

碳捕集、利用与封存技术进展丛书

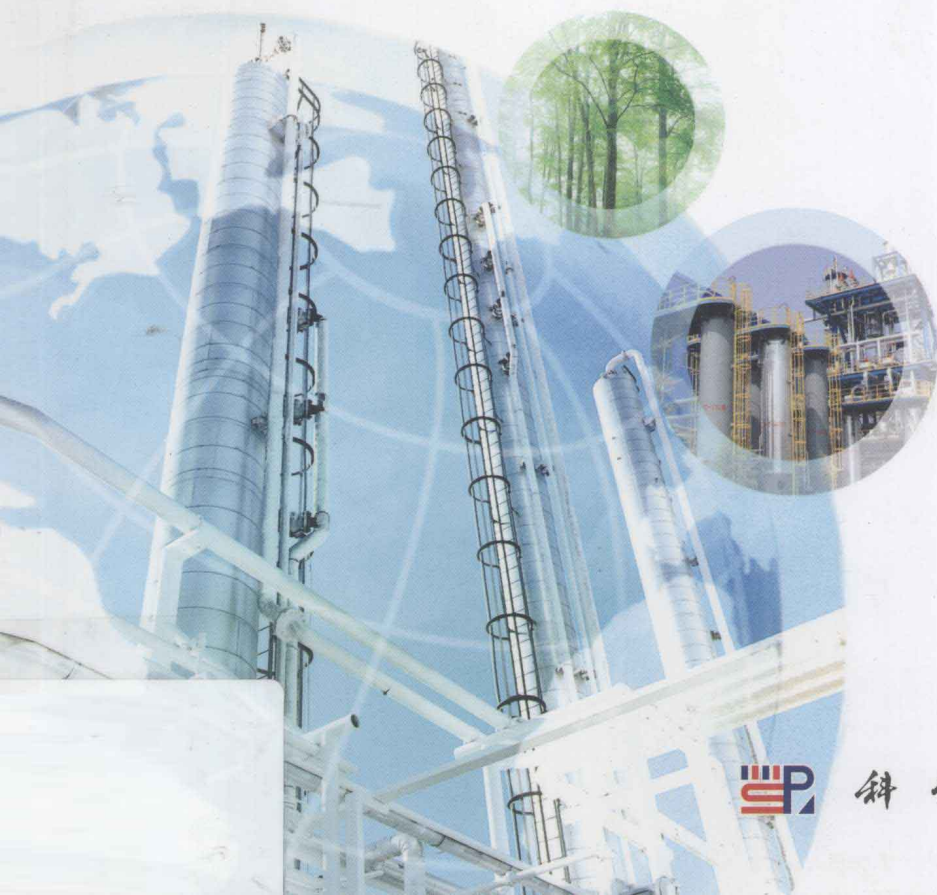
CCUS

TECHNOLOGY ROADMAP STUDY ON CARBON
CAPTURE, UTILIZATION AND STORAGE IN CHINA

中国碳捕集、利用与封存技术 发展路线图研究

科学技术部社会发展科技司 编著
中国21世纪议程管理中心

编著



科学出版社



碳捕集、利用与封存技术进展丛书

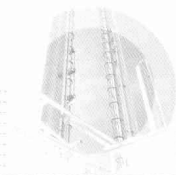
TECHNOLOGY ROADMAP STUDY ON CARBON
CAPTURE, UTILIZATION AND STORAGE IN CHINA

中国碳捕集、利用与封存技术 发展路线图研究

科学技术部社会发展科技司
中国21世纪议程管理中心

编著

藏书



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书较系统地评估了中国碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术发展现状, 提出中国 CCUS 技术发展的愿景和未来 20 年的技术发展目标, 识别出各阶段应优先开展的研发与示范行动, 并针对中国全流程 CCUS 示范部署、研发与示范技术政策和产业化政策研究等提出建议。有助于增进读者对 CCUS 技术的认识, 在应对气候变化的背景下正确评价该技术的地位和作用, 从而推动该技术的发展, 增强中国应对气候变化的能力。

本书可供相关管理部门的工作人员使用, 也可供从事相关行业的项目管理、开发、咨询人员, 以及相关领域的教学与研究参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国碳捕集、利用与封存技术发展路线图研究 (Technology Roadmap Study on Carbon Capture, Utilization and Storage in China) / 科学技术部社会发展科技司, 中国 21 世纪议程管理中心编著. —北京: 科学出版社, 2012
(碳捕集、利用与封存技术进展丛书)

ISBN 978-7-03-034130-3

I. 中… II. ①科… ②中… III. ①二氧化碳—收集—研究—中国
②二氧化碳—利用—研究—中国 ③二氧化碳—保藏—研究—中国
IV. 0613.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 080724 号

责任编辑: 李 敏 王 倩 / 责任校对: 张怡君

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

骏志印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 8 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012 年 8 月第一次印刷 印张: 7 1/4 插页: 4

字数: 150 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

本书编写委员会

主 任 马燕合 郭日生

副 主 任 孙成永 彭斯震

核心编写人员

彭斯震	沈建忠	康相武	张九天	李小春
姚 强	许世森	张 建	秦积舜	李会泉
张东晓	陈文颖	郭建强	仲 平	贾 莉

编写人员（按姓氏汉语拼音排序）

蔡宁生	陈文颖	陈 跃	方梦祥	方志明
甘志霞	高 林	龚 斌	郭建强	郭日生
郭士伊	何霄嘉	黄 斌	贾 莉	康相武
李会泉	李明远	李小春	李玉星	刘海丽
刘兰翠	刘学之	吕广忠	马燕合	彭 勃
彭斯震	秦积舜	尚玥佟	孙成永	王淑娟
王文涛	魏 宁	胥蕊娜	许世森	姚 强
叶建平	张东晓	张 建	张九天	张 军
仲 平				

总序

工业革命以来的人类活动，尤其是发达国家在工业化过程中大量温室气体的排放，引起全球气候近 50 年来以变暖为主要特征的显著变化，对全球自然生态系统产生了显著影响。全球气候变化问题日益严峻，已经成为威胁人类可持续发展的主要因素之一，削减温室气体排放以减缓气候变化成为当今国际社会关注的焦点。

为避免对气候系统造成不可逆转的不利影响，世界各国必须采取有效措施减少和控制温室气体的产生和排放。在众多温室气体减排技术方案中，碳捕集、利用与封存（CCUS）技术是一项新兴的、可实现化石能源大规模低碳利用的技术，将可能成为未来全球减少二氧化碳（CO₂）排放和保障能源安全的重要战略技术选择。CCUS 技术可以与能效技术、新能源技术、可再生能源技术等共同形成更稳妥、更经济的技术组合，能够更有效地实现保障发展和应对气候变化的双重目标。

为推动 CCUS 技术的发展，目前全球已有多个国家开展了相关的技术研发和示范，一批全流程的商业规模示范正在筹备和建设中，一些国家和国际机构还提出了未来 20 年或更长时期该技术的发展路线和目标，CCUS 技术在全球范围呈现出加速发展的态势。

近年来，中国政府也对 CCUS 技术的发展给予了积极的关注，围绕相关政策、研发示范、能力建设、国际合作开展了一系列工作推动 CCUS 技术的发展：

(1) 技术政策方面，《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》、《中国应对气候变化国家方案》、《中国应对气候变化科技专项行动》、《国家“十二五”科学和技术发展规划》等均将 CCUS 技术列为重点发展的减缓气候变化技术，积极引导 CCUS 技术的研发与示范。

(2) 研发示范方面，从“十五”期间的技术跟踪和调研，到“十一五”期间国家重大科技专项、国家主体科技计划围绕 CCUS 技术较系统的研发部署，公共研发投入的力度不断加大，支持范围从侧重单一技术环节的研究和中试，迈向支持工业规模的全流程技术示范；从侧重局部的 CO₂ 封存潜力评估，扩大到覆盖全国范围的封存潜力调查。

(3) 能力建设方面，积极推动建立产学研结合的 CCUS 技术合作平台。在科学技术部的动员和推动下，国内相关企业、研究机构、高校等正在酝酿成立“中国 CCUS 产业技术创新战略联盟”，将成为行业间、机构间开展 CCUS 技术研发与示范合作的平台。

(4) 国际合作方面，积极参与并推动 CCUS 技术相关多边和双边合作。中国是碳收集领导人论坛 (CSLF) 创始成员国之一，积极参与清洁能源部长级会议 (CEM) 框架下 CCUS 技术工作组、全球碳捕集与封存研究院 (GCCSI) 等合作机制的工作。CCUS 已成为我国双边科技合作的重点领域之一，近年先后与欧盟、美国、澳大利亚、意大利等国家和组织开展了全方位、多层次的 CCUS 技术合作。

尽管起步较晚，中国在 CCUS 技术方面都取得了长足进步。已经在上海建成了 10 万吨级燃煤电厂捕集示范，获得了与电厂热系统集成的宝贵经验；在吉林油田连续多年开展了提高采收率试验，充分验证了中国低渗油田采用 CO₂ 驱油技术的适宜性；在河北成功开展了微藻固定 CO₂ 制生物柴油中试，探索了 CO₂ 能源化利用的技术方向；在内蒙古开展的 10 万吨级咸水层封存示范已开始稳定注气，将为中国咸水层封存 CO₂ 积累宝贵工程数据和经验。这些不仅是中国 CCUS 技术发展的里程碑，也是中国为全球 CCUS 技术发展作出的重要贡献。

但是，从全球 CCUS 技术的总体发展来看，该技术仍处于研发和早期系统示范阶段，尚存在高成本、高能耗和长期安全性、可靠性待验证等突出问题。为解决这些问题，有必要进一步开展创新型技术的研发，降低 CCUS 技术系统的成本和能耗；有必要进一步加强全流程技术示范的开展，验证技术的应用效果并提升其成熟度；有必要推动形成科学的技术标准，保障 CCUS 技术应用的长期安全性；有必要探索建立有效的法律框架和监管体系，为全流程 CCUS 技术示范的开展和未来的应用提供保障。

为促进中国 CCUS 技术的发展，我们组织有关单位和专家编写了《碳捕集、

利用与封存技术进展丛书》，包括《碳捕集、利用与封存技术——进展与展望》、《中国碳捕集、利用与封存技术发展路线图研究》、《中国二氧化碳地质封存选址指南研究》等，旨在梳理和综述当前全球和中国 CCUS 技术发展现状，辨识 CCUS 技术未来发展的重点方向和路线，探索并提出 CCUS 技术相关政策、监管制度和标准的建议等。丛书凝聚了中国 CCUS 技术领域众多专家学者的智慧和心血，具有较强的参考价值，希望能对国内相关科研机构、有关企业以及相关领域的研究与实践起到积极的促进作用。

目 录 CONTENTS

	总 序	
001	摘 要	
005	第 1 章 引言	
008	第 2 章 形势与挑战	
	2.1 中国发展 CCUS 技术的基础	8
	2.2 已开展的工作	9
	2.3 技术现状评估	12
018	第 3 章 愿景与目标	
021	第 4 章 优先行动	
	4.1 捕集技术	21
	4.2 运输技术	25
	4.3 利用技术	26
	4.4 封存技术	31
	4.5 全流程 CCUS 技术示范部署策略	34

039 第5章 支撑政策

- 5.1 加强研发与示范的政策建议 39
- 5.2 推动产业化政策研究的建议 40
- 5.3 加强国际技术合作与技术转移 41

042 第6章 其他相关问题

摘 要

中国能源结构以煤为主，CO₂ 排放量大且持续增长，因此面临严峻的减排压力。同时，原油对外依存度已超过 50%，能源供应安全问题不断突显。作为一项有望实现化石能源大规模低碳利用的新兴技术，碳捕集、利用与封存（CCUS）技术将可能成为未来中国减少 CO₂ 排放和保障能源安全的重要战略技术选择。

中国发展 CCUS 技术的基础条件包括：CO₂ 集中排放源多、CO₂ 理论封存潜力可观、有多种较具前景的 CO₂ 利用途径等。同时，中国 CCUS 技术的发展也面临经济社会发展水平较低、地质条件复杂、人口密度大等多方面的挑战。近年来，通过加强政府研发投入以及国际合作，中国 CCUS 技术的发展取得了较大进步，在 CCUS 技术链各环节都已具备一定的研发与示范基础，但在相关基础研究、核心技术的研发和掌握上与国际领先水平还存在一定的差距。

经广泛调研和研讨，本路线图研究提出中国 CCUS 技术发展的愿景：为应对气候变化提供技术可行和经济可承受的技术选择，促进经济社会可持续发展。本路线图还提出了当前至 2030 年分阶段的发展目标：

(1) 到 2015 年，突破低能耗捕集关键技术，建立封存安全保障研发体系，开展全流程中试及示范，实现系统规模 30 万 t/a 以上、能耗增加 25% 以内、成本 350 元/t 左右。

(2) 到 2020 年，建立封存安全保障体系，建成百万吨级全流程 CCUS 技术示范，实现能耗增加 20% 以内、成本 300 元/t 左右。

(3) 到 2030 年，具备 CCUS 全流程项目设计、建设和运营的产业

化技术能力, 实现系统规模 100 万 t/a 以上、能耗增加 17% 以内、成本 240 元/t 以内。

为实现上述愿景和目标, 路线图识别出 CCUS 各技术环节基础研究、技术研发和示范的优先技术方向, 包括:

(1) 围绕捕集技术, 加强 CO₂ 吸收、吸附、膜分离、化学链燃烧等基础研究, 开发先进吸收剂、分离膜、固体吸附剂, 突破热集成与热耦合、高效催化剂、H₂/CO₂ 分离、富氢燃机、低能耗制氧、先进载氧体等关键技术, 开展不同捕集技术方向的工业规模示范。

(2) 围绕输送技术, 加强超临界 CO₂ 管道输送相关基础研究, 开展管道/管网输送设计、规划与标准体系研究, 突破大规模、远距离管道输送安全保障技术, 形成完整的 CO₂ 输送工艺、设备制造能力。

(3) 围绕利用技术, 加强 CO₂ 驱油、驱气、生物、化工利用等基础研究, 开展 CO₂ 驱油、驱气与封存潜力评价, 开发高活性高稳定催化剂和专属反应器, 培育固碳高效藻种, 突破场地评价与筛选、注采防腐、监测与调控一体化关键技术, 大规模生物培养、采集、深加工与多联产一体化关键技术, 形成多种 CO₂ 化工利用的全过程系统优化集成系统。

(4) 围绕地质封存技术, 加强地质封存机理研究, 开展全国范围的地质封存潜力评价, 开发场地选址、安全性评价技术与标准, 突破监测与补救技术, 建立以封存选址与工程实施指南及安全环境评价标准为核心的封存安全保障体系。

此外, 必须重视新型 CCUS 技术的研发, 开展包括创新型捕集技术、矿物封存、岩腔封存、玄武岩封存、非纯 CO₂ 封存, 以及 CO₂ 封存采水、采热、采矿、增采页岩气、采天然气水合物等新颖的封存利用方法和技术的研究。

在各方面资源有限的条件下, 中国 CCUS 技术全流程示范应重点部署、逐步推进。全流程 CCUS 技术示范项目的部署应充分考虑技术组合的减排潜力、减排成本(经济性)、减排风险(安全性)和发展

潜力等指标。经专家评议，路线图筛选出近 10 种不同的全流程技术组合示范，并提出各技术组合在不同时间节点上示范规模的建议，主要的结论性建议包括：

(1) 应尽早开展全国范围系统的利用和封存潜力评估，更准确掌握中国 CCUS 技术的应用潜力。

(2) 煤化工等高浓度排放源捕集成本较低，应率先开展全流程技术示范；燃煤电厂排放量大、点源多，也应及时开展全流程示范，在技术方向选择上，燃烧后捕集、燃烧前捕集和富氧燃烧技术示范机会应尽量均衡。

(3) CO₂驱油技术成熟度高、陆上咸水层封存的潜力巨大，应优先部署 CO₂驱油和陆上咸水层封存的全流程技术示范。

(4) 积极稳妥地推进 CO₂驱油、陆上咸水层与多种捕集方式的集成示范和规模放大，逐步在 2030 年前形成 100 万 t/a 及以上规模的示范工程。

(5) 加强创新型低成本高效 CO₂利用技术的研究，早期技术示范可考虑与其他集成系统结合开展。

(6) 全流程示范项目在鄂尔多斯盆地、松辽盆地、渤海湾盆地和准噶尔盆地等有较多的机会，具体示范项目的确定应综合考虑成本、安全、环境等因素。

CCUS 技术具有跨部门、跨领域、空间规模大、时间跨度长、投资大、风险大等特点，需要适当的政策支持技术研发与示范。为实现路线图的目标，应进一步推动 CCUS 研发与示范的统筹协调与规划、加大支持力度、建立跨行业的产学研平台，加强包括监管、产业链协作机制、融资机制、基础设施、知识产权等未来产业化关键政策的研究，积极促进 CCUS 的国际合作与技术转移，推动 CCUS 技术在中国的发展。

本书是中国首次通过路线图编制为 CCUS 技术未来的研发和示范部署提供指导和建议的初步尝试，尚存在不少不足。今后，在经费支

持条件到位，且各方面研究和数据基础更充分的情况下，将对本路线图进行完善和更新。此外，考虑到 CCUS 技术系统的复杂性，也可分别围绕工业或电力行业 CCUS 技术发展，或是围绕捕集、利用和封存各环节开展更深入的技术路线图研究。

全球气候变化问题日益严峻，已经成为威胁人类可持续发展的主要因素之一，削减温室气体排放以减缓气候变化成为当今国际社会关注的热点。

碳捕集、利用与封存 (CCUS)^① 是指将二氧化碳 (CO₂) 从工业或其他排放源中分离出来，并运输到特定地点加以利用或封存，以实现被捕集 CO₂ 与大气的长期隔离 (图 1-1)。在众多温室气体减排技术方案中，CCUS 是一项新兴的、可实现化石能源大规模低碳利用的技术。除了节能与提高能源效率、发展新能源与可再生能源、增加碳汇，CCUS 技术将是未来减缓 CO₂ 排放的重要技术选择。因此欧美等发达国家和地区不断投入大量资金进行该技术的研发与示范，并积极推动相关政策、法规与机制的制定。当前全球已建、在建和计划建设的 CCUS 项目 (包括单一捕集、利用或封存环节项目和同时考虑捕集、利用与封存的全流程项目) 超过 200 个，其中全流程项目约 70 个。

中国是 CO₂ 主要排放国之一，煤炭利用所产生的 CO₂ 排放占工业碳排放总量的 80% 左右。中国以煤为主的能源结构短期内不会改变，随着经济的不断发展与人民生活水平的持续提高，未来 CO₂ 排放还将继续增长，中国也将面临越来越严峻的温室气体减排压力。此外，中国石油资源需求持续增加，原油对外依存度不断增高，发展考虑 CO₂ 捕集的煤液化或多联产系统，以及利用捕集的 CO₂ 提高石油采收率

^① 目前国际上使用较多的提法是碳捕集与封存 (CCS) 技术，将 CO₂ 资源化利用也作为该技术系统的组成部分则称 CCUS，二者并没有本质的差别

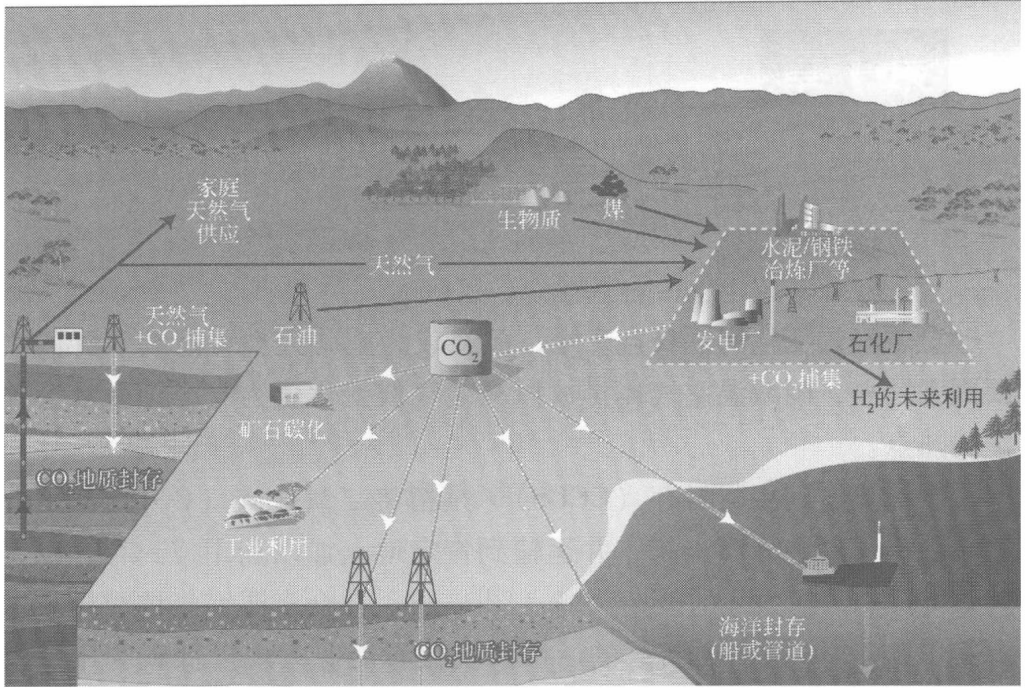


图 1-1 CCUS 技术流程示意图

注：示意图引自《IPCC 关于二氧化碳捕获与储存的技术特别报告》，政府间气候变化专门委员会（IPCC），2005 年，剑桥大学出版社，剑桥，英国。原图由 CO₂CRC 制作并提供

(EOR)，在减排 CO₂ 的同时，还有利于优化能源消费结构、保障能源安全。因此 CCUS 将可能成为未来中国减少 CO₂ 排放和保障能源安全的重要战略技术选择。

中国作为负责任的发展中大国，高度重视并积极应对全球气候变化。针对 CCUS 这项新兴的 CO₂ 减排技术，中国在多个科技政策文件中均明确了该技术的重要性，积极引导相关技术研发。《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》在先进能源技术重点研究领域提出了“开发高效、清洁和 CO₂ 近零排放的化石能源开发利用技术”；《中国应对气候变化科技专项行动》明确将开发 CO₂ 捕集、利用与封存技术作为控制温室气体排放和减缓气候变化的重要任务。2011 年 7 月发布的《国家“十二五”科学和技术发展规划》分别在“节能

环保产业”和“应对气候变化”部分两次提出要发展碳捕集、利用与封存技术。

中国 CCUS 技术起步相对较晚，总体上仍处在研发和早期技术示范阶段，在相关基础研究、核心技术的研发和掌握上与国际领先水平还存在不少差距。为了集中有限的人力、物力，力争在 2030 年左右掌握 CCUS 全流程项目设计、建设和运营的产业化技术能力，需要开展 CCUS 发展路线图的研究，制定 CCUS 分阶段的发展目标，明确分阶段各环节的优先行动，突破 CCUS 关键技术瓶颈，加强 CCUS 技术研发与示范的有序开展，建立相关安全保障体系。

形势与挑战

2.1 中国发展 CCUS 技术的基础

中国发展 CCUS 技术有以下基础条件：①适合 CO₂ 捕集的集中排放源较多、排放量较大，主要分布在电力、水泥、钢铁、化工等行业，有望借助规模和集成效应降低技术成本和推广难度。②理论封存潜力较大。据初步研究估算，中国地质封存潜力约在数千万吨规模，主要分布在咸水层、油气藏、煤层等地质体中。③存在多种 CO₂ 利用的途径，其潜在收益可能推动 CCUS 其他技术环节的发展。其中，使用 CO₂ 提高石油采收率技术可提高数十亿吨低品位石油资源的采收率和动用率，提高采收率 10% 以上，前景较广阔。

同时，中国作为发展中国家的国情和特有的地质特征给 CCUS 技术的发展带来一定的挑战：①经济社会发展水平较低，难以承受系统部署 CCUS 全流程技术示范的巨大成本，更不用说大范围推广和应用涉及的额外能耗和成本。②源汇匹配上存在一定程度的错位，区域发展不平衡导致排放源多集中于人口稠密的东部，而封存潜力较大地区多在西部。③地质条件复杂，实现封存技术难度大。中国适合 CO₂ 封存的地质体多属陆相沉积，地质结构比较复杂，岩性非均质性较强、平均层厚小、断层密度大、渗透性低，封存技术要求较高。④人口稠密，对运输和封存的安全性要求更高。