



广东南方碳捕集与封存产业中心



广东工业大学碳中和与绿色发展协同创新研究院



中国能建广东省电力设计研究院

广东省二氧化碳捕集利用运输与封存 规划研究报告（决策者摘要）

征求意见稿

2022年9月



Contents / 目录

摘要	1
01 广东省CCUS发展现状	3
1.1 项目背景	3
1.2 广东省CCUS示范项目主要进展	3
1.2.1 广东碳捕集测试平台	3
1.2.2 中国海油恩平15-1油田群二氧化碳回注示范工程	4
1.2.3 深圳妈湾电厂50万吨级CCUS全链条大型示范项目可行性研究	5
1.3 广东省CCUS支持政策	5
02 广东省重点排控企业碳捕集技术应用潜力与经济可行性	9
2.1 广东省主要排放源CCUS改造可行性分析	9
03 广东省二氧化碳利用途径初探	11
3.1 碳利用技术进展	11
3.2 广东省二氧化碳利用市场现状	12
3.3 广东省二氧化碳利用途径初探	12
04 广东省二氧化碳地质封存潜力	16
4.2 珠江口盆地CO ₂ 封存适宜性和潜力	16
4.2 北部湾盆地CO ₂ 封存适宜性和潜力	18
4.3 雷州半岛玄武岩矿化封存CO ₂ 潜力	19
05 广东省CCUS集群规划	20
5.1 源汇匹配基本概念	20
5.2 广东省CCUS源汇匹配与产业集群规划	20
5.3 广东省CCUS集群减排经济性分析	22
5.3.1 碳捕集成本	22
5.3.2 CCUS成本学习曲线	23
5.3.3 广东省典型排放源开展碳捕集项目经济性分析	24
06 广东省发展CCUS政策建议	29
6.1 广东省CCUS发展基本原则建议	29
6.2 中短期发展目标	29
6.3 广东省CCUS发展建议与策略	30



摘要

CCUS是实现碳达峰、碳中和目标的托底技术，能够为电力、钢铁、水泥、化工等行业提供近零排放技术方案。在广东省生态环境厅应对气候变化与交流合作处的指导下，广东南方碳捕集与封存产业中心、广东工业大学碳中和与绿色发展协同创新研究院、中国能建广东省电力设计研究院合作开展广东省CCUS中长期发展规划研究工作。

广东省CCUS发展起步较早，早在2005年前后中国科学院南海海洋研究所就已着手开展二氧化碳地质封存相关研究，2013年设立了中英（广东）CCUS中心，成为中国首个CCUS产学研平台，2019年建成广东碳捕集测试平台，是亚洲首个多技术开放国际碳捕集技术测试平台。在双碳目标宣布后，广东省内企业高度关注CCUS技术，广东省能源集团、华润集团、深圳能源、腾讯集团、招商局工业集团、中集集团等大型企业正积极组建项目团队，开展技术攻关，规划布局CCUS项目。

本课题对广东省内电力、钢铁、水泥、石化行业重点排放企业开展碳捕集改造初步可行性分析，认为47%电力企业、32%钢铁企业、91%水泥企业和50%石化企业的CCUS改造潜力较大。针对广东省二氧化碳市场的研究表明，广东全省市场对于液体二氧化碳和干冰的总需求量在70-200万吨CO₂/年。二氧化碳强化采油、制甲醇、制汽油和钢渣矿化等碳利用技术未来在广东省应用的减排潜力较大。

依据省内主要排放源与封存场地空间分布关系，融合广东省国土空间规划，提出规划建设4个CCUS工业集群，分别是广佛肇-深莞惠集群、珠江口西岸（珠中江）集群、粤东（汕揭潮）集群和粤西（湛江茂名）集群。广佛肇-深莞惠集群是排放最大的CCUS集群，每年碳排放超过1.2亿吨；其次是粤西集群，碳排放约7000万吨/年；粤东集群与珠江口西岸集群的规模相当，碳排规模分别在5000万吨/年、4000万吨/年。

针对4个CCUS集群，假设每家可开展CCUS项目的大型排放源以实际排放量的50%为设计捕集容量，广佛肇-深莞惠集群、珠江口西岸集群、粤东集群和粤西集群的CCUS年减排量将分别为5333万吨CO₂/年、2616万吨CO₂/年、3596万吨CO₂/年和4980万吨CO₂/年，碳捕集加离岸封存全流程平均减排成本分别为：381元/吨CO₂、410元/吨CO₂、451元/吨CO₂和396元/吨CO₂。相较于各个集群内部各企业分别开展全流程项目的平均成本，集群化可以使各集群的成本分别降低31%、26%、23%、25%。

当前广东省燃煤电厂、钢铁厂、水泥厂和石化厂每吨CO₂的捕集成本分别为276-394元、299-422元、342-489元、212-242元。石化行业的综合碳捕集成本最低，其次是电力、钢铁和水泥行业。如果具备利用二氧化碳提高石油采收率的条件，当碳价或政策补贴水平为100元/吨CO₂时，石化企业可以率先开展全流程CCUS商业化项目示范，包括惠州大亚湾石化区的企业、湛江中科炼化、茂名石化等；在碳价或政策补贴水平达到150元/吨CO₂时，电力企业，如大唐雷州电厂，具备开展全流程CCUS商业化项目；当碳价上升至170-200元/吨CO₂时，部分钢铁企业可以开展全流程CCUS商业化项目，包括宝武湛江钢铁。

针对广东省未来CCUS发展目标，研究提出在碳价达到200元/吨时（预计2030年前后），力争全省建成投运的CCUS项目碳捕集能力达到300万吨/年，二氧化碳封存量突破200万吨/年，形成大型高浓度排放源解决方案；碳市场价格达到400元/吨时（预计2035年前后），全省形成完整的CCUS产业链，建成投运的CCUS项目碳捕集能力达到2000万吨/年，二氧化碳封存量突破1800万吨/年。当国内外气候政策发生重大变化，国内配额或自愿减排价格达到500元/吨二氧化碳时，CCUS成为广东省国民经济支柱产业，创造超过10万个就业机会，电力、钢铁、水泥等高排放行业广泛采用CCUS技术开展温室气体减排，CCUS每年为广东省减排超过5000万吨二氧化碳。

主编单位

广东南方碳捕集与封存产业中心
广东工业大学碳中和与绿色发展协同创新研究院
中国能建广东省电力设计研究院

参编单位

湛江湾实验室
中国科学院南海海洋研究所
华润环保科技有限公司

鸣 谢

感谢广东省生态环境厅应对气候变化与交流合作处支持本研究课题的开展，感谢广东省发展和改革委员会对于课题研究工作的指导建议，感谢能源基金会对于课题研究工作的支持。

感谢中国可持续发展研究会碳中和专委会秘书长、科技部21世纪议程管理中心处长张贤，英国CCS中心主任、谢菲尔德大学教授Jon Gibbins，中国碳捕集利用与封存专业委员会秘书长、北京师范大学中国绿色发展协同创新中心主任张九天，全球碳捕集与封存研究院中国代表处首席代表杨晓亮，广州碳排放权交易所总经理孟萌，中国石油安全环保技术研究院政策法规与标准研究所所长袁波，腾讯集团战略部总监黄新我，苏州大学传媒学院教授、中国科技新闻学会副秘书长贾鹤鹏为研究工作提供专业的指导。

感谢以下企业单位对于本课题研究工作的大力支持：深圳妈湾电力有限公司、佛山恒益热电有限公司、深圳市广前电力有限公司、华润电力（深圳）有限公司、华润水泥（封开）有限公司、广州市珠江水泥有限公司、宝钢湛江钢铁有限公司、广东大唐国际雷州发电有限责任公司、中海油惠州石化有限公司、中海石油（中国）有限公司湛江分公司、国家石油天然气管网集团有限公司华南分公司、广东润碳科技有限公司。

► 广东省CCUS发展现状

1.1 项目背景

气候变化关系经济社会发展全局，控制温室气体排放对维护城市生命线系统运行、保证人居环境质量、保障居民生命财产安全和生态安全至关重要。2020年以来，习近平总书记在多个国际场合宣示中国将力争于2030年前实现二氧化碳排放达到峰值、2060年前实现碳中和。广东是中国的经济强省、用能大省，也是受气候变化影响较为严重的省份。当前，广东仍处于工业化、城镇化深入发展的历史阶段，传统行业所占比重依然较高，战略性新兴产业、高技术产业尚未成为经济增长的主导力量；能源消费结构仍以化石能源为主，煤炭、石油约占六成，清洁低碳、安全高效的能源体系尚未完全建立，碳达峰、碳中和时间窗口偏紧。在此形势下，广东按时完成碳达峰、碳中和目标任务艰巨，需要做好顶层设计，顺应当代科技革命和产业变革趋势，大力推进经济、能源、产业结构转型升级，才能够确保目标如期实现。

二氧化碳捕集、利用与封存技术（Carbon Capture, Utilization and Storage, 简称CCUS）是实现碳达峰、碳中和目标的托底技术。该技术能够实现发电厂、化工厂、钢铁厂和水泥厂等大型工业设施的近零排放。如果与生物质能、直接空气碳捕集等技术结合，CCUS技术甚至能够实现全社会二氧化碳的负排放。作为工业大省，广东省有超过180家重点排放企业（年排放2万吨CO₂或能源消费量1万吨标准煤以上的企业），对采用CCUS技术进行减排的需求强烈。因此，本项目从解决广东省CCUS实际问题出发，开展CCUS产业发展中长期规划研究，加强顶层设计和统筹规划，系统引导CCUS关键技术研发，科学规划CCUS项目空间布局，营造CCUS技术创新发展环境。

1.2 广东省CCUS示范项目主要进展

广东省CCUS发展起步较早，早在2005年前后中国科学院南海海洋研究所就已着手开展二氧化碳地质封存相关研究。2013年，在广东省发展和改革委员会的指导大力推动下，中国能源建设集团广东省电力设计研究院联合英国碳捕集与封存研究中心、苏格兰碳捕集与封存中心共同设立了中英（广东）CCUS中心（即“广东南方碳捕集与封存产业中心”），成为中国首个CCUS产学研平台（并于2015年在广东省民政厅完成注册）。

广东南方碳捕集与封存产业中心在设立后积极参与国内外的CCUS研究项目，同时积极推动项目示范，主持完成了生态环境部应对气候变化司《我国CCUS标准体系建设研究》、广东省发改委《CCUS示范项目可行性研究》、必和必拓和北京大学《钢铁工业碳捕集研究项目》、亚洲开发银行《CCS卓越（广州）中心》等研究项目，推动广东省碳捕集测试平台项目落地，为广东省和国家CCUS示范试点和工程技术进步做出了巨大贡献。

在国家宣布碳达峰、碳中和目标后，广东省内电力、钢铁、石油石化、化工等行业企业积极响应，纷纷将CCUS技术列为实现碳中和目标的重要抓手。广东省能源集团、华润集团、深圳能源集团、中国海洋石油集团、腾讯集团、招商局工业集团等大型企业正积极组建项目团队，开展技术攻关，规划布局大型CCUS项目。本节对广东省内处于运行或规划阶段的CCUS项目作简要介绍。

1.2.1 广东碳捕集测试平台

在广东省发改委和生态环境厅的支持下，2018年华润电力海丰CCUS项目一期开工建设，2019年建成，是亚



图1 华润海丰电厂

洲首个投入运行的碳捕集技术测试平台，年捕集二氧化碳总量达到2万吨。项目采用目前已经成熟的胺溶液吸收法，并为二代胺溶液技术进行兼容性设计。碳捕集测试平台目前已经开展胺法、膜法等二氧化碳捕集技术测试

试，膜分离技术捕集规模16.4吨/天，胺法捕集技术捕集规模50吨/天。

2022年，海丰电厂联合浙江大学在广东碳捕集测试平台基础上，开展了二氧化碳产品利用技术的创新研究和产业化开发，建设300平米规模的微藻固碳示范项目。



图2 计划开展离岸CO₂封存示范项目的中国海油恩平15-1
油田群海上平台

1.2.2 中国海油恩平15-1油田群二氧化碳回注示范工程

2021年8月30日，我国首个海上二氧化碳封存示范工程在南海珠江口盆地正式启动，距香港东南约190公里，所在海域平均水深80多米，是恩平15-1油田群开发的环保配套项目。项目计划将海上油田开发伴生二氧化碳永久封存于800米的深海底储层，每年封存量约30万吨、总计超146万吨。截至目前，中国海油已开展适应海上二氧化碳封存的地质油藏、钻完井和工程一体化关键技术研究，成功研发了海上平台二氧化碳捕集、处理、注入、封存和监测的全套技术和装备体系，填补了我国海上二氧

化碳封存技术的空白。

1.2.3 深圳妈湾电厂50万吨级CCUS全链条大型示范项目可行性研究

深圳妈湾电力有限公司是深圳市最主要的基础电源、深圳重点碳排放单位。妈湾电厂建有6台300 MW等级燃煤发电机组，现总装机容量为1960 MW。妈湾电厂已完成煤电50万吨级CCUS项目可行性研究，正在探索高标准建设50万吨碳捕集利用与封存全链条大型示范项目，同时为全容量改造进行场地预留。项目的碳捕集模块将采用最新高兼容性设计的二代胺液捕集技术（同时考虑对一代胺液的兼容性），CO₂捕集率不低于 90%，年运行4500小时，捕集获得的CO₂产品气浓度为大于 95%。捕集的50万吨二氧化碳中，45万吨二氧化碳将用于离岸运输、封存和监测示范；剩余5万吨二氧化碳将使用CCUS技术孵化中心筛选的二氧化碳资源化利用技术，开展技术示范。

除了50万吨级CCUS项目外，妈湾电厂正积极筹

划建设全球首个“多技术、开放式”CCUS技术孵化中心，先行探索碳捕集产业化发展及下游应用前景。

1.3 广东省CCUS支持政策

近年来，广东省政府高度重视气候变化问题，通过多项政策鼓励、支持和引导CCUS关键技术的研发工作和项目示范。在省内，CCUS最早于“十二五”期间纳入政策支持范围。2012年发布的广东省《“十二五”控制温室气体排放工作实施方案》首次提出在火电、水泥和钢铁等行业中开展碳捕集试验项目，建设二氧化碳捕集、驱油、封存一体化示范工程，推动碳捕集、利用与封存等新技术的研究和应用。

“十三五”时期，《广东省应对气候变化“十三五”规划》对于全省CCUS示范工程方面作了明确战略部署，提出在已完成碳捕集测试平台可行性研究的工作基础上，进一步深入推进CCUS示范与技术研发工作（具体内容见表1）。在政策推动下，“十三五”时期广东省碳捕



图3 妈湾电厂未来低碳厂区改造方案效果图

集测试平台项目顺利建成并投入运行，湛江宝钢钢铁、佛山恒益热电有限公司完成CCUS示范项目可行性研究，中科院南海海洋研究与中英（广东）CCUS中心所完成珠江口盆地、北部湾盆地、三水盆地二氧化碳地质封存潜力评估。

“十四五”时期，在双碳目标指引下，CCUS技术在广东省受到空前高度重视。《广东省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》明确提出要高水平建设广东碳捕集测试平台，积极推动碳捕集、

利用、封存技术的研究、测试及商业化应用。另外，在广东省发展和改革委员会、广东省生态环境厅、广东省科技厅和广东省自然资源厅等部门发布的多项规划文件中，均提及要支持CCUS技术和示范项目的发展（表1）。在以一系列政策的推动下，全省CCUS行业正在加速进展，广东省能源集团、深圳能源、宝钢钢铁、中国海油、中集集团、腾讯等大型企业均已开展CCUS项目或业务布局，预计“十四五”“十五五”时期广东省CCUS技术能力和示范项目数量将显著提升。

表1 2010—2021年广东省发布的CCUS有关政策及主要内容

序号	发布单位	发布时间	名称	主要内容
1	广东省发展和改革委员会	2012	《“十二五”控制温室气体排放工作实施方案》	在火电、水泥和钢铁等行业中开展碳捕集试验项目，建设二氧化碳捕集、驱油、封存一体化示范工程。推动碳捕集、利用与封存等新技术的研究和应用。
2	广东省发展和改革委员会	2014	《广东省2014—2015年节能减排低碳发展行动方案》	实施碳捕集、利用与封存试验示范工程，推动部分电力、水泥新建项目开展预留碳装置示范。
3	广东省发展和改革委员会	2017	《广东省应对气候变化“十三五”规划》	在已完成碳捕集测试平台可行性研究的工作基础上，进一步深入推进广东海丰电厂示范项目开展封存示范场地筛选、驱油和封存潜力研究、设备再利用总体方案等相关工作。在火电、化工、水泥、钢铁等行业，选择若干重点企业根据自身实际情况，选用合适的碳捕集技术开展碳捕集试验示范项目，合理评估捕集能耗、物料消耗及投资价值。在具备条件的地区开展封存试验项目，探索建设二氧化碳捕集、驱油、封存一体化示范工程，加强二氧化碳捕集点与封存地的匹配和衔接，提高试验示范项目经济效益。积极探索二氧化碳资源化利用的途径、技术和方法。探索建立相关政策激励机制。
4	广东省发展和改革委员会	2017	《2017年广东国家低碳省试点工作要点》	加强低碳科技创新，筛选二氧化碳捕集利用与封存技术、高效太阳能利用技术、大型风电技术等适合我省实际的技术进行重点研发和推广应用。

序号	发布单位	发布时间	名称	主要内容
5	广东省发展和改革委员会	2017	《广东省“十三五”控制温室气体排放工作实施方案》	推进工业领域碳捕集、利用与封存试点示范, 并做好环境风险评价。依据国家战略方向和要求, 筛选二氧化碳捕集利用与封存技术、高效太阳能利用技术、大型风电技术等适合我省省情的技术进行重点研发创新。依据国家战略方向和要求, 筛选二氧化碳捕集利用与封存技术、高效太阳能利用技术、大型风电技术等适合我省省情的技术进行重点研发创新。研究制定重点行业、重点产品温室气体排放核算标准、建筑低碳运行标准、碳捕集利用与封存标准等。推动与主要发达国家在碳捕集、利用与封存及其他近零碳排放技术等先进低碳能源技术方面的交流与合作。
6	广东省发展和改革委员会	2017	《广东省战略性新兴产业发展“十三五”规划》	支持碳捕集、利用与封存技术研发与应用, 发展碳循环产业。
7	广东省人民政府	2021	《广东省国民经济和社会发展的第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》	高水平建设广东碳捕集测试平台, 积极推动碳捕集、利用、封存技术的研究、测试及商业化应用。
8	广东省科技厅	2021	《广东省科技创新“十四五”规划》	重点开展低能耗、低成本、大规模碳捕集技术, CO ₂ 安全可靠封存、监测及运输技术, CO ₂ 加氢转化制备液体燃料技术, CO ₂ 光催化或电催化直接转化制备碳氢燃料和化学品技术, 高效低成本生物固碳技术、近零碳排放生产工艺与替代产品等创新研究与应用示范, 在低碳零碳负碳新技术、新材料、新工艺、新装备等方面取得突破性进展。
9	广东省自然资源厅	2021	《广东省自然资源保护与开发“十四五”》	积极推动蓝碳捕集、利用、封存技术的研究、测试和商业化应用。
10	广东省生态环境厅	2021	《广东省生态环境保护“十四五”规划》	推动煤电、水泥等行业开展二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)示范工程, 依托华润(海丰)电厂二氧化碳捕集测试平台, 推动相关技术的研究、推广及商业化应用。在城镇、建筑、交通、社区、园区和企业等领域实施近零碳排放示范工程, 在煤电、水泥等行业开展二氧化碳捕集、利用与封存全流程示范工程。

序号	发布单位	发布时间	名称	主要内容
11	广东省发展和改革委员会、生态环境厅	2021	《广东省生态文明建设“十四五”规划》	加快能源节约、资源循环利用、新能源开发、清洁生产技术等关键领域低碳技术创新攻关，大力发展二氧化碳捕集利用与封存、高效太阳能利用、大型风电、风光能源利用互补等技术。深入实施碳捕集、利用和封存示范工程、近零碳排放区示范工程等重点工程，高水平建设广东碳捕集测试平台。实施碳捕集、利用和封存示范建设和规模化应用。
12	广东省发展和改革委员会、能源局	2022	《广东省能源发展“十四五”规划》	实施能源创新示范工程。充分发挥我省市场规模优势，加大资金和政策扶持力度，重点在海上风电、太阳能发电、氢能、波浪能、天然气水合物、智能电网、储能、碳捕集利用与封存、核能、生物质利用、地热能等领域，实施一批具有前瞻性、战略性的科技示范项目。
13	广东省发展和改革委员会	2022	《中共广东省委 广东省人民政府关于完整准确全面贯彻新发展理念推进碳达峰碳中和工作的实施意见》	加强核心技术攻关和前沿技术布局。采用“赛马制”、“揭榜挂帅”等机制，研发低碳零碳负碳新材料、新技术、新装备，加强新能源、工业节能降碳、绿色建筑、新能源汽车、生态系统碳汇、资源循环利用等领域关键核心技术攻关。加强气候变化成因及影响、非二氧化碳温室气体减排替代、可控核聚变、碳捕集利用与封存等低碳前沿技术布局。加快构建碳达峰、碳中和先进标准计量体系，研究制定重点行业和产品温室气体排放、生态系统碳汇、碳捕集利用与封存等地方标准。
14	广东省生态环境厅	2022	《广东省应对气候变化“十四五”专项规划》	开展碳捕集利用与封存（CCUS）一体化示范工程及全产业链布局建设。积极布局碳捕集利用与封存基础科学研究和技术攻关攻坚，开展利用珠江口盆地海底地质结构封存二氧化碳的研究，甄别筛选可开展高效、大规模地质封存场所，支持大规模、低能耗、低成本的示范项目建设，积极推动电力行业CCUS技术的研究、测试及商业化应用，钢铁行业开展非高炉炼铁、氢能冶炼、CCUS一体化等低碳冶金技术试点示范，水泥行业探索水泥窑尾气CCUS示范工程，石化行业开展绿色炼化和CCUS一体化等示范工程。

► 广东省重点排控企业碳捕集技术应用潜力与经济可行性

2.1 广东省主要排放源CCUS改造可行性分析

本研究项目的研究对象主要包括《广东省2021年度碳排放配额分配实施方案》（不含深圳市）中的电力、水泥、钢铁、石化行业相关企业，以及深圳市电力行业主要排放企业，共计192家，其中电力企业75家，钢铁企业51家、水泥企业58家、石化企业8家。电力企业一般包括燃煤、燃气发电企业；钢铁企业包括炼铁、炼钢和热冷轧企业；石化企业包括石油加工和乙烯生产企业；水泥企业包括矿石开采、熟料生产和粉磨企业。

通过卫星遥感图像研究、问卷调研分析两种方式，项目组对省内主要排放源企业开展CCUS技术改造的可行性进行分析。由于排放源企业数量较多、调研工作量大，项目组统一基于超高清卫星图像，逐一评估排放源企业厂区土地利用现状（空地面积、紧凑程度）、厂区发展规划（是否上新机组、新产线等）、周边建设用地、区域发展定位，综合分析厂区开展CCUS改造的初步可行

性。另外，深圳妈湾电力有限公司、佛山恒益热电有限公司、深圳市广前电力有限公司、华润电力（深圳）有限公司、宝钢湛江钢铁有限公司还以问卷调研的方式参与项目的CCUS改造可行性评估。

电力是广东省最大的温室气体排放行业，碳排放量超过2亿吨CO₂/年。项目组研究结果发现，全省75家火电企业中，35家进行CCUS技术改造潜力较大，约占全省火电企业总数一半（47%）；受厂区内保留的空地面积与周边区域发展空间限制，28家火电企业进行CCUS技术改造的潜力较小（37%）；另有12家火电企业进行CCUS技术改造的潜力无法基于现有资料确定。

水泥是广东省第二大排放行业，排放规模接近1亿吨CO₂/年。水泥企业建厂要求靠近石灰石矿区，因此广东省内水泥企业高度集中于清远（8家）、云浮（8家）、梅州（8家）等石灰石资源较为丰富的区域。由于石灰石开采作业一般位于郊区，因此水泥企业主要位于郊外地区，周边场地空间较大。研究发现，广东省内高达91%的

广东省火电企业CCUS改造可行性分析结果

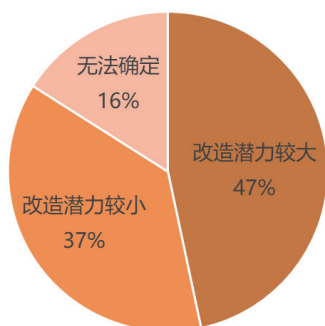


图 4 广东省火电企业CCUS改造可行性分析结果

广东省水泥企业CCUS改造可行性分析结果

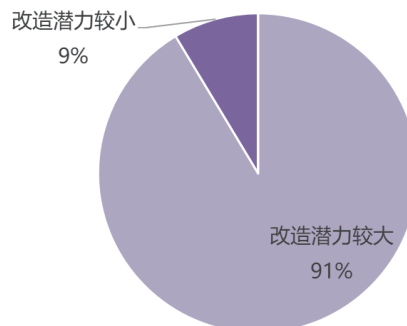


图 5 广东省水泥企业CCUS改造可行性分析结果

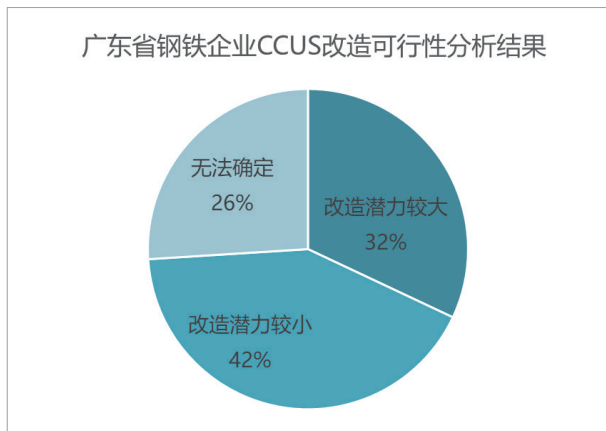


图6 广东省钢铁企业CCUS改造可行性分析结果

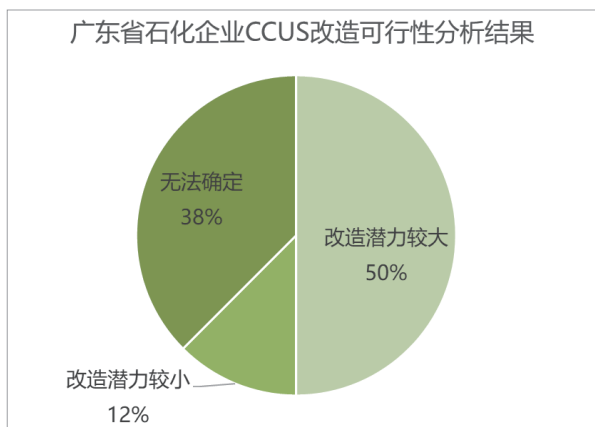


图7 广东省石化企业CCUS改造可行性分析结果

水泥企业（53家）可开展CCUS技术改造。

纳入分析的全省钢铁企业共有50家，其中河源市的钢铁企业最多（11家），清远市和揭阳市的钢铁企业数量次之（各6家），江门市和佛山市的大型钢铁企业也较多（5家）。全省最大的钢铁企业是湛江宝钢钢铁有限公司，预计年排放量超过2000万吨CO₂。另外，韶关钢铁的年碳排放规模也在千万吨以上。经调研评估，全省16家的钢铁企业开展CCUS技术改造潜力较大，占钢铁企业

总数32%；21家钢铁企业开展CCUS技术改造潜力较小，占总数42%；另有13家钢铁企业的CCUS改造潜力无法基于现有资料确定（26%）。

广东石化行业企业的碳排放规模预计在2500万吨CO₂/年左右。省内排放规模较大的石化企业在广州、惠州、茂名和湛江。经调研评估，中海油惠州石化有限公司、中海壳牌石油化工有限公司（惠州）、中海沥青（广东）有限公司（湛江）、中科（广东）炼化有限公司（湛江）4家企业开展CCUS技术改造的潜力较大；广东新华粤石化集团股份有限公司、中海石油开氏石化有限责任公司、中国石油化工股份有限公司茂名分公司3家企业的CCUS技术改造潜力需要进一步评估方可确定。



广东省二氧化碳利用途径初探

3.1 碳利用技术进展

二氧化碳利用技术是指利用CO₂的物理、化学或生物等作用，生产具有商业价值的商品，用于替代其他方式生产的相同产品或者具有相同功效的工艺相比，可实现CO₂减排效果的工农业利用技术¹。据国际能源署（IEA）统计，2019年全球CO₂利用总量约2.5亿吨/年，其中1.43亿吨CO₂用于生产尿素化肥、0.85亿吨CO₂用于强化

石油开采，另有750万吨CO₂用于生产各类碳酸饮料。随着全球响应碳中和目标号召，新兴二氧化碳利用技术、利用方式受到全球的广泛关注，政府、企业和投资者都对各类碳利用技术产生浓厚兴趣。国际能源署统计结果表明，截至2019年，全球投给碳利用技术初创企业的资金已经累计超过10亿美元²。

国家科技部21世纪议程管理中心2014年发布《中国二氧化碳利用技术评估报告》，将CO₂利用技术主要分

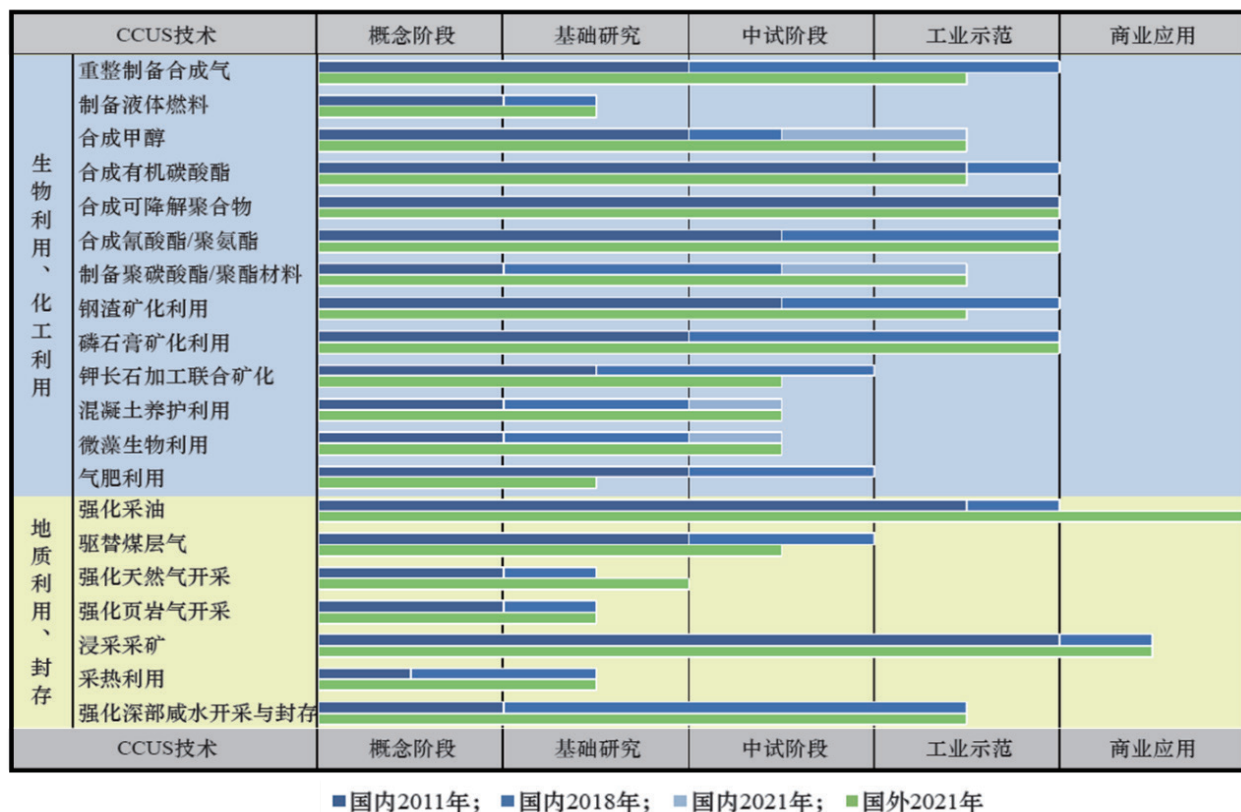


图8 国内外CCUS各环节主要技术的发展水平

为地质利用、化工利用和生物利用三大类20余项技术路线，并对中国和全球碳利用技术的现状和发展潜力做预测分析。报告研究提到，当时中国多数CO₂利用技术处于基础研究阶段，2014年CO₂利用技术的全国总减排贡献仅24万吨CO₂/年，创造工业年产值约5亿元/年。近十年来，如图8所示，我国在多项碳利用技术方面取得显著进步，其中二氧化碳制备重整气、合成甲醇等关键碳利用技术从基础研究进入工业示范阶段，强化采油技术示范规模进一步扩大，建成兰州“液态阳光”全球首套规模化(千吨级)合成绿色甲醇示范装置、山东邹城全球首套1000吨/年二氧化碳加氢制汽油中试装置、胜利油田百万吨级利用二氧化碳提高石油采收率等标志性项目。

本章内容基于碳利用技术最新进展、广东省自然资源禀赋和产业特征，针对广东省二氧化碳利用市场现状和未来发展路径、减排潜力开展初步分析。

3.2 广东省二氧化碳利用市场现状

目前广东省CO₂应用主要集中在工业级（纯度>99.9%）和食品级（纯度>99.99%）二氧化碳两个方向。工业级应用包括：（1）二氧化碳气体保护焊接；（2）制冷剂（汽车空调制冷剂，干冰研磨清洗）；（3）消防气体；（4）超临界萃取和超临界清洗剂。食品级的主要应用行业有：（1）饮料行业；（2）食品保鲜。

现阶段关于广东省每年对于的二氧化碳需求规模，不同渠道、不同统计口径的结果不一致。根据凯美特气体的评估，广东二氧化碳总需求约为150-200万吨，其中工业级二氧化碳约100-110万吨，食品级为50-90万吨³。2021年，润碳科技对广州广钢气体能源股份有限公司、厦门和丰利干冰除污设备有限公司、深圳联德康干冰科技有限公司、东莞市天卓干冰制品有限公司4家企业开展问卷调研工作；调研结果显示，整个珠三角地区目前工业级液态二氧化碳需求量约为20-50万吨/年，平均33万吨/年，食品级液态二氧化碳各家需求预测差异较大，分布在约5万-70万吨/年，平均30万吨/年，工业级干冰需求量约2-12万吨/年，平均约7万吨/年，食品级干冰需求量约2.6-8万吨/年，平均5.6万吨/年，整个珠三角地区的二氧化碳需求总量是70-80万吨/年。广东市场上目前工业

级液态二氧化碳的价格是280-600元/吨，食品级液态二氧化碳是320-720元/吨，工业级干冰价格是1100-1837元/吨，食品级干冰价格是1275-2012元/吨。

广东省内主要的二氧化碳气体生产企业有惠州凯美特气、金宏气体华南分公司、惠州华达通气体、茂名华粤华源气体等公司，相关生产企业利用尾气回收装置回收工业尾气中的二氧化碳，经提纯后灌装生产高纯二氧化碳产品，各家企业的产能如表2所示，全省液体二氧化碳的总产能超过170万吨/年。

3.3 广东省二氧化碳利用途径初探

二氧化碳利用技术路径多，本节就关注度较高的主流碳利用技术在广东省的发展和应用前景做出初步探讨和建议。

二氧化碳驱油是指将CO₂注入油田，从而提高原油采收率的一项技术，也是目前唯一能同时实现规模化碳利用、碳封存和碳减排的关键技术。由于广东省油气资源主要集中在珠江口盆地、北部湾盆地等海上区域，离岸作业成本高、技术难度大，因此尚未开展CO₂强化采油实践。位于粤西地区的大唐雷州电厂和中海油乌石油田的距离仅20公里，CO₂运输成本低，是广东省率先开展CO₂离岸驱油的最理想的选择之一，中国海油、大唐集团等已关注到相关项目机会，开展项目前期沟通和可行性分析，建议广东省积极促成多方联合开展相关项目，努力推动广东省和全国第一例CO₂离岸驱油项目落地。

二氧化碳加氢制甲醇的本质是将能量存储在燃料甲醇中，使能量便于储存、运输和利用。甲醇在常态下是液体，其存储、运输方式更接近于汽油，比氢能的存储运输更便宜、更安全，因此受到广泛关注。不过，甲醇燃烧时产生二氧化碳，不像氢能燃烧只产生水，因此反对者认为甲醇路线“革命不彻底”。但现在有两种技术路线可以实现甲醇燃料的零排放，一直通过直接空气碳捕集、生物质碳捕集，回收空气的CO₂，再结合可再生能源，生产全生命周期零排放的甲醇；第二类方法是在运输工具上安装碳捕集装置，将甲醇燃烧后的CO₂直接捕集，再与氢气、可再生能源重新生产甲醇，实现燃料中碳元素的闭环。当前广东省内对甲醇燃料关注较多的主要

表2 广东省二氧化碳生产、销售等供应公司汇总

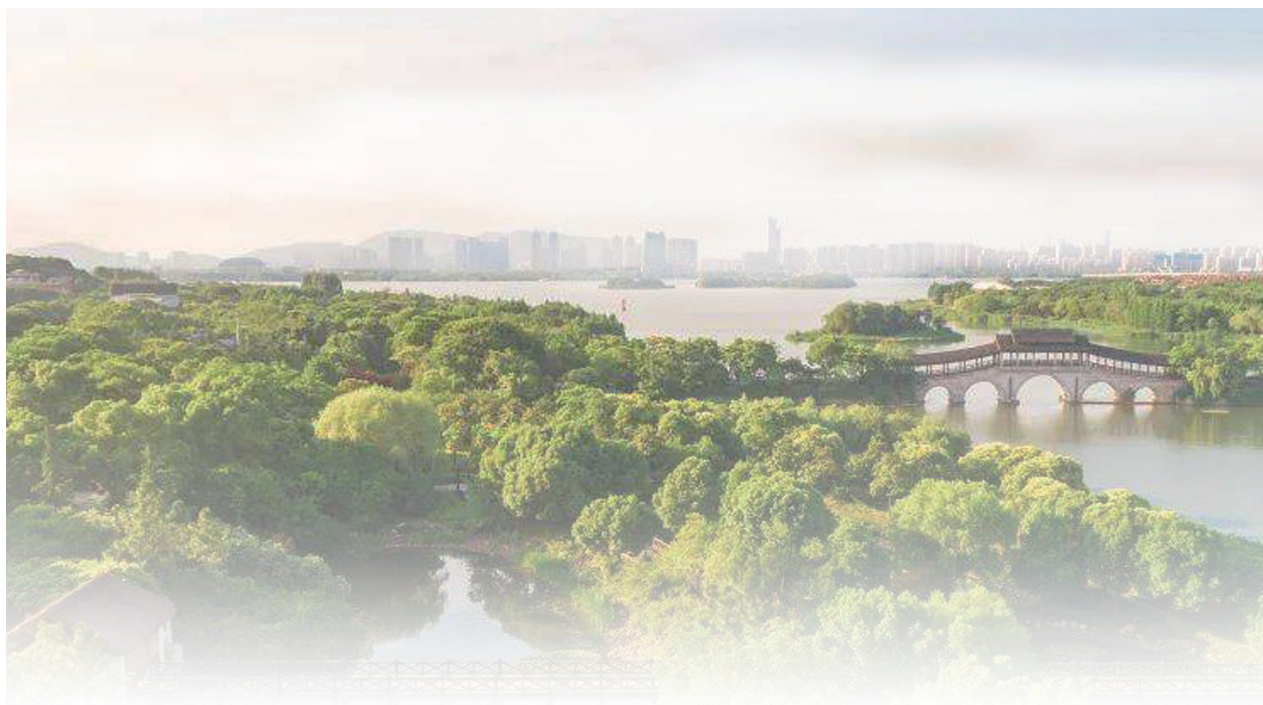
公司	许可经营项目	产能	上游企业	下游企业
惠州凯美特气	研发、生产加工各种工业气体	食品级液体二氧化碳13万吨/年、优质干冰2万吨/年	特大型石化央企及海外跨国公司	可口、百事可乐等众多知名食品饮料客户、中国船舶工业集团广州中船黄埔造船有限公司等特大型工业客户
金宏气体（华南分公司）	研发、生产加工各种工业气体，生产加工食品级干冰和食品添加剂等	291200吨（2019年总公司总量）		电子半导体、化工、食品、低温运输等行业
广州市粤佳（谱源）气体集团	标准气体和工业气体研制、开发、生产、销售	高纯气体（包含二氧化碳等）产能400吨/月。工业二氧化碳产能4万吨/月		
惠州华达通气体制造股份有限公司		38万吨液态二氧化碳、4万吨干冰；募资项目建成后将新增30万吨/年食品添加剂级液态二氧化碳	广州石化、惠州中海油以及中海壳牌等	液态二氧化碳领域主要客户有可口可乐、百事可乐、雪花啤酒、铭基食品、中船船舶、广东中烟、华特气体、久策气体、香港工业气体等；在干冰领域，主要客户有京邦达、香港萧邦、比亚迪等
茂名华粤华源气体有限公司（广东新华粤石化集团股份公司子公司）		40万吨CO ₂ /年	中石油等石化企业排放的尾气	
广东华特气体股份有限公司	采购、生产和直销特种气体、普通工业气体、气体设备与工程（二氧化碳仅占公司营收的2%左右）	总碳氧化物产量3213吨/年（全国的工厂）	空分气体企业、金属冶炼企业、化工企业、生产粗产品的气体公司等	
成中干冰有限公司		年产35000吨液体二氧化碳，8000吨干冰		
东莞市天卓干冰制品有限公司	天卓干冰使用的液态二氧化碳均为外部采购，其在学习经营过程中只需要办理危险化学品安全使用许可证，无需办理危险化学品安全生产许可证。	干冰最大产能为100吨/天		
揭阳凯美特气体有限公司（筹建中）		30万吨/年高纯食品级二氧化碳	项目利用揭阳大南海石化POX装置及炼油厂产生的尾气和上游氢气作为原料气	

是海运和船舶企业，包括中国国际海运集装箱集团、招商局工业集团有限公司。全球最大的海运企业马士基正在推广甲醇船舶、大规模采购绿色甲醇，这类甲醇基本上需要基于生物质进行生产。广东省粤西地区的生物质资源丰富，粤电湛江生物质电厂是目前世界上最大的生物质发电厂，具有开展碳捕集和生产绿色甲醇的潜力，建议积极开展相关项目可行性研究和行业布局。另外，广东省省内招商局工业集团和广东南方碳捕集与封存产业中心正在开展船舶碳捕集和甲醇碳循环利用技术研发。甲醇作为清洁燃料的应用前景较好，建议广东省支持绿色甲醇生产和技术研发，利用广东省部分区域生物质丰富的特点，探索基于绿色甲醇的航运业脱碳。

二氧化碳加氢制汽油已从基础研究进入中试阶段。2022年，由中国科学院大连化物所物理研究开发的全球首套1000吨/年二氧化碳加氢制汽油中试装置，在山东邹城工业园区开车成功，生产出符合国VI标准的清洁汽油产品。除了解决碳排放问题，二氧化碳加氢制汽油还可

以利用弃风、弃光的可再生能源，是解决储能问题的一条技术路径。目前二氧化碳加氢制汽油的生产成本约在19-23元/升汽油⁴，与化石能源开采炼化后生产汽油的成本相比，经济性仍有待提高。未来CO₂加氢生产汽油的转化效率仍有进一步提升空间，是需要重点关注的二氧化碳利用技术途径。

二氧化碳地面资源化矿化利用的方式包括与钢渣、磷石膏、钾长石等物质反应，生成碳酸盐类矿物。钢渣为钢铁企业产生的难处理固体废渣，富含CaO，能够与CO₂反应生成碳酸钙；产品碳酸钙可代替部分石灰石用于水泥生产。广东省钢渣年产量超过百万吨⁵，按照每吨钢渣可固定300-400千克CO₂计算，碳减排潜力超过30-40万吨CO₂/年，是应用前景较好的碳利用技术。磷石膏、钾长石的分布与磷资源、钾长石矿床分布情况密切相关，广东省相关产品产量较低，且靠近消费市场，磷石膏、钾长石的综合利用情况已接近饱和，相关碳利用技术的减排潜力有限。因此，广东省内磷石膏、钾长石矿化CO₂的



应用前景受供给约束，开展钢渣矿化二氧化碳或许是未来减排潜力更大的CO₂利用技术路径。

二氧化碳养殖微藻能够高效地利用光能、二氧化碳和水进行光合作用，合成储存能量的碳水化合物，通过进一步生化反应，合成蛋白质、油脂等多种营养物质。就应用方面，目前已经实现商业化的微藻应用领域为食品添加剂、营养补充剂、水产饵料、水产饲料、生物饲料、生物肥料、护肤品、生物塑料领域，应用范围较广。华润海丰电厂已于2022年建成微藻减排转化利用燃煤电厂烟气二氧化碳的首个工程示范项目，项目投资约500万元，建设一个300m²的封闭玻璃实验室及高达5米的光生物反应器等设备系统，通过微藻养殖优选微藻品种及养藻技术，打造国内首个立柱式微藻光合反应器减排二氧化碳的工程示范。二氧化碳微藻养殖的优点是在产品丰富、产品附加值较高、固碳效率高，但缺点是微藻养殖基地的占地面积大，现阶段市场对于微藻产品需求不足。微藻生物质中含有碳元素，每1吨微藻生物质能固定约1.8吨的二氧化碳⁶。《2020-2025年中国海洋微藻行业市场运营现状及投资方向研究报告》显示⁷，目前我国微藻年产量约为一万吨干粉，因此总体上整个微藻产业的减排潜力在每年2万吨左右。微藻基生物燃料或许是微藻未来重要的发展方向，但目前来看微藻燃油的成本仍远高于化石燃料。微藻养殖需要强光照条件，在这方面广东与内蒙、宁夏等省份相比不具备优势。要大规模发展微藻产业，仍需进一步深入研发相关技术，提升生产效率和品质，同时应配套相关政策，鼓励企业投资微藻领域，通过规模化破解成本制约。

二氧化碳气肥是一项农业生产增产增效技术。温室大棚内经常处于封闭状态，导致棚内的二氧化碳得不到及时的补充，无法满足作物生长发育过程中对二氧化碳的需求。因此，适时的补充大棚内的二氧化碳浓度能够提升作物生长效率。目前受碳捕集成本高和操作复杂等因素的影响，从工业排放源设施捕获并用于气肥施用的CO₂量较小，在全国温室生产面积中的应用比例极低。目前受碳捕集成本高等因素影响，从工业排放源设施捕获并用于气肥施用的CO₂量较小，内蒙古自治区是率先探索

发展富碳农业的省份，收集工业企业排放的二氧化碳，在农业生产领域实现循环利用，提升农业经济效益，协同推进乡村振兴和“双碳”目标。2021年，包头市在全国率先推广应用CO₂气肥，已在当地土右旗、东河区等地累计示范推广近10000亩，平均增产12%。目前市场条件下，CO₂气肥的应用难题主要是投入成本较高，碳捕集、碳运输和温室内CO₂增施装置、监测装置、智能化调控系统均需要大量前期投入，而后端农作物增产的收益较难抵消资本投入。整体上看，广东省利用二氧化碳气肥技术实现减排的潜力有限，按照第三次全国农业普查结果，2016年广东省全省温室占地面积3.4千公顷，采用1.4m作为温室平均高度，50天作为温室年注入CO₂天数，计算得出如果广东省所有温室均采用CO₂气肥，年利用CO₂量约1.9万吨，仅能抵消一家中型工业企业的碳排放量。

04

► 广东省二氧化碳地质封存潜力

本章研究内容以广东省珠江口盆地、北部湾盆地和雷州半岛玄武岩分布带为研究对象，分析广东省整体二氧化碳地质封存潜力。

4.2 珠江口盆地CO₂封存适宜性和潜力

珠江口盆地海域广阔，空间资源开发潜力巨大，为广东省提供了大量的二氧化碳封存机会。2006年前后，

中国科学院南海海洋研究所就已着手开展广东省近海区域二氧化碳封存可行性和封存潜力研究工作。据周蒂教授等专家测算(2011)⁸，珠江口盆地深部咸水层的二氧化碳封存潜力约3000亿吨，废弃油气藏封存潜力约600万吨；相较之下，广东省2020年二氧化碳排放量约6亿吨，珠江口盆地的地下空间能够完全满足广东省二氧化碳排放的封存需求。

根据盆地储盖层分析及《全国CO₂地质储存潜力评

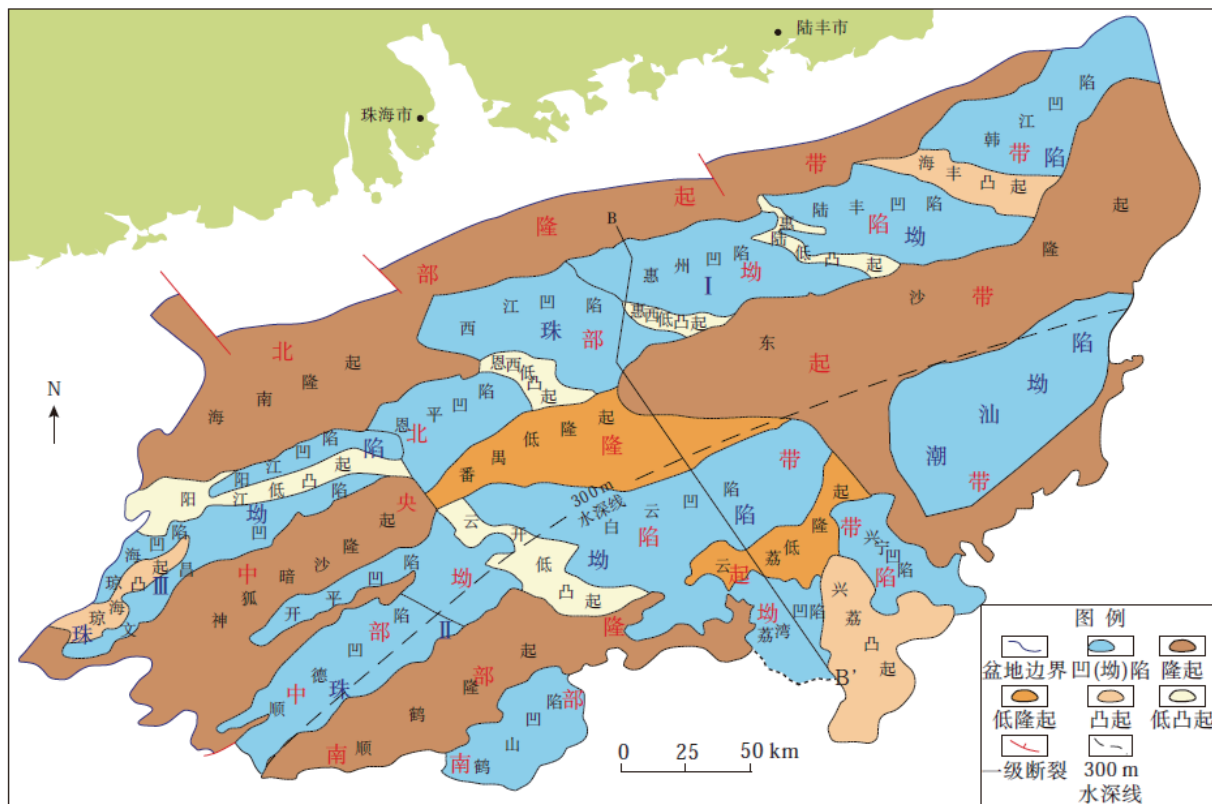


图9 珠江口盆地构造区划图

表3 珠江口盆地7个一级构造单元D级推定潜力

一级构造单元	二级构造单元	束缚气机理有效储量(亿吨)	溶解机理有效储量(亿吨)	合计(亿吨)
北部隆起	北部隆起	69.83	17.53	87.36
珠一坳陷	韩江凹陷	41.76	8.72	50.48
	海丰凸起	14.70	3.20	17.9
	陆丰凹陷	61.09	13.56	74.65
	惠陆低凸起	8.23	1.90	10.13
	惠州凹陷	83.21	19.37	102.58
	西江凹陷	73.98	17.09	91.07
	恩平凹陷	67.41	15.27	82.68
珠三坳陷		69.06	16.36	85.42
中央隆起	东沙隆起	121.34	30.01	151.35
	番禺低隆起	93.67	21.55	115.22
	神狐隆起	56.39	14.29	70.68
潮汕坳陷		21.51	6.15	27.66
珠二坳陷	白云凹陷	148.04	41.02	189.06
	云开低凹陷	26.00	6.26	32.26
	开平凹陷	28.00	6.36	34.36
	顺德凹陷	17.25	4.42	21.67
	荔湾凹陷	38.87	10.54	49.41
南部隆起	南部隆起东段	31.52	8.60	40.12
	南部隆起东段	27.09	6.74	33.83
合计		1098.95	268.94	1367.89

价与示范工程实施技术要求》D级潜力评价列出的潜力评价公式(公式1),课题组之前已评估珠江口盆地7个一级构造单元的D级推定潜力,涵盖储层的深度范围为800~3500米。潜力计算结果表明,珠江口盆地深部咸水层CO₂地质储存D级推定潜力总量为1368亿吨,其中以珠一坳陷、中央隆起和珠二坳陷的潜力最大,占整个盆地的81%(表3)。

$$M_{CO_2es} = V \times R \times \varphi \times \rho_{CO_2} \times E \text{ (公式1)}$$

其中, V为咸水层的体积; R为能渗透的岩石体积占咸水层总体积的比例; φ 为咸水层的孔隙度; ρ_{CO_2} 为储层条件下CO₂的密度; E为咸水层中CO₂的储存效率系数。

结合珠江口盆地各个构造单元勘探程度、储盖层分布、地壳稳定性、社会经济条件等特征,珠一坳陷、珠三坳陷适宜性相对较高,其中尤以珠一坳陷的陆丰凹陷、惠州凹陷、西江凹陷和恩平凹陷四个二级构造单元储存条件最好。

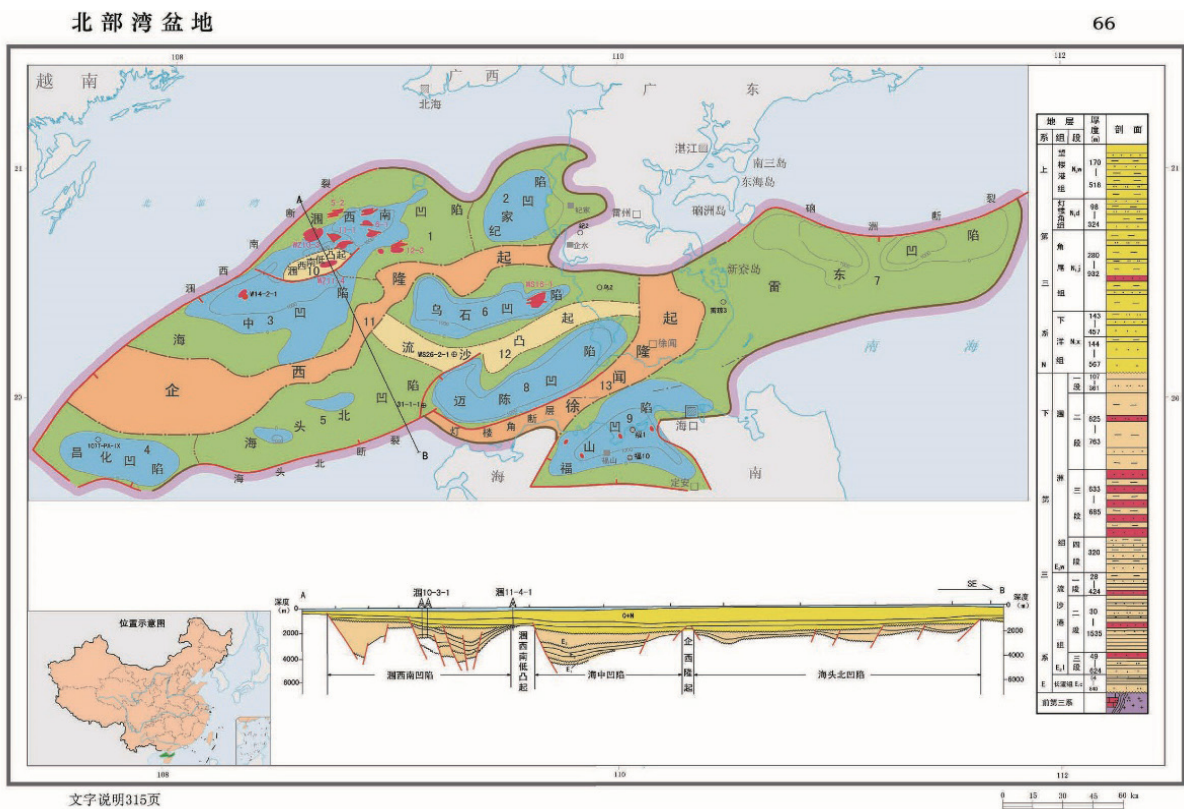


图10 北部湾盆地构造区划图

表10 北部湾盆地主要凹陷深层盐水层CO₂封存潜力

构造名称	CO ₂ 封存潜力(亿吨)
乌石凹陷	68.4
涠西南凹陷	47.2
麦城凹陷	46.7
福山凹陷	58.2
徐闻隆起	26.5
海头北凹陷	47.2
雷东凹陷	42.3
迈陈凹陷	46.7
企西隆起	35.2

4.2 北部湾盆地CO₂封存适宜性和潜力

北部湾盆地位于南海北部大陆架西部，面积51517平方公里，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（图10）。中科院南海海洋研究所李鹏春等在2015年对北部湾盆地800-3500m深度范围内盐水层进行了有效CO₂埋存潜力评估，得出盆地CO₂储存能力为485亿吨。在盐水层

中，各个构造单元的CO₂盐水层封存能力范围为26.5-68.4亿吨。其中潜力最大的为乌石凹陷，最小是徐闻隆起。涠西南凹陷、麦城凹陷和海头北凹陷的平均CO₂封存潜力分别为47.2亿吨、46.7亿吨和47.2亿吨。

通过地质评估，北部湾盆地的石油地质储量为7.34×10⁴万吨，天然气地质储量为599.21亿方，通过公式估算北部湾盆地油田CO₂有效地质封存量为2030-6760万吨，平均为4230万吨⁹。

4.3 雷州半岛玄武岩矿化封存CO₂潜力

雷州半岛的玄武岩地层是由地幔柱火山作用形成的，经历了数百万年的时间，主要由拉斑玄武岩和碱性橄榄玄武岩构成，分布面积广（约3000平方公里，图11），蚀变程度较低，孔渗性较好，具备一定矿化封存CO₂潜力。目标地层的埋深约在10-500米之间，易于开展CO₂注入。根据玄武岩的展布面积、平均厚度和矿物成分，经初步评估，雷州半岛玄武岩封存潜力超过210亿吨。

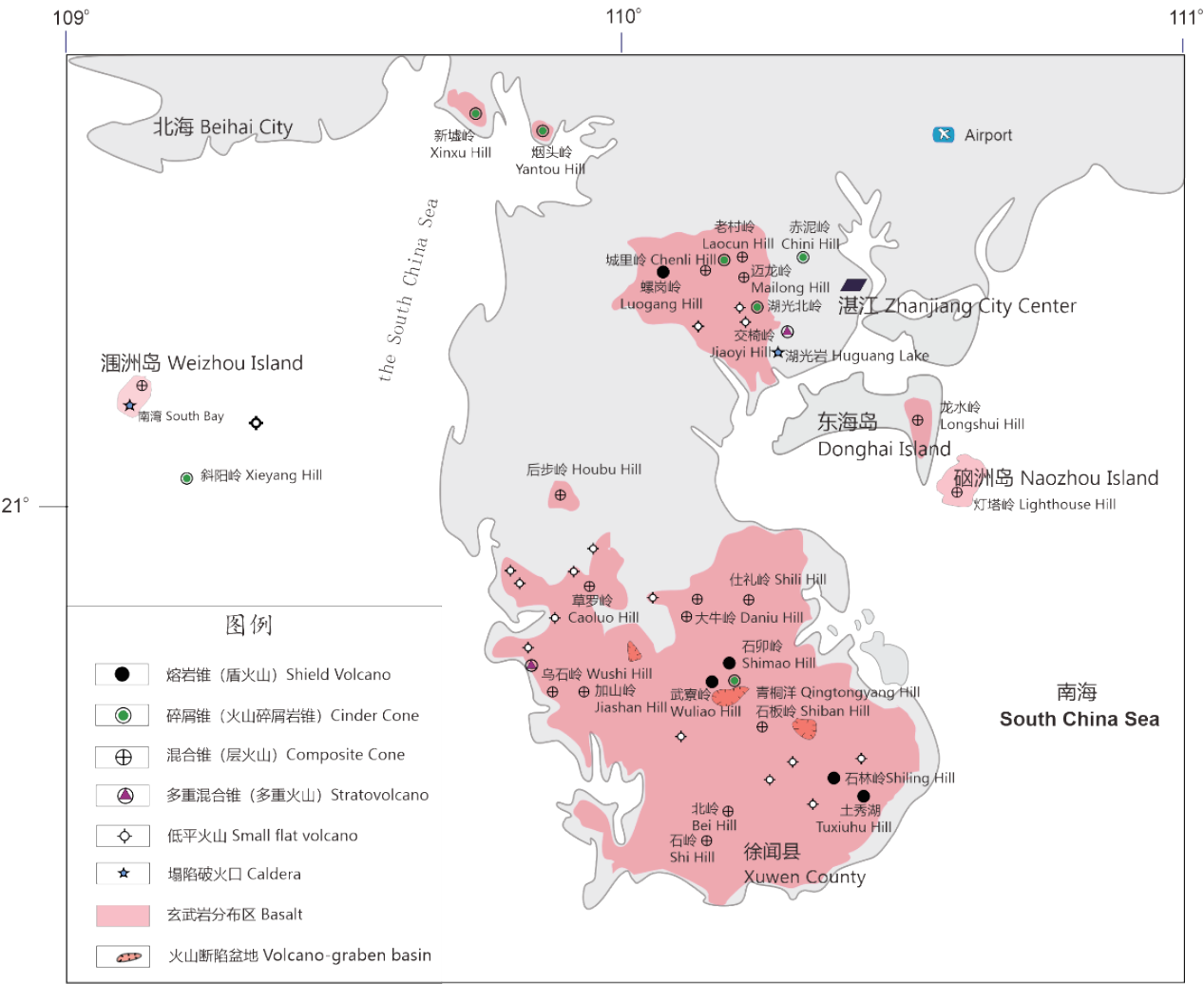


图11 雷州半岛玄武岩分布图

► 广东省CCUS集群规划

5.1 源汇匹配基本概念

“源汇匹配”指依据CO₂排放源、运输路径和封存场地的条件对排放源与封存场地进行两两匹配，对整体经济性、能耗、风险等进行优化，形成排放源与封存场地之间的最优对应关系¹⁰。CCUS集群具有基础设施共享、项目系统性强、技术代际关联度高、能量资源交互利用、工业示范与商业应用衔接紧密等优势，是一种低成本、高效率、广覆盖、体系化的CCUS集群发展途径。在无国家骨干管网和公共管网的情景下，250公里是不需要建设中继压缩站的最长管道距离，管道建设成本和运输成本相对较低，因而一般作为CCUS项目源汇匹配的距离上限¹¹。

5.2 广东省CCUS源汇匹配与产业集群规划

广东省碳排放具有点源分布较集中的特征，主要分布于珠江三角洲及海岸带区域，近海有珠江口盆地、北部湾盆地两大封存区域，开展CCUS集群源汇匹配的必要性显著，发展CCUS产业集群的规模优势明显。依据省

内主要排放源与封存场地空间分布关系，充分融合广东省国土空间规划，提出规划建设4个CCUS工业集群，分别是广佛肇-深莞惠集群、珠江口西岸（珠中江）集群、粤东（汕揭潮）集群和粤西（湛茂阳）集群¹²。广佛肇-深莞惠集群是排放全省最大的CCUS集群，每年碳排放超过1.2亿吨；其次是粤西（湛茂阳）集群，碳排放约7000万吨/年；粤东（汕揭潮）集群与珠江口西岸（珠中江）集群的规模相当，碳排放体量分别在5000万吨/年、4000万吨/年。

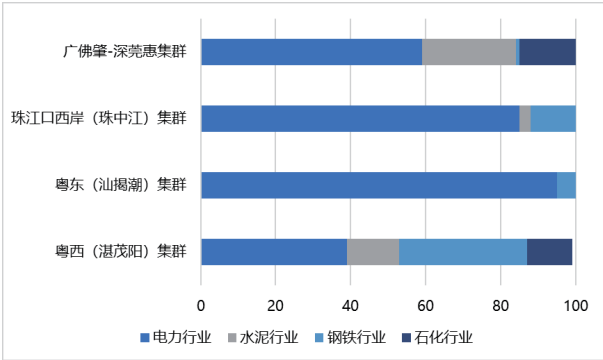


图12 广东省4个CCUS集群不同行业碳排放体量对比

表4 广东省CCUS集群排放规模与行业分布

四大行业排放合计 电力占比 (%) 水泥占比 (%) 钢铁占比 (%) 石化占比 (%)						
4大集群	广佛肇-深莞惠集群	超过1.2亿吨	59	25	1	15
	珠江口西岸（珠中江）集群	约4000万吨	85	3	12	0
	粤东（汕揭潮）集群	约5000万吨	95	0	5	0
	粤西（湛茂阳）集群	约7000万吨	39	14	34	12

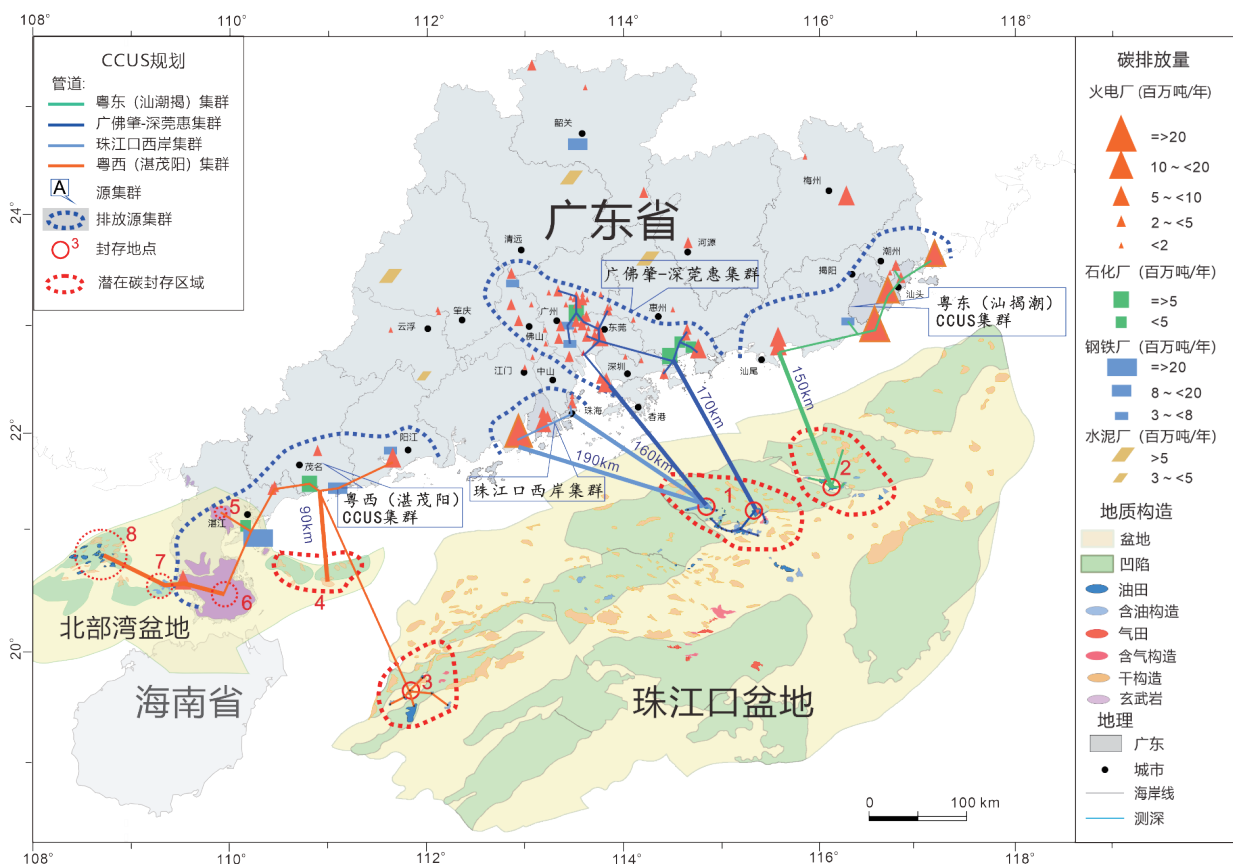


图 13 广东省CCUS集群发展规划

广佛肇-深莞惠集群覆盖广州、佛山、肇庆、深圳、东莞、惠州六市，碳排放量超过1.2亿吨 CO_2 /年，排放源以电力为主，占比59%左右，其次是水泥和石化。另外惠州大亚湾工业区的石化行业排放体量也较大，超过4000万吨 CO_2 /年。建议广佛肇-深莞惠CCUS集群规划建设区域内二氧化碳运输管网，或将部分燃气管网改造成 CO_2 运输管网，将捕集的 CO_2 通过管道或运输船舶输送到珠江口盆地的惠州凹陷（封存潜力约100亿吨 CO_2 ），利用海上石油平台将 CO_2 注入地下咸水层或油气藏，实现 CO_2 地质封存或驱油利用。广州南沙、深圳前海、惠州大亚湾是 CO_2 运输码头和运输管网的潜在核心枢纽。其中，惠州大亚湾石化企业的减排需求迫切，且 CO_2 捕集成本较低，适合率先开展CCUS示范项目和 CO_2 运输基础设施建设。

珠江口西岸集群覆盖珠海、中山和江门三市的排放源企业，除了珠海粤裕丰钢铁有限公司以外，其他均为发电企业，碳排放总量在4000万吨 CO_2 /年以上。建议珠江口西岸集群分别从珠海、江门规划两条 CO_2 运输管线，将 CO_2 输送至西江凹陷地下咸水层和油气田进行地质封存或驱油利用。目前，西江24-3油田净探明储量1900万桶，西江24-3油田上方咸水层可供率先开展 CO_2 地质封存工作。经初步估算，西江凹陷碳封存潜力约91亿吨 CO_2 ，能够满足珠江口西岸集群100年以上的减排需求。

粤东(汕揭潮)集群由汕头、汕尾、揭阳、潮州四市的大型排放源企业组成，集群碳排放总量超过5000万吨 CO_2 /年。区域内排放源企业主要沿海岸线分布，建议临海铺设 CO_2 运输管道，连接各主要排放源企业。此外，燃

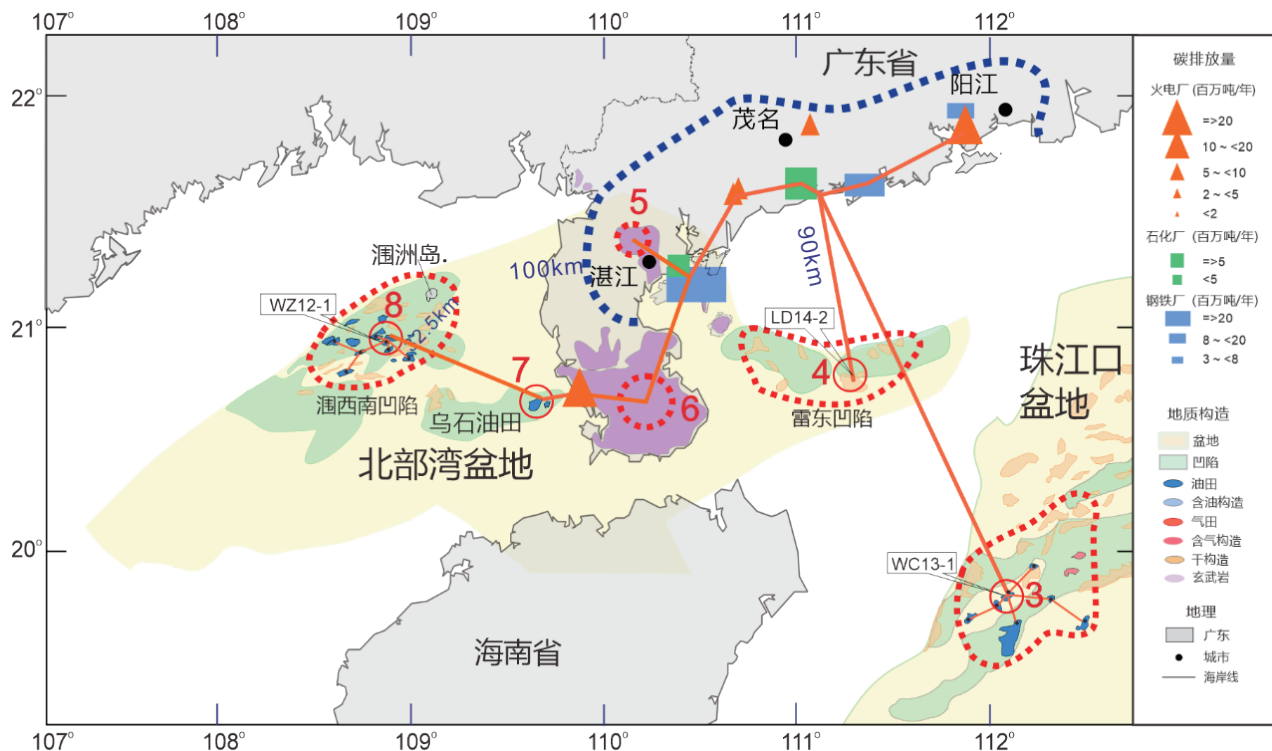


图14 粤西（湛江阳江）CCUS集群规划图

煤电厂一般配套煤炭码头专用泊位，未来可供CO₂运输船舶停靠，替代运输管道开展低成本CO₂运输。深汕合作区海丰电厂、陆丰甲湖湾均是潜在的区域CO₂运输集散枢纽。封存地点建议设立在陆丰油田群及其附近，整个陆丰凹陷的碳封存潜力约为52亿吨CO₂。从深汕合作区海丰电厂到陆丰13-1油田的直线运输距离约为150公里。

粤西（湛江阳江）CCUS集群的碳源分布于广东省西海岸沿线，隶属于湛江、茂名和阳江三市，碳排放规模约在7000万吨CO₂/年。粤西CCUS集群的封存地点选择较多，由珠江口盆地西部珠三坳陷、北部湾盆地和雷州的半岛的玄武岩共同构成。如果计划在珠三坳陷的文昌13-1油田建立封存设施枢纽群，源与汇之间的直线距离约为200公里，距离较远，可考虑利用现有油气管线基础设施。另一选择是在南海西北部的北部湾盆地开展CO₂地质封存。大唐国际雷州电厂与中国海油乌石油田的直线距离仅20公里，CO₂运输距离短，运输成本低，利用二氧化碳提高石油采收率能够获得额外经济收入，是全省

率先开展全流程CCUS示范项目的理想区域。此外，雷州半岛玄武岩发育，适合发展矿化封存，源汇匹配较好，碳封存潜力超过210亿吨¹³。

5.3 广东省CCUS集群减排经济性分析

5.3.1 碳捕集成本

CCUS项目成本中，不同行业的二氧化碳捕集和减排成本变幅很大，主要取决于气源中CO₂的浓度、工厂的位置、能源和蒸汽供应以及捕集设备与原有设施的结合。CCUS技术的能耗及成本因排放源类型及CO₂浓度不同有明显差异，通常CO₂浓度越高，捕集能耗和成本越低，CO₂减排成本越低。本项目主要分析广东省电力、水泥、钢铁、石化四个碳控排行业，针对广东省内主要排放源企业进行了CCUS项目开展经济评价。根据科技部中国21世纪议程管理中心和全球碳捕集与封存研究院

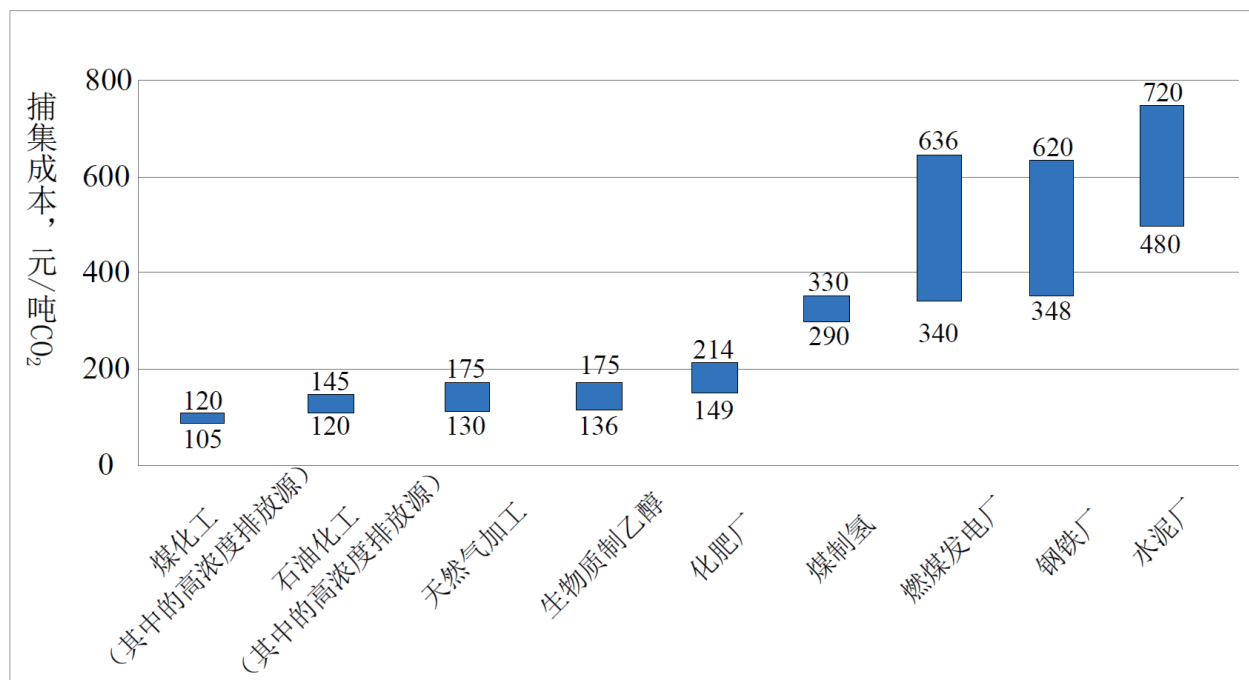


图15 不同行业碳捕集成本^{14, 15}

(GCCSI) 的研究显示, 在考虑贴现率、能源价格为敏感性因素时, 我国各行业的成本在一定区间内波动, 当前各个行业的平均捕集成本见图15。

其中, 水泥是捕集成本最高的行业, 捕集成本达到190~720元/吨CO₂。电力和钢铁行业属于捕集成本较高行业, 分别为340~636元/吨CO₂和349~620元/吨CO₂。其中石化行业相对其他三个行业, CO₂排放浓度较高, 减排成本相对较低, 最低可达到105元/吨CO₂。因此, 石化行业可优先进行CCUS项目示范, 而电力、水泥、钢铁行业CO₂排放浓度都较低, 需要较高的捕集成本, 近期在没有政府补贴的情况下, 企业运行CCUS项目可能无法实现盈利, 建议相关企业现阶段首先进行CCUS项目规划、布局, 开展小型CCUS示范项目的探索并为大型CCUS项目做捕集预留, 待捕集技术成熟、成本下降后逐步开展相关项目, 并入集群。

5.3.2 CCUS成本学习曲线

根据国外CCUS技术的发展经验, 随着越来越多大规模CCUS项目的运行, 新建项目的成本正在降低, 这种

成本的降低可能来自于技术溢出效应和研究学习。根据国际能源署(IEA)的研究, 预计2019年至2070年间, 由于CCUS项目的实践、研究以及电力和工业领域的技术溢出效应, CO₂捕集成本将降低约35%¹⁵。

IEA还预测了在不同时间节点上, 对应的发电行业和工业行业的预计二氧化碳捕集总量和对应的减排成本。IEA预计全球发电行业的碳捕集规模在2030年达到2亿吨CO₂/年左右, 对应的减排成本由2020年的450元/吨CO₂降低至400元/吨左右; 而在2060年, 全球发电行业的碳捕集规模预计增长至30亿吨CO₂/年, 对应的减排成本降低至280元/吨左右。同样, 对于其他工业行业而言, 预计全球工业行业的碳捕集规模在2030年达到17亿吨CO₂/年左右, 对应的减排成本由2020年的840元/吨CO₂降低至750元/吨左右; 假设工业行业无法从其他行业的示范项目经验中受益(无溢出效应), 那么减排成本只能降低至770元/吨CO₂。在2060年, 全球工业行业的CCUS捕集总量预计增长至100亿吨CO₂/年左右, 对应的减排成本降低至525元/吨左右。

对于我国的CCUS项目而言, CCUS成本下降潜力在

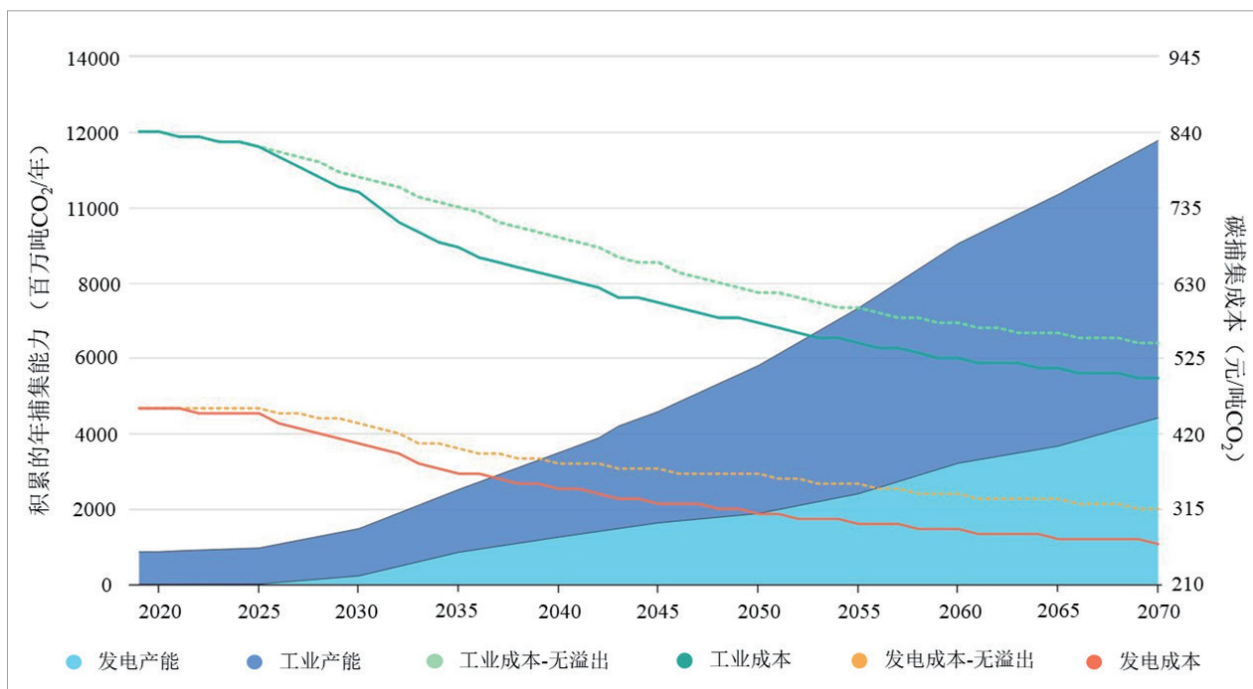


图16 发电企业和小型工业炉采用化学吸收法积累的碳捕集能力和捕集成本学习曲线¹⁶

注：“无溢出”指的是单一行业的碳捕集经验对于其他行业碳捕集成本下降没有明显的促进意义，即行业间相互独立、影响小。

IEA的学习曲线的基础上还有进一步下降的空间，主要原因是中国CCUS项目相较于国际CCUS项目，具有成本优势，主要体现在人工、设备制造、交通运输、原材料等方面。因此，广东省部署CCUS项目将有可能在2030年前将电力行业的碳捕集成本降低至300-400元/吨CO₂的水平，同时随着全国碳市场的完善和相关自愿核证减排量方法学的开发，CCUS项目如果能从碳市场中获益，将进一步降低发电行业CCUS项目建设的成本。

5.3.3 广东省典型排放源开展碳捕集项目经济性分析

为了从经济性角度分析广东省典型排放源开展CCUS项目的可行性，项目组针对已经划分的4个工业集群内具有详细资料的110家企业开展了CCUS项目成本分析。在了解每家排放源企业排放量的基础上，假设每家企业开展捕集规模为总排放量50%的碳捕集项目；该假

设主要考虑CCUS技术与其他低碳技术发挥协同作用，共同推动企业实现碳中和。单一项目生命周期假设20年，贴现率12%；因加装碳捕集设备而产生的额外能耗应在计算实际减排量时予以扣除，扣除比例设为20%。

研究结果显示，广东省内典型排放源开展碳捕集项目的成本如图17所示，其中石化企业的捕集成本最低，为212-242元/吨CO₂，建议率先开展石化行业的大型碳捕集项目示范；水泥行业捕集成本最高，为342-489元/吨CO₂，建议开展先行开展小规模碳捕集项目技术试验与示范项目。

当碳价格或政策补贴在不同水平时的各个集群内部适合开展碳捕集示范项目的统计如图18所示。当补贴水平为200元/吨CO₂时，广佛肇集群和粤西集群共有6个企业可以实现碳捕集项目的商业化运行，均为石化企业；当补贴水平超过400元时，绝大部分企业可实现碳捕集项目的商业化运行。

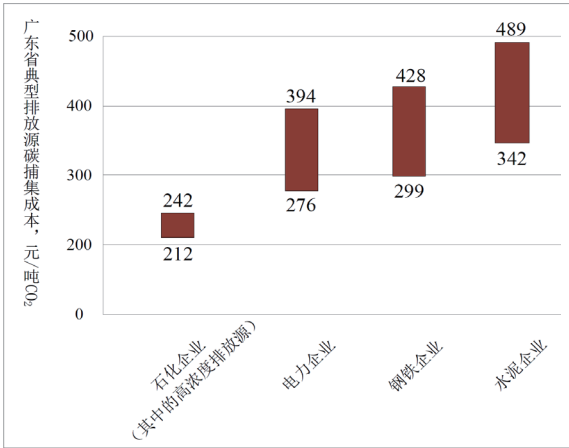


图17 广东省内典型排放源开展二氧化碳捕集的成本

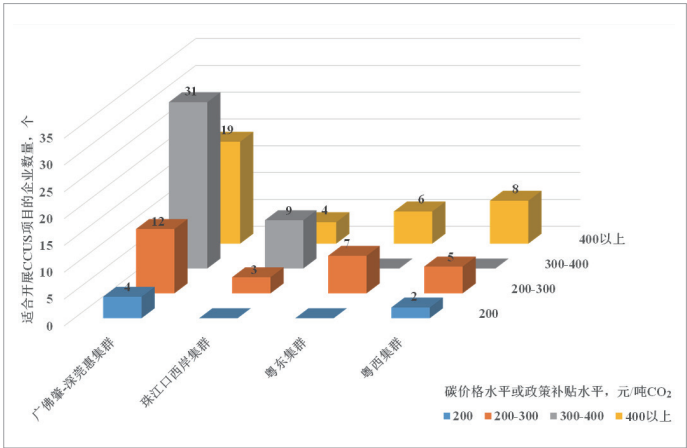


图18 不同碳价格下广东省各集群适合开展碳捕集项目的数量

表 5 广东省典型排放源开展碳捕集项目经济性分析参数

碳捕集设施投资成本（百万吨项目，万元）				碳捕集运维成本，元/吨/年（根据GCCSI报告，预计捕集运维成本约为总投资的6~8%，此处取8%）
捕集规模	行业	捕集设施投资成本计算方法	来源	
100万吨/年以下	电力	$129000 \times \text{捕集规模}^*$	参考中国科学院科技政策与管理科学研究所的数据 ¹⁷	103
	水泥	$160000 \times \text{捕集规模}^*$		128
	钢铁	$140000 \times \text{捕集规模}^*$		112
	石化	$99000 \times \text{捕集规模}^*$		79
100-300万吨/年	电力	$113520 \times \text{捕集规模}^*$	根据学习曲线，在100万吨/年项目的成本基础上减少12%的规模成本	91
	水泥	$140800 \times \text{捕集规模}^*$		113
	钢铁	$123200 \times \text{捕集规模}^*$		99
	石化	$79200 \times \text{捕集规模}^*$		63
300-1000万吨/年	电力	$90300 \times \text{捕集规模}^*$	根据学习曲线，在100万吨/年项目的成本基础上减少30%的规模成本	72
	水泥	$112000 \times \text{捕集规模}^*$		90
	钢铁	$98000 \times \text{捕集规模}^*$		78
	石化	$69300 \times \text{捕集规模}^*$		55

*注：捕集规模的单位以百万吨计。

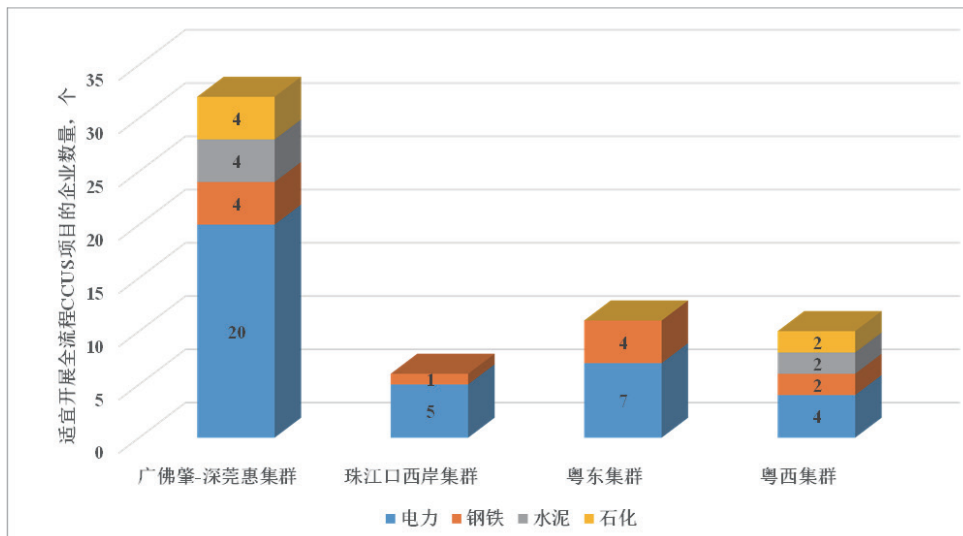


图19 广东省各集群适合开展碳捕集与离岸封存的企业数量

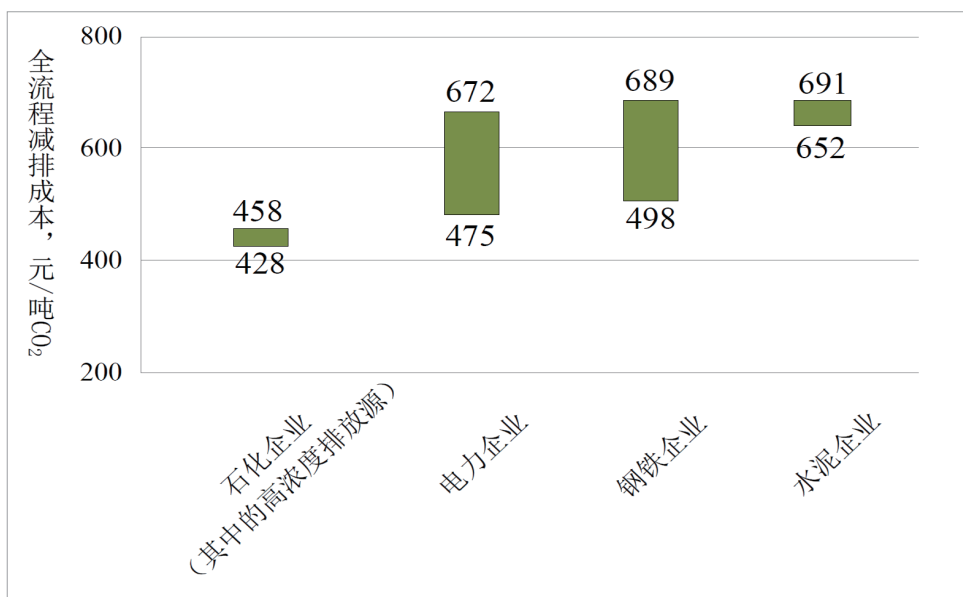


图20 广东省各类型排放源企业碳捕集与离岸封存全流程CCUS减排成本

注：石化行业全流程减排成本较高的原因是因为离岸封存设备的造价较高，许多资本需要用于投资离岸CO₂运输与注入设备。

为探究广东开展碳捕集结合离岸封存全流程CCUS项目的经济性，在省内各典型排放源碳捕集成本的基础上，考虑建设全流程CCUS项目，加入运输和咸水层封存两个技术环节的成本考量，计算过程中用到的经济评价指标如附表1所示。同时，在评价开展全流程CCUS项目可行性时，在第二章CCUS改造技术可行性基础上，对排放源进行了进一步的筛选，筛除捕集容量小于100万吨/年的潜在企业，主要原因是捕集容量在100万吨以下的企业，二氧化碳排放源在工业流程中可能较为分散，导致

单一技术流程中的工业排放量具有较大不确定性，碳捕集规模较低，可能导致单位碳捕集成本较高、项目整体经济性较小。初步筛选结果显示，适宜独立开展全流程CCUS示范项目的企业共计59个（图19）。

59个适宜开展全流程CCUS示范项目的成本分析结果如图20所示。其中石化企业开展全流程CCUS示范项目的成本最低，为427-457元/吨CO₂；水泥行业成本最高，超过600元/吨CO₂。电力和钢铁行业的成本相近，分布在475-689元/吨CO₂。

为探究集群化建设背景下，广东省应当优先开展的具有成本优势的CCUS项目，项目组对初筛的企业进行了进一步筛选，主要考虑两个因素：一是排放源距离潜在封存地的直线距离要限制在200公里以内，二是集群内部

开展CCUS集群化建设的企业相互间的距离要小于100公里。最终筛选结果如图 21，适宜优先参与广佛肇-深莞惠集群的企业数量为11个，其中电力企业5个，水泥企业3个，石化企业3个；适宜优先参与珠江口西岸集群的企业

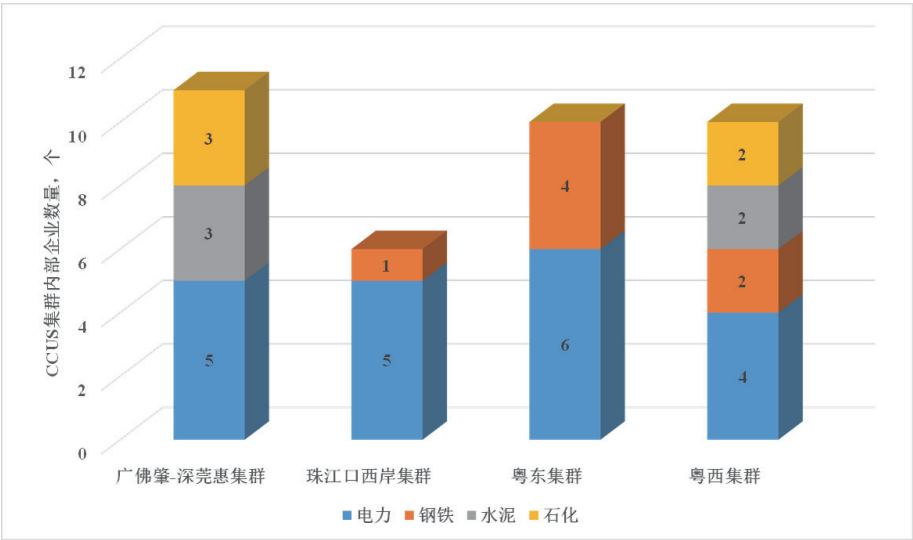


图 21 各集群具有成本优势企业的数量

表 6 广东省各CCUS集群减排经济性分析

集群名称			企业数量 (个)	排放源到潜在封存地最大直线距离 (km)	集群减排量 (万吨CO ₂ /年)	集群企业单独开展全流程项目的平均成本（元/吨CO ₂ ）	集群化发展后的 减排成本（元/吨CO ₂ ）
广佛肇-深莞惠集群	电力	5	150-170	5334	550	381	
	钢铁	0					
	水泥	3					
	石化	3					
珠江口西岸集群	电力	5	170-190	2616	557	410	
	钢铁	1					
	水泥	0					
	石化	0					
粤东集群	电力	6	160-200	3597	582	451	
	钢铁	4					
	水泥	0					
	石化	0					
粤西集群	电力	4	60-140	4981	531	397	
	钢铁	2					
	水泥	2					
	石化	2					

为6个，其中电力企业5个，钢铁企业1个；适宜优先参与粤东集群的企业为10个，其中电力企业6个，钢铁企业4个；适宜优先参与粤西集群的企业为10个，其中电力企业4个；钢铁企业2个，水泥企业2个，石化企业2个。

根据最终参与CCUS集群企业的筛选结果，对全流程CCUS集群项目进行经济性分析，分析结果如表6。在每家企业以自己实际排放量的50%为设计捕集容量的前提下，4个集群的年实际减排量分别为5334万吨CO₂/年、2616万吨CO₂/年、3597万吨CO₂/年和4981万吨CO₂/年。最终4个集群的减排成本分别为：381元/吨CO₂、410元/吨CO₂、451元/吨CO₂和397元/吨CO₂。相较于各个集群内部各企业分别开展全流程项目的平均成本，集群化可以使各集群的成本分别降低31%、26%、23%、25%。

为研究不同碳价格下广东省应优先开展的CCUS示范项目。基于上述研究成果，研究认为目前仅依靠碳价无法支撑绝大部分CCUS项目的商业化，因此需要考虑利用二氧化碳提高石油采收率（CO₂-EOR）技术为广东省优先部署的CCUS项目提供商业可行性。针对具有利用二氧化碳提高石油采收率和玄武岩矿化封存潜力的企业，开展经济性分析，选取的典型企业为大唐雷州电厂、湛江宝武钢铁厂和中科炼化。假设中短期率先示范捕集设计容量为100万吨CO₂/年的项目，二氧化碳驱油的换油率2:1，原油价格取659.7美元/吨，美元汇率取6.94，利用二氧化碳提高石油采收率注入项目的实际注入量为设计捕集容量的20%（考虑油田可开采剩余油的储量有限）。研究结果显示（图22），在具备利用二氧化碳提高石油采收率条件的企业中，当碳价或政策补贴水平为100元/吨CO₂时，石化企业可以率先开展全流程CCUS商业化项目示范，包括惠州大亚湾石化区的企业、湛江中科炼化、茂名石化等；在碳价或政策补贴水平达到150元/吨CO₂时，电力企业，如大唐雷州电厂，具备开展全流程CCUS商业化项目；当碳价上升至170-200元/吨CO₂时，部分钢铁企业可以开展全流程CCUS商业化项目，包括宝武湛江钢铁。

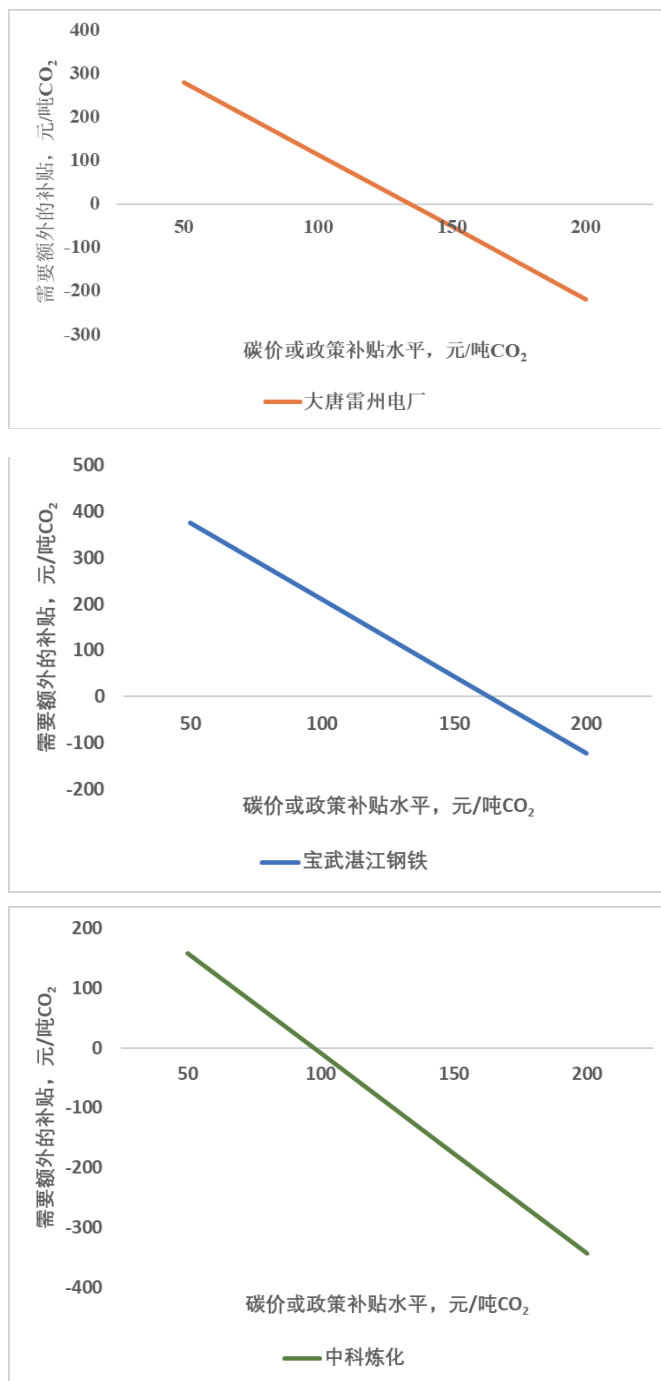


图22 不同碳价下不同行业代表性企业利用二氧化碳提高石油采收率（CO₂-EOR）成本分析

► 广东省发展CCUS政策建议

6.1 广东省CCUS发展基本原则建议

1.统筹推进、重点突破：强化顶层设计和整体统筹，围绕CCUS各环节的技术瓶颈和薄弱环节，统筹协调基础研究、技术研发、装备研制和集成示范部署，突破新低成本胺液碳捕集技术、CO₂离岸驱油、CO₂矿化封存等对于广东省至关重要的CCUS技术；加强在粤东、粤西布局CCUS创新平台，引导创新人才等资源向粤东、粤西流动共享，协同推进全省CCUS产业集群发展。

2.先行先试、防范风险：积极鼓励大型排放源开展CCUS预留设计，利用石化、化工、钢铁行业高浓度排放源率先开展多类型碳捕集、碳利用技术示范，在粤西地区乌石油田群开展近岸油气田封存驱油示范、在雷州半岛开展非常规矿化封存示范；在减排成本、减排效果持平的情况下，优先开展碳利用，后开展碳封存；严格把握CCUS示范项目的安全性指标，探索建立CCUS技术标准与规范体系；严谨制定项目工程方案和融资方案，防

范项目现金流风险。

3.策源驱动、人才为本：注重发挥高等院校和科研院所所在创新中的引领作用，以企业为技术示范主要载体，建立产学研结合和产业联合创新机制，集成和融合跨领域、跨行业优势力量，政府积极支持开展CCUS技术研发和项目示范，培养CCUS技术人才，全面提升CCUS技术创新能力。

4.碳价引导、系统布局：随着全国碳市场的不断发展和CCUS自愿减排项目方法学的开发，预计CCUS将从碳市场得到支持。建议以碳市场价格为锚点，稳步开展CCUS减排项目；前期重视低成本CCUS项目的储备和系统化布局，提前做好详细项目方案，提前完成项目减排量纳入碳市场方法学开发。等待碳市场价格基本覆盖项目减排成本时，启动相关项目，将项目减排量纳入碳市场交易，以市场化手段实现大规模碳减排。

6.2 中短期发展目标

1.碳市场价格达到100元/吨时（预计2025年左右）¹⁸，省内CCUS部分关键技术研发水平提升，全省建成投运的二氧化碳捕集能力达到50万吨/年，二氧化碳地质封存量突破30万吨/年。完成重点区域二氧化碳运输管网规划与经济性评估。落地4个以上CCUS示范项目。二代胺溶液技术取得关键突破。建立CCUS全流程的审批机制、监管机制，建立量化CCUS项目减排量的方法体系。实现CCUS项目减排量纳入碳市场交易。

2.碳市场价格达到200元/吨时（预计2030年左右），广东省CCUS产业初步形成，全省建成投运的二氧化碳捕集能力达到300万吨/年，二氧化碳封存量突破200万吨

/年，形成大型高浓度排放源解决方案，CCUS项目在全省碳达峰过程中起到关键作用。建成百万吨级CCUS示范项目，形成具有国际竞争力的CCUS集群设计、建造和的技术服务产业。突破一批CCUS关键基础理论和技术，实现捕集成本和能耗较2020年下降15%-20%，掌握国际领先的封存和监测技术，部分研发成果进入商业应用阶段并具备产业化能力。

3.碳市场价格达到400元/吨时（预计2035年左右），形成完整的CCUS产业链，全省建成投运的二氧化碳捕集能力达到2000万吨/年，二氧化碳封存量突破1800万吨/年。CCUS为实现广东省碳排放达峰后稳中有降做出重

大贡献。

4.当国内外气候政策发生重大变化，国内配额或自愿减排量价格达到500元/吨二氧化碳时，CCUS成为广东省

国民经济支柱产业，创造超过10万个就业机会，电力、钢铁、水泥等高排放行业广泛采用CCUS技术开展温室气体减排，CCUS每年为广东省减排超过5000万吨二氧化碳，

6.3 广东省CCUS发展建议与策略

1.构建CCUS技术创新生态与发展环境。发挥广东省排放源类型丰富、碳封存手段多样、高端装备制造业发达的优势，高水平打造碳捕集技术测试平台和孵化平台，构建碳利用、碳封存技术试验场景，积极引进全球先进CCUS技术到广东测试、改进和示范。重点突破二代胺溶液碳捕集技术、近海规模化CO₂地质封存与驱油利用技术，攻克玄武岩矿化封存CO₂技术，探索经济适用的CO₂利用技术，形成具有国际先进水平的CCUS技术研发、试验验证和自主知识产权体系。依托中英（广东）CCUS中心全球合作伙伴关系，积极推动广东融入全球CCUS创新网络，更好地汇聚和运用国际创新资源，建设更高水平的开放型CCUS创新体系。

2.加大CCUS示范项目支持力度。借鉴对太阳能、风能、新能源汽车等绿色技术发展的支持方式，研究制定符合广东实际的CCUS项目激励政策，探索为率先投入CCUS技术研发、开展CCUS技术示范的企业提供财政补贴、税收减免、低息贷款、增加电力配额等多方位配套政策支持。建立示范项目发展基金，探索政府与市场有机结合的CCUS商业化投融资机制，积极利用绿色金融、气候债券、低碳基金等多种方式支持CCUS项目示范。推动CCUS项目减排量进入碳排放权交易市场。以驱油驱气、固体废物矿化、化工利用等CO₂利用技术的大规模示范为牵引，积极支持油气、电力、钢铁、水泥等相关行业CCUS示范项目建设。推动惠州、茂名、湛江大型石化和钢铁企业发挥CO₂浓度高、捕集成本低的优势，率先开展全链条CCUS示范项目。推进在珠江口盆地、北部湾盆地乌石油田群、雷州半岛开展二氧化碳封存示范项目。

3.持续完善全省CCUS发展规划。鼓励全省大型排放源开展二氧化碳捕集预留¹⁹。开展全省CO₂运输管网和运输路径规划研究，建立CCUS基础设施合作共享机制，带动形成以管网设施和封存场地为基础的区域CCUS产业

促进中心。持续推进广佛肇-深莞惠、珠江口西岸、汕揭潮、湛茂阳CCUS集群的详细规划方案研究，充分发挥相关集群在基础设施共享、项目系统集成、能量资源交互利用、工业示范与商业应用衔接等方面的优势，降低CCUS减排成本。

4.制定广东省CCUS行业规范和标准体系。开展CO₂管道建设与施工标准、封存选址标准、监测评价标准等环境保护、安全保障与监管标准体系建设，研究地下空间使用权、长期责任等内容，建立覆盖捕集、储存、运输、封存和利用等CCUS全流程的监管机制，建立量化CCUS项目减排量的方法体系。针对国际标准化组织已经启动制定的CCUS相关标准，结合我国CCUS示范工程的建立，完善CCUS法律法规体系，建立CCUS项目的建设、运营、监管、终止的标准和制度，建立并完善CCUS建设运营所需的技术规范。

19 二氧化碳捕集预留：二氧化碳捕集预留：主要指燃煤电厂、燃气电厂、水泥厂、石化厂或其他类型排放源企业在设计与建造过程中预先考虑二氧化碳捕集问题，为碳捕集工程提前规划好烟气接口、项目场地和二氧化碳压缩、纯化、存储和运输等方面技术方案，从而使未来的碳捕集改造工程更加简单经济。相较于未开展捕集预留的企业，开展碳捕集预留的企业具有更好的可改造性，将明显影响降低未来改造的经济成本和技术难度。

附件

附表1 二氧化碳运输和离岸咸水层封存成本

运输资本投资	
3百万吨/年以下	0.9元/吨/km
3百万吨/年以上	0.6元/吨/km
运输运维成本	
管道运输	0.3元/吨/km
封存资本投资	
陆上咸水层	60元/吨
离岸咸水层	300元/吨
封存运维投资	
陆上咸水层	30元/吨
海底咸水层	150元/吨

来源：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；何建坤，中国长期低碳发展战略研究，2020；魏宁等，CO₂海洋管道运输的技术经济分析，2015

参考文献：

- 中国21世纪议程管理中心，《第三次气候变化国家评估报告》特别报告：中国二氧化碳利用技术评估报告，2014
- 国际能源署（International energy agency），Putting CO₂ to use, 2019
- 中英（广东）CCUS中心，广东省二氧化碳利用技术及潜力，2014
- María J.Fernández-Torres, et al. Economic and environmental assessment of directly converting CO₂ into a gasoline fuel, Energy Conversion and Management, Volume 252, 15 January 2022, 115115
- 程从密, 焦楚杰, 詹镇峰, 等. 钢渣在混凝土中的应用现状与前景分析[J]. 商品混凝土, 2009(1):3.
- 国投生物，小小微藻，助力碳中和，2022，<https://www.sdic.com.cn/cn/rmtzx/xwzx/jtdt/webinfo/2022/06/1657926369949678.htm>，2022年9月12日访问。
- 华经产业研究院，2020-2025年中国海洋微藻行业市场运营现状及投资方向研究报告，2020
- Zhou Di, Zhao Zhong-xian, Liao Jie, 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: 308-317.
- Li P, Zhou D, Zhang C, 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.
- 中国环境科学学会，二氧化碳捕集、利用与封存名词术语，2021.
- 张贤，李阳等.我国碳捕集利用与封存技术发展研究[J]. 中国工程科学. 2021.第23卷第6期
- Di Zhou,Pengchun Li,Xi Liang, 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. International Journal of Greenhouse Gas Control 70 (2018) 76–87
- Snæbjörnsdóttir SÓ, F. Wiese, T. Fridriksson, H. Armannsson, G.M. Einarsson, and S.R. Gislason (2014). "CO₂ storage potential of basaltic rocks in Iceland and the oceanic ridges" Energy Procedia 63: 4585-600.
- GCCSI. 2017. Global Cost of carbon capture and storage. 2017 updated.
- 张贤，李阳，马乔，刘玲娜等. 2021. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究. 中国工程科学. 2021, 23(6): 70-80.
- IEA. 2020. Energy Technology Perspective 2020.
- 朱磊 范英. 中国燃煤电厂CCS改造投资建模和补贴政策评价[J]. 中国人口·资源与环境. 2014, 24(7):7.
- 碳价格预测来源：路孚特，2021年中国碳价调查报告、清华大学能源环境与经济研究所张希良团队、美国环保协会



广东省二氧化碳捕集利用运输与封存 规划研究报告（决策者摘要）

征求意见稿

广东南方碳捕集与封存产业中心

广东工业大学碳中和与绿色发展协同创新研究院

中国能建广东省电力设计研究院

联系方式：广东南方碳捕集与封存产业中心

夏菖佑 changyou.xia@gdccus.org

王莉 li.wang@gdccus.org

广东工业大学碳中和与绿色发展协同创新研究院

曾雪兰 zengxuelan@gdut.edu.cn

何松 hesong@gdut.edu.cn

2022年9月