

碳中和背景下 CCUS 技术发展及广东离岸封存潜力评估

罗海中¹, 吴大卫^{1,✉}, 范永春¹, 李鹏春², 曾少雁¹, 林海周¹

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663; 2. 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301)

摘要: [目的] 碳捕集利用与封存技术 (CCUS) 是实现碳中和的关键技术之一。广东沿海是我国开展二氧化碳 (CO₂) 离岸封存项目的潜力区域。了解碳中和背景下 CCUS 技术发展现状, 分析广东近海 CO₂ 封存潜力, 有助于为我国开展大规模 CCUS 项目特别是离岸封存工程提供基础依据。[方法] 文章综述了 CCUS 各环节的技术路线和发展趋势, 探讨了广东近海珠江口盆地、北部湾盆地的 CO₂ 地质封存潜力, 总结了我国 CO₂ 离岸封存面临的问题并提出相关建议。[结果] 近年来, 我国 CCUS 技术取得了较大进展, 然而在运输、封存等环节的个别关键技术水平仍在研发示范阶段。珠江口盆地、北部湾盆地拥有巨大的 CO₂ 地质封存潜力, 并且与广东沿海大型 CO₂ 排放源形成良好的源汇匹配关系, 适宜开展 CO₂ 离岸封存项目。然而, 我国离岸封存还面临技术不成熟、成本高、环境影响不明确、政策法规不完善等问题, 需要从技术研发、项目集群布局、政策法规支持等方面推进, 推动 CO₂ 离岸封存发展。[结论] 未来我国应该加大对 CCUS 特别是离岸封存技术的研发和推广, 为碳中和提供支撑。

关键词: 碳中和; CCUS; 离岸封存; CO₂; 潜力评估

中图分类号: TM611; X701

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)06-0001-13

开放科学(资源服务)二维码:



Development of CCUS Technology in the Context of Carbon Neutrality and Assessment of the Potential for Offshore Storage in Guangdong Province

LUO Haizhong¹, WU Dawei^{1,✉}, FAN Yongchun¹, LI Pengchun², ZENG Shaoyan¹, LIN Haizhou¹

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

2. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] Carbon capture, utilization and storage (CCUS) is one of the key technologies for achieving carbon neutrality. The coastal area of Guangdong Province is a potential area for offshore CO₂ storage projects in China. Understanding the development status of CCUS technology in the context of carbon neutrality and analyzing the offshore CO₂ storage potential in the coastal area of Guangdong Province are conducive to provide the basis for large-scale CCUS projects, especially the offshore storage projects in the future in China. [Method] The technical routes and development trends of all aspects of CCUS were summarized. The offshore geological storage potential of CO₂ in the Pearl River Mouth Basin and the Beibu Gulf Basin off the coast of Guangdong Province was discussed. The problems of offshore CO₂ storage in China were summarized, and relevant suggestions were put forward. [Result] In recent years, China has made significant progress in CCUS technology, but some key technologies in transportation and storage has been still at the R&D demonstration stage. The Pearl River Mouth Basin and the Beibu Gulf Basin have enormous geological storage potential of CO₂ and an excellent matching relationship with large CO₂ emission sources in the coastal area of Guangdong Province, making it an ideal locations for offshore CO₂ storage projects. However, offshore CO₂ storage still faces problems such as immature technology, high storage costs, uncertain environmental impacts, and inadequate policy and regulation frameworks in China. It is necessary to focus on

收稿日期: 2023-07-23 修回日期: 2023-09-27

基金项目: 中国能源建设股份有限公司重大科技项目“CCUS 碳捕捉封存利用新技术开发研究”(CEEC2021-ZDYF-06); 中国电力工程顾问集团有限公司重大科技专项“新型化学吸收法碳捕集工艺研发”(GSKJ3-J02-2021); 中国能建广东院科技项目“基于两相吸收剂的二氧化碳化学吸收技术及工艺研究”(EV11211W)

technological development, promoting cluster projects, and improving policies and relevant regulations to advance the development of offshore CO₂ storage. [Conclusion] In the future, China should strengthen research, development and promotion of CCUS, especially the offshore storage technology, to promote the progress of carbon neutrality.

Key words: carbon neutrality; CCUS; offshore storage; CO₂; potential assessment

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

随着全球工业化进程的加速,人类活动所产生的 CO₂ 等温室气体排放量不断增长,极大地影响了全球气候和生态系统的平衡,减少 CO₂ 排放已成为人类社会的共识^[1-2]。为积极应对气候变化,越来越多的国家和地区制定了碳中和计划。在此背景下,我国于 2020 年提出“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”的目标,这是我国积极应对全球气候变化问题,推动经济高质量发展和生态文明建设的一项重要举措。

然而,化石燃料短时间内依然是人类社会所依赖的主体能源,2022 年世界能源相关 CO₂ 排放为 368 亿 t,仍处于上升阶段,因此实现碳中和面临着巨大挑战^[3]。为了实现经济发展,同时减少化石能源利用的影响,需要采取有效措施来限制 CO₂ 排放,CCUS 技术则能够为此提供一种有效的解决方案。CCUS 是指通过技术手段捕集工业、能源生产等过程中产生的 CO₂,运输至适宜的地点进行利用或永久封存的技术^[4-6]。IPCC AR6 报告指出,如果没有 CCUS 技术,将无法实现《巴黎协定》的温控目标^[7]。我国“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要明确将 CCUS 技术作为重大示范项目进行引导支持^[8]。研究表明,碳中和目标下我国 CCUS 减排需求为:2030 年 0.2 亿 t~4.08 亿 t,2050 年 6 亿 t~14.5 亿 t,2060 年 10 亿 t~18.2 亿 t^[2]。

CO₂ 封存是 CCUS 技术的核心组成部分之一,决定了 CCUS 技术的发展潜力和发展方向^[9]。根据 CO₂ 封存位置不同,可分为陆地封存和离岸封存(海洋封存)^[2,10]。我国华南沿海地区(特别是广东沿海地区)经济发达,碳排放强度大,排放源分布密集,然而这些地区陆地上只有零星分布的古近纪陆相断陷盆地,CO₂ 封存潜力较小^[11-12]。而其近海海底发育有大型沉积盆地,如珠江口盆地、北部湾盆地等,能提供

充足的地质封存潜力,且能够与沿海大型工业 CO₂ 排放源形成良好的源汇匹配关系。因此华南沿海省份尤其广东省,是我国开展 CO₂ 离岸封存的潜力区域之一^[12-13]。

随着碳中和目标的提出,我国 CCUS 技术进入了快速发展阶段,但仍面临诸多挑战,尤其是 CO₂ 离岸封存技术与发达国家差距较大。文章梳理了碳中和背景下 CCUS 技术的国内外发展现状,并对广东地区 CO₂ 离岸封存潜力进行了研究,为未来我国开展大规模 CCUS 项目特别是离岸封存工程提供基础依据。

1 CCUS 技术发展现状

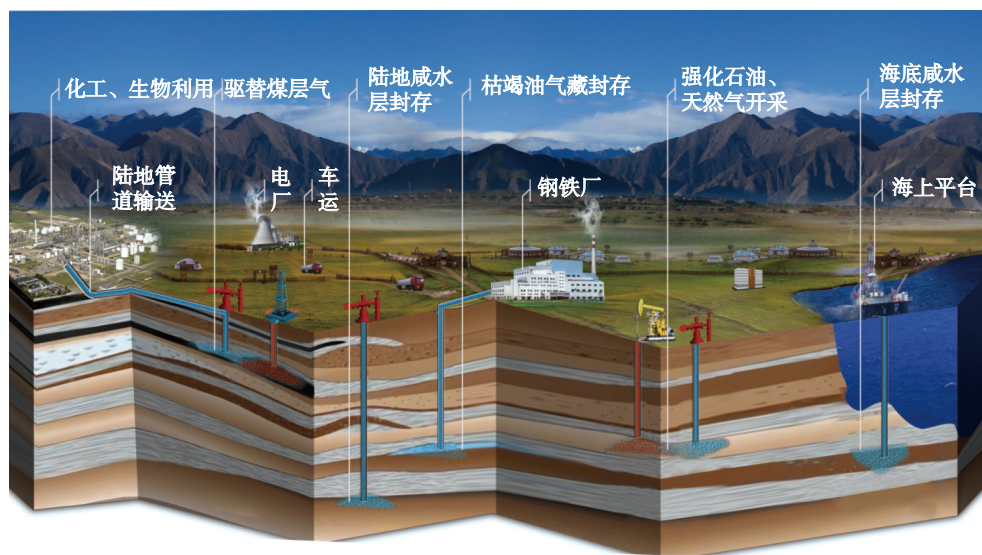
CCUS 主要技术示意图如图 1^[2]所示。CCUS 包含捕集、运输、利用、封存 4 个技术环节,各环节都包含多种技术选择,其中捕集技术主要包括燃烧前捕集、燃烧中捕集与燃烧后捕集等。输送技术主要包括罐车运输、船舶运输和管道运输。利用技术根据工程技术手段的不同,可分为化工利用技术、生物利用技术和地质利用技术等。封存技术主要分为陆地或海底的咸水层封存、枯竭油气田封存等^[2,14-15]。

1.1 CO₂ 捕集技术发展现状

CO₂ 捕集是指电力、化工、钢铁、水泥等行业大型工业设备用能过程中产生 CO₂ 的分离和富集的技术^[16]。根据捕集系统的技术基础与适用性,通常将 CO₂ 捕集技术分为 3 大类:燃烧前捕集技术、燃烧中捕集技术以及燃烧后捕集技术^[2,6,17]。

1.1.1 燃烧前捕集技术

燃烧前捕集技术主要是在指化石燃料在燃烧前化学能的转移,主要适用于整体煤气化联合循环(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)、天然气甲烷重整制氢等系统。以 IGCC 为例,该技术主要通过煤气化技术将煤转化为合成气,再经过水气变换后变为 CO₂ 和 H₂,气体压力和 CO₂ 浓度较高,

图 1 CCUS 主要技术示意图^[2]Fig. 1 Schematic diagram of the main technologies of CCUS^[2]

可采用吸收法、吸附法、低温分馏法等对 CO_2 进行捕集。该技术整体处于工业示范阶段, 我国华能集团于 2009 年建设了天津 IGCC 电站示范工程。该工程 2011 年投产, 捕集量达到 10 万 t/a ^[18-20]。目前, 燃烧前捕集技术的成本为 70 ~ 230 元/ t , 未来需要进一步开发高效捕集材料和节能工艺, 以及通过部署大规模示范项目降低投资成本^[6]。

1.1.2 燃烧中捕集技术

1) 富氧燃烧技术

富氧燃烧技术就是用比普通空气含氧浓度高的富氧空气进行燃烧, 结合烟气循环调节燃烧, 获得较高浓度的 CO_2 的烟气, 适用于新建电厂、水泥厂等。富氧燃烧技术优点在于烟气 CO_2 浓度高, 因此分离过程能耗低。该技术整体处于工业示范阶段, 华中科技大学于湖北应城进行了 35 MW 富氧燃烧碳捕集示范, 2014 年完成工程建设, CO_2 捕集量达到 10 万 t/a , 烟气 CO_2 浓度 > 80%^[6]。富氧燃烧技术的主要问题在于空分制冷的电耗很高, 目前捕集成本约为 380 元/ t , 未来发展方向主要在于开发低能耗空分技术^[6, 20-22]。

2) 化学链燃烧技术

化学链燃烧是一种新型的碳捕集技术, 该技术将传统的燃料与空气接触反应的燃烧分解为 2 个气固反应, 利用载氧体将空气中的氧传递给燃料, 直接产生高 CO_2 浓度烟气, 从而达到分离 CO_2 的目的。

具有捕集能耗低、系统效率高、 CO_2 内分离等优点。未来发展方向在于开发高效载氧体、反应器, 并进行系统效率优化等^[23-25]。

1.1.3 燃烧后捕集技术

燃烧后捕集技术是指将 CO_2 从燃料燃烧后的尾气中分离出来, 适用的分离方法主要有化学吸收法、物理吸附法、膜分离法等^[6, 26-29]。其中化学吸收法具备分离效果好、工艺易于放大等优势, 适用于火电、水泥、钢铁等行业, 在现阶段工业化应用中占据领先优势, 目前我国已建成多个不同规模的燃烧后化学吸收法碳捕集示范项目, 正在建设世界最大的燃煤电厂碳捕集项目——华能陇东正宁电厂 150 万 t/a 碳捕集项目^[30]。燃烧后化学吸收法捕集成本为 270 ~ 400 元/ t , 目前主要面临再生能耗高 (2.0 ~ 3.0 GJ/t), 以及吸收剂损耗大等问题, 未来研究需要进一步提升吸收剂性能以及优化节能工艺, 降低能耗和运行成本^[6, 31-33]。

1.2 CO_2 运输技术发展现状

1.2.1 罐车运输

CO_2 罐车运输技术核心在于 CO_2 运输储罐的设计和制造, 相关技术已较为成熟。车辆运输主要适用于 10 万 t/a 以下的 CO_2 运输, 需要对 CO_2 液化, 一般罐车内 CO_2 的温度和压力在 $-30\text{ }^\circ\text{C} \sim -20\text{ }^\circ\text{C}$, 1.7 ~ 2.0 MPa, 运输成本为 1 ~ 1.5 元/ $(\text{t}\cdot\text{km})$ ^[6, 10]。

1.2.2 船舶运输

CO_2 船舶运输是较为经济的运输方式, 运输距

离超过 1 500 km 时,成本可降至 0.1 元/(t·km)^[6, 34-35]。目前国外已有 CO₂ 运输船投入使用,领先的制造商包括现代尾浦造船、大宇造船、三菱造船、新来岛造船等。我国大连造船正在建设 7 500 m³ 液态 CO₂ 运输船,江南造船也已拥有设计能力,未来发展方向在于突破大型液化 CO₂ 运输船设计建造等。

1.2.3 管道运输

管道运输是大规模 CO₂ 运输的最优选择,可分为气态输送、低温液态输送、密相输送和超临界输送,其中密相或超临界输送具有较高的输送效率以及经济优势^[36-38]。国外已有长距离、大规模的 CO₂ 管道投运,我国处于示范阶段,2023 年,国内首条大规模 CO₂ 运输管道——齐鲁石化-胜利油田 CCUS 示范项目 CO₂ 输送管道全线贯通,未来 CO₂ 运输管道将在我国逐步实现规模化应用。

1.3 CO₂ 利用技术发展现状

1.3.1 CO₂ 化工利用

CO₂ 化工利用是指将 CO₂ 通过化学转化合成目标产物,实现 CO₂ 资源化利用的过程,主要包含 CO₂ 制备化学品技术以及 CO₂ 矿化利用技术^[6, 10]。前者主要通过热/光/电催化等将 CO₂ 转化制备成醇、烃、酯等一系列化学品,典型技术包括 CO₂ 加氢制甲醇、CO₂ 加氢制甲烷、CO₂ 重整制合成气等^[39-41]。相关技术目前大多处于基础研究和工业示范阶段,主要面临催化剂成本高、反应转化率低等问题,随着催化技术的进步,CO₂ 制备化学品的成本优势和减排潜力将迅速提升。后者是指通过天然矿物、工业材料和工业固废中钙、镁等碱性金属与 CO₂ 发生碳酸化反应生成稳定的碳酸盐,在碳减排的同时实现固废处置、联产高值化产品等^[42-43]。典型技术包括钢渣矿化利用 CO₂、磷石膏矿化利用 CO₂、CO₂ 矿化氧化混凝土等,主要处于工业示范阶段,发展方向主要在于降低过程能耗和提高利用效率^[44-46]。

1.3.2 CO₂ 生物利用

CO₂ 生物利用是指通过植物光合作用,将 CO₂ 转化为生物质从而实现资源化利用的技术,主要包括微藻利用技术和气肥利用技术^[6]。前者通过微藻将 CO₂ 固定为碳水化合物,并进一步转化为生物燃料、食品添加剂等化学品^[47-48],目前在国内处于研发示范阶段,已有数个万吨级微藻固碳示范项目。后者是指将 CO₂ 注入温室用于作物增产^[49-50],目前经济

可行性较低。

1.3.3 CO₂ 地质利用

CO₂ 地质利用是指将 CO₂ 注入适宜的地层,通过驱替、置换、传热、化学反应等作用产生有价值的产品,同时实现 CO₂ 的封存^[51-52]。主要包含强化石油开采和强化甲烷开采(天然气、煤层气、页岩气、可燃冰等)^[6]。CO₂ 强化石油开采(CO₂-EOR)是目前最具商业化前景的技术,我国已完成大规模工业示范,典型项目包括齐鲁石化-胜利油田百万吨级 CCUS 示范项目、吉林油田 CCUS 示范工程等。CO₂ 强化甲烷开采处于基础研发和中试阶段。

1.4 CO₂ 封存技术发展现状

CO₂ 封存是将大型排放源产生的 CO₂ 捕获后运输到选定地点长期封存,不再释放到大气中,是缓解全球气候变暖最有效的技术之一。

1.4.1 咸水层封存

按照地质封存体的不同,可分为咸水层封存、枯竭油气藏封存等^[2]。咸水层通常是指富含高浓度盐水(卤水)的地下深部的沉积岩层。该类地层在全球范围内分布广泛,饱含大量的水资源,但由于其地下水矿化度较大,不适合作为饮用水或农业用水,然而却是封存 CO₂ 的有利场所^[53-54]。目前,我国已在鄂尔多斯进行了 CO₂ 咸水层封存 10 万吨级示范,海上 30 万吨级咸水层封存试验也已投产^[55-56]。但我国咸水层封存技术研发与国际先进水平仍有一定差距,未来的发展方向在于 CO₂ 规模化封存,发展 CO₂ 海上封存。

1.4.2 枯竭油气藏封存

枯竭油气藏一般是指经过 3 次开采以后,已丧失开采价值的油气田。枯竭的油气藏具备完好的圈闭结构和相对稳定的地质条件,可以有效地封存 CO₂ 并限制 CO₂ 泄漏,具备较高的封存效率和安全性^[10]。同时,油气勘探、开采过程中积累的丰富的地质资料和设备可为封存提供良好基础^[56]。因此,将 CO₂ 封存到枯竭油气藏中已成为一种被广泛认同的、可行的碳封存技术。然而由于枯竭油气田残存的废弃油气井较多,也存在一定泄漏风险。目前枯竭油气田封存 CO₂ 项目仍很少。

1.4.3 离岸封存

根据封存位置,可分为陆地封存和离岸封存。CO₂ 离岸地质封存是将 CO₂ 通过船舶或管道运输到海上平台,注入到海底 800~3 000 m 的咸水层、油气

藏等深层地质结构体中^[57]。其中, 海底咸水层具有分布广、容量大、选择多等优势, 是海洋封存的主要选择; 油气藏通常具有资料基础好、完整性与封闭性确定、有生产配套设施可依托等优势, 是未来开展大规模 CO₂ 封存的基础^[58]。CO₂ 离岸封存是不具备陆上封存条件的沿海地区实现碳减排的有效途径。相较于陆地封存, CO₂ 海洋封存具有不占用土地, 不影响地下水资源, 远离居民区等优点, 且除岩石盖层外,

表层还有海水的压力和阻隔, 因此封存的风险性大幅降低^[56, 58]。

目前已有多个国家开展了 CO₂ 海洋封存项目实践工作, 典型项目如表 1^[59] 所示, 主要分布在挪威、荷兰、英国、澳大利亚等国家的附近海域, 封存地质体大多为海底咸水层, 也包括油气藏^[59]。2023 年, 我国首个离岸 CO₂ 封存示范工程——中国海油恩平 15-1 油田群 CO₂ 回注示范工程投入运行。

表 1 典型 CO₂ 离岸封存项目^[59]
Tab. 1 Typical offshore CO₂ storage projects^[59]

项目名称	国家及实施地点	封存量/10 ⁶ t	地层注入深度/m	储层岩性	盖层岩性	封存方式
Sleipner	挪威北海	17.0	1 000	砂岩	页岩	咸水层封存
Snøhvit	挪威巴伦支海	1.1	2 500	砂岩	页岩	咸水层封存
Tomakomai	日本苫小牧近海	0.3	3 000	砂岩/火山岩	泥岩	咸水层封存
Gorgon	澳大利亚巴罗岛近海	55.0	2 300	砂岩	页岩	咸水层封存
White Rose	英国亨伯近海	54.0	1 020	砂岩	泥岩	咸水层封存
K12-B	荷兰北海	0.1	3 800	砂岩	蒸发岩	枯竭油气藏封存
Peterhead	英国北海	34.0	2 560	砂岩	页岩	枯竭油气藏封存
Lula	巴西里约热内卢近海	0.8	3 000	碳酸盐岩	泥岩	驱油封存

2 广东省离岸地质封存潜力

2.1 广东省 CO₂ 离岸封存潜力

广东是沿海工业发达省份, 存在大规模的 CO₂ 集中排放源, 而陆上 CO₂ 封存潜力匮乏, 离岸封存是将来大规模 CO₂ 减排的最主要方式^[60]。近年来, 广东省积极发展离岸封存技术产业, 2022 年启动了我国首个海上规模化 CCUS 集群研究项目“大亚湾区二氧化碳捕集、利用及封存集群研究项目”, 力求打造中国南部地区 CO₂ 商业规模离岸封存的中心, 为我国海上 CO₂ 封存事业奠定基础, 因此, 有必要探明广东地区 CO₂ 离岸封存潜力, 为后期实施大规模 CO₂ 离岸封存提供理论和实践依据。

中国海域 CO₂ 地质封存潜力评价预测我国海域盆地级碳封存潜力约为 2.6 万亿 t^[61]。广东省近海沉积盆地面积大, 包括在珠江口、北部湾盆地等, 这些盆地的沉积地层厚, 储盖层组合好, 圈闭发育, CO₂ 封存适宜性高^[12]。

2.1.1 广东近海盆地咸水层 CO₂ 封存潜力

1) 珠江口盆地

珠江口盆地位于南海的北部海域, 呈 NE—SW 向展布, 长 750 km, 宽 300 km, 面积约 26.68 万 km²^[62]。如图 2^[63] 所示, 珠江口盆地面积广阔, 800 ~ 3500 m 深度范围内咸水层广泛发育, 具有巨大的地质碳封存潜力, 并且与北部沿岸的广东省 CO₂ 排放源构成了良好的源汇匹配关系^[60, 64]。

一些研究人员已开展了珠江口盆地 CO₂ 封存潜力评价。霍传林^[57] 对我国近海 CO₂ 海洋封存潜力进行评估, 结果显示珠江口盆地的封存适宜性是最佳的, 800 ~ 2500 m 的咸水层有效容量平均为 1359 亿 t。Zhou 等^[64-65] 的研究结果表明, 珠江口盆地深部咸水层的有效 CO₂ 储存容量约 3080 亿 t。根据中国地质调查局水文地质环境地质调查中心《全国二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程总成果报告》^[66], 珠江口盆地内具有中等以上碳封存适宜性的单元的推定潜力约为 2066 亿 t。根据中英(广东)CCUS 中心与中国科学院南海海洋研究所的测算结果^[63], 珠江口盆地深部咸水层 CO₂ 地质储存推定潜力总量约 1368 亿 t。

2) 北部湾盆地

北部湾盆地位于南海北部大陆架西部, 面积为

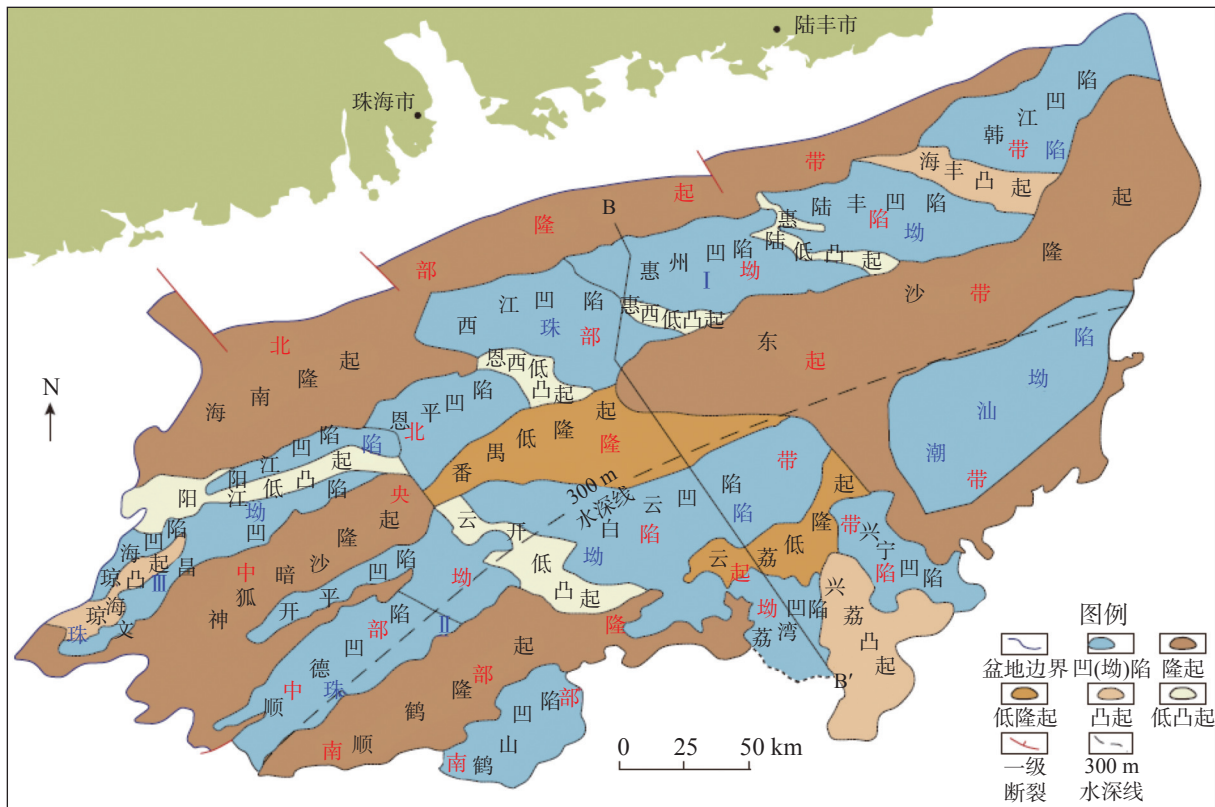


图 2 珠江口盆地碳源、碳封存潜力及适宜性综合评价图^[63]

Fig. 2 Comprehensive assessment of carbon source, and carbon storage potential and suitability of the Pearl River Mouth Basin^[63]

51 517 km², 包括北部湾海区的一部分、雷州半岛东部海区的一部分以及雷州半岛南部和海南岛北部陆地, 如图 3^[67] 所示。北部湾盆地海底地貌较平坦, 海水较浅, 深度小于 55 m, 北浅南深。霍传林^[57] 的评估结果证明该地区 800 ~ 2500 m 内咸水层的有效 CO₂ 封存容量平均为 343 亿 t。Li 等^[68] 的评估结果表明北部湾盆地咸水层封存潜力为 485 亿 t, 其中潜力最大的为乌石凹陷, 约 68.4 亿 t。

2.1.2 广东省离岸 CO₂ 驱油潜力

CO₂ 驱油是 CO₂ 利用和封存的一条有效途径, 该技术能够产生实际效益, 降低 CO₂ 封存的成本。近年来, 离岸 CO₂-EOR 发展较快, 广东省近海的珠江口、北部湾盆地等已探明大量油气田, 具备一定有可利用资料和设备, 是开展我国离岸 CO₂-EOR 的理想区域之一, 因此有必要了解广东近海沉积盆地的 CO₂-EOR 潜力。

Zhou 等^[65] 评估了珠江口盆地的 CO₂ 封存潜力, 结果显示珠江口盆地油气藏封存潜力约 6000 万 t。其后续的研究^[60, 64] 评估了我国近海盆地的 CO₂-

EOR 潜力, 发现珠江口盆地通过 CO₂-EOR 可封存 3.4 亿 t ~ 5.1 亿 t CO₂, 中小型油田具有应用混相驱的有利条件, 流花 11-1 大型油田需要考虑采用非混相驱。

Zhou 等^[69] 的研究结果表明北部湾盆地油田 CO₂ 封存潜力约为 2200 万 t。Li 等^[70] 在 2013 年的研究显示北部湾盆地油田 CO₂ 有效地质封存量约为 1290 万 t, 天然气田 CO₂ 封存潜力约为 350 万 t。在其后续的研究中^[68], 北部湾盆地油、气田 CO₂ 封存潜力评估值分别提升至 4230 万 t 和 6230 万 t。

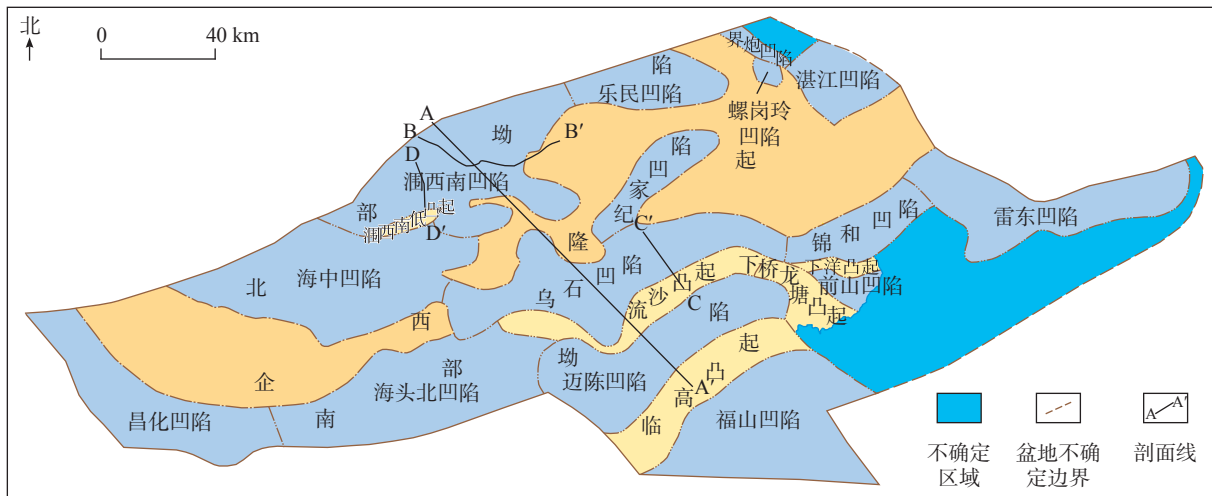
2.2 广东省 CO₂ 离岸封存源汇匹配分析

2.2.1 广东沿海主要 CO₂ 排放源分布

广东省工业发达, 拥有众多电力、石化、钢铁、水泥等企业, 主要分布于珠江三角洲及海岸带区域, 大部分距海岸线不到 150 km, 发展 CCUS 产业集群的规模优势明显。

1) 煤电行业

2021 年, 广东省煤电碳排放约为 2.68 亿 t, 其中沿海的粤西、珠三角、粤东地区煤电装机量分别为

图3 北部湾盆地构造划分^[67]Fig. 3 Division of tectonic units in the Beibu Gulf Basin^[67]

13 GW、24 GW 和 18 GW, 年 CO₂ 排放量约为 5300 万 t、1 亿 t 以及 7400 万 t。此外, 粤西、粤东地区未来仍将新增煤电装机 4 GW 以及 17 GW, 考虑煤电利用小时数降至 3500~4000 h, 预计将新增碳排放共 5900 万 t~6700 万 t。

2) 石化、钢铁、水泥行业

珠三角及海岸带区域占广东全省石化、钢铁、水泥三大行业直接碳排放约六成。粤西地区石化、钢铁、水泥行业的碳排量分别为 2167 万 t、3522 万 t 以及 950 万 t; 珠三角地区三大行业的碳排量分别为 2273 万 t、1247 万 t 以及 2804 万 t; 粤东地区钢铁行业碳排量为 1721 万 t, 此外水泥行业排放约 6 万 t。

2.2.2 广东省 CO₂ 离岸封存源汇匹配方案

广东省 CO₂ 排放源主要分布在沿海地区, 与近海的 CO₂ 封存场地构成了良好的源汇匹配关系。现有研究将广东省 CO₂ 源汇集群分为 4 个集群: 粤西集群、珠江口西岸集群、广佛肇-深莞惠集群、粤东集群^[63]。考虑各地区 CO₂ 源汇之间的空间分布, 粤西地区离岸封存地点可包括珠江口盆地西部珠三坳陷以及北部湾盆地, CO₂ 经海上管道或船舶直线运输至珠三坳陷约 200 km, 至北部湾盆地东部的雷东凹陷约 90 km, 雷州半岛碳排放源距离北部湾盆地乌石凹陷仅数十千米, 适宜在此地区开展离岸驱油项目。珠江口西岸地区适宜在珠江口盆地西江凹陷开展离岸咸水层封存或离岸驱油, 海上运输距离为 160~190 km; 广佛肇-深莞惠地区可将捕集的 CO₂ 运输至珠江口盆地的惠州凹陷开展离岸封存或离岸

驱油, 海上运输距离约 170 km; 粤东地区可将 CO₂ 运输至珠江口盆地的陆丰凹陷进行离岸封存或用于驱油, 海上运输距离约 150 km。

3 存在问题和举措

3.1 现阶段存在问题

在我国广东省等东南沿海地区开展 CO₂ 离岸封存项目, 有助于降低高排放行业的碳排放量, 同时也有利于推动可持续发展和创新产业发展。但目前我国 CO₂ 离岸封存还存在以下问题。

1) 技术成熟度较低

CO₂ 离岸封存技术是一项复杂的技术, 需要保证安全性、可监控性、可操作性以及环境友好性, 需要通过大量的基础研究和实践来不断完善。虽然我国已启动了 CO₂ 离岸封存试点项目, 但与欧美等发达国家相比, 技术水平和规模均处在初步阶段, 相关研究和实践经验不足, 在封存地选址、基础设施建设、海上运输、注入、驱油、监测等领域需要不断优化和提升。

2) 封存成本高

CO₂ 离岸封存投资较大, 高昂的建设和运营成本制约了该项技术的发展。离岸封存需要建设相关基础设施和设备, 包括海底运输管道、注入平台、监测系统, 海上作业成本和技术难度显著高于陆地封存, 因此需要巨大的投资成本^[71]。离岸封存涉及到安全和生态环境方面的风险, 如地震、火灾和泄漏等, 地质勘探等前期工作也面临较大投资^[72]。目前,

海底咸水层 CO₂ 封存成本约为 300 元/t, 缺乏市场竞争力^[15]。

3) 环境影响不明确

CO₂ 从海底封存空间泄漏到海洋环境的概率非常低, 但同样不能忽视其泄漏风险, 如果发生泄漏, 可能引发海水酸化而危害海洋生物, 破坏局部海洋环境^[56]。如果封存地点附近发生海底地震等地质灾害, 导致 CO₂ 大规模的泄漏, CO₂ 会通过海洋重新逃逸到大气中^[10]。

4) 政策法规不完善

CO₂ 地质封存缺乏经济效益, 在没有激励政策的情况下面临着动力不足的问题。目前 CCUS 在欧美等发达国家能够以财政税收支持政策作为支撑, 例如美国 45Q 税收抵免政策修订后, 将为固定源排放 CO₂ 的地质封存提供 85.00 美元/t 的补贴^[73]。而我国尚未制定相关的税收优惠和补贴激励政策, 这导致国内企业在参与 CO₂ 离岸封存项目上缺乏积极性。

此外, 目前我国对于 CO₂ 封存项目的选址、建设、运营和封存场地关闭后的环境风险评估、监控等方面同样缺乏相关的法律法规。

3.2 应对举措

CO₂ 离岸封存的大规模工业化仍需要时间和技术创新的进一步积累, 针对存在的挑战, 建议从以下几方面着手, 推动技术产业发展。

1) 加快关键技术攻关, 降低封存成本

针对 CO₂ 离岸封存, 需要开展更为深入的理论和实践研究, 鼓励相关企业联合科研机构, 在封存选址、海上运输、注入技术、监测技术等领域增加科研投入、加强技术攻关, 提升技术成熟度。开发大规模商业化运营的离岸封存专用设备, 降低工程建设成本, 推动产业化进程, 以促进我国 CO₂ 离岸封存技术的发展和应用。

2) 加大基础设施投资, 推动集群项目发展

加快 CO₂ 运输船舶或海底管道、中转储运、注入平台等基础设施建设与共享, 发挥示范项目引领作用, 通过示范项目验证技术可行性和经济性, 提升技术水平。加速推进离岸封存技术产业化发展, 推动 CCUS 全产业链示范工程建设, 实现规模效应, 降低成本。

3) 完善法律法规

相关部门应加强政策引导, 建立科学和完整的 CO₂ 离岸封存法制体系, 积极探索出符合实践需要的法律法规, 以确保 CO₂ 离岸的长期稳定发展。探索符合国情的税收优惠和补贴激励政策, 确立离岸封存项目的法律原则和环保标准, 建立针对离岸封存项目选址、运行、关闭等全流程的监管机制, 完善投融资模式和碳交易市场, 将离岸封存纳入碳交易体系, 引导社会资本参与, 推动 CO₂ 离岸封存持续发展。

4 结论

CCUS 技术被认为是实现碳中和的关键技术之一。近年来, 我国大力支持 CCUS 技术研发, 通过加强基础研究、关键技术攻关、推进示范项目等方式, 在 CCUS 各技术环节均实现了快速发展, 部分技术已达到国际先进水平, 然而仍需在运输、封存环节的个别关键技术上进一步提升。

广东近海地区具备巨大的 CO₂ 地质封存潜力。然而离岸封存还需要解决技术不成熟、封存成本高、环境影响不明、政策法规缺乏等问题, 未来我国应该加大对离岸 CCUS 技术的研究和投入, 降低技术成本, 逐步完善离岸封存项目的配套设施和政策体系, 推动大规模集群项目落地, 助力碳中和工作的顺利进行。

参考文献:

- [1] 联合国. 气候变化框架公约 [R]. 里约热内卢: 联合国, 1992. United Nations. United Nations framework convention on climate change [R]. Rio de Janeiro: United Nations, 1992.
- [2] 蔡博峰, 李琦, 张贤. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2021)——中国 CCUS 路径研究 [R]. 北京: 生态环境部环境规划院, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 中国 21 世纪议程管理中心, 2021. CAI B F, LI Q, ZHANG X. China carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) annual report (2021): China CCUS pathway study [R]. Beijing: Institute of Environmental Planning, Ministry of Ecology and Environment, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences University of Chinese. The Administrative Center for China's Agenda 21, 2021.
- [3] IEA. Global energy review: CO₂ emissions in 2022 [R]. Paris: IEA, 2023.
- [4] 张贤, 李阳, 马乔, 等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 70-80. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2021.06.004.

- ZHANG X, LI Y, MA Q, et al. Development of carbon capture, utilization and storage technology in China [J]. *Strategic study of CAE*, 2021, 23(6): 70-80. DOI: [10.15302/J-SSCAE-2021.06.004](https://doi.org/10.15302/J-SSCAE-2021.06.004).
- [5] 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. DOI: [10.12062/cpre.20210827](https://doi.org/10.12062/cpre.20210827).
- ZHANG X, LI K, MA Q, et al. Orientation and prospect of ccus development under carbon neutrality target [J]. *China population, resources and environment*, 2021, 31(9): 29-33. DOI: [10.12062/cpre.20210827](https://doi.org/10.12062/cpre.20210827).
- [6] 黄晶.中国碳捕集利用与封存技术评估报告[M].北京:科学出版社,2021.
- HUANG J. National assessment report on development of carbon capture utilization and storage technology in China [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [7] IPCC. Climate change 2022: mitigation of climate change [R]. Geneva: IPCC, 2022.
- [8] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[M].北京:人民出版社,2021.
- Outline of the People's Republic of China 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development and Long-Range Objectives for 2035 [M]. Beijing: People's Publishing House, 2021.
- [9] 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. DOI: [10.13199/j.cnki.cst.2021.11.002](https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.11.002).
- SUN T M, LIU S Q, WANG T. Research advances on evaluation of CO₂ geological storage potential in China [J]. *Coal science and technology*, 2021, 49(11): 10-20. DOI: [10.13199/j.cnki.cst.2021.11.002](https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.11.002).
- [10] 陆诗建.碳捕集、利用与封存技术[M].北京:中国石化出版社,2020.
- LU S J. Carbon capture, utilization and storage technology. Beijing: China Petrochemical Press, 2020.
- [11] 李国玉,吕鸣岗.中国含油气盆地图集[M].北京:石油工业出版社,2002.
- LI G Y, LÜ M G. Atlas of China's petroliferous basins [M]. Beijing: Petroleum industry press, 2002.
- [12] 秦长文,肖钢,王建丰,等.CO₂地质封存技术及中国南方近海CO₂封存的前景[J].*海洋地质前沿*,2012,28(9):40-45. DOI: [10.16028/j.1009-2722.2012.09.001](https://doi.org/10.16028/j.1009-2722.2012.09.001).
- QIN C W, XIAO G, WANG J F, et al. A review of CO₂ storage technology and perspective of CO₂ storage in the nearshore area of South China [J]. *Marine geology frontiers*, 2012, 28(9): 40-45. DOI: [10.16028/j.1009-2722.2012.09.001](https://doi.org/10.16028/j.1009-2722.2012.09.001).
- [13] ZHOU D, LI P C, LIANG X, et al. A long-term strategic plan of offshore CO₂ transport and storage in northern South China Sea for a low-carbon development in Guangdong province, China [J]. *International journal of greenhouse gas control*, 2018, 70: 76-87. DOI: [10.1016/j.ijggc.2018.01.011](https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.01.011).
- [14] 骆仲洪,方梦祥,李明远,等.二氧化碳捕集封存和利用技术[M].北京:中国电力出版社,2012.
- LUO Z Y, FANG M X, LI M Y, et al. Carbon dioxide capture, storage and utilization technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [15] 科学技术部社会发展科技司,中国21世纪议程管理中心.中国碳捕集利用与封存技术发展路线图(2019版)[M].北京:科学出版社,2019.
- Department of Social Development, Ministry of Science and technology, The Administrative Center for China's Agenda 21. Roadmap for carbon capture, utilization and storage technology development in China (2019 edition) [M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [16] 胡其会,李玉星,张建,等.“双碳”战略下中国CCUS技术现状及发展建议[J].*油气储运*,2022,41(4):361-371. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2022.04.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2022.04.001).
- HU Q H, LI Y X, ZHANG J, et al. Current status and development suggestions of CCUS technology in China under the "Double Carbon" strategy [J]. *Oil & gas storage and transportation*, 2022, 41(4): 361-371. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2022.04.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2022.04.001).
- [17] 李阳.碳中和与碳捕集利用封存技术进展[M].北京:中国石化出版社,2021.
- LI Y. Progress of carbon neutrality and carbon capture, utilization and storage technology [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2021.
- [18] 任永强,车得福,许世森,等.国内外IGCC技术典型分析[J].*中国电力*,2019,52(2):7-13,184. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.201806062](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.201806062).
- REN Y Q, CHE D F, XU S S, et al. Study on typical domestic and foreign IGCC technology applications [J]. *Electric power*, 2019, 52(2): 7-13,184. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.201806062](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.201806062).
- [19] 樊强,许世森,刘沅,等.基于IGCC的燃烧前CO₂捕集技术应用与示范[J].*中国电力*,2017,50(5):163-167,184. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.2017.05.163.05](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.2017.05.163.05).
- FAN Q, XU S S, LIU Y, et al. Application and demonstration of IGCC-based pre-combustion CO₂ capture technology [J]. *Electric power*, 2017, 50(5): 163-167,184. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.2017.05.163.05](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.2017.05.163.05).
- [20] 叶云云,廖海燕,王鹏,等.我国燃煤发电CCS/CCUS技术发展方向及发展路线图研究[J].*中国工程科学*,2018(20):80-89. DOI: [10.15302/J-SSCAE-2018.03.012](https://doi.org/10.15302/J-SSCAE-2018.03.012).
- YE Y Y, LIAO H Y, WANG P, et al. Research on technology directions and roadmap of CCS/CCUS for coal-fired power generation in China [J]. *Strategic study of CAE*, 2018(20): 80-89. DOI: [10.15302/J-SSCAE-2018.03.012](https://doi.org/10.15302/J-SSCAE-2018.03.012).
- [21] 刘飞,关键,祁志福,等.燃煤电厂碳捕集、利用与封存技术路线选择[J].*华中科技大学学报(自然科学版)*,2022,50(7):1-

13. DOI: [10.13245/j.hust.220701](https://doi.org/10.13245/j.hust.220701).
LIU F, GUAN J, QI Z F, et al. Technology route selection for carbon capture utilization and storage in coal-fired power plants [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (natural science edition)*, 2022, 50(7): 1-13. DOI: [10.13245/j.hust.220701](https://doi.org/10.13245/j.hust.220701).
- [22] 郭军军, 张泰, 李鹏飞, 等. 中国煤粉富氧燃烧的工业示范进展及展望 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(4): 1197-1208. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.201639](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201639).
GUO J J, ZHANG T, LI P F, et al. Industrial demonstration progress and trend in pulverized coal oxy-fuel combustion in China [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(4): 1197-1208. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.201639](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201639).
- [23] 史晓斐, 杨思宇, 钱宇. 化学链技术在煤炭清洁高效利用中的研究进展 [J]. *化工学报*, 2018, 69(12): 4931-4946. DOI: [10.11949/j.issn.0438-1157.20180436](https://doi.org/10.11949/j.issn.0438-1157.20180436).
SHI X F, YANG S Y, QIAN Y. Chemical looping technology for clean and highly efficient coal processes [J]. *CIESC journal*, 2018, 69(12): 4931-4946. DOI: [10.11949/j.issn.0438-1157.20180436](https://doi.org/10.11949/j.issn.0438-1157.20180436).
- [24] 王金星, 孙宇航. 化学链燃烧技术的研究进展综述 [J]. *华北电力大学学报 (自然科学版)*, 2019, 46(5): 100-110. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2691.2019.05.13](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2691.2019.05.13).
WANG J X, SUN Y H. Review of chemical-looping combustion technology research [J]. *Journal of North China Electric Power University (natural science edition)*, 2019, 46(5): 100-110. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2691.2019.05.13](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2691.2019.05.13).
- [25] 白歆慰, 刘金昌, 白磊. 煤化学链燃烧载体研究进展 [J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(2): 31-44. DOI: [10.13226/j.issn.1006-6772.CCUS20092701](https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.CCUS20092701).
BAI X W, LIU J C, BAI L. Recent advances in oxygen carriers for chemical looping combustion of coal [J]. *Clean coal technology*, 2021, 27(2): 31-44. DOI: [10.13226/j.issn.1006-6772.CCUS20092701](https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.CCUS20092701).
- [26] 陈旭, 杜涛, 李刚, 等. 吸附工艺在碳捕集中的应用现状 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(增刊 1): 155-163. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.190376](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.190376).
CHEN X, DU T, LI G, et al. Application of adsorption technology on carbon capture [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(Suppl. 1): 155-163. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.190376](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.190376).
- [27] SREEDHAR I, VAIDHISWARAN R, KAMANI B M, et al. Process and engineering trends in membrane based carbon capture [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2017, 68: 659-684. DOI: [10.1016/j.rser.2016.10.025](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.025).
- [28] RIBOLDI L, BOLLAND O. Overview on pressure swing adsorption (PSA) as CO₂ capture technology: state-of-the-art, limits and potentials [J]. *Energy procedia*, 2017, 114: 2390-2400. DOI: [10.1016/j.egypro.2017.03.1385](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1385).
- [29] OCHEDI F O, YU J L, YU H, et al. Carbon dioxide capture using liquid absorption methods: a review [J]. *Environmental chemistry letters*, 2021, 19(1): 77-109. DOI: [10.1007/s10311-020-01093-8](https://doi.org/10.1007/s10311-020-01093-8).
- [30] 林海周, 吴大卫, 范永春, 等. 燃煤电厂烟气 CO₂ 化学吸收捕集液-液两相吸收剂开发进展 [J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(4): 21-30. DOI: [10.13226/j.issn.1006-6772.RM23040101](https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.RM23040101).
LIN H Z, WU D W, FAN Y C, et al. Development progress of liquid-liquid biphasic solvents for carbondioxide chemical absorption capture from flue gas of coal-fired power plants [J]. *Clean coal technology*, 2023, 29(4): 21-30. DOI: [10.13226/j.issn.1006-6772.RM23040101](https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.RM23040101).
- [31] LE M Y, NEVEUX T, AL A A, et al. Process modifications for solvent-based post-combustion CO₂ capture [J]. *International journal of greenhouse gas control*, 2014, 31: 96-112. DOI: [10.1016/j.ijggc.2014.09.024](https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.09.024).
- [32] 林海周, 杨晖, 罗海中, 等. 烟气二氧化碳捕集胺类吸收剂研究进展 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(1): 8-14. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.003).
LIN H Z, YANG H, LUO H Z, et al. Research progress on amine absorbent for CO₂ capture from flue gas [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(1): 8-14. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.003).
- [33] 林海周, 裴爱国, 方梦祥. 燃煤电厂烟气二氧化碳胺法捕集工艺改进研究进展 [J]. *化工进展*, 2018, 37(12): 4874-4886. DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2017-2525](https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2017-2525).
LIN H Z, PEI A G, FANG M X. Progress of research on process modifications for amine solvent-based post combustion CO₂ capture from coal-fired power plant [J]. *Chemical industry and engineering progress*, 2018, 37(12): 4874-4886. DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2017-2525](https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2017-2525).
- [34] 邝展婷. 全球船企抢占 CCUS 风口 [N]. *中国船舶报*, 2022-02-18 (005).
KUANG Z T. Global shipping companies seize the CCUS outlet [N]. *China Ship News*, 2022-02-18 (005).
- [35] 吕龙德. 二氧化碳运输船或迎广阔市场 [J]. *广东造船*, 2021, 40(5): 13-15. DOI: [10.3969/j.issn.2095-6622.2021.05.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-6622.2021.05.003).
LÜ L D. Carbon dioxide carriers may welcome a broad market [J]. *Guangdong shipbuilding*, 2021, 40(5): 13-15. DOI: [10.3969/j.issn.2095-6622.2021.05.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-6622.2021.05.003).
- [36] 陈霖. 中石化二氧化碳管道输送技术及实践 [J]. *石油工程建设*, 2016, 42(4): 7-10. DOI: [10.3969/j.issn.1001-2206.2016.04.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2206.2016.04.002).
CHEN L. Transmission technology of CO₂ pipeline and practice in sinopec [J]. *Petroleum engineering construction*, 2016, 42(4): 7-10. DOI: [10.3969/j.issn.1001-2206.2016.04.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2206.2016.04.002).
- [37] 高帅帅, 刘辉. 二氧化碳管道输送关键技术研究及应用 [J]. *石化技术*, 2017, 24(9): 57,30. DOI: [10.3969/j.issn.1006-0235.2017.09.045](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-0235.2017.09.045).
GAO S S, LIU H. Research and application of key technologies for carbon dioxide pipeline transportation [J]. *Petrochemical industry technology*, 2017, 24(9): 57,30. DOI: [10.3969/j.issn.1006-0235.2017.09.045](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-0235.2017.09.045).

- 1006-0235.2017.09.045.
- [38] 郑建坡,史建公,刘志坚,等.二氧化碳管道输送技术研究进展[J].中外能源,2018,23(6):87-94
ZHENG J P, SHI J G, LIU Z J, et al. Recent advances in pipeline transportation technology of carbon dioxide [J]. Sino-global energy, 2018, 23(6): 87-94
- [39] 潘卫国,李楚凡,郭瑞堂.光电催化CO₂还原技术研究进展[J].华中科技大学学报(自然科学版),2023,51(1):146-155. DOI: 10.13245/j.hust.239153.
PAN W G, LI C F, GUO R T. Research progress in photocatalytic CO₂ reduction technology [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (natural science edition), 2023, 51(1): 146-155. DOI: 10.13245/j.hust.239153.
- [40] 陈为,魏伟,孙予罕.二氧化碳光电催化转化利用研究进展[J].中国科学:化学,2017,47(11):1251-1261. DOI: 10.1360/N032017-00092.
CHEN W, WEI W, SUN Y H. Recent progress on photoelectrocatalytic conversion of carbon dioxide [J]. Scientia sinica (chimica), 2017, 47(11): 1251-1261. DOI: 10.1360/N032017-00092.
- [41] 李龙泰,高彪,罗学彬,等.二氧化碳催化加氢研究进展[J].工业催化,2021,29(7):1-10. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1143.2021.07.001.
LI L T, GAO B, LUO X B, et al. Research progress on hydrogenation of carbon dioxide [J]. Industrial catalysis, 2021, 29(7): 1-10. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1143.2021.07.001.
- [42] 张亚朋,崔龙鹏,刘艳芳,等.3种典型工业固废的CO₂矿化封存性能[J].环境工程学报,2021,15(7):2344-2355. DOI: 10.12030/j.cjee.202101003.
ZHANG Y P, CUI L P, LIU Y F, et al. Comparison of three typical industrial solid wastes on the performance of CO₂ mineralization and sequestration [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2021, 15(7): 2344-2355. DOI: 10.12030/j.cjee.202101003.
- [43] 莫淳,廖文杰,梁斌,等.工业固废活化钾长石CO₂矿化提钾的生命周期碳排放与成本评价[J].化工学报,2017,68(6):2501-2509. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20161754.
MO C, LIAO W J, LIANG B, et al. Life-cycle greenhouse gas emissions and cost of potassium extraction and CO₂ mineralization via K-feldspar—industrial solid waste calcination [J]. CIESC journal, 2017, 68(6): 2501-2509. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20161754.
- [44] 孙一夫,李凤军,何文,等.二氧化碳矿化养护加气混凝土试验研究[J].洁净煤技术,2021,27(2):237-245. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CCUS20071401.
SUN Y F, LI F J, HE W, et al. Investigation on CO₂ mineralization curing of aerated concretes [J]. Clean coal technology, 2021, 27(2): 237-245. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CCUS20071401.
- [45] 王秋华,吴嘉帅,张卫风.二碱性工业固废矿化封存二氧化碳研究进展[J].化工进展,2023,42(3):1572-1582. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2022-0813.
WANG Q H, WU J S, ZHANG W F. Research progress of alkaline industrial solid wastes mineralization for carbon dioxide sequestration [J]. Chemical industry and engineering progress, 2023, 42(3): 1572-1582. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2022-0813.
- [46] 吴林,李季,朱家骅,等.磷石膏-氨-水固碳反应体系氨浓度对石膏颗粒溶解速率的影响[J].化工学报,2020,71(8):3575-3584. DOI: 10.11949/0438-1157.20200200.
WU L, LI J, ZHU J H, et al. Effect of ammonia concentration on dissolution rate of gypsum particles in phosphogypsum-ammonia-water reaction system for carbon sequestration [J]. CIESC journal, 2020, 71(8): 3575-3584. DOI: 10.11949/0438-1157.20200200.
- [47] 廖莎,薛冬,李晓姝,等.微藻固碳技术基础及其生物质应用研究进展[J].当代化工,2020,49(6):1175-1179,1183. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0460.2020.06.041.
LIAO S, XUE D, LI X Z, et al. Research progress in carbon dioxide fixation by microalgae and its biomass application [J]. Contemporary chemical industry, 2020, 49(6): 1175-1179,1183. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0460.2020.06.041.
- [48] 夏慕,叶文帆,富经纬,等.燃煤烟气微藻固碳减排技术现状与展望[J].煤炭科学技术,2020,48(1):108-119. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2020.01.014.
XIA A, YE W F, FU J W, et al. Current status and prospect of carbon fixation and emission reduction technology for coal-fired flue gas by microalgae [J]. Coal science and technology, 2020, 48(1): 108-119. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2020.01.014.
- [49] 王伟伟,马俊贵.CO₂气肥增施技术及其应用[J].农业工程,2014,4(增刊1):48-51. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1795.2014.z1.013.
WANG W W, MA J X. Gas fertilizer increasing technology and its application of carbon dioxide [J]. Agricultural engineering, 2014, 4(Suppl. 1): 48-51. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1795.2014.z1.013.
- [50] 姚闯,张林雁,任守华.棚室CO₂气肥机作用机理与应用研究[J].科技创新与应用,2021(10):182-184.
YAO C, ZHANG L Y, REN S H. Study on mechanism and application of CO₂ gas fertilizer in shed [J]. Technology innovation and application, 2021(10): 182-184.
- [51] 胡永乐,郝明强,陈国利,等.中国CO₂驱油与封存技术及实践[J].石油勘探与开发,2019,46(4):716-727. DOI: 10.11698/PED.2019.04.10.
HU Y L, HAO M Q, CHEN G L, et al. Technologies and practice of CO₂ flooding and sequestration in China [J]. Petroleum exploration and development, 2019, 46(4): 716-727. DOI: 10.11698/PED.2019.04.10.
- [52] 李阳.低渗透油藏CO₂驱提高采收率技术进展及展望[J].油气地质与采收率,2020,27(1):1-10. DOI: 10.13673/j.cnki.cn37-

- 1359/te.2020.01.001.
- LI Y. Technical advancement and prospect for CO₂ flooding enhanced oil recovery in low permeability reservoirs [J]. *Petroleum geology and recovery efficiency*, 2020, 27(1): 1-10. DOI: 10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2020.01.001.
- [53] 胥蕊娜, 姜培学. CO₂ 地质封存与利用技术研究进展 [J]. *中国基础科学*, 2018, 20(4): 44-48. DOI: 10.3969/j.issn.1009-2412.2018.04.008.
- XU R N, JIANG P X. Research progress of CO₂ geological storage and utilization technology [J]. *China basic science*, 2018, 20(4): 44-48. DOI: 10.3969/j.issn.1009-2412.2018.04.008.
- [54] 臧雅琼, 高振记, 钟伟. CO₂ 地质封存国内外研究概况与应用 [J]. *环境工程技术学报*, 2012, 2(6): 503-507. DOI: 10.3969/j.issn.1674-991X.2012.06.079.
- ZANG Y Q, GAO Z J, ZHONG W. Overview of research and application of CO₂ geological sequestration at home and abroad [J]. *Journal of environmental engineering technology*, 2012, 2(6): 503-507. DOI: 10.3969/j.issn.1674-991X.2012.06.079.
- [55] 王永胜. 中国神华煤制油深部咸水层二氧化碳捕集与地质封存项目环境风险后评估研究 [J]. *环境工程*, 2018, 36(2): 21-26. DOI: 10.13205/j.hjgc.201802005.
- WANG Y S. Research of the environmental risk assessment of CO₂ capture and aquifer geologic storage project in China Shenhua coal to oil [J]. *Environmental engineering*, 2018, 36(2): 21-26. DOI: 10.13205/j.hjgc.201802005.
- [56] 李姜辉, 李鹏春, 李彦尊, 等. 离岸碳捕集利用与封存技术体系研究 [J]. *中国工程科学*, 2023, 25(2): 173-186. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2023.07.015.
- LI J H, LI P C, LI Y Z, et al. Technology system of offshore carbon capture, utilization, and storage [J]. *Strategic study of CAE*, 2023, 25(2): 173-186. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2023.07.015.
- [57] 霍传林. 我国近海二氧化碳海底封存潜力评估和封存区域研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2014. DOI: 10.7666/d.Y2553612.
- HUO C L. Study on the potential evaluation and the storage areas of the carbon dioxide seabed storage in offshore China [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014. DOI: 10.7666/d.Y2553612.
- [58] 米立军. 全球海上 CO₂ 封存现状及中国近海机遇与挑战 [J]. *中国海上油气*, 2023, 35(1): 123-135. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2023.01.013.
- MI L J. Current status of global CO₂ ocean sequestration and opportunities and challenges in China offshore areas [J]. *China offshore oil and gas*, 2023, 35(1): 123-135. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2023.01.013.
- [59] 张少鹏, 刘晓磊, 程光伟, 等. 海底碳封存环境地质灾害风险及监测技术研究 [J]. *中国工程科学*, 2023, 25(3): 122-130. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2023.03.011.
- ZHANG S P, LIU X L, CHENG G W, et al. Geoenvironmental hazard risks and monitoring technologies for marine carbon sequestration [J]. *Strategic study of CAE*, 2023, 25(3): 122-130. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2023.03.011.
- [60] 可行, 陈建文, 龚建明, 等. 珠江口盆地二氧化碳地质封存条件及源汇匹配性分析 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2023, 43(2): 55-65. DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022112301.
- KE X, CHEN J W, GONG J M, et al. Assessment on geological condition for carbon dioxide sequestration and source-sink matching in the Pearl River Mouth Basin [J]. *Marine geology & quaternary geology*, 2023, 43(2): 55-65. DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022112301.
- [61] 自然资源部. 2022 年中国自然资源统计公报 [R]. 北京: 自然资源部, 2023.
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. China natural resources statistical bulletin 2022 [R]. Beijing: Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2023.
- [62] 李林涛, 于航, 李彦尊, 等. 珠江口盆地 CO₂ 地质封存适宜性 GCA 评价 [J]. *中国海上油气*, 2023, 35(1): 170-178. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2023.01.018.
- LI L T, YU H, LI Y Z, et al. GCA evaluation of the suitability of CO₂ geological storage in the Pearl River Mouth basin [J]. *China offshore oil and gas*, 2023, 35(1): 170-178. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2023.01.018.
- [63] 广东南方碳捕集与封存产业中心. 广东省二氧化碳捕集利用运输与封存规划研究报告 [R]. 广州: 广东南方碳捕集与封存产业中心, 2022.
- Guangdong CCUS Centre. Research report on carbon dioxide capture, utilization, transportation and storage planning in Guangdong Province [R]. Guangzhou: Guangdong CCUS Centre, 2022.
- [64] 周蒂, 李鹏春, 张翠梅. 离岸二氧化碳驱油的国际进展及我国近海潜力初步分析 [J]. *南方能源建设*, 2015, 2(3): 1-9. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.001.
- ZHOU D, LI P C, ZHANG C M. Offshore CO₂-EOR: worldwide progress and a preliminary analysis on its potential in the sedimentary basins off China [J]. *Southern energy construction*, 2015, 2(3): 1-9. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.001.
- [65] ZHOU D, ZHAO Z X, LIAO J, et al. A preliminary assessment on CO₂ storage capacity in the Pearl River Mouth Basin offshore Guangdong, China [J]. *International journal of greenhouse gas control*, 2011, 5(2): 308-317. DOI: 10.1016/j.ijggc.2010.09.011.
- [66] 郭建强. 全国二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程总成绩报告 [R]. 保定: 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 2013.
- GUO J Q. National carbon dioxide geological storage potential evaluation and demonstration project overall results report [R]. Baoding: Center for Hydrogeology and Environmental Geology China Geological Survey, 2013.
- [67] 李凡昇, 张厚和, 李春荣, 等. 北部湾盆地海域油气勘探历程与

启示 [J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(3): 337-345. DOI: [10.7657/XJPG20210310](https://doi.org/10.7657/XJPG20210310).

LI F Y, ZHANG H H, LI C R. Offshore petroleum exploration history and enlightenment in Beibu Gulf Basin [J]. *Xinjiang petroleum geology*, 2021, 42(3): 337-345. DOI: [10.7657/XJPG20210310](https://doi.org/10.7657/XJPG20210310).

[68] LI P C, ZHOU D, ZHANG C M, et al. Assessment of the effective CO₂ storage capacity in the Beibuwan Basin, offshore of southwestern P. R. China [J]. *International journal of greenhouse gas control*, 2015, 37: 325-339. DOI: [10.1016/j.ijggc.2015.03.033](https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.03.033).

[69] ZHOU D, ZHAO D Q, LIU Q, et al. The GDCCSR project promoting regional CCS-readiness in the Guangdong Province, South China [J]. *Energy procedia*, 2013, 37: 7622-7632. DOI: [10.1016/j.egypro.2013.06.708](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.708).

[70] LI P C, ZHOU D, ZHANG C M, et al. Potential of sub-seafloor CO₂ geological storage in Northern South China Sea and its importance for CCS development in South China [J]. *Energy procedia*, 2013, 37: 5191-5200. DOI: [10.1016/j.egypro.2013.06.435](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.435).

[71] 魏宁, 王倩, 李小春, 等. CO₂ 海洋管道运输的技术经济分析 [J]. *油气储运*, 2015, 34(11): 1141-1146. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2015.11.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2015.11.001).

WEI N, WANG Q, LI X C, et al. Technical and economic assessments on CO₂ transmission through subsea pipelines [J]. *Oil & gas storage and transportation*, 2015, 34(11): 1141-1146. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2015.11.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2015.11.001).

[72] 孙玉景, 周立发, 李越. CO₂ 海洋封存的发展现状 [J]. *地质科技情报*, 2018, 37(4): 212-218. DOI: [10.19509/j.cnki.dzkq.2018.0428](https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.2018.0428).

SUN Y J, ZHOU L F, LI Y. Development status of CO₂ marine sequestration [J]. *Bulletin of geological science and technology*, 2018, 37(4): 212-218. DOI: [10.19509/j.cnki.dzkq.2018.0428](https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.2018.0428).

[73] NING Y R, TURA A. Economic and operational investigation of CO₂ sequestration through enhanced oil recovery in unconventional reservoirs in Colorado, USA [J]. *Geoenergy science and engineering*, 2023, 226: 211820. DOI: [10.1016/j.egon.2023.211820](https://doi.org/10.1016/j.egon.2023.211820).

[geon.2023.211820](https://doi.org/10.1016/j.egon.2023.211820).

作者简介:



罗海中

罗海中 (第一作者)

1981-, 男, 高级工程师, 环境工程专业硕士, 主要从事能源行业烟气治理、低碳节能和二氧化碳捕集及利用工程技术研究和设计咨询工作(e-mail)luohaizhong@gedi.com.cn。



吴大卫

吴大卫 (通信作者)

1993-, 男, 华中科技大学热能工程博士, 主要从事二氧化碳捕集技术研究工作(e-mail)wudawei@gedi.com.cn。

范永春

1976-, 男, 正高级工程师, 学士, 主要从事能源电力领域的咨询规划研究、工程设计和项目建设工作 (e-mail)fanyongchun@gedi.com.cn。

李鹏春

1978-, 男, 副研究员, 博士, 主要从事近海碳捕集、利用与封存及盆地构造与油气地质研究工作(e-mail)lypengchun@scsio.ac.cn。

曾少雁

1980-, 女, 高级工程师, 环境工程专业硕士, 主要从事能源行业烟气和噪声治理方面技术研究和设计咨询工作(e-mail)zengshaoyan@gedi.com.cn。

林海周

1989-, 男, 高级工程师, 浙江大学能源环境工程博士, 主要从事二氧化碳捕集技术研究工作(e-mail)linhaizhou@gedi.com.cn。

(编辑 叶筠英)