

引文: 文绍牧, 李森圣, 何润民, 等. 中国西南地区CCUS区域中心建设路径与政策建议[J]. 天然气工业, 2024, 44(4): 171-179.
WEN Shaomu, LI Sensheng, HE Runmin, et al. Paths and policy suggestions for the construction of CCUS regional center in southwestern China[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(4): 171-179.

中国西南地区 CCUS 区域中心建设路径与政策建议

文绍牧¹ 李森圣² 何润民² 敬兴胜³ 王盟浩² 胡俊坤³

1. 中国石油西南油气田公司 2. 中国石油西南油气田公司天然气经济研究所 3. 中国石油西南油气田公司发展计划部

摘要: 西南地区正在加快推动成渝地区双城经济圈和国家天然气(页岩气)千亿立方米产能基地等国家战略实施, 面临能源消费量增长硬需求和碳减排硬约束之间的矛盾, 推动 CCUS 产业发展是解决该问题的必由之路, 而建设 CCUS 区域中心是 CCUS 产业规模化、集群化发展的必然趋势, 其中四川盆地是西南地区打造 CCUS 区域中心的最佳选择。为了加快建设中国西南地区 CCUS 区域中心, 系统梳理了国外的经验做法, 分析了其优势和挑战, 结合我国西南地区的 CO₂ 排放及分布情况、封存地质条件、源汇匹配关系, 针对性提出了建设路径和政策建议。研究结果表明: ①打造中国西南地区 CCUS 区域中心具有企业减碳和增产的需求巨大、高耗能行业企业碳源丰富且较为集中、地质封存潜力大且分布集中、源汇匹配情况较好、地方政府积极支持等 5 大优势; ②当前面临的主要问题是缺乏顶层设计和统一规划、缺乏全产业链协同技术攻关的共享平台、缺乏碳减排的激励和约束政策体系等; ③下一步应聚焦 CCUS-EGR、CCS、DACCS 等 3 条路径, 分启动、扩展、规模化发展 3 个阶段打造西南地区 CCUS 区域中心, 形成两个千万吨级产业集群和 3 个百万吨级产业集群, 并比选技术路径和商业化路径。结论认为, 要重点从完善顶层设计, 出台统一的战略规划; 强化科技攻关体系建设, 加快形成技术成熟、经济可行的 CCUS 全链条技术; 强化政策支持、推动国际合作等 3 个方面入手, 加快推动中国西南地区 CCUS 区域中心建设。

关键词: 西南地区; 四川盆地; CCUS; 区域中心; 产业集群; 源汇匹配; 建设路径; 政策建议

中图分类号: TE991.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3787/j.issn.1000-0976.2024.04.017

Paths and policy suggestions for the construction of CCUS regional center in southwestern China

WEN Shaomu¹, LI Sensheng², HE Runmin², JING Xingsheng³, WANG Menghao², HU Junkun³

(1. PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610051, China; 2. Natural Gas Economic Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610051, China; 3. Development Plan Department, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610051, China)

Natural Gas Industry, Vol.44, No.4, p.171-179, 4/25/2024. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: In the southwestern China, the implementation of national strategies such as the Chengdu-Chongqing Economic Circle and the national natural gas (shale gas) productivity base of 100 billion cubic meters is being sped up. Facing the contradiction between the hard demand of energy consumption growth and the rigid constraint of carbon emission reduction, promoting the development of CCUS industry is the only way to solve this problem, while the construction of CCUS regional center is the inevitable trend of CCUS industrial scale and cluster development. Furthermore, the Sichuan Basin is the best choice for the construction of CCUS regional center in the southwestern China. In order to speed up the construction of the center, this paper systematically reviews foreign experiences and practices, and analyzes their advantages and challenges. Then, the construction paths and policy suggestions are put forward specifically based on the characteristics, source-sink matching and current situations of CO₂ and geological storage resources in the southwestern China. And the following research results are obtained. First, there are five advantages in building a CCUS regional center in the southwestern China, i.e., huge demand of carbon reduction and production increase for enterprises, abundant and concentrated carbon sources from high-energy-consuming industrial enterprises, large-scale carbon sink resources, good source-sink matching, and active support from local governments. Second, at present, the main problem in the construction of the center is that there is no top-level design and unified planning, sharing platform for the whole-industry-chain collaborative technological research, and incentive and restrictive policy system for carbon emission reduction. In the next step, it is necessary to focus on three paths of CCUS-EGR, CCS and DACCS, build the southwestern China CCUS regional center via three stages of start-up, expansion, large-scale development, construct two industrial clusters of ten million tons and three industrial clusters of one million tons, and compare and select the technical and commercial paths. In conclusion, the construction of the CCUS regional center in the southwestern China shall be promoted mainly from the following three aspects. Specifically, we should focus on perfecting the top-level design, and issuing unified strategic planning; strengthening the construction of a scientific and technological research system, and accelerating the formation of a technologically mature and economically feasible CCUS whole-chain technology; and enhancing policy support, and promoting international cooperation.

Keywords: Southwestern China; Sichuan Basin; CCUS; Regional center; Industrial cluster; Source-sink matching; Construction path; Policy suggestion

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司软科学研究课题“打造集团公司 CCUS 西南区域产业中心的路径与政策研究”(编号: 中油研 20230134)、中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司科研项目“西南油气田 CCUS 业务商业模式及支持政策研究”(编号: 20230312-03)。

作者简介: 文绍牧, 1972 年生, 正高级工程师, 博士; 现任中国石油西南油气田公司油气田开发首席专家, 主要从事气田开发技术研究和管理工作、新能源技术研究和管理工作。地址: (610051) 四川省成都市成华区府青路一段 3 号。ORCID: 0000-0002-2394-7251。E-mail: wensm@petrochina.com.cn

通信作者: 李森圣, 1988 年生, 高级经济师, 博士, 本刊青年编委; 主要从事天然气价格、双碳与新能源经济研究工作。地址: (610051) 四川省成都市成华区府青路一段 19 号。ORCID: 0000-0001-7168-6378。E-mail: lisensheng@petrochina.com.cn

0 引言

近年来,全球 CO₂ 捕集利用与封存技术 (CCUS) 发展态势迅猛。由于在削减单位成本、降低投资风险以及扩大产业规模等方面的显著优势,CCUS 区域产业中心成为 CCUS 产业规模化、集群化发展的新趋势、新模式。中国西南地区面临能源消费量增长硬需求和碳减排硬约束之间的突出矛盾,CCUS 技术作为融合能源生产供应与涵养生态优势的兜底技术,有望成为西南地区如期实现碳达峰并最终实现碳中和目标的主要手段,将在提高西南地区能源资源供应保障能力、助力如期实现“双碳”目标、构建具有西南特色的新型能源体系中发挥重要作用。位于西南地区的四川盆地及其周边区域在企业减碳和天然气增产方面展现出巨大的需求潜力,该地区不仅拥有高耗能行业的丰富碳源,还广泛分布有咸水层、枯竭气藏等 CO₂ 地质封存场所,为 CCUS 技术的规模化应用提供了巨大的潜力,也是西南地区打造 CCUS 区域中心的最佳选择。然而,当前该区域的 CCUS 产业仍处于技术攻关和项目示范的早期阶段,由于缺乏统一的规划布局以及财税和激励政策,尚未能将资源优势转化为 CCUS 区域中心的建设和发展优势,难以支撑 CCUS 产业的可持续健康发展。因此,迫切需要对西南地区 CCUS 区域中心建设路径开展相关研究,并提出相应的建议。

1 CCUS 区域中心的概念

根据全球碳捕集与封存研究院发布的《CCUS 区域中心手册(2022)》,CCUS 区域中心是指从多个排放源(如重工业和电力企业)收集 CO₂,然后使用公用基础设施进行运输和封存的一种产业形式,与 CCUS 产业集群、产业枢纽的概念紧密联系。CCUS 区域中心可以包含多个集群或枢纽,是 CCUS 技术进入到产业化、规模化发展阶段的一种产物^[1]。CCUS 区域中心的价值链通常包括一个区域中心开发者、多家负责保障捕集和供应 CO₂ 的排放企业以及一家运输和封存公司,后者可以为多个区域中心服务(图 1)。大多数 CCUS 区域中心建立在排放源密集分布的工业集群周围,例如英国的净零提赛德项目和荷兰的鹿特丹项目。少数区域中心处理的排放源在地域上比较分散,这些中心通过管道或船舶从不同地点的排放源收集 CO₂,挪威的北极光中心项目便是这一类型区域中心的典型代表。

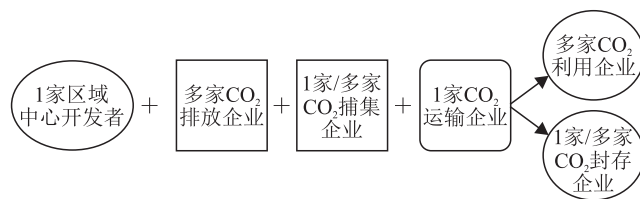


图 1 CCUS 区域中心参与主体示意图

由于较高的投资门槛及较大的运营风险,目前全球 CCUS 产业仍处于商业化的早期阶段,大多数在运行的 CCUS 项目仍然采用“一对一”的简单模式,即 CO₂ 从一个捕集设施运输到一个注入点,整个链条的项目往往由单一运营商承担,导致了高投资成本和较大的跨链风险^[2]。相比之下,建立 CCUS 区域中心能够带来显著的优势,主要包括:单位成本的降低、风险的减少以及规模化效应的扩大^[1,3]。

2 国外建设 CCUS 区域中心的经验启示

2.1 国外 CCUS 产业发展历程

全球 CCUS 产业的发展历程可分为 3 个阶段:探索阶段(1952—1990 年)、政策驱动阶段(1991—2014 年),以及当前的双效驱动阶段(2015 年至今)。在这一过程中,全球 CO₂ 工业碳源捕集能力显著增强,尤其是天然气处理项目占据主导地位,同时其他工业碳源的占比也在稳步上升^[4]。近年来,随着全球对气候变化问题的重视程度不断加深,各国/地区接连提出碳达峰和碳中和的发展目标,CCUS 产业发展形势也呈现新趋势:①在碳达峰、碳中和目标的背景下,CCUS 技术的发展潜力和角色定位得到重新审视。早期的 CCUS 技术定位于“可实现化石能源大规模低碳利用的战略储备技术”,在应对气候变化过程中,CCUS 技术作为实现碳中和目标的一项关键碳减排技术受到广泛关注,CCUS 技术的角色和定位也从侧重资源化利用逐步向碳减排转变^[5-7]。② CCUS 产业规模化和集群化发展渐成趋势。推动 CCUS 产业规模化、集群化发展是降低技术成本的核心举措,也是创新商业模式、争取政策支持的重要基础,为增强规模经济效益,北美与欧洲的 CCUS 项目逐步趋向形成规模化产业集群。

国外以石油公司为产业引领者,与全球 CCUS 产业发展阶段相适应地形成了 3 种产业集群发展模式:①在探索阶段形成了“石油公司碳源+油藏地质封存”的产业集群发展模式,以石油公司高浓度天然 CO₂ 气藏和天然气处理厂生产的 CO₂ 作为主要碳

源、油藏为地质封存场所，典型代表是美国二叠纪盆地和落基山脉两个 CCUS 产业集群；②在政策驱动阶段形成了“工业碳源 + 油藏地质封存”的产业集群发展模式，以非石油公司生产的 CO₂ 为主要碳源、油藏为地质封存场所，典型代表是美国中部和密歇根两个 CCUS 产业集群；③在双效驱动阶段形成了“工业碳源 + 咸水层地质封存”的产业集群发展模式，以各类工业碳源为主要碳源、地下咸水层为地质封存场所，典型代表是欧洲北极光产业集群和净零提赛德产业集群^[4,8-10]。

2.2 国外建设 CCUS 区域中心的主要做法

2.2.1 美国主要做法

美国 CCUS 技术发展处于全球领先地位，在捕集项目数量、捕集规模及 CO₂ 输送管网建设等方面均位居全球第一。受益于以《国内税收法》中的第 45Q 条税收抵免为代表的财政激励政策支持、对技术研发的大力资助以及完善的监管框架（表 1），美国境内大型 CCUS 设施数量居世界之首，全球在运

行的工业规模 CCUS 项目 50% 在美国，总计捕集 2 500×10⁴ t/a，占全球总捕集量的 80%。

2019 年底，美国国家石油委员会（National Petroleum Council, NPC）发布《迎接双重挑战：CCUS 产业规模化部署路线图》报告，计划大规模部署 CCUS 项目^[11]。该报告主要包括以下内容：①发展目标是在 CCUS 产业领域处于全球领先地位，并具有推动 CCUS 项目广泛部署的强大能力；②发展思路是通过启动（未来 5～7 年）、扩张（未来 15 年）和规模化应用（未来 25 年）3 个阶段，实现 CCUS 项目在美国的大规模部署；③投资规划是未来 25 年，美国 CCUS 产业累计投资将达到 6 800 亿美元，其中包括 280 亿美元的基础设施投资，CCUS 产业规模增至 5×10⁸ t/a；④研发资助方面，未来 10 年通过持续的技术研发和示范使 CCUS 技术成本在未来 20 年降低 10%～30%，美国国会拨款 15 亿美元/a 用作 CCUS 技术研发经费，以促进技术开发和示范。在总结过往成功经验基础上，美国国家石油委员会提出了未来实现 CCUS 产业规模化发展的计划路径（表 1）。

表 1 美国 CCUS 产业规模化发展的做法和未来计划路径表

项目	达到当前 CCUS 产业规模的主要做法	未来实现 CCUS 产业规模化发展的计划路径
财政激励机制	①美国国税局在 2008 年实施了最初的《国内税收法》中的第 45Q 条税收抵免条款，提供了有限的财政激励 ②2018 年美国两党预算法修订了 45Q，增加了在安全地质储存中捕获和利用 CO ₂ 用于提高采收率或其他用途的税收抵免	美国国税局将明确 45Q 对信用互换的要求，包括证明安全的地质封存、确定施工开始日期，以及信用回收准备金
监管框架	①美国国家环境保护局于 2010 年实施了监管和许可框架，以确保安全可靠地开展 CO ₂ 地质封存 ②美国国家环境保护局在 2010 年实施了一项 CO ₂ 注入和地质封存的报告计划 美国交通部对 CO ₂ 输送管道的许可和运营实施监管	①美国交通部和各州通过法规，授权进入和使用联邦 / 州土地的孔隙空间进行地质封存 ②美国国家环境保护局应在 6 个月内签发 VI 类钻探许可证 ③美国国家环境保护局在收到完井报告后，应进行审查，进行必要的修改，并在 6 个月内颁发 VI 类注入许可证 ④美国国家环境保护局将按计划对 VI 类井进行定期审查，以配合现场特定的风险以及性能化的设计
技术和能力	①美国能源部在 20 年内为 CCUS 技术提供了 45 亿美元的公私合作资金 ②美国能源部已经在美国和加拿大实施了 19 个小规模的 CO ₂ 注入试点项目和 7 个大规模的 CO ₂ 注入测试项目	①美国能源部将继续对可扩展的陆上和海上地质储层进行确证 ②石油和天然气行业将继续为新兴技术的研发提供达到或者高于当前水平的资金 ③能源部将继续推进公私合作关系，并酌情考虑采用开源方法进行技术开发
利益相关者参与	美国陆上 CO ₂ 地质容量足以承受数百年的固定源 CO ₂ 排放，研究表明，海上储存资源可能同样巨大，EOR 在短期内提供了一个重要的 CO ₂ 储存解决方案，拥有超过 40 年的经验和每年约 2 400×10 ⁴ t CO ₂ 的地质储存量	①政府、行业和相关联盟应设计政策和提供公众参与机会，以促进公开讨论，简化术语，并建立 CCUS 技术是一种安全可靠的排放管理手段的信心 ②石油和天然气行业仍然致力于改善其环境绩效指标，并继续发展环境保护措施 ③油气行业将继续投资 CCUS 技术研发、捕集设施和管道基础设施建设

2.2.2 英国主要做法

英国的 CCUS 产业发展成熟度仅次于美国，是推动 CCUS 产业集群化发展前列的国家。对于在当前技术市场环境下难以盈利的 CCUS 技术，英国搭建了“补贴+市场+研发”的综合性发展道路。此外，多元化的市场主体存在是英国 CCUS 产业蓬勃发展的基础之一。

2022 年，英国政府发布《CCUS 投资路线图》，制定 CCUS 区域中心发展规划^[12]：①发展目标是成为 CCUS 全球技术领导者，到 2030 年部署 4 个 CCUS 产业集群，捕集和封存规模达到 $2\,000\times 10^4$ t/a 以

上。②发展思路是分两个阶段推进产业集群化发展，到 2025 年部署两个 CCUS 产业集群；到 2030 年部署 4 个产业集群，每年捕集和封存 $2\,000\times 10^4\sim 3\,000\times 10^4$ tCO₂。③投资补助包括 2021 年英国政府的 CCS 基础设施基金（CIF）承诺提供 10 亿英镑的公共投资，支持到 2030 年发展 4 个 CCUS 产业集群；2023 年，英国政府发布的《2023 年春季预算》指定了新的资金支持 CCUS 项目发展，拨款 200 亿英镑支持英国各地发展 CCUS 项目。为了支持规划目标实现，英国政府提出了系列 CCUS 产业支持政策工具（表 2）。

表 2 英国 CCUS 产业支持政策工具表

工具	具体内容
CO ₂ 减排履约价的差价合约	提前通过合同约定，根据 CO ₂ 证书中的每吨 CO ₂ 履约价值，支付相对于常规业务所预期的工业碳捕集成本
成本加成补贴	通过政府拨款直接补偿合理发生的运营成本
受监管的资产基础（仅限氢气）	产品价格（氢气）由监管机构来决定，以收回资本和运营成本
可交易的税收抵免	通过工业碳捕集来减少能源密集型行业的税收负担（以每吨 CO ₂ 的价格为单位）。税收抵免可能是固定的，也可能会随着时间的推移逐渐减少。可通过市场交易来实现其全部价值
可交易的 CCUS 证书及义务	CCUS 证书按减排的 CO ₂ 吨数授予，并可出售给其他有排放义务的 CO ₂ 排放者
创建低碳市场	通过认证、公共采购和最终用途法规创建低碳市场，允许低碳商品的价格溢价

2.3 经验启示

1) 规模化、集群化发展是 CCUS 产业未来发展的必然趋势，推动 CCUS 区域中心建设具有必要性和重大意义。相比单一项目模式，CCUS 区域中心模式拥有 3 大优势：更低的成本和投资风险、更多的政府支持、更快地扩大规模。

2) CCUS 区域中心是产业发展到一定程度后的阶段性产物，需要必备 3 个基础条件：①区域内碳源丰富、地质封存潜力大且分布集中、距离适中，源汇匹配性良好；②区域内拥有多年的 CCUS 示范项目经验，拥有可靠的、规模巨大的地质封存容量；③国家和地方政府高度重视，将 CCUS 技术纳入区域低碳/零碳战略的核心地位，并在商业模式和激励政策上给予大力支持。

3) CCUS 区域中心建设的 4 个成功经验做法：①政府的大力支持是基础，越是在区域中心发展的早期阶段，政府产业政策的重要性越是显著，需要根据 CCUS 区域中心建设的阶段提供必要的产业政策，并逐步优化调整。此外，除了国家层面支持，也需要地方政府支持。②多样化的商业模式是重点，市场化机制的作用与政府支持相辅相成，通过探索

适宜性的商业模式推动实现商业化运营。③产业链所有利益相关者共同努力，产业链各环节技术进步、基础设施的建设与共享，均有赖于各方的共同发力。④社会对 CCUS 技术价值主张的理解与认可，社会对 CCUS 技术在低碳/零碳发展战略的作用认可对于产业规模化发展至关重要。

3 中国西南地区建设 CCUS 区域中心的意义

中国西南地区能源生产与生态环境呈现 3 大鲜明特征，决定了必须走能源生产与生态环境高水平融合发展道路：①西南地区正处于工业化中期向中后期转型推进的关键阶段，同时担负着合力建设成渝地区双城经济圈、高质量承接东部沿海地区产业转移等重大任务。这决定了当前及较长一段时期，区域内高耗能企业数量多、碳排放量占比高等特征将长期存在，碳达峰碳中和形势严峻。②西南地区是长江、黄河上游重要的生态屏障和水源涵养地，是全国气候变化的敏感区和影响显著区，极易受气候变化不利影响。同时，该区域内有人口大省、经济大省和清洁能源大

省。这决定了能源生产必须绿色化、低碳化、高效化，并着力构建具有西南地区特色的新型能源体系。③西南地区正在推动国家天然气（页岩气）千亿立方米级产能基地建设，天然气加快增储上产带来区域内天然气全产业链碳排放量的刚性增长，区域内油气企业面临巨大的增产减碳压力。这决定了能源生产必须引入低碳、负碳技术，确保如期实现碳达峰碳中和。

作为融合能源生产供应与涵养生态优势的兜底技术，CCUS 技术将在西南地区绿色低碳转型发展中发挥重要作用：①通过 CO₂ 提高天然气采收率和地质封存（CCUS-EGR）技术，解决老气田提高采收率和枯竭气藏地下空间深度利用的世界级难题；②通过与化石能源以及钢铁、水泥等难以减排行业的耦合，解决化石能源低碳化利用、钢铁水泥行业低碳转型难题；③通过与电力、生物质能源、氢能等行业的耦合，解决多能互补能源供给体系的调峰和储能难题，探索建立“天然气+CCUS”“CCUS+新能源”的西南地区特色新型能源体系^[13]。

4 中国西南地区建设 CCUS 区域中心的优势及挑战

4.1 西南地区建设 CCUS 区域中心的优势

四川盆地具备良好的源汇资源和匹配情况，是当前西南地区打造 CCUS 区域中心的最佳选择，其优势包括：

1) 企业减碳和增产的需求巨大。以油气田企业为例，按照国家天然气（页岩气）千亿立方米级产能基地建设部署，2035 年之前，四川盆地都在加快天然气增储上产，上产气田碳排放量刚性增长，通过 CCUS 技术大规模减碳，是区域内油气企业按时实现碳达峰目标的少数选择之一。此外，CCUS-EGR 技术增产前景广阔，当前处于开发中后期气藏的剩余可采储量达数千亿立方米，预期可增产天然气量超百亿立方米。

2) 高耗能行业企业碳源丰富且较为集中。以四川盆地所在的四川省和重庆市为例，2022 年，四川省和重庆市 CO₂ 排放量合计约 5×10^8 t，其中火电、钢铁、水泥、化工等高耗能行业企业 CO₂ 排放量占工业排放总量超过 60%。分行业来看，排放源集中在火电、水泥行业，点源数量接近总数的 50%。

3) CO₂ 地质封存潜力大且分布集中。经评估，四川盆地气藏总封存容量为 87.58×10^8 t，其中通过

枯竭气藏可以封存 53.73×10^8 t，通过强化天然气开采可以封存 33.85×10^8 t；此外，还拥有深部咸水层封存容量 154.20×10^8 t^[14-15]。初步测算，四川盆地仅气藏封存容量即可满足西南地区 50 年的封存需求，即可以满足西南地区 2070 年之前的 CO₂ 封存需求。

4) 源汇匹配情况较好。源汇匹配分析模型的测算结果表明：川渝地区碳源分布广泛，碳汇封存储量大，捕集成本和运输成本是影响 CCUS 项目源汇匹配全流程成本的主要因素，通过合理规划匹配路径可显著降低 CCUS 项目成本，源汇匹配情况整体较好。

5) 四川省和重庆市地方政府积极支持。CCUS 产业属于战略新兴产业，四川省和重庆市政府正在着力推动战略新兴产业集群发展，出台了相关规划和支持性政策。

4.2 西南地区建设 CCUS 区域中心的挑战

1) 缺乏顶层设计和统一规划。西南地区 CCUS 区域中心横跨多省市、多行业、多企业，当前仅靠个别企业自发协调无法实现 CCUS 区域中心基础设施共享、源汇优化匹配的协同优势，四川盆地独特源汇资源优势和科技体系引领 CCUS 区域中心建设优势也无法得到有效转化。

2) 缺乏全产业链协同技术攻关的共享平台。当前主要是油气企业、电力企业以及高校科研单位各自或联合开展 CCUS 的相关技术攻关，缺乏 CCUS 技术全产业链协同技术攻关的共享平台，迫切需要按照多主体协同、全产业链参与的模式试点建设 CCUS 技术试验基地，搭建 CCUS 技术测试和孵化共享平台^[16-18]。

3) 缺乏碳减排的激励和约束政策体系。CCUS 产业当前处于示范初期，强制碳减排政策缺失和碳交易体系不够完善造成碳埋存企业投资成本回收困难、投资积极性不高，难以支撑 CCUS 产业链的可持续发展，难以推动分散的试点示范向 CCUS 区域中心的产业化、规模化发展^[19-20]。

5 中国西南地区 CCUS 区域中心的建设路径

5.1 总体思路与目标

5.1.1 总体思路

根据西南地区的碳达峰碳中和目标战略部署，结合区域内战略新兴产业集群发展规划布局，重点依托四川盆地，充分发挥四川盆地良好的源汇条件和

技术、市场等优势,创新“天然气+CCUS”“新能源+CCUS”融合发展模式,聚焦 CCUS-EGR、碳捕集与封存(CCS)、直接空气碳捕集和封存(DACCS)等 3 条技术路径,分启动、扩展、规模化发展 3 个阶段打造西南地区 CCUS 区域中心。

5.1.2 建设目标

不同阶段的建设目标、重点任务如表 3 所示。

表 3 西南地区 CCUS 区域中心的建设目标和重点任务表

阶段	目标	重点任务
启动阶段(2024—2030 年)	至少启动 1 个 CCUS 产业集群建设,碳捕集能力达到 100×10^4 t,碳封存规模达到 80×10^4 t	①中低浓度碳捕集技术取得突破 ②落地 2 个以上 CCUS-EGR 示范项目 ③落地 1 个 DACCS 示范项目 ④建设 CCUS-EGR 试验基地 ⑤推动 CCUS-EGR 项目减排量纳入碳市场交易
扩张阶段(2031—2040 年)	建成 1~2 个 CCUS 产业集群,碳捕集能力达到 500×10^4 t,碳封存规模达到 400×10^4 t	①建成百万吨级 CCUS-EGR 示范项目 ②建成百万吨级气藏型 CCS 示范项目 ③建成气藏型 CCUS-EGR 和 CCS 全国试验基地,打造成为气藏型 CCUS-EGR 和 CCS 技术测试和孵化平台 ④实施百万吨级 DACCS 示范项目
规模化阶段(2041—2050 年)	建成 3~4 个 CCUS 产业集群,碳捕集能力达到 $3\,000\times 10^4$ t,碳封存规模达到 $2\,500\times 10^4$ t	① CCUS-EGR 实现规模化发展,建成 1 个以上千万吨级的产业集群 ② CCS 实现规模化发展,建成 1 个以上千万吨级的产业集群 ③ DACCS 推广应用,建成多个百万吨级 DACCS 项目

5.2 产业集群部署

基于源汇匹配情况,结合成渝地区双城经济圈建设规划纲要,以及四川省、重庆市都市圈和区域中心城市建设的规划,可依托四川盆地按照“2+3”模式打造西南地区 CCUS 区域中心。

1) 打造 2 个千万吨级的 CCUS 产业集群:围绕成渝地区双城经济圈打造 CCUS 产业集群,重庆市区域,以涪陵、垫江为重要枢纽,辐射长寿、綦江、江津、合川等区县,早期以涪陵和垫江区域内地质条件适宜的枯竭气藏和咸水层作为 CO₂ 地质封存场所;成都市及周边区域,以资阳、遂宁为重要枢纽,辐射成都、眉山、绵阳等地市,早期以资阳和遂宁区域内地质条件适宜的枯竭气藏和咸水层作为 CO₂ 地质封存场所。碳源方面,早期以天然气净化厂、煤化工、石油炼化和石油天然气化工尾气作为主要碳源,并逐步考虑火电厂、钢铁及水泥等重点排放企业大型碳源。

2) 打造 3 个百万吨级的 CCUS 产业集群:①打造渝东北 CCUS 产业集群,以万州为中心,辐射开州、忠县等区县,早期以万州、开州区域内地质条件适宜的枯竭气藏和咸水层作为 CO₂ 地质封存场所。②打造川南 CCUS 产业集群,以宜宾、泸州为重要

其中,到 2030 年,至少启动 1 个 CCUS 产业集群建设,碳捕集能力达到 100×10^4 t,碳封存规模达到 80×10^4 t;到 2040 年,建成 1~2 个 CCUS 产业集群,碳捕集能力达到 500×10^4 t,碳封存规模达到 400×10^4 t;到 2050 年,建成 3~4 个 CCUS 产业集群,碳捕集能力达到 $3\,000\times 10^4$ t,碳封存规模达到 $2\,500\times 10^4$ t。

枢纽,早期以宜宾和泸州区域内地质条件适宜的枯竭气藏和咸水层作为 CO₂ 地质封存场所。③打造川东北 CCUS 产业集群,以达州、南充为重要枢纽,早期以达州和南充区域内地质条件适宜的枯竭气藏和咸水层作为 CO₂ 地质封存场所。碳源方面,早期同样以天然气净化厂、煤化工、石油炼化和石油天然气化工尾气作为主要碳源,并逐步考虑火电厂、钢铁及水泥等重点排放企业大型碳源。

5.3 技术路径

根据川渝地区源汇匹配,以及区域内 CCUS 技术研发的相关情况,开展 CCUS 多元化技术路径比选。从捕集端来看,重点是开展天然气净化厂尾气 CO₂ 捕集技术,天然气产业下游工业尾气 CO₂ 捕集技术,钢铁、水泥等中低浓度工业尾气 CO₂ 捕集技术,及 DACCS 等技术攻关。从利用和封存端来看,重点是攻关 CCUS-EGR 和页岩气/煤层气 CO₂ 压裂技术,以及 CO₂ 化工利用和矿化利用等技术,同时开展枯竭气藏地质封存和咸水层封存技术攻关^[21]。

5.4 商业化路径

结合产业发展的不同阶段,提供相适应的政府

产业支持政策和建立市场化机制（表 4）。一是在启动阶段（产业培育期），以争取国家层面、四川省和重庆市政府层面、参与单位总部层面针对科技攻关和项目示范的财税补贴与激励政策为主，同时推动 CCUS 项目减排量进入国内外温室气体自愿减排市场。二是在扩张阶段（产业成长期）以及规模化发展阶段（产业成熟期），政府与市场有机结合，逐步提升市场化水平，政府产业支持政策力度逐步退坡，并最终过渡到以规模化 CO₂ 利用及碳市场收益为主实现商业化运营^[22-23]。

表 4 西南地区 CCUS 区域中心产业支持政策和商业模式设计表

发展阶段	产业支持政策和商业模式
启动阶段 (产业培育期)	①总体思路：以争取四川省和重庆市政府和参与单位总部层面的激励政策为主，支持项目示范 ②政府产业支持政策：在项目示范、科技攻关方面，向国家和川渝政府争取财政补贴、税收减免、低息贷款、增加新能源指标等多方位配套政策支持 ③市场化机制：推动 CCUS 项目减排量进入国内外温室气体自愿减排市场
扩张阶段 (产业成长期)	①总体思路：政府与市场有机结合，逐步提升市场化水平 ②政府产业支持政策：继续争取国家层面、四川省和重庆市政府层面多方位的产业支持政策 ③市场化机制：提升 CO ₂ 利用收益水平；相关利益主体共同建立产业发展基金，积极利用绿色金融、气候债券、低碳基金等支持；完善 CCUS 项目减排量在国内外温室气体资源减排市场交易规则，确保合理价格
规模化发展阶段 (产业成熟期)	①总体思路：主要通过市场化方式实现商业化运营 ②政府产业支持政策：政府产业支持政策力度逐步退坡 ③市场化机制：主要以规模化的 CO ₂ 利用及碳市场收益为主，通过产业发展基金实现产业化、规模化发展

5.5 配套政策需求

- 1) 规划及产业引领政策：争取将四川盆地 CCUS 产业集群发展纳入国家层面统筹部署，推动四川省和重庆市政府“一盘棋”共同规划设计 CCUS 区域产业中心，并支持区域内龙头企业担当 CCUS 产业链链长。
- 2) 技术攻关支持政策：争取国家层面、四川省和重庆市地方政府层面的科技专项、重点研发计划等，支持气藏 CCUS-EGR、CCS、直接空气捕集（DAC）等关键技术以及 CO₂ 化工利用、矿化利用等技术攻关。国家、四川省和重庆市地方政府及龙头企业三方合力，共同支持打造国内外领先的 CCS/CCUS 研发平台。
- 3) 财税及激励政策：争取国家层面、四川省和重庆市政府层面出台 CCUS 项目的财政补贴、税收减免、专项资金等支持政策。推动四川省和重庆市政府将 CCUS 项目纳入气候友好型项目给予积极财政支持，探索将 CCUS 项目与新能源指标挂钩政策，按照 CCUS 项目减排量给予配套的新能源资源指标。
- 4) 碳市场机制政策：推动将 CCUS 项目尽快纳入我国自愿减排机制，试点将 CCUS 项目减排量纳入重庆市区碳市场交易，并扩大至西南地区。
- 5) 基础设施建设及共享政策：争取国家层面、四川省和重庆市政府层面支持四川盆地 CCUS 项目管网规划布局和集群基础设施建设，给予要素保障

并落实共建共享政策。

6) 国际合作政策：争取国家层面、四川省和重庆市政府层面支持依托四川盆地开展气藏 CCUS-EGR、CCS 和 DAC 等技术的国际合作，推动气藏 CCS 和 DAC 项目碳减排量交易与国际市场接轨。

6 政策建议

- 1) 完善顶层设计，出台统一的战略规划。以服务长江经济带、成渝地区双城经济圈和国家天然气（页岩气）千亿立方米级产能基地建设为指引，加快引导区内龙头企业健全完善西南地区 CCUS 产业链，支持龙头企业争当西南地区 CCUS 产业链链长，并协同相关利益主体推动西南地区 CCUS 区域中心统一战略规划，按照源汇匹配原则，统筹区域内大规模、中高浓度碳排放源和 CO₂ 地质封存潜力巨大的深部咸水层和枯竭气藏等地质封存场所，依托四川盆地打造两个千万吨级产业集群和三个百万吨级产业集群。
- 2) 强化科技攻关体系建设，加快形成技术成熟、经济可行的 CCUS 全链条技术。开展中低浓度、高浓度的碳捕集和 DAC，以及管网输送、碳利用及碳封存等 CCUS 全链条技术攻关，按照“一室两会”模式打造国内外领先的 CCUS 技术研发平台：①设立 CCUS-EGR 和 DAC 全国重点实验室，建设全国试验基地，打造全国 CCUS 技术测试和孵化平台，

形成全产业链技术经济可行的技术体系。②推动四川省和重庆市政府建立 CCUS 联席会议制度, 协调产业链各环节企业共谋发展。③支持高校和企业全方位开展国际交流, 主办 CCUS 国际学术研讨会, 共享国内外前沿技术。

3) 强化政策支持, 推动国际合作: ①出台财税补贴和激励政策。按照综合考虑 CCUS 全链条成本、科学设置各环节补贴的理念, 借鉴美国 45Q 和中国可再生能源补贴政策经验, 推动国家层面、四川省和重庆市政府层面分产业阶段设计 CCUS 产业支持政策, 推动出台技术研发补助、财税减免政策、专项资金支持等政策; 结合川渝地区天然气大发展和新能源资源禀赋特点, 推动出台 CCUS 项目减碳指标与新能源资源指标挂钩的创新政策。②完善碳交易等市场化机制。利用重庆市作为西部地区唯一碳市场试点省(市) 的优势, 以成渝共建区域性碳交易市场为契机, 在四川和重庆地区率先试点推动 CCUS 项目核定减排量纳入区域碳交易市场的规则、规范和制度建设, 并推动 CCUS 项目核定减排量纳入全国温室气体自愿减排交易机制。③加强国际交流合作。充分发挥四川盆地在 DAC 项目试点示范具备的独特优势, 强化与加拿大碳工程公司等交流合作, 持续跟进国际碳移除技术和交易规则的最新进展, 推动 DAC 技术研发、碳减排量核定规则、碳交易市场衔接等方面的国际合作, 提升产业影响力和国际话语权。

参 考 文 献

- [1] 全球碳捕集与封存研究院. CCUS 区域中心手册: 适用于监管机构、工业排放企业和区域中心开发者的指南 (2022)[R]. 墨尔本: 全球碳捕集与封存研究院, 2023.
Global CCS Institute. The CCUS hub playbook: A guide for regulators, industrial emitters and hub developers (2022)[R]. Melbourne: Global CCS Institute, 2023.
- [2] 于航, 刘强, 李彦尊, 等. 大规模海上 CCS/CCUS 集群项目研究与思考 [J]. 石油科技论坛, 2023, 42(2): 90-95.
YU Hang, LIU Qiang, LI Yanzun, et al. Research and thinking of large-scale offshore CCS/CCUS cluster projects[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2023, 42(2): 90-95.
- [3] 甘满光, 张力为, 李小春, 等. 欧洲 CCUS 技术发展现状及对我国的启示 [J]. 热力发电, 2023, 52(4): 1-13.
GAN Manguang, ZHANG Liwei, LI Xiaochun, et al. Development status of CCUS technology in Europe and the enlightenment to China[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(4): 1-13.
- [4] 窦立荣, 孙龙德, 吕伟峰, 等. 全球二氧化碳捕集、利用与封存产业发展趋势及中国面临的挑战与对策 [J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(5): 1083-1096.
DOU Lirong, SUN Longde, LYU Weifeng, et al. Trend of global carbon dioxide capture, utilization and storage industry and challenges and countermeasures in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(5): 1083-1096.
- [5] IPCC. Global warming of 1.5 °C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty[R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018.
- [6] IEA. Energy technology perspectives 2020[R]. Paris: IEA, 2020.
- [7] 清华大学气候变化与可持续发展研究院. 中国长期低碳发展战略与转型路径研究 [M]. 北京: 中国环境出版集团, 2021.
Tsinghua University Institute of Climate Change and Sustainable Development. China's long-term low-carbon development strategies and pathways[M]. Beijing: China Environmental Publishing Group, 2021.
- [8] Advanced Resources International, Inc. The U.S. CO₂ enhanced oil recovery survey[R/OL]. (2021-10-21)[2024-02-25]. <https://www.adv-res.com/pdf/ARI-2021-EOY-2020-CO2-EOR-Survey-OCT-21-2021.pdf>.
- [9] Di Pietro P, Balash P, Wallace M. A note on sources of CO₂ supply for enhanced-oil-recovery operations[J]. SPE Economics and Management, 2012, 4: 69-74.
- [10] REALISE CCUS. Industrial clusters[EB/OL]. (2023-05-24)[2024-02-25]. <https://realiseccus.eu/ccus-and-refineries/industrial-clusters>.
- [11] National Petroleum Council. Meeting the dual challenge: A roadmap to at-scale deployment of carbon capture, use, and storage[R]. Washington, D.C.: National Petroleum Council, 2019.
- [12] HM Government. CCUS Net Zero investment roadmap: Capturing carbon and a global opportunity[EB/OL]. (2023-04-05)[2024-02-25]. <https://www.gov.uk/government/publications/carbon-capture-usage-and-storage-net-zero-investment-roadmap/ccus-net-zero-investment-roadmap-capturing-carbon-and-a-global-opportunity>.
- [13] 董焕忠, 熊波, 王道成, 等. “绿色发展西南模式”的思考与实施路径——以中国石油西南油气田公司为例 [J]. 天然气工业, 2022, 42(4): 149-155.
DONG Huanzhong, XIONG Bo, WANG Daocheng, et al. Thinking and implementation path of "Green Development Mode in Southwest China": A case study on PetroChina Southwest Oil&Gasfield Company[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(4): 149-155.
- [14] 张烈辉, 曹成, 文绍牧, 等. 碳达峰碳中和背景下发展 CO₂-EGR 的思考 [J]. 天然气工业, 2023, 43(1): 13-22.

- ZHANG Liehui, CAO Cheng, WEN Shaomu, et al. Thoughts on the development of CO₂-EGR under the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(1): 13-22.
- [15] 张烈辉, 王峰. 石油工业 CCUS 发展概论 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2023.
- ZHANG Liehui, WANG Feng. Introduction to the development of CCUS in the petroleum industry[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2023.
- [16] 张烈辉, 张涛, 赵玉龙, 等. 二氧化碳—水—岩作用机理及微观模拟方法研究进展 [J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(1): 199-211.
- ZHANG Liehui, ZHANG Tao, ZHAO Yulong, et al. A review of interaction mechanisms and microscopic simulation methods for CO₂-water-rock system[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(1): 199-211.
- [17] 赵玉龙, 黄义书, 张涛, 等. 页岩气藏超临界 CO₂ 压裂—提采—封存研究进展 [J]. 天然气工业, 2023, 43(11): 109-119.
- ZHAO Yulong, HUANG Yishu, ZHANG Tao, et al. Research progress on supercritical CO₂ fracturing, enhanced gas recovery and storage in shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(11): 109-119.
- [18] 周军平, 旷年杰, 田时锋, 等. 页岩气储层无水压裂技术现状 [J]. 天然气技术与经济, 2022, 16(6): 49-55.
- ZHOU Junping, KUANG Nianjie, TIAN Shifeng, et al. Status quo of water-free fracturing technology for shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2022, 16(6): 49-55.
- [19] 李森圣, 敬兴胜, 王富平, 等. 川渝地区 CCUS 产业支持政策研究 [J]. 天然气技术与经济, 2022, 16(6): 62-68.
- LI Sensheng, JING Xingsheng, WANG Fuping, et al. Study on support policies for CCUS industry in the Sichuan-Chongqing area[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2022, 16(6): 62-68.
- [20] 李森圣, 王盟浩, 徐程浩, 等. CCUS-EGR 全产业链经济评价方法 [J]. 天然气技术与经济, 2023, 17(6): 34-43.
- LI Sensheng, WANG Menghao, XU Chenghao, et al. Economic evaluation on the whole industrial chain of CCUS-EGR[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2023, 17(6): 34-43.
- [21] 张贤, 杨晓亮, 鲁玺, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023)[R]. 北京: 中国 21 世纪议程管理中心, 2023.
- ZHANG Xian, YANG Xiaoliang, LU Xi, et al. China carbon dioxide capture, utilization and storage annual report(2023)[R]. Beijing: The Administrative Center for China's Agenda 21, 2023.
- [22] 李阳, 赵清民, 薛兆杰. “双碳”目标下二氧化碳捕集、利用与封存技术及产业化发展路径 [J]. 石油钻采工艺, 2023, 45(6): 655-660.
- LI Yang, ZHAO Qingmin, XUE Zhaojie. Carbon dioxide capture, utilization and storage technology and industrialization development path under the dual carbon goal[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2023, 45(6): 655-660.
- [23] 陆晓如. 推动形成 CCUS 战略产业——专访中国工程院院士李阳 [J]. 中国石油石化, 2024(增刊 1): 16-19.
- LU Xiaoru. Promote the formation of CCUS strategic industry—Exclusive interview with Li Yang, academician of the CAE Member[J]. China Petrochem, 2024(S1): 16-19.

(修改回稿日期 2024-04-20 编辑 陈 嵩)



全文
互动