸的现象,今后该公司还将继续密切关注这一情况<sup>[67-69]</sup>。

巴西国家石油公司(Petrobras)在桑托斯盆地 Pre-Salt 油田 CCS 项目是世界上最大的碳捕获网络,该项目位于距离里约热内卢海岸 300 km 的超深海域,年封存能力为 7 Mt,目标是到 2025 年实现 40 Mt 的 CO<sub>2</sub> 封存量。截至 2019 年 12 月,Petrobras 已向岩石储层注入超过 14 Mt 的 CO<sub>2</sub><sup>[56, 70-72]</sup>。

在澳大利亚,Santos 的 Bayu-Undan 天然气液化和海上地质封存 CCS 项目已进入详细前端工程和设



计阶段,该项目将利用现有天然气管道来输送 CO<sub>2</sub>,以期达到安全、永久的封存效果。项目预计每年可储存多达 10 Mt 的 CO<sub>2</sub>,相当于澳大利亚年碳排放量的 1.5%左右<sup>[72-74]</sup>。

## 2.2 国内 CO<sub>2</sub> 海洋封存进展

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 CO<sub>2</sub> 海洋封存提供了良好的条件,预计我国海域地质封存潜力可达 2 580 Gt<sup>[75-76]</sup>。然而,我国目前还没有对海域开展基于实际调查数据的全面性评价。国家海洋局“中国二氧化碳海底封存能力评估与风险控制技术预研究”项目对我国近海 11 个大型沉积盆地的封存适宜性和封存潜力进行了初步评估,结果表明大部分近海盆地均具有较好的封存适宜性。渤海盆地、北黄海盆地、南黄海盆地、东海陆架盆地、台西盆地、台西南盆地、珠江口盆地、北部湾盆地、琼东南盆地、南海中南部诸盆地均具备封存适宜性。其中渤海盆地的封存可操作性相对较高,而且其相关的技术条件也最为成熟,是开展实际封存实验的理想盆地;珠江口盆地的理论封存容量比广东省 CO<sub>2</sub> 集中排放量大得多,而且与海岸线距离较近,非常适合进行实际的封存工程,同时该盆地盖层条件也比较好,具有良好的渗透性,北部水深更是低至 200 m,具有巨大的潜力进行大规模封存<sup>[77]</sup>。而且我国的 CO<sub>2</sub> 排放主要集中在山东、河北、江苏、广东等沿海省份,这对 CO<sub>2</sub> 海洋封存也有着极为有利的库源匹配上的优势<sup>[78]</sup>。

我国针对 CCUS 的布局也正在不断拓展。2021 年 8 月,中国海油宣布将在珠江口盆地开始我国首个 CO<sub>2</sub> 海底封存示范项目<sup>[79]</sup>。该项目距离深圳西南约 200 km,封存深度在海床下约 800 m,这是属于恩平 15-1 油田开发的配套环保项目。恩平 15-1 油田群位于我国南海,其伴生气中 CO<sub>2</sub> 含量高达 95%,项目将对这些 CO<sub>2</sub> 进行捕集,经过处理后再回注到海底进行封存,在提高原油采收率的同时实现 CO<sub>2</sub> 减排,这对海上油田的绿色低碳开发具有重要的示范意义。项目预计每年可封存 0.3 Mt 的 CO<sub>2</sub>,累计可封存 1.5 Mt 以上,相当于植树近 1 400 万棵<sup>[80-81]</sup>。

2022 年 6 月,中国海油宣布与广东省发展与改革委员会、壳牌和埃克森美孚共同合作开展最大规模达 10 Mt 级的大亚湾区 CCS/CCUS 集群研究项目,这也是我国首个海上规模化 CCS/CCUS 集群研究项

目。项目将通过捕集装置对大亚湾石化区排放的 CO<sub>2</sub> 实现全面收集,然后输送到合适的海域进行封存,预计第一阶段 CO<sub>2</sub> 封存量为每年 3~5 Mt,第二阶段力争实现 5~10 Mt 级的 CO<sub>2</sub> 封存量。该项目的实施不仅可以提供丰富的技术数据和宝贵的工程经验,还可以为我国大规模开展 CCS/CCUS 项目打造全链条示范性基地,增强我国 CCS/CCUS 全产业链技术水平,从而加快该产业的体系建设和能力发展,有效支撑我国的碳中和目标<sup>[82-83]</sup>。

2023 年 6 月,中国海油在恩平 15-1 油田正式实施 CO<sub>2</sub> 封存能力达 1.5 Mt 的示范工程,开始规模化向海底地层注入伴随海上石油开采产生的 CO<sub>2</sub>。这是我国海上首个百万吨级 CO<sub>2</sub> 封存工程,将在 CCS 技术方法适用范围、封存效率损失、运行成本、泄漏风险等方面提供经验。该项目的成功投用提供了一个完整的解决方案,标志着我国已经成功掌握了海上 CO<sub>2</sub> 封存和监测的全流程设备和技术体系,实现了我国海上 CO<sub>2</sub> 封存领域从无到有的重要突破,对最终实现碳达峰碳中和目标具有重要意义<sup>[84-85]</sup>。

尽管近年来我国 CCS 技术在不断发展,各环节均取得了长足的进步,部分技术甚至已经具备商业化应用潜力。但与世界发达国家相比,我国 CCS 技术研发工作起步较晚,目前各环节发展不平衡,一些技术还存在瓶颈尚未突破,海底管道输送 CO<sub>2</sub> 等技术仍缺乏经验。整体上,我国海洋技术尚处于早期研究阶段,与实现规模化和全流程示范应用的目标相比还存在较大的差距<sup>[14]</sup>。

## 3 CO<sub>2</sub> 海洋封存的环境问题

CO<sub>2</sub> 深海储存可能会对海洋环境造成污染,将 CO<sub>2</sub> 储存于深海中也可能会带来海水酸化等问题,对海洋生物及其食物链造成严重的危害<sup>[86-90]</sup>。一方面捕集到的 CO<sub>2</sub> 气体中常混有许多有害物质,如含铅、镍、汞等元素,这些有害物进入深海后有可能对海洋水体造成污染<sup>[91]</sup>。另一方面,封存在海底的 CO<sub>2</sub> 可能会存在泄露的潜在风险,某些深海钻探工程可能会影响到封存的 CO<sub>2</sub>,进而导致其溢出,这会对环境构成严重的威胁。研究表明,如果确实发生了 CO<sub>2</sub> 泄漏,泄漏的 CO<sub>2</sub> 将与周围海水迅速反应,从而导致海水 pH 值的局部大幅降低,使得当地海水强烈酸化<sup>[92-94]</sup>。CO<sub>2</sub> 一旦进入海水就会溶解产生碳酸(H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>),大多数碳酸会迅速离解为氢离子(H<sup>+</sup>)和碳酸氢根(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)离子。这些反应非常迅速,CO<sub>2</sub> 水合生

成碳酸的时间尺度只有数十秒, 随后的酸碱反应的时间尺度更是仅为  $\mu\text{s}$ <sup>[95-96]</sup>。Martinez-Cabanas 等<sup>[97]</sup>进行了海洋  $\text{CO}_2$  泄漏实验, 初始没有  $\text{CO}_2$  泄漏时海水的 pH 值为 8.030; 在第 8 天当  $\text{CO}_2$  泄漏流速设置为  $143 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$  时, 研究观测到海水的 pH 值将会急剧下降到 7.987。过量的氢离子会与碱性的碳酸根离子 ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) 反应生成碳酸氢根离子, 这会引起海水中的碳酸根离子浓度降低。碳酸根离子的减少降低了  $\text{CaCO}_3$  的饱和状态, 使得  $\text{CaCO}_3$  的溶解增加, 导致牡蛎、蛤蜊、海胆、浅水珊瑚、深海珊瑚和钙质浮游生物等钙化生物难以建造和维护外壳和其他碳酸钙结构<sup>[89, 94, 98-102]</sup>。海水酸化不仅会影响钙化过程, 甚至还会对生殖行为产生负面影响<sup>[103]</sup>。关键底栖物种的变化可能会对生物扰动和营养循环产生重大影响<sup>[104-105]</sup>, 导致元素的生物地球化学循环发生一连串变化, 从而危及海洋底栖生物群落<sup>[106-107]</sup>。 $\text{CO}_2$  渗漏还可能引起沉积物-水界面的生物地球化学发生变化,  $\text{CO}_2$  渗漏可能会导致某些容易溶解的微量元素从沉积层中快速进入海水, 其他易溶解的则会缓慢增强溶解到海水<sup>[108]</sup>。海水中重金属可溶性组分的增加可能会导致从海底到中上层系统的海洋生态中产生有毒的级联效应<sup>[91]</sup>。海水 pH 的下降还会对磷的循环产生严重影响, 降低海洋沉积物中磷的埋藏效率, 导致水体中磷浓度增加, 并促进富营养化, 尤其是在浅水区<sup>[109]</sup>。这些都会对海洋生物及其食物链, 甚至海洋生态系统造成严重影响。而且海洋碳封存时间长、覆盖范围大, 因此很难对  $\text{CO}_2$  的泄漏进行长时段的实时监测。

## 4 海洋 $\text{CO}_2$ 封存技术的发展方向

全球气候变暖的形势日趋严峻, 要实现本世纪末将全球平均气温升高限制在  $2^\circ\text{C}$  的目标, 我们不仅要降低碳排放, 还应加强碳封存技术的研究。作为封存技术中的一种富有前景、发展潜力巨大的技术, 海洋碳封存是减少大气中  $\text{CO}_2$  浓度的有效方法, 是实现可持续发展的重要手段。未来海洋碳封存研究的方向应主要侧重于技术经验、成本能耗、安全选址、泄漏监测等几个方面。

在海洋中储存二氧化碳没有明显的不可逾越的技术障碍, 经验的缺乏可能会影响海洋  $\text{CO}_2$  封存技术的发展<sup>[22]</sup>。由于发展水平有限, 对海洋  $\text{CO}_2$  封存技术的成本也难以估计, 这就需要各国广泛开展示范性工程项目以积累经验、提升技术, 降低成本和能

耗, 方便评估整体流程的可行性和经济性等, 为后期大规模应用奠定基础。安全选址上应主要关注成本、环境安全及社会政治问题, 同时也要大力发展监测技术, 包括化学和生物监测等, 尽量避免万一泄漏或事故造成对人类生活和生态环境的影响。此外, 在海洋中进行碳封存没有法律可以依据, 应该构建完备的海洋碳封存法律框架, 制定相应的责任制度和监管机制, 保障海洋碳封存的实施。

## 5 结语

我国经济体量大, 具有能源消费多、碳排放总量高的特征, 双碳目标的实现面临着较大的压力。CCUS 是实现碳中和关键核心技术, 海洋作为  $\text{CO}_2$  封存的一个理想场所, 潜力巨大、优势明显, 势必成为  $\text{CO}_2$  封存技术的中流砥柱。在  $\text{CO}_2$  海洋封存的研究中, 海洋生态环境的保护也是一个不可忽视的因素。海洋封存技术的发展离不开各领域科研人员的协同合作, 我国科研人员需要密切关注国外  $\text{CO}_2$  海洋封存的先进技术和经验, 加强国际合作与交流, 共同探索和研究有效的海洋封存技术, 以期达到更好的效果。政府部门也要通过政策引导及财政扶持, 共同推进我国  $\text{CO}_2$  海洋封存技术的进步。

### 参考文献:

- [1] CHAPMAN D A, LICKEL B. Climate change and disasters: How framing affects justifications for giving or withholding aid to disaster victims[J]. *Social Psychological and Personality Science*, 2016, 7(1): 13-20.
- [2] IPCC. Climate change 2023: Synthesis report[R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023.
- [3] HASZELDINE R S. Carbon capture and storage: How green can black be?[J]. *Science*, 2009, 325(5948): 1647-1652.
- [4] SONGOLZADEH M, SOLEIMANI M, TAKHT RAVANCHI M, et al. Carbon dioxide separation from flue gases: A technological review emphasizing reduction in greenhouse gas emissions[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014: 828131.
- [5] SONG C F, LIU Q L, DENG S, et al. Cryogenic-based  $\text{CO}_2$  capture technologies: State-of-the-art developments and current challenges[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 101: 265-278.
- [6] STEWART C, HESSAMI M A. A study of methods of carbon dioxide capture and sequestration—the sustainability of a photosynthetic bioreactor approach[J]. *Energy Conversion and Management*, 2005, 46(3): 403-420.
- [7] SUN Y, ZHANG X B, REN G Y, et al. Contribution of



- urbanization to warming in China[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(7): 706-709.
- [8] PETERS G P, MARLAND G, LE QUÉRÉ C, et al. Rapid growth in CO<sub>2</sub> emissions after the 2008–2009 global financial crisis[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(1): 2-4.
- [9] GULEV S K, THORNE P W, AHN J, et al. Changing state of the climate system[M]//MASSON-DELMOTTE V, ZHAI P, PIRANI A, et al. *Climate Change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021: 287-422.
- [10] EYRING V, GILLETT N P, ACHUTARAO K M, et al. Human influence on the climate system[M]//MASSON-DELMOTTE V, ZHAI P, PIRANI A, et al. *Climate Change 2021: The Physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021: 423-552.
- [11] 崔荣国, 郭娟, 程立海, 等. 全球清洁能源发展现状与趋势分析[J]. *地球学报*, 2021, 42(2): 179-186.  
CUI Rongguo, GUO Juan, CHENG Lihai, et al. Status and trends analysis of global clean energies[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 42(2): 179-186.
- [12] LIU F Q, MAUZERALL D L, ZHAO F Q, et al. Deployment of fuel cell vehicles in China: Greenhouse gas emission reductions from converting the heavy-duty truck fleet from diesel and natural gas to hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(34): 17982-17997.
- [13] PANCHASARA H, SAMRAT N H, ISLAM N. Greenhouse gas emissions trends and mitigation measures in Australian agriculture sector—A review[J]. *Agriculture*, 2021, 11(2): 85.
- [14] 蔡博峰, 李琦, 张贤, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存 CCUS 年度报告(2021)—中国 CCUS 路径研究[R]. 生态环境部环境规划院, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 中国 21 世纪议程管理中心, 2021.  
CAI Bofeng, LI Qi, ZHANG Xian, et al. Annual report on carbon dioxide capture, utilization, and storage (CCUS) in China (2021) - research on China's pathways of CCUS[R]. Chinese Academy of Environmental Planning, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, The Administrative Center for China's Agenda 21, 2021.
- [15] 张贤, 李凯, 马乔, 等. 碳中和目标下 CCUS 技术发展定位与展望[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(9): 29-33.  
ZHANG Xian, LI Kai, MA Qiao, et al. Orientation and prospect of CCUS development under carbon neutrality target[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(9): 29-33.
- [16] LACKNER K S. A guide to CO<sub>2</sub> sequestration[J]. *Science*, 2003, 300(5626): 1677-1678.
- [17] 孙玉景, 周立发, 李越. CO<sub>2</sub> 海洋封存的发展现状[J]. *地质科技情报*, 2018, 37(4): 212-218.  
SUN Yujing, ZHOU Lifa, LI Yue. Development status of CO<sub>2</sub> marine sequestration[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37(4): 212-218.
- [18] 张泉, 林进, 折印楠, 等. 我国二氧化碳地质封存潜力评价研究进展[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2022, 42(11): 144-146.  
ZHANG Quan, LIN Jin, SHE Yinnan, et al. Research progress on the potential evaluation of carbon dioxide geological storage in China[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2022, 42(11): 144-146.
- [19] 孙腾民, 刘世奇, 汪涛. 中国二氧化碳地质封存潜力评价研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(11): 10-20.  
SUN Tengmin, LIU Shiqi, WANG Tao. Research advances on evaluation of CO<sub>2</sub> geological storage potential in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(11): 10-20.
- [20] KU H C, MIAO Y H, WANG Y Z, et al. Frontier science and challenges on offshore carbon storage[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2023, 17(7): 80.
- [21] DAI Z X, ZHANG Y, STAUFFER P, et al. Injectivity evaluation for offshore CO<sub>2</sub> sequestration in marine sediments[J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 2921-2932.
- [22] BREWER P G, PELTZER E T, FRIEDERICH G, et al. Experimental determination of the fate of rising CO<sub>2</sub> droplets in seawater[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(24): 5441-5446.
- [23] METZ B, DAVIDSON O, CONINCK H, et al. *IPCC special report on carbon dioxide capture and storage*[R]. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [24] ADAMS E E, GOLOMB D S, HERZOG H J. Ocean disposal of CO<sub>2</sub> at intermediate depths[J]. *Energy Conversion and Management*, 1995, 36(6): 447-452.
- [25] CIRCONE S, STERN L A, KIRBY S H, et al. CO<sub>2</sub> hydrate: Synthesis, composition, structure, dissociation behavior, and a comparison to structure I CH<sub>4</sub> hydrate[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2003, 107(23): 5529-5539.
- [26] TOHIDI B, YANG J, SALEHABADI M, et al. CO<sub>2</sub> hydrates could provide secondary safety factor in sub-surface sequestration of CO<sub>2</sub>[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(4): 1509-1514.
- [27] HOUSE K Z, SCHRAG D P, HARVEY C F, et al. Permanent carbon dioxide storage in deep-sea sediments[J].

- Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006, 103(33): 12291-12295.
- [28] KOIDE H, SHINDO Y, TAZAKI Y, et al. Deep sub-seabed disposal of CO<sub>2</sub> — The most protective storage[J]. *Energy Conversion and Management*, 1997, 38: S253-S258.
- [29] ADAMS E E, CALDEIRA K. Ocean storage of CO<sub>2</sub>[J]. *Elements*, 2008, 4(5): 319-324.
- [30] QANBARI F, POOLADI-DARVISH M, TABATABAIE S H, et al. CO<sub>2</sub> disposal as hydrate in ocean sediments[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2012, 8: 139-149.
- [31] GISLASON S R, OELKERS E H. Carbon storage in basalt[J]. *Science*, 2014, 344(6182): 373-374.
- [32] PRASAD P S R, SRINIVASA SARMA D, NIRMAL CHARAN S. Mineral trapping and sequestration of carbon-dioxide in deccan basalts: SEM, FTIR and raman spectroscopic studies on secondary carbonates[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2012, 80(4): 546-552.
- [33] SLAGLE A L, GOLDBERG D S. Evaluation of ocean crustal sites 1256 and 504 for long-term CO<sub>2</sub> sequestration[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(16): L16307.
- [34] ECCLES J K, PRATSON L. Global CO<sub>2</sub> storage potential of self-sealing marine sedimentary strata[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(19): L19604.
- [35] MATTER J M, STUTE M, SNÆBJÖRNSDOTTIR S Ó, et al. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions[J]. *Science*, 2016, 352(6291): 1312-1314.
- [36] TENG Y H, ZHANG D X. Long-term viability of carbon sequestration in deep-sea sediments[J]. *Science Advances*, 2018, 4(7): eaao6588.
- [37] GOEL N. In situ methane hydrate dissociation with carbon dioxide sequestration: Current knowledge and issues[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2006, 51(3): 169-184.
- [38] SAHA D, GRAPPE H A, CHAKRABORTY A, et al. Postextraction separation, on-board storage, and catalytic conversion of methane in natural gas: A review[J]. *Chemical Reviews*, 2016, 116(19): 11436-11499.
- [39] KUMAR K V, PREUSS K, TITIRICI M M, et al. Nanoporous materials for the onboard storage of natural gas[J]. *Chemical Reviews*, 2017, 117(3): 1796-1825.
- [40] KONNO Y, MASUDA Y, AKAMINE K, et al. Sustainable gas production from methane hydrate reservoirs by the cyclic depressurization method[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 108: 439-445.
- [41] EBINUMA T. Method for dumping and disposing of carbon dioxide gas and apparatus therefor: 5261490[P]. 1993-11-16.
- [42] OHGAKI K, TAKANO K, SANGAWA H, et al. Methane exploitation by carbon dioxide from gas hydrates—phase equilibria for CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> mixed hydrate system—[J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 1996, 29(3): 478-483.
- [43] YEZDIMER E M, CUMMINGS P T, CHIALVO A A. Determination of the gibbs free energy of gas replacement in Si clathrate hydrates by molecular simulation[J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2002, 106(34): 7982-7987.
- [44] 张学民, 李金平, 吴青柏, 等. CO<sub>2</sub> 置换开采冻土区天然气水合物中 CH<sub>4</sub> 的可行性研究[J]. *化工进展*, 2014, 33(S1): 133-140.
- ZHANG Xuemin, LI Jinping, WU Qingbai, et al. Feasibility study on replacement of CH<sub>4</sub> gas from methane hydrate with CO<sub>2</sub> in frigid permafrost region[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2014, 33(S1): 133-140.
- [45] 郭会荣, 陈颖, 赵锐锐. 地质封存温压条件下 CO<sub>2</sub> 溶解、扩散及水岩反应实验研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2014.
- GUO Huirong, CHEN Ying, ZHAO Ruirui. Experimental simulation on the dissolution, diffusion, and reaction of CO<sub>2</sub> sequestered into saline aquifer[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014.
- [46] HERZOG H, CALDEIRA K, ADAMS E. Carbon sequestration via direct injection[M]//STEELE J H. *Encyclopedia of ocean sciences*. Oxford: Academic Press, 2001: 408-414.
- [47] MARCHETTI C. On geoengineering and the CO<sub>2</sub> problem[J]. *Climatic Change*, 1977, 1(1): 59-68.
- [48] HIRAI S, OKAZAKI K, TABE Y, et al. Numerical simulation for dissolution of liquid CO<sub>2</sub> droplets covered with clathrate film in intermediate depth of ocean[J]. *Energy Conversion and Management*, 1997, 38: S313-S318.
- [49] HIRAI S, OKAZAKI K, ARAKI N, et al. Transport phenomena of liquid CO<sub>2</sub> in pressurized water flow with clathrate-hydrate at the interface[J]. *Energy Conversion and Management*, 1996, 37(6): 1073-1078.
- [50] AMETISTOVA L, TWIDELL J, BRIDEN J. The sequestration switch: removing industrial CO<sub>2</sub> by direct ocean absorption[J]. *Science of The Total Environment*, 2002, 289(1): 213-223.
- [51] SHINDO Y, FUJIOKA Y, YANAGISHITA Y, et al. Formation and stability of CO<sub>2</sub> hydrate[C]//Direct ocean disposal of carbon dioxide. Tokyo: Terra Publishing Company, 1993: 217-231.
- [52] SHINDO Y, LUND P C, FUJIOKA Y, et al. Kinetics of

- formation of CO<sub>2</sub> hydrate[J]. *Energy Conversion and Management*, 1993, 34(9): 1073-1079.
- [53] SHINDO Y, FUJIOKA Y, TAKEUCHI K, et al. Kinetics on the dissolution of CO<sub>2</sub> into water from the surface of CO<sub>2</sub> hydrate at high pressure[J]. *International Journal of Chemical Kinetics*, 1995, 27(6): 569-575.
- [54] SHINDO Y, SAKAKI K, FUJIOKA Y, et al. Kinetics of the formation of CO<sub>2</sub> hydrate on the surface of liquid CO<sub>2</sub> droplet in water[J]. *Energy Conversion and Management*, 1996, 37(4): 485-489.
- [55] GOLDTHORPE S. Potential for very deep ocean storage of CO<sub>2</sub> without ocean acidification: A discussion paper[J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 5417-5429.
- [56] 全球碳捕集与封存研究院. 全球碳捕集与封存现状 2020[R]. 全球碳捕集与封存研究院, 2020. Global CCS Institute. *Global Status of CCS Report: 2020*[R]. Global CCS Institute, 2020.
- [57] FURRE A K, EIKEN O, ALNES H, et al. 20 years of monitoring CO<sub>2</sub>-injection at Sleipner[J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 3916-3926.
- [58] BAKLID A, KORBOL R, OWREN G. Sleipner vest CO<sub>2</sub> disposal, CO<sub>2</sub> injection into A shallow underground aquifer[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro, 1996.
- [59] HANSEN H, EIKEN O, AASUM T O. Tracing the path of carbon dioxide from a gas/condensate reservoir, through an amine plant and back into a subsurface aquifer – case study: The Sleipner Area, Norwegian North Sea[C]//SPE Offshore Europe Oil and Gas Exhibition and Conference. OnePetro, 2005.
- [60] SINGH V, CAVANAGH A, HANSEN H, et al. Reservoir modeling of CO<sub>2</sub> plume behavior calibrated against monitoring data from Sleipner, Norway[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro, 2010.
- [61] HANSEN O, GILDING D, NAZARIAN B, et al. Snøhvit: the history of injecting and storing 1 Mt CO<sub>2</sub> in the fluvial Tubåen Fm[J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 3565-3573.
- [62] SHI J Q, IMRIE C, SINAYUC C, et al. Snøhvit CO<sub>2</sub> Storage Project: Assessment of CO<sub>2</sub> injection performance through history matching of the injection well pressure over a 32-months period[J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 3267-3274.
- [63] EXXONMOBIL. Charting a bold concept for a lower-carbon future[EB/OL]. (2021-04-21)[2023-05-01]. <https://energyfactor.exxonmobil.com/reducing-emissions/carbon-capture-and-storage/lcs-houston-ccs-concept/>.
- [64] KLINGE N. Proposed Houston CCS hub gains supermajor support[EB/OL]. (2022-01-20)[2023-05-02]. <https://www.upstreamonline.com/energy-transition/proposed-houston-ccs-hub-gains-supermajor-support/2-1-1149392>.
- [65] JACOBS T. Shell signs on with ExxonMobil-Led effort to build world's largest CCS project[EB/OL]. (2022-01-20)[2023-05-01]. <https://jpt.spe.org/shell-signs-on-with-exxonmobil-led-effort-to-build-worlds-largest-ccs-project>.
- [66] ENERGYFACTOR EUROPE. The promise of carbon capture and storage, and a Texas-sized call to action [EB/OL]. (2021-04-30)[2023-05-01]. <https://energyfactor.exxonmobil.eu/perspectives/houston-ccs-hub/>.
- [67] TANASE DAIJI et al. Tomakomai CCS demonstration project[EB/OL]. [2023-04-19]. <https://www.japanccs.com/en/business/demonstration/index.php>.
- [68] IEA. Tomakomai CCS demonstration project—CCUS around the world[EB/OL]. (2021)[2023-05-03]. <https://www.iea.org/reports/ccus-around-the-world/tomakomai-ccs-demonstration-project>.
- [69] SAWADA Y, TANAKA J, SUZUKI C, et al. Tomakomai CCS demonstration project of Japan, CO<sub>2</sub> injection in progress[J]. *Energy Procedia*, 2018, 154: 3-8.
- [70] WALTERS N. Petrobras hits carbon capture milestone [EB/OL]. (2021)[2023-04-19]. <https://www.argusmedia.com/metals-platform/newsandanalysis/article/2287533-Petrobras-hits-carbon-capture-milestone>.
- [71] JUNIOR A N, QUEIROZ G N, GODOY M G, et al. Assessing EOR strategies for application in Brazilian pre-salt reservoirs[J]. *Geoenery Science and Engineering*, 2023, 223: 211508.
- [72] STEYN M, OGLESBY J, TURAN G, et al. Global Status of CCS 2022[R]. Global CCS Institute, 2022.
- [73] BATTERSBY A. Santos progresses at Barossa, development drilling still suspended[EB/OL]. (2023-07-20) [2023-07-25]. <https://www.upstreamonline.com/field-development/santos-progresses-at-barossa-development-drilling-still-suspended/2-1-1489305>.
- [74] SANTOS. Globally significant carbon capture and storage project a step closer[EB/OL]. (2022-03-08) [2023-06-01]. <https://www.santos.com/news/globally-significant-carbon-capture-and-storage-project-a-step-closer/>.
- [75] 冯丽妃. 中国海域二氧化碳地质封存潜力达 2.58 亿吨[N]. *中国科学报*, 2023-01-13(1). Feng Lifei. The potential for geological storage of carbon dioxide in China's sea areas is 2.58 trillion tonnes[N]. *China Science Daily*, 2023-01-13(1).
- [76] XU Y H. Offshore China harbours huge carbon capture potential[EB/OL]. (2023-01-19)[2023-03-10]. <https://www.upstreamonline.com/energy-transition/offshore-china-harbours-huge-carbon-capture-potential/2-1-1390955>.
- [77] 高慧. 中国成为第四个开展二氧化碳海底封存的国家 [EB/OL]. (2021-09-10)[2023-04-19]. <https://mp.weixin.qq.com/s/BGF2yE3pd8VKDds8SsPDXA>. GAO Hui. China becomes the fourth country to carry



- out subsea carbon dioxide storage[EB/OL]. (2021-09-10)[2023-04-19]. <https://mp.weixin.qq.com/s/BGF2yE3pd8VKDds8SsPDXA>.
- [78] 王瑛, 何艳芬. 中国省域二氧化碳排放的时空格局及影响因素[J]. 世界地理研究, 2020, 29(3): 512-522.  
WANG Ying, HE Yanfen. Spatiotemporal dynamics and influencing factors of provincial carbon emissions in China. *World Regional Studies*, 2020, 29(3): 512-522.
- [79] CNOOC. Annual Report 2021[R]. CNOOC, 2021.
- [80] 衣华磊, 郭欣, 贾津耀, 等. 恩平 15-1 油田开发 CO<sub>2</sub> 回注封存工程方案研究[J]. 中国海上油气, 2023, 35(1): 163-169.  
YI Hualei, GUO Xin, JIA Jinyao, et al. Research on CO<sub>2</sub> re-injection and storage engineering scenario of EP15-1 oil field development[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(1): 163-169.
- [81] GLOBAL TIMES. China's first offshore CO<sub>2</sub> storage facility starts operation in South China Sea[EB/OL]. (2023-06-01)[2023-06-21]. <https://www.globaltimes.cn/page/202306/1291785.shtml>.
- [82] 杨漾. 我国首个海上规模化二氧化碳捕集利用及封存集群研究项目启动[EB/OL]. (2022-06-28)[2022-07-03]. [https://www.thepaper.cn/newsDetail\\_forward\\_18773291](https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_18773291).  
YANG Yang. China launches the first offshore large-scale CCUS cluster research project. [EB/OL]. (2022-06-28)[2022-07-03]. [https://www.thepaper.cn/newsDetail\\_forward\\_18773291](https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_18773291).
- [83] SHELL (CHINA) LIMITED. Shell partners with CNOOC, Guangdong Government, ExxonMobil on offshore carbon capture and storage hub in China[EB/OL]. (2022-06-28)[2022-07-04]. [https://www.shell.com.cn/en\\_cn/media/media-releases/2022-media-releases/shell-partners-with-cnooc-guangdong-government-exxonmobil-on-offshore-carbon-capture-and-storage-hub-in-china.html](https://www.shell.com.cn/en_cn/media/media-releases/2022-media-releases/shell-partners-with-cnooc-guangdong-government-exxonmobil-on-offshore-carbon-capture-and-storage-hub-in-china.html).
- [84] JI J. China's first million-ton offshore carbon capture and storage project goes into operation[EB/OL]. (2023-06-13)[2023-07-01]. [https://www.bjreview.com/China/202306/t20230613\\_800334120.html](https://www.bjreview.com/China/202306/t20230613_800334120.html).
- [85] XINHUA. China Focus: China achieves breakthrough as million-tonne offshore carbon storage project begins operations[EB/OL]. (2023-06-02)[2023-06-11]. [http://www.china.org.cn/china/Off\\_the\\_Wire/2023-06/02/content\\_86150078.htm](http://www.china.org.cn/china/Off_the_Wire/2023-06/02/content_86150078.htm).
- [86] DAMEN K, FAAIJ A, TURKENBURG W. Health, safety and environmental risks of underground CO<sub>2</sub> storage – overview of mechanisms and current knowledge[J]. *Climatic Change*, 2006, 74(1): 289-318.
- [87] JONES D G, BEAUBIEN S E, BLACKFORD J C, et al. Developments since 2005 in understanding potential environmental impacts of CO<sub>2</sub> leakage from geological storage[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 40: 350-377.
- [88] AMARO T, BERTOCCI I, QUEIROS A M, et al. Effects of sub-seabed CO<sub>2</sub> leakage: Short- and medium-term responses of benthic macrofaunal assemblages[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 128: 519-526.
- [89] MOLARI M, GUILINI K, LINS L, et al. CO<sub>2</sub> leakage can cause loss of benthic biodiversity in submarine sands[J]. *Marine Environmental Research*, 2019, 144: 213-229.
- [90] SOKOŁOWSKI A, BRULIŃSKA D, SOKOŁOWSKA E. Multimarker response of the ragworm *Hediste diversicolor* (Polychaeta) to seawater acidification derived from potential CO<sub>2</sub> leakage from the CCS sub-seabed storage site in the Baltic Sea[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2020, 530-531: 151433.
- [91] ARDELAN M V, STEINNES E, LIERHAGEN S, et al. Effects of experimental CO<sub>2</sub> leakage on solubility and transport of seven trace metals in seawater and sediment[J]. *Science of The Total Environment*, 2009, 407(24): 6255-6266.
- [92] BLACKFORD J, STAHL H, BULL J M, et al. Detection and impacts of leakage from sub-seafloor deep geological carbon dioxide storage[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(11): 1011-1016.
- [93] BLACKFORD J C, JONES N, PROCTOR R, et al. Regional scale impacts of distinct CO<sub>2</sub> additions in the North Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56(8): 1461-1468.
- [94] BLACKFORD J, JONES N, PROCTOR R, et al. An initial assessment of the potential environmental impact of CO<sub>2</sub> escape from marine carbon capture and storage systems[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2009, 223(3): 269-280.
- [95] ZEEBE R E, WOLF-GLADROW D A. CO<sub>2</sub> in seawater: Equilibrium, kinetics, isotopes[M]. Amsterdam; New York: Elsevier, 2001.
- [96] DICKSON A G, SABINE C L, CHRISTIAN J R. Guide to best practices for ocean CO<sub>2</sub> measurements: IOCCP report; 8[R]. Sidney, British Columbia: North Pacific Marine Science Organization, 2007: 191.
- [97] MARTÍNEZ-CABANAS M, ESPOSITO M, GROS J, et al. Deviations from environmental baseline: Detection of subsea CO<sub>2</sub> release in the water column from real-time measurements at a potential offshore carbon dioxide storage site[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 109: 103369.
- [98] RIES J B, COHEN A L, MCCORKLE D C. Marine calcifiers exhibit mixed responses to CO<sub>2</sub>-induced ocean acidification[J]. *Geology*, 2009, 37(12): 1131-1134.

- [99] SOKOŁOWSKI A, BRULIŃSKA D, MIRNY Z, et al. Differing responses of the estuarine bivalve *Limecola balthica* to lowered water pH caused by potential CO<sub>2</sub> leaks from a sub-seabed storage site in the Baltic Sea: An experimental study[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 127: 761-773.
- [100] HALL-SPENCER J M, RODOLFO-METALPA R, MARTIN S, et al. Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification[J]. *Nature*, 2008, 454(7200): 96-99.
- [101] DONEY S C, FABRY V J, FEELY R A, et al. Ocean acidification: The other CO<sub>2</sub> problem[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2009, 1(1): 169-192.
- [102] FEELY R A, SABINE C L, BYRNE R H, et al. Decadal changes in the aragonite and calcite saturation state of the Pacific Ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(3): GB3001.
- [103] HILDEBRANDT N, NIEHOFF B, SARTORIS F J. Long-term effects of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on the Arctic calanoid copepods *Calanus glacialis* and *C. hyperboreus*[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 80(1): 59-70.
- [104] MURRAY F, WIDDICOMBE S, MCNEILL C L, et al. Consequences of a simulated rapid ocean acidification event for benthic ecosystem processes and functions[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 73(2): 435-442.
- [105] WIDDICOMBE S, BEESLEY A, BERGE J A, et al. Impact of elevated levels of CO<sub>2</sub> on animal mediated ecosystem function: The modification of sediment nutrient fluxes by burrowing urchins[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 73(2): 416-427.
- [106] BIBBY R, WIDDICOMBE S, PARRY H, et al. Effects of ocean acidification on the immune response of the blue mussel *Mytilus edulis*[J]. *Aquatic Biology*, 2008, 2(1): 67-74.
- [107] SOKOŁOWSKI A, ŚWIEŻAK J, HALLMANN A, et al. Cellular level response of the bivalve *Limecola balthica* to seawater acidification due to potential CO<sub>2</sub> leakage from a sub-seabed storage site in the southern Baltic Sea: TiTank experiment at representative hydrostatic pressure[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 794: 148593.
- [108] BASALLOTE M D, DE ORTE M R, DELVALLS T Á, et al. Studying the effect of CO<sub>2</sub>-induced acidification on sediment toxicity using acute amphipod toxicity test[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(15): 8864-8872.
- [109] ŁUKAWSKA-MATUSZEWSKA K, GRACA B, SOKOŁOWSKI A, et al. The impact of potential leakage from the sub-seabed CO<sub>2</sub> storage site on the phosphorus transformation in marine sediments – An experimental study[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 886: 163879.

# Technology and research progress with regard to CO<sub>2</sub> ocean storage

ZHANG Haibin<sup>1</sup>, LU Di<sup>1</sup>, WANG Yongchang<sup>1</sup>, TIAN Wenshuang<sup>1</sup>, SHEN Guofei<sup>2</sup>,  
SONG Xuehang<sup>2</sup>, WEI Wei<sup>2</sup>

(1. CNOOC Energy Conservation and Emission Reduction Center, Tianjin 300452, China; 2. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, CAS Key Laboratory of Low-Carbon Conversion Science & Engineering, Shanghai 201210, China)

**Received:** Aug. 1, 2023

**Key words:** carbon capture; utilization and storage (CCUS); ocean storage; research progress; marine environment; ocean acidification

**Abstract:** The world is now facing a critical challenge: global warming. Addressing this issue requires a collective effort to reduce carbon emissions and achieve carbon neutrality, a goal that has gained international consensus. In recent years, carbon capture, utilization, and storage (CCUS) has emerged as a critical tool in the fight against carbon emissions, and it is presently in a rapid phase of development. Among the various methods incorporated within CCUS technology, CO<sub>2</sub> ocean storage shows the most potential. Therefore, understanding its current developmental status is crucial for further advancements in CO<sub>2</sub> storage research. This paper provides an overview of the methods and mechanisms of CO<sub>2</sub> ocean storage and summarizes the progress made in CO<sub>2</sub> marine storage technology at home and abroad. It also outlines the enormous potential for CO<sub>2</sub> ocean storage and the benefits of source–sink matching in China. However, it also considers the potential environmental implications for CO<sub>2</sub> ocean storage, which could be far from negligible. Finally, the paper points out that it is necessary to promote research on ocean storage technologies, explore the extent of ocean storage capacity, and accelerate carbon emission reduction to achieve carbon neutrality as soon as possible.

(本文编辑: 赵卫红)