中英（广东）CCUS 中心
UK-China (Guangdong) CCUS Centre

北部湾区域碳捕集与封存机遇及CCUS集群部署研究：

引领能源与工业部门的净零转型



中英（广东）CCUS中心

2025年3月

致谢

本研究由英国全球合作伙伴基金（Global Partnership Fund）资助，谨此致以诚挚谢忱。

本报告研究团队

夏菖佑、高志豪、马诗佳、余晓洁、刘牧心、梁希

团队联系方式

如需进一步了解信息，请联系：

夏菖佑博士

邮箱：changyou.xia@gdccus.org

目录

决策者摘要 02

01 北部湾：CCUS 发展的优选区域 04

02 北部湾区域 CCUS 发展现状与部署进展 07
2.1 广东省 08
2.2 广西壮族自治区 09
2.3 海南省 11

03 北部湾区域碳排放特征分析 15

04 北部湾区域二氧化碳地质封存潜力分析 18

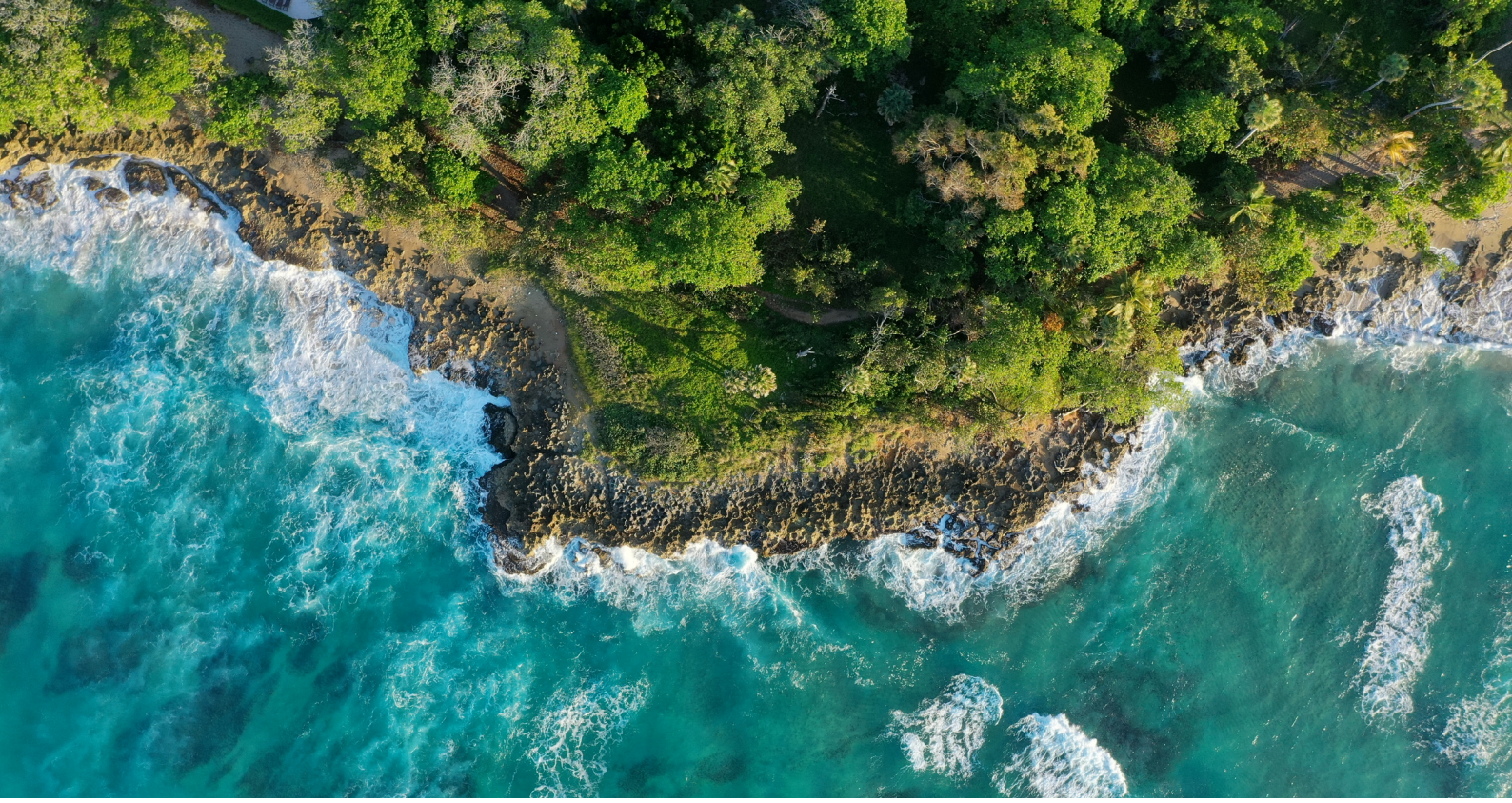
05 北部湾 CCUS 集群部署分析 23

06 北部湾地区 CCUS 集群商业运营模式研究 30
6.1 CCUS 集群的商业运作模式分析 31
6.2 北部湾区域 CCUS 集群商业模式建议 34
6.2.1 集群孵化阶段 34
6.2.2 集群成熟阶段 39

07 政策建议 41

08 北部湾区域 CCUS 商业机遇 44

附录 46



决策者摘要

北部湾盆地作为中国南方地区推进碳捕集、利用与封存（CCUS）技术集群部署的优选区域，具备优越的地质条件、良好的基础设施支撑，以及政府和产业界日益增强的碳减排意愿与战略承诺。作为中国大陆最南端的重要海上枢纽，北部湾不仅是连接中国南部与西南地区通往国际市场的重要通道，也承载着推动区域经济高质量发展与绿色低碳转型的重要使命。区内沿海产业高度集聚，以石化、冶金与能源为重点行业，在碳达峰与碳中和目标约束下面临持续增加的减排压力。本研究旨在系统评估 CCUS 技术在北部湾盆地的部署潜力与实施路径，为推进能源与工业部门深度脱碳及净零转型提供科学依据与决策参考。

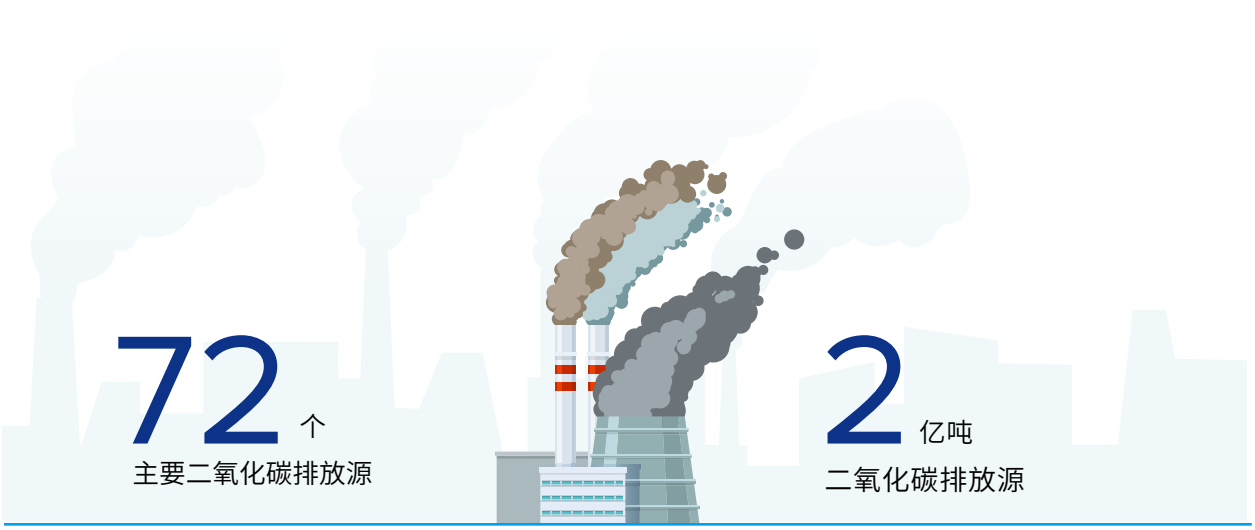
研究识别出环北部湾盆地范围内 72 个主要二氧化碳排放源，其地理分布主要集中于广东省西部、广西壮族自治区南部以及海南省北部地区。上述排放源年排放总量逾 2 亿吨二氧化碳。其中，电力行业（尤以煤电为主）排放规模最大，约占总排放量的近 50%；钢铁行业次之，占比约达三分之一；此外，水泥、炼油及造纸等行业亦为重要排放来源。值得注意的是，尽管生物质发电厂及垃圾焚烧设施的碳排放强度相对较低，但其具备通过碳捕集与封存技术实现负排放的潜力，从而生成高价值的碳移除信用，因而在区域碳减排路径中具有战略意义。

从地质条件来看，北部湾盆地具备巨大的二氧化碳封存潜力，主要依托深层咸水层、枯竭油气藏等适宜的地质构造。据多家科研机构评估，该区域的碳封存能力介于 236 亿吨至 4856 亿吨之间，展现出显著的资源禀赋优势。此外，区域内广泛分布的火山玄武岩地层为二氧化碳的长期稳定封存提供了额外保障，进一步增强了实施大规模碳封存的技术经济可行性与环境安全性。

基于区域产业布局特征及碳排放分布格局，本研究建议优先围绕以下六个区域布局 CCUS 集群或二氧化碳运输与封存集成系统：广东省湛江市、茂名 - 阳江地区；广西壮族自治区钦州 - 防城港地区、北海市；以及海南省的海口 - 澄迈地区和洋浦经济开发区。上述区域工业集中度高、排放源密集，具备良好的 CCUS 基础设施协同条件和发展潜力。

尽管前景广阔，北部湾 CCUS 集群的发展仍面临多重挑战，亟需系统性政策支持与制度保障。特别是在 CCUS 技术孵化与示范应用初期，政策的引导作用尤为关键。国际经验表明，美国与加拿大通过税收抵免机制有效激励了 CCUS 项目的投资与落地；英国、挪威、丹麦及荷兰等国则采用财政补贴方式降低企业初期投入与运营成本，推动产业集群建设。借鉴上述国家的成功实践，并结合北部湾当前 CCUS 项目推进情况，研究提出以下政策建议：一是加快制定区域 CCUS 专项发展规划，明确发展定位与技术路径；二是设立分阶段实施目标，确保与国家“双碳”战略有机衔接；三是探索多元化、可持续的商业模式与激励机制，提升项目经济可行性和市场适应能力；四是建立健全覆盖项目审批、建设、运行全过程的监管体系，保障环境安全与公众利益；五是加强区域间及国际合作，促进技术交流、资源共享与能力建设，助力构建开放、协同、高效的 CCUS 发展格局。

当前北部湾 CCUS 产业仍处于发展初期，在规划咨询、工程设计、项目建设、装备制造及监测服务等领域存在广泛商业机遇。随着 CCUS 技术不断成熟与规模化应用，该区域有望成为华南地区低碳转型的战略支点，为区域深度减排与绿色转型提供关键支撑。



01

北部湾：CCUS 发展的优选区域



北部湾为中国最大的半封闭海湾，地跨广东省、广西壮族自治区及海南省部分区域（具体见图 1）。该区域是“一带一路”合作倡议中“海上丝绸之路”的关键节点，具有显著的经贸战略价值。凭借其得天独厚的区位条件，北部湾有效联通中国南部、西南地区与国际市场，促进了以石化、冶金和能源为核心的重化工业集群发展。

在地理空间上，北部湾盆地东起广东省雷州半岛，北接广西壮族自治区，南邻海南岛。该盆地具备优越的二氧化碳地质封存条件，表现为沉积厚度大、储盖组合条件良好且构造封闭性强。过去数十年来的油气勘探与开发为 CCUS 项目的推进积累了丰富的地质资料，并提供了可再利用的基础设施（如油气田井网、集输系统等），有

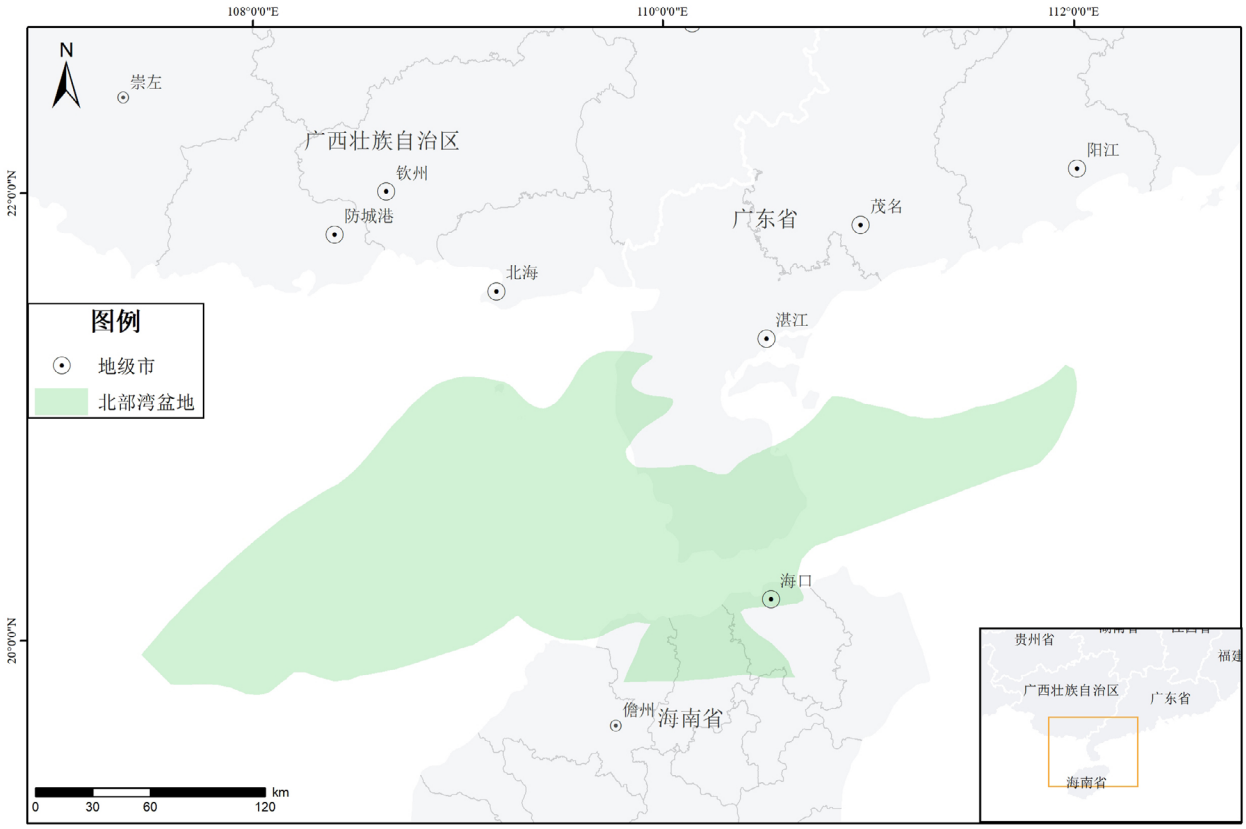


图 1　北部湾盆地地理示意图

助于显著降低二氧化碳注入与封存成本。此外，盆地周边集聚大量工业碳排放源（覆盖石化、钢铁、电力等行业），进一步强化了其作为 CCUS 战略枢纽的现实可行性——排放源与封存场地的空间匹配性，为规模化 CCUS 项目的“源 - 网 - 汇”协同奠定了基础。

从经济发展与减排协同的角度看，本区域能源密集型产业在推动经济增长的同时，也带来了碳排放总量持续上升的严峻挑战。推进绿色低碳转型，已成为区域高质量发展的必然要求。北部湾地区同时兼备产业集群化基础与封存资源潜力，为开展大规模 CCUS 工程示范和商业模式创新提供了理想场景。

本报告旨在系统评估北部湾地区 CCUS 发展的潜力与机遇：通过系统剖析区域碳排放分布特征、地质构造条件及产业布局规律，提出 CCUS 产业集群构建的整体框架及配套政策支持体系。研究目标是依托北部湾独特的地理区位、地质资源与产业基础等综合禀赋，助力区域能源与工业部门实现绿色低碳转型。

02

北部湾区域 CCUS 发展现状与部署进展

2.1 广东省

广东省已将 CCUS 技术的发展作为实现碳达峰、碳中和目标的重要战略抓手之一，并持续推进相关部署。早在 2021 年，广东便完成了全国首个省级层面的 CCUS 发展规划研究，提出在全省布局建设四大 CCUS 产业集群，其中以湛江、茂名、阳江为核心的粤西集群被列为优先发展区域[1]。2024 年 4 月，广东省印发《广东省未来绿色低碳产业集群培育发展行动计划》[2]，明确将 CCUS 列为构建未来低碳产业生态体系的核心领域之一，强化政策支持力度。该计划聚焦八大重点绿色产业，其中 CCUS 被视为关键突破领域。计划提出，依托湛江东海岛石化产业园区、粤东粤西地区沿海高性能火电机组等沿海 CO_2 排放源富集区，加快大亚湾区 CCUS 集群项目、粤西 CCUS 集群项目落地，研究布局 CO_2 综合运输网络，打造珠三角技术研发基地、粤西材料装备制造基地，培育沿海经济带 CCUS 产业集群。

在地方实践层面，湛江市政府委托湛江湾实验室，研究 CCUS 分阶段推进策略[3]：第一阶段以排放源近域封存为重点，选取大唐雷州电厂、乌石油田作为首期示范场景，积累工程实践经验；第二阶段规划在东海岛—雷东凹陷区域开展大规模深层咸水层封存，并同步推进玄武岩矿化封存技术研发与示范，突破关键技术瓶颈[3]。

目前，粤西地区已有 5 个 CCUS 项目处于运营或建设阶段（表 1）。此外，宝武钢铁、大唐雷州电厂、中海油湛江分公司等龙头企业均在区域内布局 CCUS 项目，标志着粤西正加速构建全国 CCUS 技术应用示范高地，为我国乃至全球碳减排进程提供重要实践支撑。

1 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)[R]. 广州 : 广东南方碳捕集与封存产业中心 , 2022.

2 广东省发展和改革委员会 , 广东省科学技术厅 , 广东省工业和信息化厅 . 广东省培育发展未来绿色低碳产业集群行动计划 [EB/OL]. (2024-02-27)[2025-05-06]. https://sqzc.gd.gov.cn/rdzt/wlcy/zcsd/content/post_4382073.html.

3 林宇云 , 杨杰 , 方小宇 . 湛江加快推动 CCUS 技术研发和产业发展 [EB/OL]. (2023-07-19)[2025-05-09]. https://www.gdzjdaily.com.cn/p/2857469.html.

表 1　2024 年粤西地区在运 / 在建 CCUS 项目一览

序号	项目名称	实施单位	地点
1	生物质电厂二氧化碳捕集与微藻培养项目	广东粤电湛江生物质发电有限公司	湛江
2	生物质绿色甲醇示范项目	中集绿能低碳科技 (湛江) 有限公司	湛江
3	二氧化碳合成碳酸酯类化合物（锂电池电解液溶剂）项目	湛江中捷精创先进材料有限公司	湛江
4	20 万吨 / 年石化尾气二氧化碳回收利用项目	新华粤（湛江）有限公司	湛江
5	40 万吨 / 年石化尾气二氧化碳回收利用项目	茂名华粤华源气体有限公司	茂名

2.2　广西壮族自治区

广西目前尚处于 CCUS 发展的初步探索阶段，但在政策支持与产业引导方面已呈现出逐步加强的趋势。《广西壮族自治区“十四五”能源发展规划》明确提出，将运用税收优惠等一系列政策工具，积极推进 CCUS 技术的研发与应用 [4]。同时，规划着重强调要构建绿色金融支持机制，引导社会资金流向 CCUS 示范项目，为产业发展提供坚实的资金保障。

尽管广西 CCUS 发展尚属早期，截至 2024 年，其南部地区已建成 4 个在运 CCUS 项目（详见表 2）。其中，1 个项目采用氧化钙（CaO）吸附剂捕集二氧化碳，并将其转化为碳酸钙（$CaCO_3$）产品，实现资源化利用；其余 3 个项目主要针对工业尾气开展二氧化碳分离，产出液态二氧化碳产品，推动工业排放向资源化方向转型。

4　广西壮族自治区政府 . 广西壮族自治区人民政府关于印发广西壮族自治区国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要的通知 [EB/OL]. (2021-04-19)[2025-05-09]. http://www.gxzf.gov.cn/zfwj/zxwj/t8687263.shtml.

表 2　2024 年广西南部在运 / 在建 CCUS 项目一览

序号	项目名称	实施单位	地点
1	3.8 万吨 / 年工业废气二氧化碳捕集（CaO 吸收，碳酸钙生产）	北海美特环保科技有限公司	北海
2	1.5 万吨 / 年酒精发酵尾气二氧化碳回收	广西中粮生物质能源有限公司	北海
3	22 万吨 / 年石化及化工行业尾气二氧化碳回收	广西万兴化工科技有限公司	钦州
4	6 万吨 / 年酒精发酵尾气二氧化碳回收	广西新天地能源有限公司	钦州



广西钦州广西万兴化工科技有限公司 22 万吨 / 年石化及化工行业尾气二氧化碳回收项目（图片来源：广西万兴）

2.3 海南省

海南省已通过省级政策框架明确了 CCUS 发展的阶段性目标。《海南省碳达峰实施方案（2022 年）》提出，推动水泥、石化及化工等行业 CCUS 技术的试点应用，明确到 2030 年实现 50 万吨 / 年碳地质封存能力[5]。

在具体实践方面，中石油福山油田于 2018 年启动了首期二氧化碳驱油示范项目。至 2022 年，福山油田已建成具备年封存能力 10 万吨的二氧化碳液化与封存基础设施。根据“十四五”规划，福山油田计划于 2025 年前将 CCUS 处理能力提升至 30 万吨 / 年，并启动百万吨级碳地质封存示范基地建设[6]。2023 年 3 月，中石油南方勘探公司与 bp（中国）投资有限公司签署海南低碳合作协议，双方将共同探索建设清洁绿色油田，打造海南 CCUS 区域中心。2024 年 7 月，福山凹陷咸水层二氧化碳地质封存示范项目于金凤 7X 井场正式启动，标志着项目迈出重要一步[7]。

与此同时，海南省其他重点行业也在同步推进 CCUS 技术应用。2023 年，华能海南洋浦天然气电厂投运燃烧后碳捕集系统，具备年捕集 2000 吨二氧化碳的能力。华润水泥（昌江）有限公司启动建设碳中和研发平台，其中包括设计年捕集与利用 6 万吨水泥生产过程二氧化碳的子项目。这些项目的实施，体现了海南在能源、工业与资源开发等多领域协同推进 CCUS 技术应用的战略布局，为全省实现碳减排目标提供有力支撑。

5 海南省人民政府 . 海南省人民政府关于印发海南省碳达峰实施方案的通知 [EB/OL]. (2022-08-09)[2025-05-09]. https://www.hainan.gov.cn/hainan/zmghnwj/202208/6c5d8bad000c479582fc3c51a39999b8.shtml.

6 中国石油新闻中心 . 南方勘探公司创建绿色企业纪实 [EB/OL]. (2022-05-12)[2025-05-09]. https://news.cnpc.com.cn/system/2022/05/12/030067699.shtml.

7 中国石油新闻中心 . 中国石油首个咸水层 CCS 试注项目启动 [EB/OL]. (2024-07-15)[2025-05-09]. http://news.cnpc.com.cn/system/2024/07/15/030137084.shtml.

表 3　2024 年海南省在运 / 在建 CCUS 项目一览

序号	项目名称	实施单位	地点
1	10 万吨 / 年福山油田 CCUS 项目	中石油海南福山油田勘探开发有限公司	澄迈
2	2000 吨 / 年天然气电厂碳捕集示范项目	华能洋浦热电公司	儋州
3	6 万吨 / 年水泥行业碳捕集与利用项目	华润水泥 (昌江) 有限公司	昌江



海南福山油田的二氧化碳压缩机。天然气通过分子筛和吸附塔进行脱水处理，随后气体中的二氧化碳被加压并冷凝成液态，用于地下地质封存及提高采油效率。（图片来源：中国船舶重工集团有限公司）



bp 与中石油签署海南低碳合作谅解备忘录



海南省澄迈中石油福山油田二氧化碳注入泵



海南省华能洋浦电厂天然气电厂碳捕集示范项目（捕集能力 2000 吨 / 年）（图片来源：华能集团）

03

北部湾区域碳排放特征分析

本章对北部湾区域能源消费与工业活动所产生的碳排放情况展开系统分析。研究范围涵盖八大行业类别，包括两类发电行业（燃气发电与燃煤发电）、四类工业行业（钢铁、水泥、石化与造纸）以及两类环境能源行业（生物质发电与垃圾焚烧）。为保障碳捕集项目具备经济可行性，商业化项目需达到一定规模以降低单位二氧化碳捕集成本。基于此，本研究将纳入 CCUS 集群网络的化石燃料电厂与工业设施年排放阈值设定为 10 万吨。考虑到生物质发电与垃圾焚烧设施可产生具有较高市场价值的碳移除信用，其捕集门槛设定为 5 万吨，以体现其在碳市场机制中的特殊价值。

经系统调研，本研究共确认北部湾区域内 72 个主要二氧化碳排放源（详见表 4），其分布与排放特征如下：

- 化石燃料发电行业占据主导地位，包括 12 座燃气电厂和 17 座燃煤电厂，合计 29 座设施，年排放二氧化碳总量约为 1.077 亿吨；
- 工业行业共识别出 32 个主要排放源，其中包括 7 座钢铁厂（年排放合计约 6550 万吨）、10 座水泥厂（约 1070 万吨）、8 座石化厂（约 1130 万吨）以及 7 座造纸厂（约 1060 万吨）；
- 环境能源领域排放规模较小，但具备碳负排放潜力。该领域年排放量超过 5 万吨的设施主要涵盖 7 座生物质发电厂（年排放合计约 80 万吨）与 4 座垃圾焚烧设施（年排放约 40 万吨）。

表 4　北部湾八大行业设施碳排放估算

排放源类别	设施数量	年二氧化碳排放量（百万吨）
燃气发电厂	12	6.2
燃煤发电厂	17	101.5
钢铁厂	7	65.5
水泥厂	10	10.7
石化厂	8	11.3
造纸厂	7	10.6
生物质发电厂	7	0.8
垃圾焚烧厂	4	0.4

从行业结构来看，燃煤发电行业是北部湾区域碳排放的最大来源，占区域总排放量的近 50%（见图 2）；钢铁行业紧随其后，贡献约三分之一的排放份额；水泥、石化和造纸等行业也占有显著比例，年排放量均在 1000 万吨以上（见图 1）。燃气发电厂虽然数量较多，但其年排放总量仅为 620 万吨，相较燃煤电厂显著偏低，体现了其在低碳方面的相对优势。生物质发电厂和垃圾焚烧设施因排放量较小，区域总排放不足 100 万吨，但其在碳负排放路径中的潜力值得关注。

从空间分布来看，碳排放呈现显著的区域集聚特征。广东西部地区为区域内最大排放中心，拥有 27 个排放源，年排放总量达 1.05 亿吨二氧化碳，主要集中于密集的工业与能源基础设施布局。广西南部次之，共计 30 个排放源，年排放量约 8400 万吨。海南省碳排放规模相对较小，共识别 14 个排放源，年排放量约为 1680 万吨。

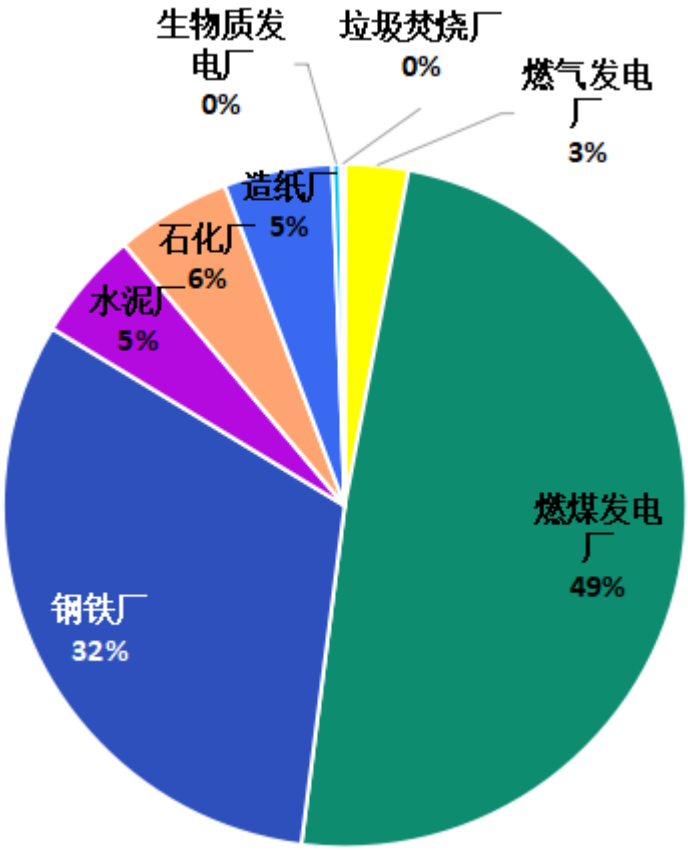


图 2　北部湾区域各行业二氧化碳排放贡献比例

04

北部湾区域
二氧化碳地质封存潜力分析

北部湾盆地形成于始新世早期（约 6500 万年前），初始为陆相沉积环境。在区域沉降与海侵作用的长期影响下，该区域逐步演化为浅海环境，并在湖相、滨海相及海相沉积体系中发育了砂岩储层与页岩盖层交替分布的地层结构。这一地质演化过程塑造了盆地内分层清晰的构造格局，为二氧化碳的安全地质封存创造了有利条件，尤以角尾组（中新世）、下洋组（中新世）、涠洲组（渐新世）及流沙港组（始新世）四个关键砂岩储层为代表。表 5 系统总结了上述地层的基本特征。这些储层具备良好的厚度条件（介于 120 至 212 米之间），且覆盖稳定、封闭性良好的页岩盖层，从而为二氧化碳的长期封存提供了必要的储集能力与安全保障。

表 5　北部湾盆地潜在二氧化碳封存储层地层特征 [8,9]

年代		地层			岩性组成	CO_2 封存储 / 盖层组合	
		地层名称		厚度 (m)		储层	盖层
第四系					泥质砂岩		
上新统		望楼港组		170-603	上部砂岩，下部泥岩		
中新统	晚	灯楼角组		135-491	砂岩		
	中	角尾组		172-900	泥岩砂岩互层		
	早	下洋组		61-724	砂岩		
渐新统	晚	涠洲组	1st	0-3400	泥岩砂岩互层		
	早		2nd				
			3rd				
始新统	晚	流沙港组	1st	0-4400	泥岩砂岩互层		
	中		2nd		泥岩		
			3rd		泥岩砂岩互层		
	早	长流组		0->800	泥岩砂岩互层		
古新统	晚				泥岩		
	早				砂岩与砾岩互层		

8　熊鹏飞 , 方小宇 , 乐文喜 , 等 . 北部湾盆地涠西南凹陷咸水层 CO2 地质封存储盖优选及潜力评估 [J]. 煤炭学报 ,2024,49(05):2405-2413. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2023.0616.

9　SCSIO (South China Sea Institute of Oceanology). Feasibility Study of CCS-Readiness in Guangdong Province, China (GDCCSR) Final Report: Part 2: Assessment of CO2 Storage Potential for Guangdong Province, China[R]. Guangzhou: South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2013.

针对北部湾盆地的二氧化碳地质封存能力，多家科研机构基于不同方法与参数开展了评估工作，结果因空间范围与模型假设不同而存在一定差异。中国科学院南海海洋研究所于 2013 年首次开展评估，认为盆地内各凹陷区深层咸水层的有效封存容量可达 485.6 亿吨 [8]。中国地质调查局水文地质环境地质调查中心（HEGSC）于 2010 至 2012 年间组织实施《中国二氧化碳地质储存适宜性评价与示范工程》，评估结果为 236 亿吨 [10]。青岛海洋地质研究所的封存潜力评估结果显示，在 90% 置信度下，封存潜力为 228 亿吨，在 50% 置信度下为 456 亿吨，反映了地下储层非均质性带来的不确定性 [11]。除了盆地整体的深层咸水层评估外，部分研究还对重点区域进行了精细化分析。例如，湛江湾实验室聚焦涠洲凹陷的角尾组与涠洲组，在优选的砂岩储层中识别出封存适宜性高的地质单元，总潜力为 11.23 亿吨 [7]。

根据北部湾盆地已探明油气田的资源量估算，其有效二氧化碳封存潜力分别为 4230 万吨（封存系数为 0.25）和 6230 万吨（封存系数为 0.63）[12]。目前，北部湾盆地多个沉积凹陷区已发现油气资源，包括涠西南凹陷、乌石凹陷、迈陈凹陷、海中凹陷、福山凹陷和雷东凹陷 [12]。其中，涠西南凹陷已建成南海西部的重要原油生产区，乌石凹陷与福山凹陷的多个油田也已进入开发阶段。李鹏春等人评估了涠西南凹陷中七个油田的有效 CO_2 封存能力，结果显示其总潜力约为 442 万吨 [12]。

10 郭建强 , 文冬光 , 张森琦 , 等 . 中国二氧化碳地质储存适宜性评价与示范工程 [M]. 北京 : 地质出版社 , 2014.

11 Wang J, Yuan Y, Chen J, et al. Geological conditions and suitability evaluation for CO2 geological storage in deep saline aquifers of the Beibu Gulf Basin (South China)[J]. Energies, 2023, 16(5): 2360.

12 Li P, Zhou D, Zhang C, et al. Assessment of the effective CO2 storage capacity in the Beibuwan Basin, offshore of southwestern PR China[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 37: 325-339.

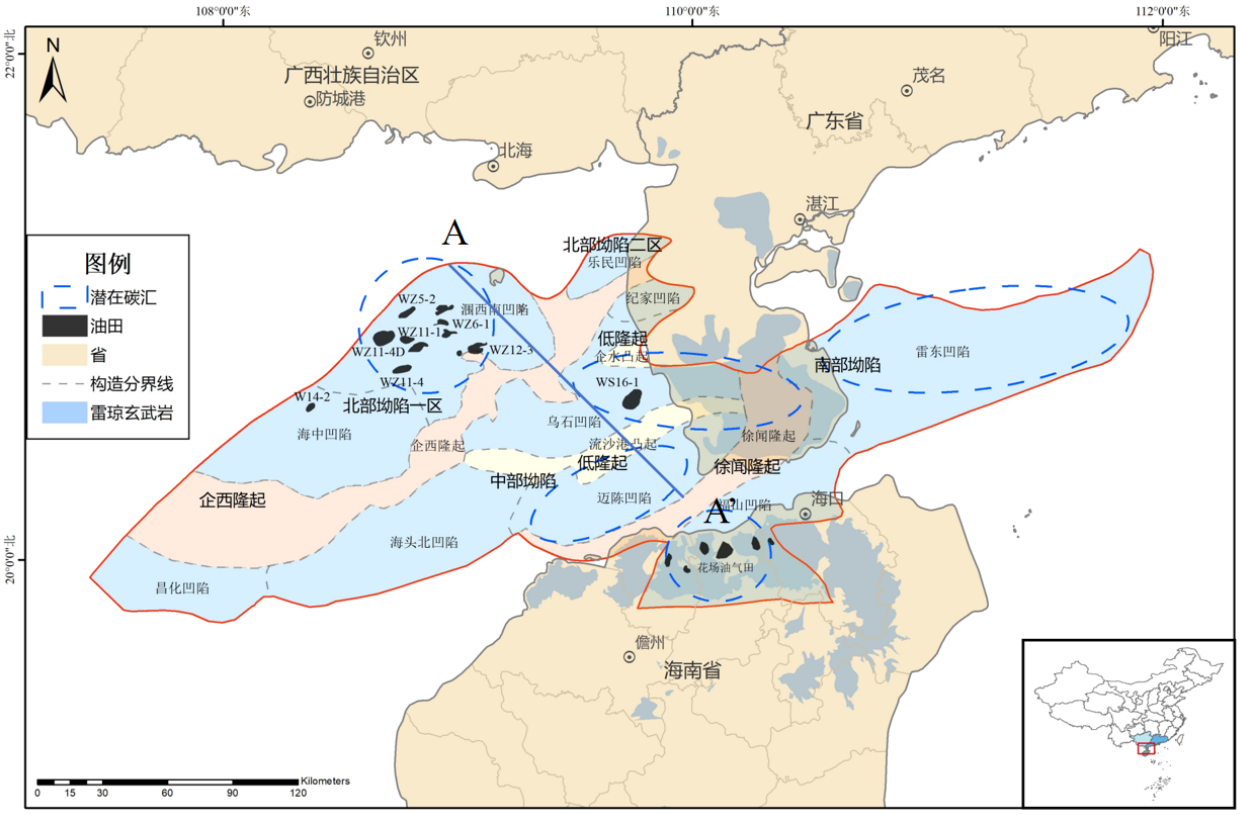


图 3　北部湾盆地潜在碳封存区域、油气田及玄武岩分布图

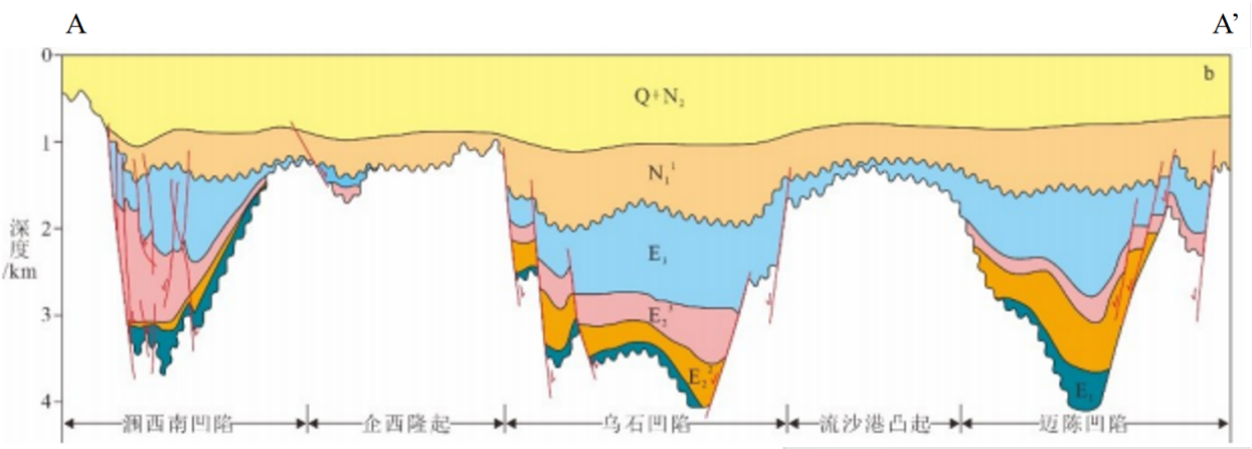


图 4　北部湾盆地地质剖面图 (剖面位置参见图 3)

除了北部湾盆地内的深层咸水层和枯竭油气藏之外，雷州半岛与海南岛的玄武岩区（统称“雷琼火山岩”）也具有重要的二氧化碳封存潜力。雷琼火山岩总覆盖面积约为 8000 平方千米，其中雷州半岛约占 3900 平方千米，海南岛北部约占 4100 平方千米[13]。截至目前，区域内已识别出 177 座火山[13]。雷琼火山岩的地质活动期涵盖中白垩世至全新世（约 1 亿年前至 1 万年前），其成因与北部湾盆地扩张及地壳减薄引发的地幔物质上涌有关。该区域火山活动在中更新世（约距今 78 万至 13 万年）达到高峰，并于全新世逐渐减弱[14]。海南岛最近一次火山喷发发生于马鞍岭火山群，距今约 8000 年[15]。

Carbfix 公司与腾讯已对该区域玄武岩地层的碳封存潜力开展了初步评估工作。评估结果显示，该区域碳封存能力的估算范围在 210 亿吨至 34100 亿吨二氧化碳之间[16]。此外，中国科学院南海海洋研究所开展的相关研究进一步表明，雷州半岛玄武岩的碳封存潜力估算值为 19 亿吨至 459 亿吨二氧化碳[17]。不过，区域地质调查数据显示，由于该地区玄武岩形成时间较晚，多数玄武岩埋藏于 300 米以上的浅部地层。目前，对于埋深超过 300 米的玄武岩地层，仍缺乏系统性的勘探工作。这一浅埋特征引发了关于玄武岩层厚度与埋深是否满足工程封存技术要求的关切，也成为未来研究与实地调查的关键方向之一。

13 陶奎元 . 中国雷琼世界地质公园 [J]. 资源调查与环境 ,2007,(03):223-227.

14 黄镇国 , 蔡福祥 , 韩中元等 . 雷琼第四纪火山 [M]. 北京 : 科学出版社 , 1993.

15 白志达 , 徐德斌 , 魏海泉 , 等 . 琼北马鞍岭地区第四纪火山活动期次划分 [J]. 地震地质 , 2003, 25(B12):9.DOI:10.3969/j.issn.0253-4967.2003.z1.003.

16 Carbfix and Tencent, Pre-feasibility screening study for CO2 mineral storage potential in China [R], 2021

17 李鹏春 , 江静练 , 程锦辉 , 等 . 广东雷州半岛火山岩二氧化碳矿化封存潜力评估 [J]. 高校地质学报 , 2023, 29(1):76-84.DOI:10.16108/j.issn1006-7493.2022078.

05

北部湾 CCUS 集群部署分析

北部湾盆地周边能源与工业领域的碳排放源呈现显著的空间集聚特征，主要分布在广东湛江、广西北海、防城港、钦州，以及海南海口、儋州等临港工业区，具备优越的 CCUS 集群部署条件。基于排放源的空间分布、产业布局及区域地质特征，本研究建议在北部湾盆地周边布局六个 CCUS 集群，分别为：广东省包括湛江集群与茂名—阳江集群；广西壮族自治区包括钦州—防城港集群与北海集群；海南省则包括海口—澄迈集群与洋浦集群（图 5）。

在粤西地区（图 6），湛江是枢纽城市，同时也是重要的钢铁和石化产业基地。湛江市区周边分布着 10 余个大型二氧化碳排放源，年排放总量超过 3000 万吨。依托该区域的高密度排放特征，建议布局湛江 CCUS 集群，通过建设约 60 公里长的二氧化碳输送管道，将捕集的二氧化碳输送至北部湾盆地东部适宜封存区域。该集群的集中化布局有助于实现规模效应，显著降低单位碳捕集与封存成本。

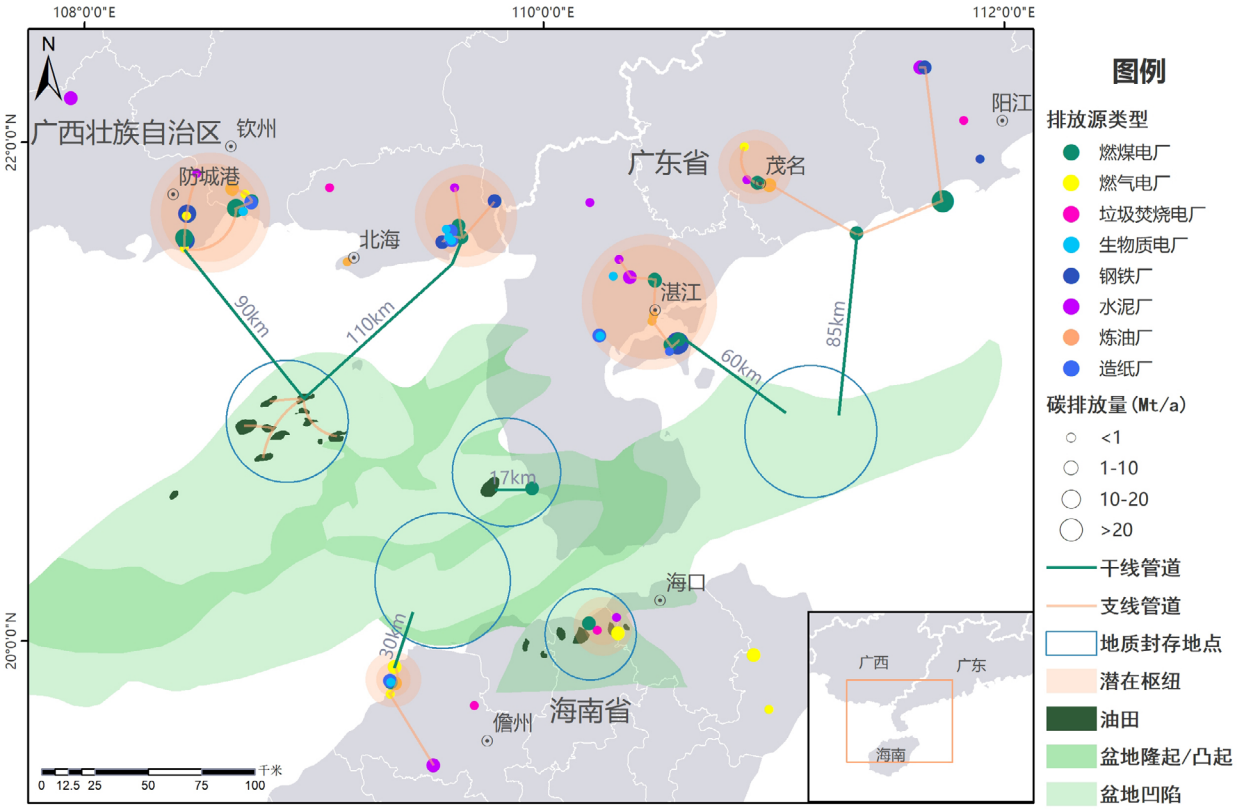


图 5　北部湾盆地周边 CCUS 集群布局建议

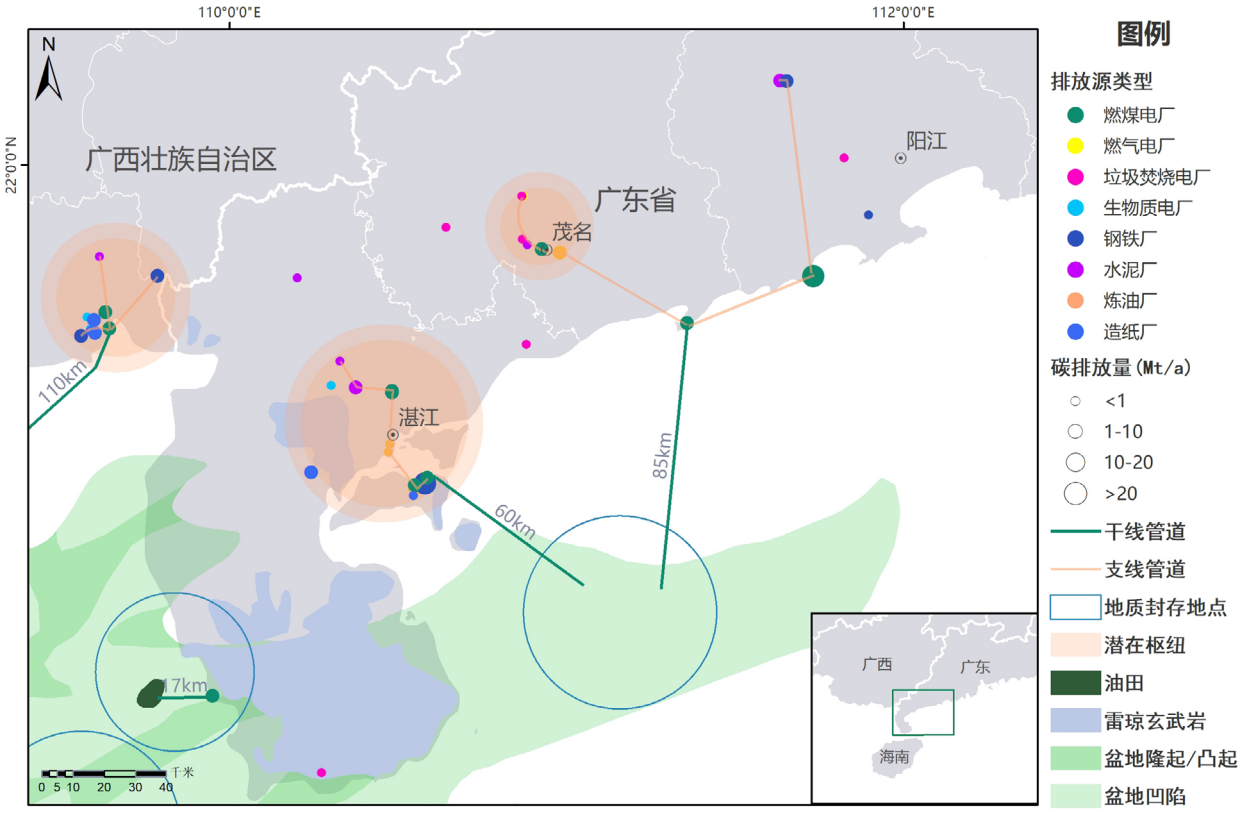


图 6　粤西湛江、茂名与阳江 CCUS 集群布局建议

在茂名和阳江两地，二氧化碳排放源分布相对分散。需构建二氧化碳输送与封存系统以连接沿海排放源，而位于内陆的排放点则需要铺设额外管道或采用槽车等方式，将二氧化碳输送至沿海主干管道网络。

广西（图 7）防城港毗邻，排放源高度集中，共同构成一个以能源与钢铁行业为主的重要工业集群，年碳排放总量接近 6000 万吨。北海地区的排放源亦主要分布在港口周边，集群内年排放总量不到 2000 万吨。上述区域的潜在二氧化碳封存目标区位于北部湾盆地东北部的涠西南凹陷。由于该区域油田的封存能力有限，仅达百万吨级别，规模化封存需主要依靠深层咸水层资源。总体而言，钦州、防城港与北海地区碳排放高度集中，为发展规模化 CCUS 集群及相关产业提供了良好基础。

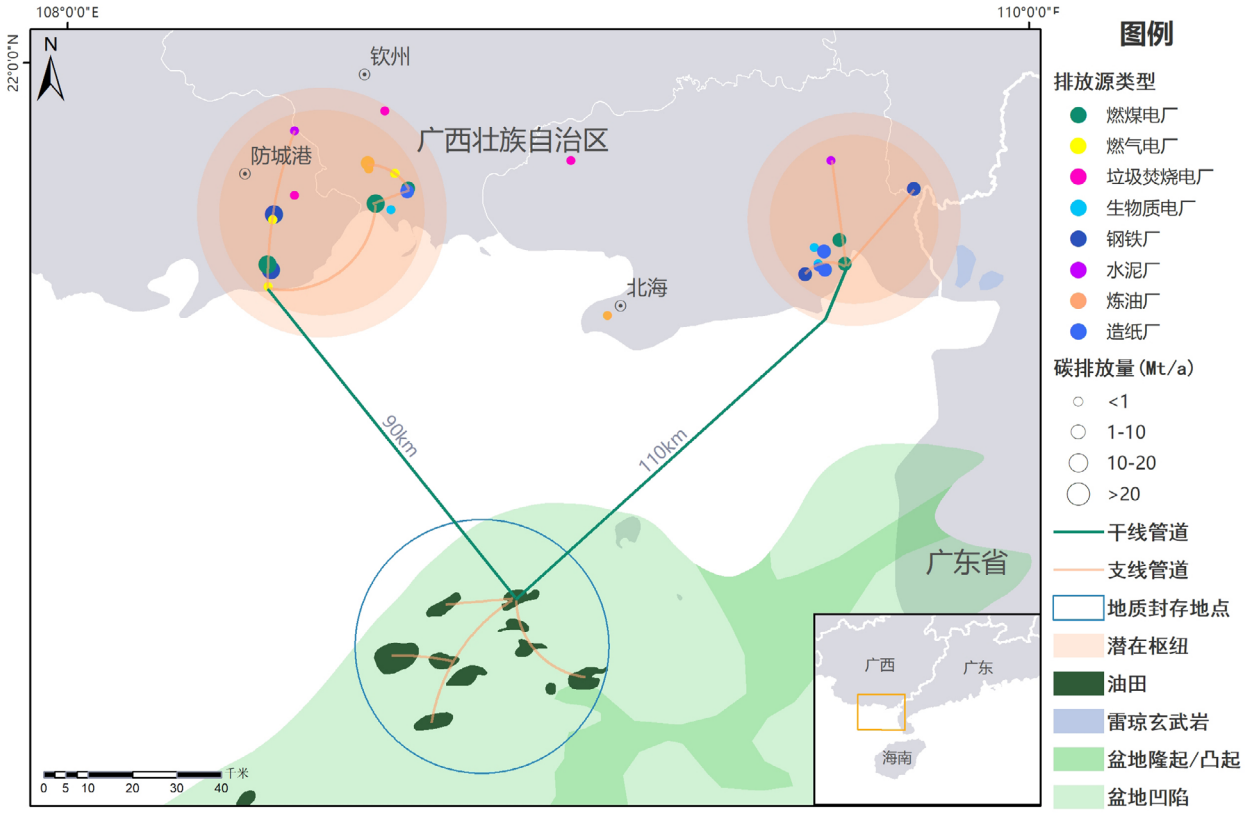


图 7　广西西部北海、钦州与防城港 CCUS 集群布局建议

海南省的海口—澄迈集群排放规模相对较小，年碳排放量为数百万吨，显著低于广东与广西的集群排放规模。该集群周边十公里范围内分布有中国石油天然气集团公司所属的福山油田，该油田计划于 2025 年实现年注入 30 万吨二氧化碳的封存能力。

海口—澄迈集群所在区域陆上封存条件优越，周边分布有丰富的枯竭油气藏与咸水层，可为集群内碳排放源提供充足的封存空间。此外，该地区广泛发育的火山玄武岩层亦具备额外的二氧化碳地质封存潜力。基于上述地质条件，预计该集群未来将主要采用陆上封存方式，这一特点使其在北部湾各集群中具有显著差异。陆上封存虽具备输送距离短、成本较低的优势，但对安全性提出更高要求，因此需制定更为严格的安全标准与监测体系，以保障封存作业的长期可靠运行。

洋浦集群位于海南省儋州市，碳排放主要集中于洋浦经济开发区，以石化与电力行业为主。该区域毗邻北部湾盆地的迈陈凹陷，具备利用区位优势建设二氧化碳输送管道系统的条件。建议规划布局自洋浦石化区至目标封存区、长度约 30-50 公里的管道，以实施地质封存项目。鉴于洋浦经济开发区仍处于快速发展阶段，宜尽早启动二氧化碳捕集、运输与封存项目的前期可行性研究，并为未来 CCUS 基础设施预留建设用地。通过前瞻性规划，有助于在未来有效控制碳减排成本，提升 CCUS 项目的经济性与实施可行性。

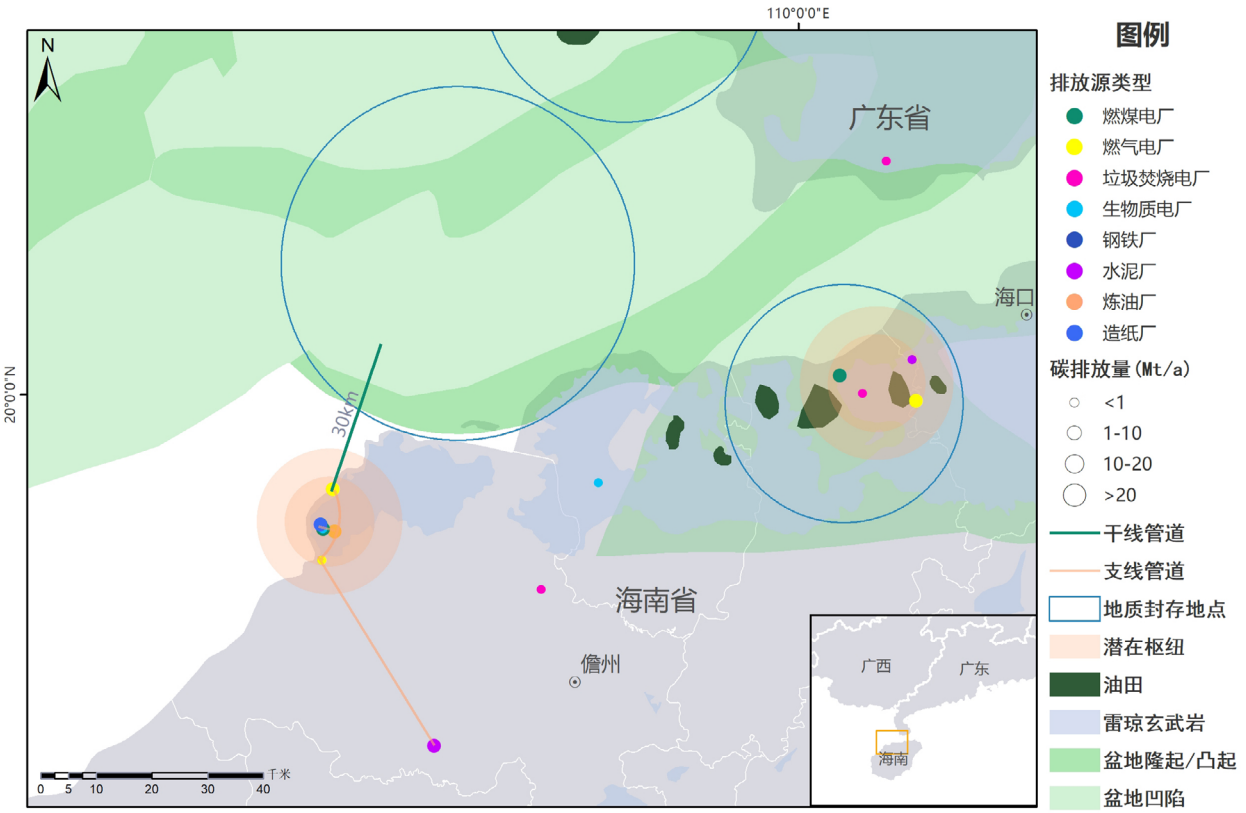


图 8　海南北部海口、澄迈与洋浦 CCUS 集群布局建议



华厦阳西电厂，位于广东省阳江市沿海地区，装机容量达 5000 兆瓦，是北部湾沿岸规模最大的发电基地。



洋浦经济开发区内的中石化海南炼化一体化装置



海南洋浦经济开发区石化产业园区

06

北部湾地区 CCUS 集群商业运营模式研究

6.1 CCUS 集群的商业运作模式分析

CCUS 集群项目通常具有资金密集、跨行业协作复杂的特点，其成功实施依赖于多方主体的深度协同。借鉴欧美等地区 CCUS 集群的发展经验，在项目的前期规划与具体实施阶段，政府发挥着关键的主导作用。政府通过制定区域层面的战略发展规划，同时出台配套的政策体系，包括财政补贴、税收优惠以及风险共担机制等，能够在很大程度上缓解私营企业的资金紧张状况，增强其参与项目的意愿与能力。这不仅有利于加快 CCUS 集群的布局建设速度，还能显著提升 CCUS 集群项目的整体经济可行性与长期可持续运营能力。

综合全球 CCUS 集群案例实践，其发展历程中已形成三类具有代表性的商业模式 [18]：

（1）运输与封存（T&S）运营商模式：该模式下，由专业运营商承担整个 CCUS 产业链中的二氧化碳运输与地质封存职责，形成枢纽、管道、封存设施一体化的运营体系（图 9）。通过统一管理运输网络与封存资源，该模式有效降低各个环节之间的协调成本，提升项目整体实施效率，尤其适用于 CCUS 产业发展的初期阶段，可显著加快项目落地速度并提升运营效率，进而实现全系统效能优化。目前，该模式已成为欧洲多个大型 CCUS 项目的核心架构，典型案例包括：（1）英国东海岸集群：由英国石油（bp）、挪威国油（Equinor）和道达尔能源（TotalEnergies）组成的北方耐力合作伙伴联盟（Northern Endurance Partnership）担任运输与封存运营商；（2）英国 HyNet 集群：意大利埃尼集团（Eni）作为指定运输与封存运营商；（3）荷兰 Porthos 项目：由荷兰国家石油公司（EBN）、荷兰天然气基础设施公司（Gasunie）和鹿特丹港务局联合运营；（4）挪威北极光项目：由 Equinor、壳牌（Shell）和道达尔能源共同组建的北极光合资公司（Northern Lights JV）负责管理。

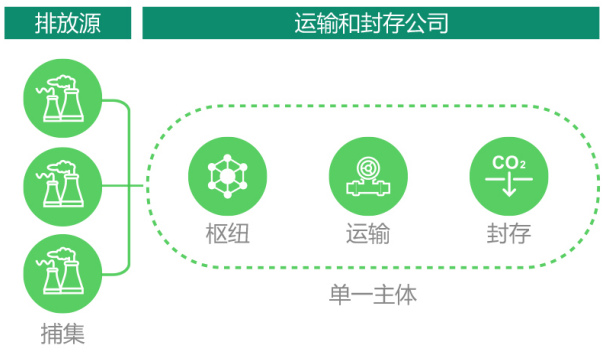


图 9　运输与封存运营商模式示意图

18　Fattouh B, Muslemani H, Jewad R. Capture carbon, capture value: An overview of CCS business models[M]. OIES Paper: CM, 2024.

（2）分段责任共担模式：该模式的特点是CCUS 产业链各环节参与方职责明确划分，其核心架构包含一个独立运营的枢纽设施，作为二氧化碳的集散与再分配中心（图 10）。该枢纽作为系统中介，可协调多个下游运输与封存运营商提供差异化服务，形成互补竞争格局。尽管目前尚无完全落地的 CCUS 集群采用此模式，但其被视为更成熟的架构方案——允许排放企业根据成本效益、服务质量和技术适配性灵活选择运输封存服务商。英国东海岸集群的亨伯河（Humber）区域提供了典型案例：在规划中的两条并行运输封存系统路线中，伊明汉姆（Immingham）被设定为枢纽节点。其中一条是 Harbour Energy 运营的“Viking 碳运输封存系统”（Viking Carbon Transport and Storage），另一条则由北方耐力合作伙伴联盟（NEP）管理。此外，英国能源安全与净零部（DESNZ）在《CCUS 竞争性市场建设愿景》（2023）中明确提出，第二阶段战略将引入二氧化碳运输封存经济许可分配新机制[19]。该机制旨在扩大运输封存运营商参与范围，从而提升系统灵活性与运营效率。

(3) 自由市场模式：在该模式下，碳捕集企业可灵活选择多个枢纽节点、运输服务商及封存运营商（图 11）。所有参与方基于市场需求与价格信号进行决策，通过市场机制实现资源的最优配置。此模式体现了 CCUS 集群的高水平发展阶段，在碳运输与封存领域形成竞争性市场。具体而言，碳捕集项目可通过多种运输方式（如管道、船舶等）连接多个封存场地，显著提升系统

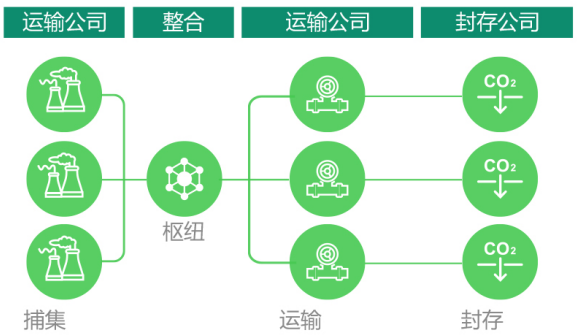


图 10　分段责任共担模式

19 Department for Energy Security and Net Zero. Carbon capture, usage and storage: a vision to establish a competitive market[EB/OL]. (2023-12-20)[2025-06-10]. https://www.gov.uk/government/publications/carbon-capture-usage-and-storage-a-vision-to-establish-a-competitive-market.

的灵活性与可扩展性。整个体系由市场机制主导，政府干预程度较低，主要通过制定市场规则和提供政策引导来保障市场公平与稳定。

在上述商业模式框架下，政府可通过多元化财政激励措施推动 CCUS 集群发展，具体包括：前期规划研究资助；投资成本一次性补贴；运营成本定期补贴；税收优惠政策以及建立碳价保障机制（即当碳市场价格低于预设基准值时，政府提供补贴以弥补差额）。

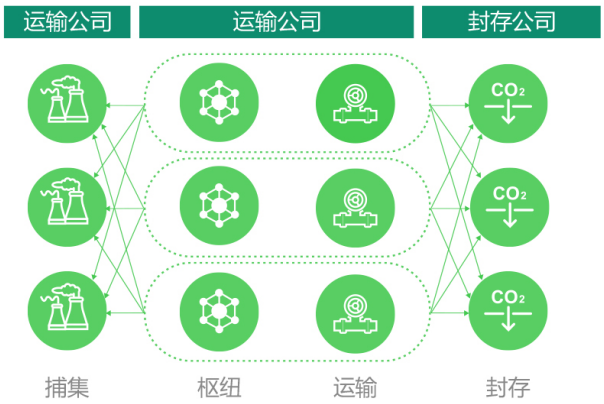


图 11　自由市场模式



6.2 北部湾区域 CCUS 集群商业模式建议

在目前碳定价机制尚不健全、监管政策体系尚不明确的背景下，为碳排放企业及碳运输与封存基础设施开发主体构建具有可行性的商业模式，已成为 CCUS 项目推进过程中的一项重大挑战。为应对这一系统性难题，需针对 CCUS 项目全生命周期各阶段——包括项目规划、开发建设、实施运营等环节——提供多层次、差异化的支持体系。该体系应涵盖财政激励、技术支持、监管指导与市场培育等多个维度，以有效降低项目风险，提升投资吸引力。

同时需要认识到，CCUS 集群的发展具有明显的阶段性特征，各阶段在技术需求、资金结构和政策支持方面呈现出显著差异。为便于深入分析，本研究将集群发展划分为两个关键时期：集群孵化期与集群成熟期。本节将聚焦北部湾区域实际情况，针对不同发展阶段提出相应的商业模式构建方案，旨在推动该地区 CCUS 技术的规模化应用与可持续发展。

6.2.1 集群孵化阶段

在集群孵化阶段，市场机制尚未完善，基础设施相对薄弱，此时政府的积极介入与持续承诺对推动 CCUS 集群发展具有决定性作用。从全球实践来看，各国政府对早期 CCUS 产业的支持政策呈现出多元化特征，形成了各具特色的政策体系。

在北美地区，美国与加拿大均采用以税收抵免为核心的支持机制，为 CCUS 项目提供普惠性政策支持。美国通过《通胀削减法案》(IRA) 及《国内税收法典》第 45Q 条款，构建了全国统一的 CCUS 项目支持框架（见表 6）。具体而言，对实施点源捕集与地质封存的项目，联邦政府将提供每吨 85 美元的税收抵免额度。在加拿大，政府于 2024 年推出了针对 CCUS 项目的税收抵免政策。对于 2030 年前产生的符合条件的 CCUS 项目资本支出，碳捕集项目投资成本的 50% 以及运输和封存基础设施投资成本的 37.5% 可享

受税收抵免（见表 6）。此外，阿尔伯塔省还配套推出《阿尔伯塔碳捕集激励计划》（ACCIP），为新建 CCUS 项目的合格资本支出提供 12% 的财政补助，形成了联邦与地方政府协同支持的政策格局。

在欧洲，多个国家日益认识到 CCUS 在实现净零排放目标中的不可或缺性，并纷纷为 CCUS 项目提供有力的政策措施。相较于北美以税收激励为主的模式，欧洲更侧重于财政直接补贴与竞争性资金支持的结合，政策导向更具系统性和阶段性特征。在英国、挪威、荷兰和丹麦，政府已出台明确政策，为大型 CCUS 项目和 CCUS 集群的投资和运营成本提供财政补贴（各国具体政策详见表 6）。德国和法国也发布了国家 CCUS 战略，均提及未来将采用碳差价合约（CCfDs）来补贴 CCUS 项目（表 6）。

欧洲国家的补贴机制呈现出两大鲜明特点。首先，普遍采用竞争性资金分配机制，要求项目方通过提案竞争获取政府资助。这种设计旨在通过充分竞争，以最低成本实现最大减排效益。例如，英国政府通过多轮筛选，从各地区提交的集群提案中择优选定四个 CCUS 集群或二氧化碳运输封存项目予以重点支持，具体支持力度通过政府与企业间的个别谈判确定。荷兰与丹麦同样采用公开招标与竞争性选拔机制分配 CCUS 项目资助。其次，建立了完善的项目收益保障机制。鉴于未来碳市场价格存在不确定性，英国、法国与德国等国引入碳差价合约机制，为 CCUS 项目提供收益托底保障。该机制通过政府与企业签订长期合约，承诺当实际碳价低于约定基准时由政府补足差额，有效降低了项目面临的收益风险，为投资者提供了稳定的财务预期。

表 6　各国培育 CCUS 集群的现行政策

序号	国家	支持政策
1	美国	《通胀削减法案》（IRA）和《国内税收法典》第 45Q 条款为 CCUS 项目提供丰厚激励，具体包括: • 点源捕集结合地质封存：85 美元 / 吨 • 点源捕集结合强化采油 / 利用：60 美元 / 吨 • 直接空气捕集（DAC）结合地质封存：180 美元 / 吨
2	加拿大	•2024 年 6 月通过《C-59 法案》，将 CCUS 投资税收抵免纳入《所得税法》。2022–2030 年间符合条件的资本支出抵免率为：直接空气捕集 60%，其他捕集方式 50%，运输、封存与利用 37.5%。2031 年至 2040 年，所有项目的 ITC 抵免率将减半 [20]。 • 阿尔伯塔碳捕集激励计划（ACCIP）对新增合格 CCUS 资本支出提供 12% 补助 [21]。
3	英国	•2023 年春季预算承诺未来 20 年提供最高 200 亿英镑 CCUS 专项资金。 • 英国政府在评估各项提案后，决定资助两个 CCUS 集群（东海岸集群和 HyNet）以及两个二氧化碳运输与封存项目（Acorn 和 Viking）。 • 工业碳捕集（ICC）合同：对于碳捕集项目，政府将通过 ICC 合同提供激励，根据捕集的二氧化碳量提供收入支持。根据合同约定的支付条款，该收入支持将用于覆盖资本支出、运营成本以及二氧化碳运输和封存费用 [22]。 • 运输与封存公司收入支持计划（RSA）：政府通过收入支持协议（RSA）以两种方式支持二氧化碳运输与封存公司（T&SCo）：若实际收入未达到规定标准，则补偿收入缺口；同时覆盖因用户连接延迟导致的运营损失和资产折旧 [23]。

20 Canada Revenue Agency. Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Investment Tax Credit (ITC)[EB/OL]. (2024-10-18)[2024-12-19]. https://www.canada.ca/en/revenue-agency/services/tax/businesses/topics/corporations/business-tax-credits/clean-economy-itc/carbon-capture-itc.html.

21 ALBERTA. Alberta Carbon Capture Incentive Program[EB/OL]. (2025-06-10)[2025-06-10]. https://www.alberta.ca/alberta-carbon-capture-incentive-program.

22 Department for Energy Security and Net Zero. Carbon Capture, Usage and Storage. Industrial Carbon Capture business models Update for Track-1 Expansion and Track-2[EB/OL]. (2024-04)[2025-06-10]. https://www.gov.uk/government/publications/carbon-capture-usage-and-storage-ccus-business-models.

23 Department for Energy Security and Net Zero. Carbon Capture, Usage and Storage: An update on the business model for Transport and Storage - explanatory note and indicative heads of terms [R]. 2023.

4	挪威	挪威政府已与参与“Longship”项目的公司签署国家支持协议。根据这些协议，项目将获得直接资助，包括：（i）投资资助，覆盖项目部分资本支出（CAPEX）；（ii）运营资助，覆盖项目部分运营支出（OPEX）[24]。此外，资助还包括对二氧化碳泄漏和 CCUS 全链条相关风险的补偿。投资资助将从项目启动时提供，直至设施建设完成；运营资助将在设施建成后提供 10 年。资金将通过挪威国家预算每年分配。“Longship”项目总成本估计约为 300 亿挪威克朗（约合 26.2 亿美元），其中政府承担的成本估计为 200 亿挪威克朗（约合 17.5 亿美元）[25]。
5	荷兰	可持续能源转型补贴计划（SDE++）旨在弥补 CCUS 技术成本与欧盟排放交易体系（ETS）碳价之间的差额，为项目提供差异化支持。该计划采用竞争性补贴机制，项目减排成本越低，获得补贴的优先级越高。在 2024 年度的申请中，SDE++ 设置了五个补贴等级，对应补贴标准分别为每吨二氧化碳 75 欧元、150 欧元、225 欧元、300 欧元和 400 欧元 [26]。
6	丹麦	丹麦政府为 CCUS 项目提供资金支持： • 2023 年 5 月，丹麦政府向 Ørsted 公司拨付首笔专项资金，金额为 80 亿丹麦克朗（约合 11 亿美元）。该笔资金将支持该公司自 2026 年起，在为期 20 的时间内，每年从生物质与秸秆发电厂捕集并永久封存 43 万吨二氧化碳 [27]。 • 2024 年 5 月，丹麦设立“负二氧化碳排放基金”（NECCS 基金），总额为 25 亿丹麦克朗（约合 3.5 亿美元）。该基金已与三家企业签署合作协议，计划在 2026 年至 2032 年间，每年捕集并封存共计 160,350 吨生物源二氧化碳 [28]。 • 2025 年 10 月，丹麦能源署宣布启动新一轮 CCS 项目招标机制，拟分配资金总额达 287 亿丹麦克朗（约合 40 亿美元），作为丹麦推动碳捕集与封存技术部署的第三轮财政支持。该资金将在 15 年内分阶段拨付，预计自 2030 年起实现每年减排二氧化碳 230 万吨 [29]。

24 EFTA Surveillance Authority, The Full-Scale CCS Project [R]. 2020.

25 GASSNOVA. State Support Agreements in Longship[EB/OL]. (2025-05-20)[2025-05-20]. https://ccsnorway.com/state-support-agreements-in-longship/.

26 Netherlands Enterprise Agency. SDE++ Apply[EB/OL]. (2025-02-26)[2025-06-06]. https://english.rvo.nl/subsidies-financing/sde/apply.

27 ENERGISTYELSEN. The first tender of the CCUS subsidy scheme has been finalized: the Danish Energy Agency awards the contract to Ørsted's full scale CCS project[EB/OL]. (2025-05-15)[2025-01-30]. https://ens.dk/en/press/first-tender-ccus-subsidy-scheme-has-been-finalized-danish-energy-agency-awards-contract.

28 Energistyrelsen. Three new CCS projects have been pledged support to capture and store biogenic CO2[EB/OL]. (2024-04-17)[2025-01-09]. https://ens.dk/en/press/three-new-ccs-projects-have-been-pledged-support-capture-and-store-biogenic-co2.

29 Energistyrelsen. Danish Energy Agency presses the start button for billion-dollar tendering procedure for carbon capture and storage[EB/OL]. (2024-10-09)[2025-01-09]. https://ens.dk/en/press/danish-energy-agency-presses-start-button-billion-dollar-tendering-procedure-carbon-capture.

7	瑞典	瑞典以竞争性拍卖机制对生物质碳捕集与封存（BECCS）项目提供国家援助。该计划预算总额为 30 亿欧元（约合 32 亿美元），资金将在 2026 年至 2046 年间逐步拨付，并于 2028 年 12 月 31 日前通过招标程序完成项目授予 [30,31]。首轮拍卖已于 2024 年 8 月至 11 月期间组织实施。 援助范围覆盖项目资本支出与运营成本，支持周期为自实现首吨生物源二氧化碳永久封存之日起 15 年。项目须在三年内启动生物源二氧化碳封存作业，并可根据实际情况申请延长两年执行期限。申请企业须为在瑞典境内运营、排放生物源二氧化碳并实施 CCS 项目的实体，且年捕集能力不低于 5 万吨。 为防范重复补偿，若受益方通过出售 CCS 信用额度获得市场收益，相应金额将从国家援助中予以扣除。
8	法国	法国政府已制定国家 CCUS 战略，明确到 2030 年实现年捕集二氧化碳 400 万至 800 万吨的目标，并在若干重点工业集群内建成集成化 CCUS 枢纽 [32]。为保障战略目标的顺利达成，政府拟通过为期 15 年的碳差价合约机制，为工业领域的 CCUS 项目提供长期财政支持。该机制将依据碳市场价格与二氧化碳捕集、运输及封存全过程成本之间的差额，对项目进行动态补偿，以降低技术应用的经济风险，激励企业投资部署低碳创新技术 [33]。
9	德国	德国政府已发布《联邦碳管理战略关键原则》，强调 CCUS 技术在实现气候中性目标中不可或缺的作用 [34]。为落实该战略，《工业与气候行动联邦支持资助指南》（FRL BIK）草案中专门增设了 CCUS 资助模块。根据该指南，公共资金将在特定条件下优先支持水泥等难以减排的工业领域以及垃圾焚烧行业中无法避免的排放问题。对于能够显著减少工业过程排放的 CCUS 项目，将有资格申请碳差价合约作为财政支持机制。

30 European Commission. Commission approves €3 billion Swedish State aid scheme to support the roll-out of biogenic carbon dioxide capture and storage[EB/OL]. (2024-07-02)[2025-02-06]. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_3583.

31 ARGUS. Swedish Energy Agency opens BECCS reverse auction[EB/OL]. (2024-08-28)[2025-02-06]. https://www.argusmedia.com/zh/news-and-insights/latest-market-news/2602382-swedish-energy-agency-opens-beccs-reverse-auction.

32 The Directorate General of Enterprises. Déploiement de la capture, du stockage et de la valorisation du carbone (CCUS) en France[EB/OL]. (2024-07-04)[2025-02-06]. https://www.entreprises.gouv.fr/la-dge/actualites/deploiement-de-la-capture-du-stockage-et-de-la-valorisation-du-carbone-ccus-en.

33 French Government. State of the art and perspectives of CCUS deployment in France[R]. Paris: The Directorate General of Enterprises, 2024.

34 Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK). Key principles of the Federal Government for a Carbon Management Strategy[R]. Berlin: Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK), 2024.

6.2.2 集群成熟阶段

集群成熟阶段的特征是 CCUS 集群已实现多年稳定、安全的运行。在此阶段，由于“干中学”效应的持续积累以及规模经济的逐步实现，CCUS 项目的单位二氧化碳减排成本预计将显著下降。同时，随着技术的广泛验证与广泛应用，其减排效果已获得充分证实，由此带来的技术、政策及市场风险大幅降低。相较于集群培育阶段，成熟阶段的碳市场亦趋于完善，碳价格预期将更为合理且具备持续性，从而为 CCUS 项目提供更强的经济可行性支持，推动其实现自我可持续发展。然而，随着捕集项目对封存地点选择选项的增多，以及多个 CCUS 集群之间在二氧化碳运输与封存服务方面的竞争加剧，市场结构将更加复杂，对资源配置效率和监管能力提出更高要求。

碳市场在推动 CCUS 项目自我可持续发展的过程中发挥关键作用。目前，全球范围内尚无成熟碳市场将 CCUS 项目所实现的碳减排信用纳入其核心配额交易机制。尽管美国加利福尼亚州碳市场与加拿大阿尔伯塔省碳信用体系在部分机制设计上具有借鉴意义（参见表 7），相关实践经验仍处于起步阶段。未来数年，建立适配 CCUS 项目的碳信用认定与交易机制，将成为推动该技术商业化发展的关键领域。

为实现从集群培育阶段向成熟阶段的平稳过渡，需相应出台能够体现政府角色与私营部门职责调整的政策框架。CCUS 集群将逐步由依赖公共财政支持的模式，过渡至以市场驱动为主导的发展路径。在此背景下，建议政府通过以下措施加强制度建设和监管优化：

- 制定有利于吸引私人资本进入 CCUS 领域的法规与制度框架；
- 设计政府资金有序退出的路径，并推动碳市场机制为 CCUS 集群的长期稳定运行提供支持，同时建立机制有效应对碳价格波动带来的运营风险；
- 着力优化监管体系，提升集群运行效率，包括合理设定二氧化碳运输与封存基础设施的准入标准，促进更多合格市场主体参与；
- 制定负排放 CCUS 技术专项发展战略，覆盖生物质能碳捕集与封存（BECCS）、直接空气捕集（DAC）等关键技术路径。

表 7　全球碳排放交易体系中 CCUS 项目碳信用纳入政策现状

序号	地区 / 国家	相关政策
1	美国加利福尼亚州	在加利福尼亚州的《低碳燃料标准》（LCFS）体系下，符合碳交易条件的 CCUS 项目运营商主要分为两类。第一类为承担强制合规义务的企业（如炼油厂及油气设施），其开展的碳捕集与封存项目须依规申请减排信用额度，并须满足项目规模、选址与实施时间等方面的限制。第二类为自愿参与的市场化运营商，它们虽无法定义务，但可通过投资 CCS 项目并出售所产生的减排量来获取经济收益。
2	加拿大阿尔伯塔省	2023 年 1 月，加拿大阿尔伯塔省在其《工业设施温室气体排放限值与抵消条例》体系中，为碳捕集与封存项目引入了两项核心机制：“捕集认可吨数”（Capture Recognition Tonnes）与“封存信用额度”（Sequestration Credits）。其中，“封存信用额度”代表通过地质封存二氧化碳所获得的排放抵消单位；而“捕集认可吨数”则允许纳入该体系的大型排放企业或自愿参与者，将封存信用额度折算为相应吨数，并从其净排放量中予以扣除，从而履行或减轻其在 TIER 体系下的减排责任。

在该阶段，一个成熟的 CCUS 集群应具备在区域内以具有市场竞争力的成本提供二氧化碳捕集、运输与封存服务的能力，并能够在国内及国际碳市场中出售经认证的低碳信用额度，从而实现经济上的可持续运行。基于区域地质条件和区位优势，我们认为北部湾地区在构建多个 CCUS 集群的二氧化碳运输与封存体系方面具有显著的先天优势。随着 CCUS 技术的广泛应用，华南地区其他具备改造条件的高排放产业或将基于成本优化的考虑，逐步向该区域进行一定程度的产业转移。在碳中和目标的推动下，依托 CCUS 技术的规模化应用，北部湾区域有望发展成为华南地区日益重要的低碳工业枢纽和经济增长极。

07

政策建议

为推动 CCUS 产业及集群的发展，政府应在制度建设与政策引导方面发挥关键作用，主要履行以下三项核心职责：一是构建有利于 CCUS 发展的监管与法律体系；二是统筹协调 CCUS 集群相关利益主体；三是制定和实施激励机制，以支持早期示范项目的顺利启动。与此同时，企业应承担相应的实施责任，包括深入探索技术可行、成本可控、效益显著的项目方案，在有限投资条件下实现最大限度的二氧化碳减排；同时，应加强与政府部门的沟通协作，及时反馈项目实施进展、面临的问题以及政策调整需求，为政策优化提供实践依据。

鉴于政府在推动 CCUS 产业发展中具有不可替代的主导作用，现建议政府考虑以下关键政策举措：

(1)开展 CCUS 中长期发展规划研究

- 启动 CCUS 产业及集群规划研究工作，着重解决 CCUS 集群封存地点的选址、管道铺设路线规划以及成本分摊机制等问题。明确 CCUS 项目在实现 2060 年碳中和目标过程中的阶段性目标与时间安排。通过系统规划，有助于提升技术部署效率，降低碳减排综合成本。
- 基于规划研究成果，科学设定区域层面的 CCUS 发展指标，强化碳捕集与封存作为关键技术路径在国家和地区减排战略中的定位，体现政府推动该技术规模化应用的战略决心。

(2)探索因地制宜的 CCUS 商业模式

- 建议设立专门机构或指定主管部门，统筹协调 CCUS 全链条各环节的规划与实施。可参考挪威政府设立国有公司 Gassnova 作为 Longship 碳捕集与封存项目整合方的经验，强化政府在项目推进中的组织与协调职能。
- 应系统研究并确立产业链各主体之间的协同机制。借鉴欧洲 CCUS 集群的发展模式，可明确划分碳排放方与运输封存运营商的权责边界，并引入具备成本效益的激励方式，例如支持企业申报低成本 CCUS 方案并参与政府资金竞标，或采用差价合约等市场化工具以保障项目收益。
- 建议建立长期二氧化碳封存责任的风险分担机制。可通过设立行业性保险计划或区域性专项基金等方式，为封存场地在运营期及移交后的长期安全提供财务保障，从而有效分担因封存责任可能导致的个体企业风险，增强项目的可持续性与可投资性。

(3)构建支持 CCUS 项目与集群发展的监管框架

- 制定适用于碳捕集与封存项目的审批程序，明确各阶段审批责任主体与时限要求，提升项目审批效率，降低制度性交易成本。
- 强化政府资金与社会资本的协同配置，厘清国家补贴与私人投资在 CCUS 项目不同阶段的功能定位与合作模式，推动形成可持续的融资机制。
- 探索二氧化碳地质封存与石油、天然气及矿产资源开发之间的空间协调管理机制，避免地下资源利用冲突，保障封存安全与资源开发的协同发展。
- 完善项目全生命周期监管制度，特别是在二氧化碳注入完成后，应建立制度安排，将长期监测与监管责任从项目运营方逐步转移至政府主管部门，保障长期封存的安全性与公共责任的有序承接。
- 建立风险分担与保障机制，可通过设立政府主导的专项基金或引入商业保险机制，为 CCUS 项目在建设与运营过程中可能面临的重大环境与技术风险（如泄漏、地质不稳定等）提供制度化保障。
- 加强技术研发支持，根据区域 CCUS 项目的技术瓶颈与发展需求，合理配置研发资金，支持关键技术研发与工程化应用，提升本地技术能力与项目经济性。
- 加强区域和国际合作，积极参与国际 CCUS 合作机制，借鉴英国、挪威、荷兰和丹麦等国在 CCUS 集群建设方面的经验，促进技术交流、政策互鉴与项目联合示范。
- 建议加强与省级及国家层面主管部门的沟通协调，推动在北部湾盆地设立 CCUS 集群示范区，打造集技术研发、工程示范、政策创新于一体的综合性平台，为全国 CCUS 规模化发展提供实践样板。

08

北部湾区域 CCUS 商业机遇

当前，北部湾盆地的 CCUS 产业及集群发展尚处于初期探索阶段，社会各界对 CCUS 技术的认知仍需深化，系统性规划与前期研究工作有待进一步加强。在中国承诺于 2060 年前实现碳中和的背景下，该区域在推动 CCUS 发展方面既面临艰巨任务，也蕴含巨大潜力与广阔的商业机遇。这些商业机遇主要体现为以下几个方面：

(1) 北部湾区域亟需围绕碳排放源分布、地质封存条件、源汇匹配路径等开展系统规划研究，包括资源潜力评估、封存适宜性分析、经济性分析等内容。同时，大型 CCUS 项目的可行性研究和初步设计需求上升，为工程咨询、设计和技术服务企业提供了广阔的市场空间。

(2) 围绕区域内重点排放企业，大型碳捕集设施的建设将带动以工程总承包（EPC）模式为主的投资与建设需求。同时，配套建设陆上二氧化碳输送管道、港口装卸设施及海上运输系统，将激活对关键设备与工程服务的市场需求。该领域技术门槛高、投资强度大，是吸引大型能源企业、工程承包商和设备制造商参与的重要商业切入点。

(3) CCUS 项目全链条涉及碳捕集、压缩、运输、注入与监测等多类关键设备，设备采购和制造是项目投资中占比最高的环节之一。推动本地化生产与供应体系建设，尤其是在二氧化碳输送管道、高压压缩设备、海上注入平台及监测仪器等细分领域，有望带动高端装备制造产业发展。

(4) 随着 CCUS 项目逐步落地，碳减排量的真实性、可测量性与可核查性成为项目融资、碳信用交易与政策补贴发放的核心依据。在此背景下，围绕测量、报告与核查（MRV）机制开展的第三方技术服务市场潜力巨大。鼓励本地及外部专业机构提供标准化、可追溯的碳减排量认证服务，不仅有助于提升项目运营透明度，也为碳资产的金融化、市场化奠定基础，推动碳服务产业的健康发展。

附录

首字母缩略词

ACCIP	Alberta Carbon Capture Incentive Program 阿尔伯塔碳捕集激励计划
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage 生物能碳捕集与封存
CAPEX	Capital Expenditure 资本支出
CCfDs	Carbon Contracts for Difference 碳差价合约
CCUS	Carbon Capture, Usage, and Storage 二氧化碳捕集利用与封存
DAC	Direct Air Capture 直接空气碳捕集
EPC	Engineering, Procurement, and Construction 工程总承包
FEED	Front End Engineering Design 前端工程与设计
GPF	Global Partnership Fund 全球伙伴关系基金
HEGSC	Hydrogeology and Environmental Geology Survey Center 水文地质环境地质调查中心
IRA	Inflation Reduction Act 通货膨胀削减法案
ITC	Investment Tax Credit 投资税收抵免
LCFS	Low Carbon Fuel Standard 低碳燃料标准
MRV	Measurement, Reporting, and Verification 测量、报告与核查
Mt	Million Tonnes 百万吨
NECCS	Negative Emissions Carbon Capture and Storage 负排放碳捕集与封存项目
OPEX	Operating Expenditure 运营成本
Pre-FEED	Pre-Front End Engineering Design 预前端工程设计
SCCS	Scottish Carbon Capture & Storage 苏格兰碳捕集与封存中心
SDE++	Stimulering Duurzame Energieproductie en Klimaattransitie 可持续能源转型补贴计划
T&S	Transport and Storage 运输与封存
TIER	Technology Innovation and Emissions Reduction 工业设施温室气体排放限值与抵消条例
UKCCSRC	UK Carbon Capture and Storage Research Centre 英国碳捕集与封存研究中心

关于中英（广东）CCUS 中心

中英（广东）CCUS 中心是在广东省发展和改革委员会指导下，于 2013 年成立的非营利组织。该中心由中国能源建设集团广东省电力设计研究院、英国碳捕集与封存研究中心（UKCCSRC）及苏格兰碳捕集与封存中心（SCCS）共同发起成立。中心致力于在中国推进 CCUS 及其他近零排放技术的研发与应用，助力国家减少温室气体排放、应对气候变化的相关工作。

联系我们

地　　址：广东省广州市黄埔区天丰路一号 D 区 232
联系电话：+86（0）2032117500
网　　址：www.gdccus.org

免责声明

本报告所载内容仅供信息参考及研究分析之用，不构成任何法律、财务、技术或投资建议，亦不可替代专业咨询机构基于具体情形所提供的针对性意见。尽管在编制过程中力求信息准确可靠，版权方不对报告内容的完整性、时效性及其适用于特定用途的能力作任何明示或默示的担保或保证。

本报告基于公开信息、行业交流及内部研究成果编写，所载结论与观点仅为研究团队基于现有资料所作之独立分析，不代表任何所引用的政府机构、企业或其他第三方的立场或政策导向。

版权声明

版权所有 © 2025 中英（广东）CCUS 中心。保留所有权利。

未经版权方事先书面同意，任何个人或实体不得将本报告用于商业目的之复制、分发或传播。允许在注明出处的前提下，为个人学习、研究或内部参考等非商业目的进行合理摘录或使用。