

Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) Technology Development in China

Ping Zhong¹, Li Jia¹, Jiutian Zhang^{*1}

¹The Administrative Centre for China's Agenda 21, Beijing, China 100038

Email: zhangjt@acca21.org.cn

*: Correspondence author

Abstract: This article summarizes the policies in China regarding the development of Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) technology, and introduces the overall status of the CCUS R&D&D (research development and demonstration) activities in China. The article also compares the development of CCUS technology in China with CCS technical development in EU, US and other advanced developed countries, and puts forward some helpful near-term recommendations for China to better develop CCUS technology.

Keywords: CCS; CCUS; CO₂; Technology Development; China; Roadmap

碳捕集、利用与封存(CCUS)技术在中国的发展

仲平¹, 贾莉¹, 张九天^{*1}

¹中国 21 世纪议程管理中心, 北京, 中国, 100038

Email: zhangjt@acca21.org.cn

摘 要: 本文总结了当前我国二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)技术政策, 全面介绍了中国 CCUS 技术研发和示范活动的开展情况, 并通过与欧美等发达国家 CCS 技术发展与示范活动现状的对比, 全面分析评价了我国 CCUS 技术发展方面存在的不足, 并提出了针对性的建议。

关键词: CCS; CCUS; CO₂; 技术发展; 中国; 路线图

1 引言

以气候变化为核心的全球环境问题日益严重, 已经成为威胁人类可持续发展的重要挑战。根据政府间气候变化委员会第 4 次评估报告 (IPCC AR4) 结论, 全球地表平均温度近百年来 (1906-2005 年) 升高了 0.74℃, 主要是由于化石燃料燃烧和土地利用变化等人类活动排放的温室气体 (主要包括二氧化碳、甲烷和氧化亚氮等) 导致大气中温室气体浓度增加所引起的^[1]。情景研究表明, 到本世纪末, 大气中温室气体的浓度将增加 1 倍, 全球平均温度仍将上升 1.1-6.4℃, 海平面可能上升 0.6 米^[2]。为避免对气候系统造成不可逆转的不利影响, 必须采取措施减少和控制温室气体的产生和排放。

削减以 CO₂ 为主的温室气体排放已成为当今国际社会关注的热点。碳捕集、利用与封存(Carbon Capture

and Storage, CCS)技术作为是一项新兴的、具有大规模减排潜力的技术, 有望实现化石能源使用的二氧化碳近零排放, 被认为是进行温室气体深度减排最重要的技术路径之一。近年来, 为促进该技术的发展与应用, 欧盟、美国、澳大利亚等发达国家均已启动大规模的计划推动 CCS 技术的研发与示范, 并在 8 国集团 (G8), 20 国集团 (G20) 等框架下积极推动 CCS 在全球范围的发展^[3]。

我国能耗总量大, 能源结构以煤为主的现实在未来将长期存在, 在温室气体减排问题上也将面临越来越大的压力。为积极应对气候变化, 增强控制温室气体排放技术能力, 我国也对该技术给予了积极的关注和高度重视, 政府、科研机构和企业从不同的层面围绕该技术领域开展了大量的工作。

2 我国碳捕集、利用与封存(CCUS)技术政策

2.1 CCS 与 CCUS

*: 张九天博士为本文联系作者。本研究得到了“十一五”国家科技支撑计划全球环境变化应对技术研究示范重大项目“我国应对全球环境变化的科技战略研究”专题 (编号: 20077BAC03A12-5) 的资助。

CCS 技术是指将 CO_2 从电厂等工业或其他排放源分离,经富集、压缩并运输到特定地点,注入储层封存以实现被捕集的 CO_2 与大气长期分离的技术^[4]。CCS 技术是一项系统技术,包括 CO_2 捕集技术、运输技术和封存技术的系统集成,主要应用对象为大规模的 CO_2 排放点源,包括电厂、煤化工等。根据排放源类型的不同,捕集技术分为燃烧后捕集(用于传统燃煤电厂等)、燃烧前捕集(用于 IGCC 电厂等)和富氧燃烧捕集(用于富氧燃烧系统)。运输可采用槽车、船舶、管道等方式。封存方式包括地质封存与海洋封存,其中地质封存可在深层咸水层、油气藏和深层煤层中进行。关于技术的具体分类和细节本文不一一赘述。

CO_2 是工业活动的必然产物,对其进行捕集和封存在经济效益上是纯耗费的行为,如能加以资源化利用,可创造额外的经济和环境效益。为此,我国格外关注创新型 CO_2 资源化利用技术的研发,提出系统发展碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)技术的概念,并在国际社会产生了一定影响。2010 年 7 月,主要经济体能源与能源安全与气候变化论坛(MEF)专门成立了 CCUS 工作组,以推动 CCUS 技术在全球层面的研发、示范与推广工作。

2.2 我国现有 CCUS 技术政策

CCUS 技术是一项具有战略意义的新兴温室气体控制技术,总体上尚处于研发和示范阶段,目前仍存在许多制约其发展的突出问题,包括能耗和成本过高、可持续发展效益不显著、长期封存的安全性和可靠性存在风险等^[5]。因此,加强技术研发和示范是现阶段推动该技术发展的重点。

开展 CCUS 技术的研发和储备,将为我国未来温室气体减排提供一种重要的战略性技术选择。为引导和推动该技术的发展,《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、清洁和二氧化碳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》明确将二氧化碳捕集、利用与封存技术开发作为控制温室气体排放和减缓气候变化的重要任务之一;《中国应对气候变化国家方案》将 CCUS 等煤清洁高效开发与利用技术的开发列为我国温室气体减排领域的重点工作之一。

2.3 国家科技计划有关项目安排

“十一五”期间,国家重点基础研究发展(973)计划、国家高技术研究发展(863)计划等支持对 CO_2 捕集、资源化利用与封存相关科学理论、关键技术等展开研究,旨在加强技术创新,促进能耗和成本降低,深化和拓展 CO_2 资源化利用途径,提高其可持续发展效益。

2.3.1 国家重点基础研究发展(973)计划

“十一五”期间,973 计划安排了“温室气体提高石油采收率的资源化利用及地下埋存”项目,分为 8 个课题,包括适合中国地质特点的 CO_2 埋存标准制订及应用潜力评价研究; CO_2 地下埋存的地质学理论研究; CO_2 地下埋存的监测和前缘预测技术研究;注 CO_2 提高原油采收率的多相多组分相态理论研究; CO_2 驱替过程中多相多组分非线性渗流机理和规律研究; O_2/CO_2 循环燃烧及污染物的协同脱除研究;燃煤 CO_2 分离与富集研究; CO_2 防腐、结垢等工程技术与方法研究。参与项目研究的单位包括中石油、中科院地质与地球物理研究所、中国石油大学、华中科技大学等。

2.3.2 国家高技术研究发展(863)计划

“十一五”期间,863 计划资源环境技术领域安排了“二氧化碳的捕集与封存技术”重点项目,瞄准国际技术前沿,研发吸附、吸收等二氧化碳捕集技术,探索二氧化碳封存技术。项目包括 3 个课题,分别围绕新型高效吸收溶剂、特大型吸收设备强化和过程优化;新型高效吸附材料的制备筛选和基础物性、吸附分离过程优化;咸水层封存能力评价、安全性以及封存效果监测开展具体的研发与示范工作。包括华能集团等单位参与了课题研究,并已在国内开展了相关的示范工程建设工作。

3 我国 CCUS 技术研发与示范

与国外发达国家相比,我国 CCUS 技术研发工作起步较晚,但近年来发展迅速。在国家相关科技政策的引导下,一些国内高校、科研院所、企业等已经围绕 CO_2 封存、利用和埋存开展了许多具体的研究和示范工作,在部分技术领域,技术水平、示范规模及运行效果甚至已经走在世界前列。在全流程 CCUS 技术整合与示范方面,部分国内企业也已开始行动,一些工业级试验和示范正在开展。本节将对其中的部分研发和示范活动进行初步的归纳。

3.1 CO_2 捕集技术研发与示范

3.1.1 华能集团 3000 吨/年捕集试验和 10 万吨/年捕集示范

2008 年, 华能集团在华能北京热电厂建成投产了年回收能力达 3000 吨的燃煤电厂烟气 CO_2 捕集试验系统。投运一年多来, 该系统各装置运行稳定可靠, 技术经济指标均达到设计值, CO_2 回收率大于 85%, CO_2 纯度达到 99.997%, 累计回收 CO_2 约 4000 吨, 并全部实现了再利用。

2009 年, 华能集团在上海石洞口第二电厂启动了 10 万吨/年 CO_2 捕集示范项目, 使用具有自主知识产权的燃烧后 CO_2 捕集技术。该项目是上海石洞口第二电厂二期 2 台 660MW 国产超超临界机组的配套工程, 年 CO_2 捕集能力为 12 万吨。项目于 2009 年 7 月份在上海开工建设, 2009 年 12 月底完成调试工作投入示范运行, 捕集的 CO_2 经精制提纯后用于食品行业。该示范工程为当时世界上最大的燃煤电厂烟气 CO_2 捕集装置。

3.1.2 华中科技大学富氧燃烧技术研发与中试

在相关理论研究和技术研发的基础上, 华中科技大学已经建立了热输入为 400kWt 的中试规模富氧燃烧试验系统, 开展空气助燃方式燃烧、 O_2/CO_2 烟气循环燃烧、炉内喷钙增湿活化脱硫、分级燃烧等试验研究。预计于 2010 年底建成热输入为 3MWt 的中试系统, 设计捕获 CO_2 量为 1t/h。

此外, 该校有关科研人员正在筹备建设一套 10 万吨/年的全流程的 CO_2 富氧燃烧捕集与封存工业示范系统。

3.1.3 中电投重庆双槐电厂 1 万吨/年碳捕集示范

2010 年 1 月, 中国电力投资集团投资建设的重庆合川双槐电厂 CO_2 捕集工业示范项目正式投运。这套装置每年可处理 5000 万 Nm^3 烟气, 从中捕集 1 万吨浓度在 99.5% 以上的 CO_2 , CO_2 捕集率达到 95% 以上。

3.1.4 国电集团 2 万吨/年 CO_2 捕集和利用示范

中国国电集团将于 2010 年底投运 CO_2 捕集中试装置, 拟于 2011 年底建成年捕集 2 万吨的 CO_2 捕集和利用示范工程。工程拟在国电天津北塘电厂进行, 采用化学吸收法进行捕集, 示范工程的液态 CO_2 产品将处理达到食品级在天津地区销售。

3.2 CO_2 资源化利用技术研发与示范

CO_2 是一种重要的工业气体, 有较广泛的用途。

如图 1 所示, CO_2 可以被广泛用于制造碳酸饮料、烟丝膨化处理、金属保护焊接、合成有机化合物、灭火、制冷, 也可用于强化石油开采 (Enhanced Oil Recovery, EOR) 和强化煤层气开采 (Enhanced Coal-Bed Methane Recovery, ECBM)。以 EOR 为例, 初步测算, 若在我国全面推广 CO_2 驱油与封存技术, 可增加原油的可采储量 6-10 亿吨, 同时提供封存 10-15 亿吨 CO_2 的潜力, 应用前景广阔。

目前, 中国企业在 EOR、ECBM、微藻生物能源、化工合成等领域都开展了初步的研发和示范工作。

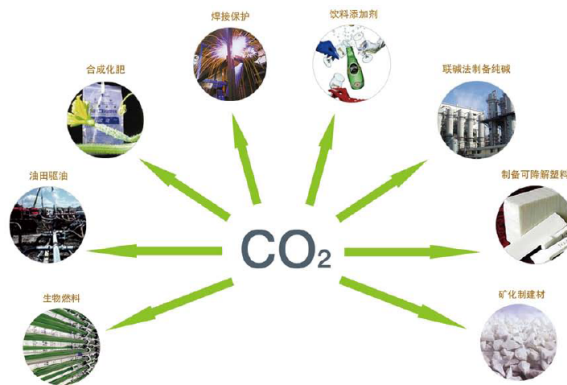


Figure 1. Various industrial uses for CO_2

图 1. CO_2 资源化利用的不同方式

3.2.1 中石油吉林油田 CO_2 EOR 研究与示范

在科技部支持下, 中国石油集团 2007 年启动重大科技专项“吉林油田含 CO_2 天然气藏开发和资源综合利用与封存研究”项目研究, 主要目标是研发 CO_2 驱油与封存技术, 在 CO_2 驱油提高低渗透油藏的采收率和特低渗透油藏的动用率的同时, 解决高含 CO_2 天然气开发中副产的 CO_2 的排放问题。

截止 2010 年上半年, CO_2 驱油与封存先导试验现场累积注入液态 CO_2 12.2 万吨, 控制封存 CO_2 约 8 万吨, CO_2 驱累积产油 5.1 万吨。预计到 2015 年末, 将达到 CO_2 驱油年产 50 万吨的生产能力, 控制封存 CO_2 约 80-100 万吨。

3.2.2 中联煤利用 CO_2 强化煤层气开采项目

在科技部支持下, 中联煤层气公司启动了“深煤层注入/埋藏二氧化碳开采煤层气技术研究”。通过实验室研究和野外试验相结合, 研究煤储层 CO_2 吸附解吸特征, 开展现场煤层气井 CO_2 注入试验, 探索性地研究和开发一套 CO_2 注入深部煤层中开采煤层气资源的技术。项目目前正在开展注入试验。

3.2.3 新奥集团微藻固碳生物能源示范

河北省新奥集团开发了“微藻生物吸碳技术”，建立了“微藻生物能源中试系统”，实现利用微藻吸收煤化工 CO₂ 的工艺。该中试系统包括了煤化工 CO₂ 捕捉、微藻养殖等全套工艺设备，年吸收 CO₂ 110 吨，生产生物柴油 20 吨，生产蛋白质 5 吨。

在此基础上，新奥集团拟于内蒙古达拉特旗建立“达旗微藻固碳生物能源示范”项目，该项目利用微藻吸收煤制甲醇/二甲醚装置烟气中的 CO₂，生产生物柴油的同时生产饲料等副产品，年吸纳 CO₂ 32 万吨。

3.2.4 中科金龙 CO₂ 制备化工产品和原料技术示范

江苏中科金龙化工股份有限公司已建成 2.2 万吨 CO₂ 基聚碳酸亚丙（乙）酯生产线示范，该工艺以酒精厂捕集的 CO₂ 为原料反应制备聚碳酸亚丙（乙）酯多元醇，用于外墙保温材料、皮革浆料、可降解塑料等产品，每年 CO₂ 利用量约 8000 吨。

3.3 CO₂ 封存有关研究

3.3.1 中国 CO₂ 地质封存潜力初步评价

2009 年，中国地质调查局制定了“中国二氧化碳储存地质潜力调查评价实施纲要”。同年，国土资源部将 CO₂ 地质储存调查评价纳入《地质矿产保障工程实施方案（2010-2020 年）》地质基础支撑计划内的全球变化调查监测与评价和地下空间资源调查之中。

目前，《中国二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程》正式立项启动，旨在开展中国主要沉积盆地 CO₂ 地质储存潜力调查，进行适宜性评价分区，圈定一批 CO₂ 地质储存适宜靶区；以沉积盆地单元编制 CO₂ 地质储存适宜性评价图集与 1:500 万 CO₂ 地质储存适宜性评价成果图系。同时，拟与有关企业联合开展 CO₂ 地质储存示范工程。

此外，清华大学、中科院岩土力学所等高校和研究机构对于源汇特征进行了研究，并对某一些省份进行了源汇匹配分析。

3.3.2 CO₂ 地质封存有关研究

近年来，中科院地质与地球物理研究所、中国科学院武汉岩土力学研究所、清华大学、华中科技大学等高校和研究机构对于 CO₂ 盐层封存过程中 CO₂ 在盐层中的运移规律、化学反应、固化机理以及盐层中 CO₂ 注入技术、封存控制技术等进行了初步研究。

3.4 全流程 CCUS 技术整合与示范

作为一项系统性技术，CCUS 技术的成熟以捕集、运输和埋存等各个环节技术的成熟和系统整合为基础。目前，国内已有数个不同规模和路线的全流程 CCUS 示范正在开展或筹备。

3.4.1 中石化胜利油田燃煤电厂 3 万吨/年 CO₂ 捕集与 EOR 示范

自 2008 年起，中国石化集团胜利电厂开展了 100 吨/日燃煤烟道气 CO₂ 捕集和封存驱油中试工程建设。该中试工程捕集胜利发电厂燃煤烟道气中体积浓度约 14% 的 CO₂，纯化后达 99.5% 的 CO₂ 用于胜利低渗透油藏 EOR，实现全流程 CO₂ 捕集与封存。目前，该中试工程已完成建设，处于试运行阶段。

在此基础上，中石化集团计划进一步开展 100 万吨/年燃煤电厂烟气 CO₂ 捕集纯化、驱油与封存技术开发的示范工程，初步计划于 2015 年建成。

3.4.2 神华集团 10 万吨/年的 CCS 示范工程

中国神华集团计划建立全流程的 10 万吨/年的 CCS 示范工程，通过捕集煤化工工厂的高浓度 CO₂ 尾气并提纯后，由槽车运送至封存地点，加压后注入到深部盐水层。计划于 2010 年底开始现场注入。

3.4.3 中国华能绿色煤电 IGCC 电站示范工程

绿色煤电天津 IGCC 电站示范工程是中国华能集团公司“绿色煤电计划”的项目依托，位于天津市滨海新区。示范工程旨在研究开发、示范推广可大幅提高发电效率、实现污染物和 CO₂ 近零排放的煤基发电系统。重点是自主设计和制造干煤粉加压气化相关设备，掌握大型煤气化工程的设计、建设和运行技术。

天津 IGCC 示范一期工程已于 2009 年 7 月开工建设。项目拟分三期建设，计划 2011 年底完成一期——电厂建成投产；2014 年完成绿色煤电关键技术研发；2016 年建成含有 CO₂ 捕集的 400MW 示范工程，捕集的 CO₂ 用于附近油田 EOR。

3.4 CCUS 有关国际科技合作

近年来，CCUS 技术相关领域也成为我国对外科技合作的热点。在或多边或双边的合作框架下，国内高校、科研机构、企业与欧盟、澳大利亚、意大利、日本、美国等相关机构开展了广泛的科技交流与合作。

比较有代表性的合作包括：参与碳收集领导人论坛（CSLF）、全球 CCS 研究院（GCCSI）合作；在中欧气候变化合作框架下开展了中欧/中英煤炭利用

近零排放合作项目 (NZEC), 包括中欧碳捕集与封存合作 (COACH) 和碳捕集与封存政策法规研究 (STRACO₂) 等; 在亚太清洁发展和气候伙伴关系 (APP) 框架下开展的中澳 CO₂ 地质封存合作项目, 以及中意 CCS 技术合作项目等。通过这些国际合作, 不仅加强了中国相关科研机构和企业的能力建设, 形成了中国在 CCUS 领域的核心研究团队, 同时围绕捕集技术选择、技术经济性评价、封存潜力评估、源汇匹配等开展了探索性的研究工作。

4 进一步推动我国 CCUS 技术发展的几点思考

尽管起步较晚, 我国 CCUS 技术发展在近些年取得了长足进步, 成功的开展了工业级的 CO₂ 捕集示范, 并在 CO₂ 利用等技术环节形成了有自主知识产权的技术, 形成自身的技术特点。

但是, 对比欧、美、澳等发达国家, 我们仍存在几个方面的明显不足^[5]:

第一, 缺少国家层面的技术政策的指导和宏观协调, 无法引导资源的有效配置。近年来, 国际能源署 (IEA)、碳收集领导人论坛 (CSLF)、全球 CCS 研究院 (GCCSI) 等国际机构或国际合作平台, 以及美国、加拿大、澳大利亚、英国等国家发布了多个全球或国家层面的 CCS 技术发展路线图 (Technology Roadmap)^[3,6]。一方面明确未来 CCUS 技术发展重点和关键环节, 引导资源有效配置; 另一方面从系统层面安排部署重大项目计划, 确保资源的有效使用。鉴于此, 我国也应适时发布 CCUS 技术发展规划 (或路线图), 明确我国发展 CCUS 技术的定位、目标、重点研究方向和重点任务;

第二, 缺少行业间合作平台, 示范项目往往侧重于单个技术环节。为推动 CCUS 技术的发展, 无论是欧盟的 CCS 旗舰计划 (Flagship Program), 美国的区域 CCS 伙伴计划、未来发电计划 (FutureGen), 还是澳大利亚的 ZeroGen 计划, 均建立了包括电企、油企、研究机构在内的跨行业合作平台, 比如欧盟的零排放技术合作联盟 (Zero Emission Platform, ZEP) 等, 并且在技术研发、经验共享等方面取得了良好的效果。CCUS 技术的发展需要原属于不同行业技术间的系统集成和优化, 并开展跨行业的全流程示范。因此, 中国也应尽早建立类似的合作平台, 如“CCUS 技术合作战略联盟”, 集各成员单位的优势开拓合作共赢的

局面;

第三, 现有研发与示范工作均专注于“硬技术”, 对于 CCUS 技术未来应用的软环境建设明显缺失。CCUS 作为一项新技术其应用涉及多个环节, 一方面, 封存场地选址、CO₂ 监测和长期安全管理等均需要全面细致的技术标准和相应的管理规范^[7]; 另一方面, 相关管理和审批涉及多个部门, 有关 CO₂ 的长期监测及安全管理等均属新鲜“事物”, 健全的法律法规体系是顺利开展 CCUS 的有利条件。此外, 公众了解和接受也是开展 CO₂ 封存的前提条件。尽管我国目前阶段对 CCUS 技术的定位仅为战略性技术储备, 但这些“软”技术方面的工作也必须及早开展。

致 谢

作者感谢中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团公司、中国华能集团公司、中国电力投资集团公司、中国国电集团公司、中国神华集团公司、中联煤层气公司、新奥集团、江苏中科金龙化工股份有限公司、清华大学、华中科技大学、中科院地质与地球物理研究所、中科院岩土力学研究所等单位及有关专家提供的关于 CCUS 有关研究和示范活动的信息。

References (参考文献)

- [1] IPCC, 2007a. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge, Cambridge University Press.
- [2] IPCC, 2007b. Climate Change 2007: Synthesis Report. IPCC, Geneva, Switzerland.
- [3] IEA, 2010, Carbon Capture and Storage: Progress and Next Steps (IEA/CSLF Report to the Muskoka 2010 G8 Summit), available at: www.iea.org/papers/2010/ccs_g8.pdf.
- [4] WU Zongxin, WANG Weizhong, CHEN Wenying, CO₂ Capture and Storage Development Strategy and Long-term Implication to Mitigation in China [J], *Environmental Science*, 2007 (6): 1178-1182 (Ch).
吴宗鑫, 王伟中, 陈文颖. CO₂ 收集封存战略及其对我国远期减缓 CO₂ 排放的潜在作用[J]. *环境科学*. 2007(6): 1178-1182.
- [5] ZOU Lele, ZHANG Jiutian, WEI Yiming, Review and Analysis of International Regulations and Policies on CCS Technology [J], *Energy and Environment*, 2010, 32(4): 15-18 (Ch).
邹乐乐, 张九天, 魏一鸣. 二氧化碳封存技术相关国际法规与政策的回顾与分析[J]. *能源与环境*. 2010, 32(4): 15-18.
- [6] US DOE, NETL, 2007, Carbon Sequestration Technology Roadmap and Program Plan 2007, available at: http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon_seq/refshelf/project%20portfolio/2007/2007roadmap.pdf.
- [7] EC, 2008b. Directive of the European Parliament and of the Council on the geological storage of carbon dioxide and amending Council Directives 85/337/EEC, 96/61/EC, Directives 2000/60/EC, 2001/80/EC, 2004/35/EC, 2006/12/EC and Regulation (EC) no 1013/2006, 23/01/2008.