

中国碳捕集、利用与封存技术路线图(2011版)实施情况评估分析

李小春¹, 张九天², 李琦^{1,3}, 刘桂臻¹, 张贤², 魏凤⁴

1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071
2. 中国21世纪议程管理中心, 北京 100038
3. 中国科学院大学, 北京 100049
4. 中国科学院武汉文献情报中心, 武汉 430071

摘要 CO₂捕集、利用与封存(CCUS)是减少温室气体排放、应对全球气候变化的一个重要选项。2011年9月,科技部社会发展科技司、中国21世纪议程管理中心共同发布《中国碳捕集、利用与封存(CCUS)技术发展路线图研究》,部署CCUS技术2015、2020及2030年3个节点分阶段的发展目标,以及为实现目标的基础研究、技术研究、技术示范的优先建议。当前,路线图设定的第一个时间节点(2015年)已经过去,从文献调研与专家研讨的结果分析,中国已建成多个CCUS工业试点和示范工程,优先部署行动也得到许多成果;但从整体上看,进度滞后目标约3~5年。在此背景下,要实现2020年的阶段性目标,不仅需要解决大规模示范项目的融资问题,提高CCUS项目的经济效益,还需要解决规模化的关键技术问题。为此,建议设定新一版CCUS路线图的目标时,除了考虑主流技术发展水平和新兴技术升级换代外,还应该考虑国家相关政策对项目应用的影响。

关键词 气候变化;碳捕集、利用与封存;全流程示范项目;国家政策

CO₂捕集、利用与封存(CCUS)作为减少温室气体排放、应对全球气候变化的新举措,正受到世界各国的关注。中国作为一个经济高速发展的大国,积极推进包括CCUS在内的煤炭清洁高效利用和节能减排,坚持绿色和谐的可持续发展道路,具有重要意义。2016年11月4日,《巴黎协定》正式生效。《巴黎协定》的签订确定了自下而上的减排承诺方式,即由成员国自行确定

2030年前的减排目标和路径;同时也明确了21世纪末温升控制目标由2℃向1.5℃的方向努力。前者意味着2030年减排压力较为缓和,从而对CCUS的需求减缓,但反而增加了2030年以后的CCUS需求。

自2007年以来,中国积极开展CCUS研发与示范活动,建成多个工业试点和示范工程,如中国神华煤制油深部咸水层CO₂地质封存示范工程、中石化胜利油田

收稿日期:2017-02-10;修回日期:2017-09-08

基金项目:中国清洁发展机制基金赠款项目(2013085)

作者简介:李小春,研究员,研究方向为岩土工程安全性监测与评价、二氧化碳地质埋存地层稳定性评价与工程设计理论,电子信箱: xcli@whrsm.ac.cn;
李琦(通信作者),研究员,研究方向为酸气回注、二氧化碳地质利用与封存,电子信箱:qli@whrsm.ac.cn

引用格式:李小春,张九天,李琦,等. 中国碳捕集、利用与封存技术路线图(2011版)实施情况评估分析[J]. 科技导报, 2018, 36(4): 85-95; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.04.013

CO₂强化采油(CO₂-EOR,简称EOR)示范工程等。与此同时,国家出台了各种政策,促进CCUS技术在中国的应用发展^[1]。

2011年9月,科技部社会发展科技司、中国21世纪议程管理中心共同发布《中国碳捕集、利用与封存(CCUS)技术发展路线图研究》^[2-3],首次提出中国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。路线图提出了2015、2020及2030年分阶段的发展目标,以及CCUS技术环节基础研究、技术研发和示范的优先技术方向^[2,4]。

目前,中国有不同类型的小规模CCUS示范项目已经投入运行,一些大规模CCUS集成项目也正在部署中。随着CCUS在中国的应用和发展,与其相关的各种研究,如捕集技术优化、项目环境监测、风险评估等也随之开展。

当前路线图设定的第1个时间节点(2015年)已经过去,其发展目标的实现情况能够有效地评估当前CCUS技术的发展现状,以此调整未来发展目标,有针对性地促进CCUS技术的发展^[5]。

本文将对第1个时间节点,即到2015年为止路线图的实现情况进行分析,在此基础上提出新目标的发展注意事项与调整措施。

1 总体目标及其完成情况

路线图提出至2015年的阶段目标为,突破低能耗捕集关键技术,建立封存安全研发体系,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%、成本350RMB/t左右^[2]。除此以外,路线图还提出了CCUS捕集、运输、利用和封存环节的规模、能耗、成本等阶段性目标(图1)。

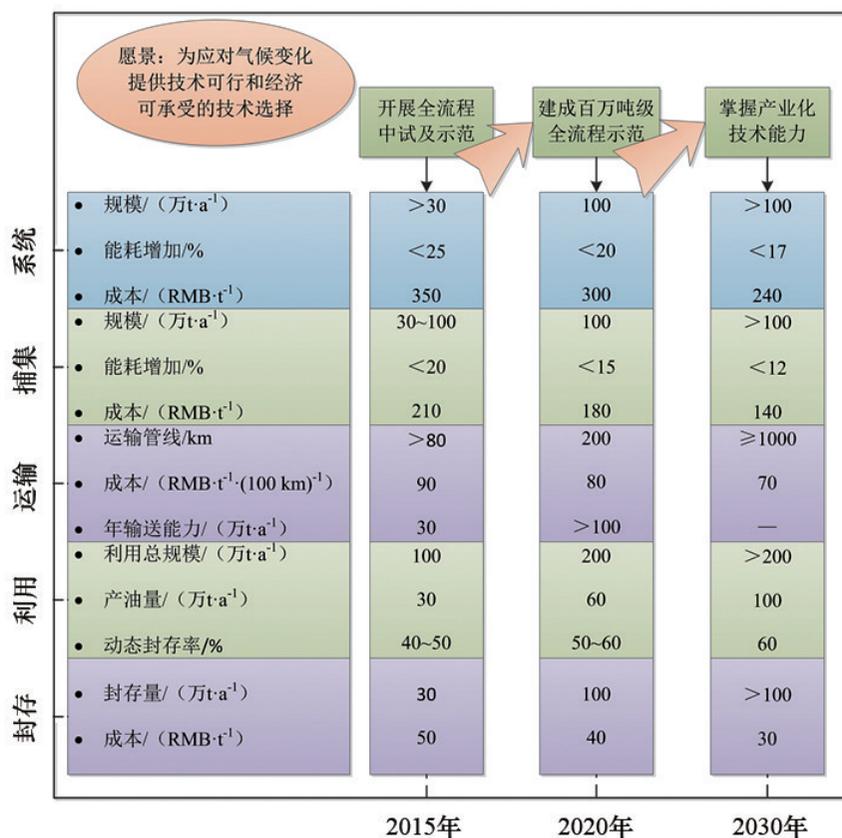


图1 中国CCUS技术发展愿景与阶段目标

Fig. 1 Development vision and phase target of China's CCUS technology

1.1 中国CCUS大规模项目发展情况

为了分析中国CCUS大规模示范项目的发展趋势,结合全球碳捕集与封存(CCS)研究院(GCCSI)的数据、

最新动态^[6],汇总了中国CCUS大规模集成项目的准备情况(表1)。

目前,中国已站在大规模示范的门口。多达14个

表1 中国CCUS大规模集成项目的准备情况
Table 1 Progress of China's large-scale CCUS projects

项目名称	项目内容				目标			
	排放源	捕集类型	运输方式	利用封存方式	规模/(万t·a ⁻¹)	计划投运时间	2016	未来预期
中石化齐鲁石化CCS项目	炼油厂	燃烧前捕集	管道(75 km, 陆—陆)	EOR	50	2014	初步设计	滞后,经济效益原因
中石化胜利电厂CCS项目	电厂	燃烧后捕集	管道(80 km, 陆—陆)	EOR	100	2014	完成预可研	滞后,经济效益原因
大唐集团CO ₂ 捕集和示范封存(大庆油田)	电厂	富氧燃烧	管道(50~100 km, 陆—陆)	EOR或者咸水层封存	100	2016	完成预可研	中止
中石油吉林油田EOR项目(二期)	天然气处理	燃烧前捕集	管道(50 km, 陆—陆)	EOR	50	2017	实际25万t/a	滞后,CO ₂ 供应不足
延长集团碳捕集与封存集成示范项目(延长集团EOR项目)	煤化工	燃烧前捕集	管道(140+42 km, 陆—陆)	EOR	40	2017	建设中	按计划
山西国际能源集团CCUS项目	电厂	富氧燃烧	管道	未明确	200	2020	完成预可研	滞后,因为发电厂未建,该项目很可能取消
神华宁夏煤制油项目	煤制油	燃烧前捕集	管道(200~250 km, 陆—陆)	未明确	200	2020	完成机会研究	滞后,若有激励机制,可能按计划推进
华能绿色煤电IGCC项目(3期)	电厂	燃烧前捕集	管道(50~100 km EOR, 250~300 km 深部咸水层, 陆—陆)	EOR及咸水层封存	200	2020 (原计划2016年投运)	尚未开始机会研究	滞后,目前正在运营10万t级捕集,若与中石油达成合作并有激励机制,有可能实现整体投运
神华鄂尔多斯煤制油项目(二期)	煤制油	燃烧前捕集	管道(200~250 km, 陆—陆)	咸水层封存	100	2020	完成预研究	未知
神华国华电力神木电厂CCS项目	电厂	富氧燃烧	管道(80 km, 陆—陆)	EOR及咸水层封存	100	2020	完成预可研	滞后
华润电力(海丰)碳捕集与封存集成示范项目	电厂及炼油厂	燃烧后及燃烧前	管道(大于150 km, 陆—海)	离岸EOR或者咸水层封存	100	2025	预可研中	滞后,若有激励机制,可能按计划推进
中海油大同煤制气	煤制气	燃烧前	管道(300 km, 陆—陆)	咸水层封存及EOR	100	无公布数据	完成预可研	未知
中海油鄂尔多斯煤制气	煤制气	燃烧前	管道(300 km)	咸水层封存及EOR	100	无公布数据	完成预可研	未知
中电投道达尔鄂尔多斯煤制烯烃	煤制烯烃	燃烧前	管道(300 km)	咸水层封存及EOR	100	无公布数据	完成预可研	未知

注:未考虑化工利用、生物利用项目,只考虑全流程地质利用与封存项目。大规模是指40万t/a以上的规模。项目进行阶段分为机会研究、预研究、预可研、可研、初步设计、施工图设计与建设、运行。CCS—碳捕集与封存;IGCC—整体煤气化联合循环发电系统。

大规模示范项目处于不同阶段准备过程中,且全部是全流程项目,规模大多在100万t以上。吉林油田EOR项目的管道和驱油工程实际上已经完成50万t/a的建设,正等待外部CO₂的供给;胜利油田EOR在2013年就完成了百万t级项目的预可研,部分工程已经完成可行性研究;延长集团EOR项目,正在进行37万t项目的建设,和100万t项目的预研。

1.2 路线图目标实现情况

如图1所示,路线图提出了2015年CCUS的总体目标,以及整体系统、捕集、运输、利用和封存环节的规模、能耗、成本等阶段性目标。结合上文所总结的中国大规模CCUS示范项目发展情况,该时间节点目标的实现情况如表2所示。

表2 2011年CCUS路线图设定的2015年目标及其实现情况

Table 2 Target setting for 2015 in China's CCUS technical roadmap (2011 edition) and the corresponding achievements

2015年目标		2015实际情况	达成状况
总体目标	开展全流程中试及示范		接近完成
系统	规模: > 30万 t/a	吉林油田EOR规模为28万 t/a	接近完成
	能耗增加: < 25%	无公开数据	难以评估
	成本: 350 RMB/t	无公开数据	难以评估
捕集	规模: 30~100万 t/a	10万 t/a(华能、华中科技大学等燃烧前/燃烧后、富氧燃烧碳捕集)	接近完成
	能耗增加: < 20%	无公开数据	可能实现
	成本: 210 RMB/t	无公开数据	不确定
运输	运输管线: > 80 km	50 km(吉林油田)	未完成
	成本: 90 RMB/(t·100 km)	无公开数据	接近实现
	年输送能力: 30万 t/a	50万 t/a	完成
利用	利用总规模: 100万 t/a	47万 t/a	未完成
	产油量: 30万 t/a	2007—2015年吉林油田7年累计增油7.5万 t	
		2010—2015年胜利油田累增油4.3万 t以上	未完成
封存	动态封存率: 40%~50%	> 86%(胜利油田)	不确定,国际上没有动态封存率这个概念
	封存量: 30万 t/a	阶段封存率 > 96%(吉林)	
	成本: 50 RMB/t	10万 t/a(神华)	未完成
		无公开数据	不确定

据表3所列的CCUS项目资料,中国尚无大规模全流程CCUS项目投入运行,但中石油吉林油田EOR项目达到了28万t/a,且建有50 km输送能力为50万t/a的管道,在规模化目标上,路线图的目标接近达成。

成本和能耗目标是否达成,很难评估。首先,目前项目的规模较小、运行期短,多属科研项目,且成本数据很少公开,不宜以项目实际数据进行评估;其次路线图成本目标的内涵也比较模糊,没有界定工艺路线、工程条件和计算方法。

1.3 项目进展与障碍分析

目前中国大规模示范的驱动力仍然不足。大多数项目的进展滞后于计划,实际上没有进入标志实质性开展的初步设计阶段。即使3个进展靠前的EOR项目,也因为油价下跌无法盈利而处于观望之中。中国CCUS在2020年前都基本处于研发和示范阶段,这个阶

段的项目不可能通过商业渠道给投资者带来收益,考虑到成本支出以及技术的不确定性,企业往往不愿意独自承担研发和示范的风险^[7]。

中石化胜利电厂EOR大规模项目就是一个例子。其试点项目于2010年投运,2012年,“十二五”国家科技支撑计划项目《大规模燃煤电厂烟气二氧化碳捕集、驱油、封存(CCUS)技术开发及应用示范》,在胜利油田启动,作为中国首个燃煤电厂CCUS项目,原计划于2014年投运。但是目前尚在进行捕集工程建设,根据当前项目进展及计划,预计2020年后投入运营。该项目开展滞后最主要的因素为资金问题,根据胜利油田对该项目的经济效益分析,按照2014年11月国际原油价格70美元/桶进行计算,在没有任何国家激励政策的前提下,内部收益率为5.6%。依据《中国石油天然气集团公司建设项目经济评价参数(2013)》,陆上特殊油田

开采项目的税后内部收益率规定为8%,低于企业预期的收益率大大降低了企业开展CCUS项目的热情,企业对国家经济激励政策的观望,包括碳价和政府的资金支持等,导致了项目的开展没有完成、停止或滞后。

2 各环节分阶段优先行动现状

为实现所提出的愿景和目标,路线图识别出CCUS

各环节基础研发、技术研发和示范的优先技术方向,包括捕集、输送、利用和地质封存4个环节共12个对象41条建议。

2.1 中国CCUS项目试验示范情况

自2005年以来,中国企业积极开展CCUS研发与示范活动,取得了一定进展,已建成多个万t级以上的装置(表3)。

表3 中国CCUS示范工程的总体情况

Table 3 Overall view of China's CCUS pilot projects

序号	项目名称	示范内容				投运年份	2016年捕集/封存可能规模/(t·a ⁻¹)
		排放源	捕集技术	运输方式	封存或利用方式		
1	中石油吉林油田EOR研究与示范	天然气净化	燃烧前	管道(~50 km)	EOR	2007	能力为50万。因气源供气不足,实际为28万
2	华能高碑店	电厂	燃烧后	—	—	2008	0.3万
3	华能石洞口电厂	电厂	燃烧后	—	—	2009	12万
4	中石化中原油田EOR项目	化工厂	燃烧前	罐车	EOR	2008年始注外购气,2015年建成10万t/a捕集装置	10万
5	中石化山东胜利油田EOR示范项目	电厂	燃烧后	罐车(~80 km)	EOR	2010	<4万
6	中联煤CO ₂ 强化煤层气开采项目		外购气	罐车	ECBM	2010	0.1万
7	中电投重庆双槐电厂碳捕集示范项目	电厂	燃烧后	—	—	2010	1万
8	神华煤制油深部咸水层CO ₂ 地质封存示范	煤制油	燃烧前	罐车(~11 km)	咸水层封存	2011	10万,目前已停止
9	连云港清洁煤能源动力系统研究设施	电厂	燃烧前	—	—	2011	3万
10	华中科技大学35 MW富氧燃烧技术研究与示范	电厂	富氧燃烧	—	—	2011	1万~10万
11	国电集团天津北塘热电厂	电厂	燃烧后	—	—	2012	2万
12	延长集团EOR项目	煤化工	燃烧前	罐车	EOR	2013	<1万
13	华能天津IGCC	电厂	燃烧前	罐车	EOR及咸水层封存	捕集装置建成,封存工程延迟	<10万

2.2 优先行动现状

全流程项目已有4个正在运行,积累了丰富的设计、建设及运营经验。全流程项目包括神华煤制油深

部咸水层CO₂地质封存示范项目、吉林油田EOR项目、胜利油田EOR项目和延长集团EOR项目。其中吉林油田EOR项目规模已达28万t/a,但尚未达到工业示范水

平。CCUS各个环节的情况如下。

2.2.1 捕集技术

捕集技术优先进动部署及现状如表4所示。捕集技术方面,已完成了各种捕集工艺的中试,具备100万t级装置的设计能力。燃烧后捕集已建成从0.3万、1万、2万、4万、12万t级不等的多个试验装置,测试了MEA、MDEA吸收剂的多种添加剂性能,对原料气预处理工

艺、余热回收等工艺进行了不断改进和优化,已经具备了100万t级装置的设计能力^[8]。富氧燃烧装置已建成0.3 MW、3 MW、35 MW(10万t级)装置,完成200 MW装置(100万t级)的可行性研究^[9]。265 MW的华能天津IGCC电厂已投入运行,相配的10万t级捕集装置已经建成^[10]。高碳能源低能耗的CO₂分离技术依旧是未来的研发方向^[11]。

表4 捕集技术优先进动部署及现状

Table 4 Deployment and current state of capture technologies with the priority actions

工艺	行动	进 度	
		0	100%
燃烧后捕集	胺基复合吸收剂、新型氨吸收剂开发和试验		
	膜材料和高效固体吸收剂的开发		
	启动30万t以上规模示范		
	先进水煤气变换催化剂和工艺开发		
燃烧前捕集	先进物理吸收剂和工艺开发与中试试验		
	新型固体吸收(附)剂的开发与中试试验		
	中高温CO ₂ 分离膜材料开发		
	启动10万t级系统示范		
富氧燃烧	低能耗制氧技术实验开发		
	新型载氧体的开发和中试试验		
	富氧燃烧系统中试示范		

2.2.2 运输技术

运输技术优先进动部署现状如表5所示。管道输送方面取得了零的突破。中石油吉林油田已经建成输送能力为50万t/a、50 km长的CO₂管道。相关的管道输送标准及规范正在制定中。管道泄漏的扩散和检测目前还在模型研究^[12]及试验阶段^[13-14],其中泄漏试验已经进行了工业规模的装置设计与安装。

2.2.3 地质利用技术

地质利用技术优先进动部署及现状如表6所示。地质利用与封存方面,完成了中国煤田储层CO₂地质储存潜力评价,以及油气田储层CO₂地质储存适宜性评价,并开展EOR、咸水层封存、驱煤层气现场试验。神华煤制油深部咸水层CO₂地质封存示范项目已经向深部咸水层注入30万t的CO₂,为亚洲最大的咸水层封存

表5 运输技术优先进动部署及发展水平

Table 5 Deployment and current state of transport technologies with the priority actions

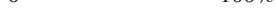
行动	进 度	
	0	100%
开展CO ₂ 管道输送理论、流动特性与模拟研究		
研究CO ₂ 扩散规律,开发CO ₂ 泄漏检测方法		
研究CO ₂ 管道输送工艺标准及规范		
完成80 km的超临界CO ₂ 管道输送工程,年输送能力30万t/a的工程示范		

表6 地质利用技术优先行动部署及现状

Table 6 Deployment and current state of geological utilization technologies with the priority actions

工艺	行动	进 度	
		0	100%
CO ₂ 驱油技术	基本完成中国 CO ₂ 驱油与封存资源潜力评价和源汇匹配研究		
	研究 CO ₂ 驱油-封存的经济评价方法		
	完善 CO ₂ 驱油-封存的主体技术		
	研发 CO ₂ 驱油-封存相关主要装备制造技术		
	实施 10 万 t 规模的 CO ₂ 驱油-地质封存工程示范		
CO ₂ 驱煤层气技术	开展气固耦合作用机理的基础研究, 开发数值模拟技术, 实施煤层增渗技术先导试验		
	完善场地评价及筛选技术, 优先一批技术应用候选场地		
	开展万 t 级规模工程示范		

项目, 该项目目前已经关闭。吉林油田 EOR 项目的注气量已达到 25 万 t/a, 为亚洲最大的 EOR 项目, 胜利油田 EOR 项目已连续运行多年, 并进行了多项基础研究^[15]。中联煤在沁水盆地进行多次驱煤层气现场试验, 已达到 1000 t/a 的规模、逼近 1000 m 的深度, 其规模为世界第二、亚洲最大。

2.2.4 封存技术

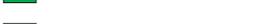
封存技术优先技术行动现状如表 7 所示。共性技术上, 对于不同封存技术的机理均有一定的研究, 尤其是陆上咸水层封存^[16], 对于安全监测与风险控制研究, 包括 EOR 的监测方案研究、井喷泄漏机理研究等^[17]。

当前中国对 4 种封存技术的研究重心为陆上咸水层 > 枯竭油气田 > 海底咸水层 > 酸气回注。其中陆上咸水层及油气田受到较多关注。但是对于陆上咸水层 CO₂封存的环境影响主要还是以影响机理研究为主^[18], 包括对土壤微生物^[19-20]、近地表陆地生态系统^[21]、水体水质及鱼类^[22]、农田作物及其土壤环境等^[23-24], 尚未形成较为系统的整体评价技术。对资源的影响机理及评价技术则较为缺失。

海底咸水层研究包括机理研究^[25]、封存能力评估与风险控制技术与研究、泄漏的潜在生态环境影响评估研究、生态环境脆弱性/敏感性评估等^[26], 完成了中国近

表7 封存技术优先行动部署及现状

Table 7 Deployment and current state of geological storage technologies with the priority actions

工艺	行动	进 度	
		0	100%
共性技术	开展封存机理的基础研究		
	开发场地选址与评价技术、安全监测与风险控制技术		
	评价地质封存潜力与适宜性		
陆上咸水层	开展地质封存的资源与生态影响机理研究		
	开发地质封存的资源与生态影响评价技术		
	开展 30 万 t/a 示范		
海底咸水层	开展中国海底封存机理的基础研究		
	开发海底监测技术及补救技术		
酸气回注	开展酸气封存机理的基础研究		
	开发测试与模拟技术		
	开展试验与示范		
枯竭油气田	开展井筒完整性评价		
	开发井筒修复技术		

海 CO₂ 海底封存区域的综合评估。

近年来对于酸气回注的研究较少,主要有室内酸气流通仪的研制与试验^[27]、世界酸气回注数据库建立^[28]、经济性分析^[29]、工艺技术研究^[30]以及以中石油土库曼斯坦阿姆河右岸区块为对象的封存场地适应性评估等^[31]。目前尚未开展场地试验与示范工作。

2.3 技术壁垒及存在问题

目前中国 CCUS 技术的技术壁垒,包括监测技术、超临界 CO₂ 管道建设、钻井修复工艺等。下一代的低能耗碳捕集技术,如化学链、增压富氧燃烧、膜分离等和国际最近进展有差距^[32]。除此以外,还有一些规模化的关键技术需要解决,例如 CO₂ 大流量压缩技术、大流量高效注气泵、封隔器/封堵/封隔技术、微震监测、合成孔径雷达监测、气体成分检测、环境影响评价等^[33],同时,还需解决项目运行或结束出现的新问题,例如 CCUS 项目废弃井的相关法规及技术支撑^[34-35]。

对于现有先导示范平台,还特别需要政府在政策和资金方面的支持,以充分利用其功能和测试能力,避免低水平的重复建设。

除了技术问题以外,CCUS 技术的发展还存在公众接受度问题与经济效益问题。公众接受度是影响项目发展的重要因素,需要采取合适的宣传手段和内容,降低社会风险^[36]。经济效益是企业开展 CCUS 项目的动力,可以考虑优先发展一些有效地抵消 CCS 技术成本的技术,例如 EOR、二氧化碳驱水(CO₂-EWR)等^[37-39]。

3 结论

2016 年底为止的进度较之 2011 年路线图的阶段性目标滞后约 3~5 年。进展最快的延长集团 EOR 项目最早投运时间尚未明确。在此背景下,要实现 2020 年的阶段性目标,需要解决规模化的关键技术以及项目运行或结束出现的新问题,同时,还需解决大规模示范项目的融资问题^[40],提高 CCUS 项目的经济效益;除此之外,政策激励不足,运行前景不明朗,也是需要迫切解决的问题。

在路线图更新时,新目标的设定,除了考虑技术发展水平和新技术的出现以外,还应该考虑到相关政策对相关技术在项目应用上的影响^[1]。具体有以下几点建议:需要加快对具有早期机会和良好示范效应的地质利用技术(EOR、EWR、增强地热系统)的示范部署,加大扶持力度,避免碎片化资助;明确对示范企业

CCUS 各技术环节的可度量、可报告和可验证的部署要求,建议全生命周期的核查管理体系;强化 CCUS 相关政策、法规和监管框架研究,加大对碳封存预留(CCS-Ready)、碳市场和碳金融的试点经验推广力度;在愿景设定时,注意跟踪 CCS 国际标准技术委员会(ISO/TC 265)和碳收集领导人论坛(CSLF)等相关国际组织的规范与标准。

参考文献 (References)

- [1] Li Q, Chen Z A, Zhang J T, et al. Positioning and revision of CCUS technology development in China[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2016, 46: 282-293.
- [2] 科技部社会发展科技司, 中国 21 世纪议程管理中心. 中国碳捕集、利用与封存(CCUS)技术发展路线图研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 50.
Department of S&T for Social Development, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, The Administrative Center for China's Agenda 21. Technology roadmap study on carbon capture, utilization and storage in China [M]. Beijing: Science Press, 2012: 50.
- [3] Zhang X, Fan J, Wei Y. Technology roadmap study on carbon capture, utilization and storage in China[J]. Energy Policy, 2013, 59: 536-550.
- [4] Li Q, Zhang J T, Jia L, et al. How to "capture the future by utilization of the past" in the coming revision of China CO₂ technology roadmap[J]. Energy Procedia. 2014, 63: 6912-6916.
- [5] 李琦, 陈征澳, 张九天, 等. 中国 CCUS 技术路线图未来版的(更新)启示——基于世界 CCS 路线图透视的分析[J]. 低碳世界, 2014(7): 7-8.
Li Qi, Chen Zheng'ao, Zhang Jiutian, et al. Inspiration to a future update of CCUS technology roadmap in China: Based a synthetic analysis on global CCS roadmaps[J]. Low Carbon World, 2014(7): 7-8.
- [6] Global CCS Institute. Large-scale CCS facilities[EB/OL]. [2017-01-07]. <http://www.globalccsinstitute.com/projects/large-scale-ccs-projects>.
- [7] 陈征澳, 李琦, 张贤. 欧洲能源复兴计划 CCS 示范项目进展与启示[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(10): 81-86.
Chen Zheng'ao, Li Qi, Zhang Xian. The implementation of European energy programme for recovery CCS demonstration projects and inspirations to China[J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(10): 81-86.
- [8] 陆诗建, 黄凤敏, 李清方, 等. 燃烧后 CO₂ 捕集技术与工程进展[J]. 现代化工, 2015, 35(6): 48-52.
Lu Shijian, Huang Fengmin, Li Qingfang, et al. Advance in technology and project of post-combustion CO₂ capture[J]. Modern Chemical Industry, 2015, 35(6): 48-52.

- [9] 郑楚光, 赵永椿, 郭欣. 中国富氧燃烧技术研发进展[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(23): 3856-3864.
Zheng Chuguang, Zhao Yongchun, Guo Xin. Research and development of oxy-fuel combustion in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(23): 3856-3864.
- [10] 张启阳, 黄凤敏, 陆诗建, 等. 燃烧前脱碳技术与工程进展[J]. 应用化工, 2015, 44(7): 1331-1334.
Zhang Qiyang, Huang Fengmin, Lu Shijian, et al. Advances in technology and project of before burning CO₂ capture[J]. Applied Chemical Industry, 2015, 44(7): 1331-1334.
- [11] 翟明洋, 林千果, 马丽, 等. 电力行业碳捕集现状和发展趋势[J]. 环境科技, 2014(2): 65-69.
Zhai Mingyang, Lin Qianguo, Ma Li, et al. Current status and development of carbon capture in power generation industry[J]. Environmental Science and Technology, 2014(2): 65-69.
- [12] 钱新明, 刘彧, 刘振翼. 管道输送二氧化碳泄漏模型研究进展及展望[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(2): 201-206.
Qian Xinming, Liu Yu, Liu Zhenyi. Advances and prospects of the study of modeling CO₂ accidental releases from a pipeline[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(2): 201-206.
- [13] 张媛媛, 张建, 张煜, 等. 浅谈挪威船级社 CO₂ 管道泄漏实验[J]. 油气田环境保护, 2015, 25(5): 14-17.
Zhang Yuanyuan, Zhang Jian, Zhang Yu, et al. Brief discussion on the experiments of CO₂ pipeline leakage of Norway DNV[J]. Environmental Protection of Oil & Gas fields, 2015, 25(5): 14-17.
- [14] 张建. 工业规模 CO₂ 管道泄漏试验装置设计与安装[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
Zhang Jian. Design and installation of the industrial scale CO₂ pipeline leak test[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [15] Lü G Z, Li Q, Wang S J, et al. Key techniques of reservoir engineering and injection-production process for CO₂ flooding in China's SINOPEC Shengli Oilfield[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2015, 11: 31-40.
- [16] Li C, Zhang K, Wang Y, et al. Experimental and numerical analysis of reservoir performance for geological CO₂ storage in the Ordos Basin in China[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2016, 45: 216-232.
- [17] 石晖. 二氧化碳井喷泄漏扩散不确定性分析和危险水平分级研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
Shi Hui. Identification of key factors that influenced leakage and diffusion of CO₂ from a wellbore and classification of their corresponding hazard levels[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [18] 石晖, 刘兰翠, 李琦. CO₂ 地质封存与高放射性核废物地中处置的地质环境影响对比[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(5): 203-207.
Shi Hui, Liu Lancui, Li Qi. A comparative study of geo-environmental impacts of CO₂ geological storage and high level nuclear waste geo-disposal[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(5): 203-207.
- [19] 王莎. 高浓度 CO₂ 对土壤微生物的影响研究[D]. 西安: 西北大学, 2014.
Wang Sha. Effects of high concentration CO₂ on soil microbes[D]. Xi'an: Northwest University, 2014.
- [20] 张慧慧, 李春荣, 邓红章, 等. 二氧化碳入侵土壤包气带对微生物群落的影响[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(2): 377-381.
Zhang Huihui, Li Chunrong, Deng Hongzhang, et al. Effect of carbon dioxide permeation into soil's unsaturated layer on the microbial community[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(2): 377-381.
- [21] 田地, 马欣, 查良松, 等. 地质封存 CO₂ 泄漏对近地表陆地生态系统的影响综述[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(2): 137-145.
Tian Di, Ma Xin, Zha Liangsong, et al. Review of impact of CO₂ leakage from geologic storage on near-surface terrestrial ecological system[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2013, 29(2): 137-145.
- [22] 邵强. 高浓度二氧化碳对水体水质及鱼类的影响研究[D]. 西安: 西北大学, 2015.
Shao Qiang. Elevated CO₂ concentration on surface water quality and carassius auratus research[D]. Xi'an: Northwest University, 2015.
- [23] 田地. 地质封存 CO₂ 泄漏对农田作物及其土壤环境的影响研究[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2013.
Tian Di. Research on the effect of captured CO₂ leakage on crops, grass and soil environment[D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2013.
- [24] 伍洋, 马欣, 李玉娥, 等. 地质封存 CO₂ 泄漏对农田生态系统的影响评估及耐受阈值[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 196-205.
Wu Yang, Ma Xin, Li Yu'e, et al. Impact assessment and tolerable threshold value of CO₂ leakage from geological storage on agro-ecosystem[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(2): 196-205.
- [25] 倪建宇, 初凤友, 金翔龙. CO₂ 海洋封存的研究现状[C]//二氧化碳减排控制技术与资源化利用研讨会论文集. 上海: 中国资源综合利用协会, 2009: 81-85.
Ni Jianyu, Chu Fengyou, Jin Xianglong. An overview of ocean storage of carbon dioxide[C]//Proceedings of the Carbon dioxide emission reduction control technologies and resource utilization. Shanghai: China Association of Circular Economy, 2009: 81-85.
- [26] 霍传林. 我国近海二氧化碳海底封存潜力评估和封存区域

- 研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
- Huo Chuanlin. Study on the potential evaluation and the storage areas of the carbon dioxide seabed storage in offshore China[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014.
- [27] 刘学浩. 新型酸气流通反应仪的研发[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- Liu Xuehao. Development of a novel acid gas flooding apparatus with chemical reaction[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [28] Li Q, Liu G, Liu X. Development of management information system of global acid gas injection projects[M]. New York: Wiley, 2014: 243-254.
- [29] 刘学浩, 李琦, 杜磊, 等. 高含硫气田酸气回注与硫回收经济性对比[J]. 天然气技术与经济, 2012, 6(4): 55-59.
- Liu Xuehao, Li Qi, Du Lei, et al. Economical comparison of both acid-gas reinjection and sulfur recovery in high-sour gasfields[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2012, 6(4): 55-59.
- [30] 孙立辉, 尹龙飞. 酸气回注工艺流程及安全风险研究[J]. 辽宁化工, 2014, 43(1): 94-96.
- Sun Lihui, Yin Longfei. Research on the acid gas Reinjection process and security risk[J]. Liaoning Chemical Industry, 2014, 43(1): 94-96.
- [31] 李琦, 匡冬琴, 刘桂臻, 等. 酸气回注——以土库曼斯坦阿姆河右岸封存场地适应性评价为例[J]. 地质论评, 2014, 60(5): 1133-1146.
- Li Qi, Kuang Dongqin, Liu Guizhen, et al. Acid gas injection: A suitability evaluation for sequestration site in Amu Darya Basin, Turkmenistan[J]. Geological Review, 2014, 60(5): 1133-1146.
- [32] Zheng C, Liu Z, Xiang J, et al. Fundamental and technical challenges for a compatible design scheme of oxyfuel combustion technology[J]. Engineering, 2015, 1(1): 139-149.
- [33] Asian Development Bank. Roadmap for carbon capture and storage demonstration and deployment in the People's Republic of China[M]. Manila, Philippines: Asian Development Bank, 2015.
- [34] 匡冬琴, 李琦, 陈征澳, 等. 全球CCUS废弃井法规现状及其对中国的启示[J]. 天然气与石油, 2015, 33(4): 37-41.
- Kuang Dongqin, Li Qi, Chen Zheng'ao, et al. Global status of abandoned wells regulations and it's enlightenment for China [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33(4): 37-41.
- [35] 李琦, 宋然然, 匡冬琴, 等. 二氧化碳地质封存与利用工程废弃井技术的现状与进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(3): 225-235.
- Li Qi, Song Ranran, Kuang Dongqin, et al. Status and advances of abandoned process of wells for CO₂ geological storage[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(3): 225-235.
- [36] Chen Z, Li Q, Liu L, et al. A large national survey of public perceptions of CCS technology in China[J]. Applied Energy, 2015, 158: 366-377.
- [37] Li Q, Wei Y, Chen Z. Water-CCUS nexus: Challenges and opportunities of China's coal chemical industry[J]. Clean Technologies and Environmental Policy 2016, 18(3): 775-786.
- [38] 李琦, 魏亚妮. 二氧化碳地质封存联合深部咸水开采技术进展[J]. 科技导报, 2013, 31(27): 65-70.
- Li Qi, Wei Yani. Progress in combination of CO₂ geological storage and deep saline water recovery[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(27): 65-70.
- [39] 翟明洋, 林千果, 钟林发, 等. CO₂捕集封存联合地下咸水利用经济评价[J]. 现代化工, 2016, 36(4): 8-12.
- Zhai Mingyang, Lin Qianguo, Zhong Linfa, et al. Economic assessment of carbon capture and storage combined with utilization of deep saline water[J]. Modern Chemical Industry, 2016, 36(4): 8-12.
- [40] 林则夫, 文书洋, 宋斌. 基于实物期权的碳税政策对CCS项目投资决策影响研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(9): 13-20.
- Lin Zefu, Wen Shuyang, Song Bin. Research on the effect of carbon tax policy on CCS projects investment decision based on real option[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(9): 13-20.

Implementation status and gap analysis of China's carbon dioxide capture, utilization and geological storage technology roadmap (2011 edition)

LI Xiaochun¹, ZHANG Jiutian², LI Qi^{1,3}, LIU Guizhen¹, ZHANG Xian², WEI Feng⁴

1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering; Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China
2. The Administrative Center for China's Agenda 21, Beijing 100038, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. Wuhan Library, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

Abstract The carbon dioxide capture, utilization and geological storage (CCUS) is one of the key technologies to reduce emissions of greenhouse gases (GHGs) in fighting against global climate change. With rapid economic development in China, the energy conservation and the GHG emission reduction are important, especially for the sustainable development of green gross domestic product. In September 2011, "Technology Roadmap Study on Carbon Capture, Utilization and Storage in China" was issued by the Department of S&T for Social Development, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China and the Administrative Center for China's Agenda 21. This first CCUS roadmap sets some milestone objectives in 2015, 2020 and 2030, as well as some suggestions for priority technical development of fundamental researches and applied technology researches for the demonstration objectives. The first milestone (2015) has just reached. This paper reviews the latest literature and expert panel discussions, and it is shown that China has built a number of CCUS pilot and demonstration projects, and the priority deployment has also made some progress, but on the whole the current progress lags behind the target by about 2–3 years. In this context, this paper suggests that, to achieve the milestone object of 2020, it is necessary to solve the financing problem of large scale integrated projects to improve the economic efficiency of CCUS technology, and at the same time, and to solve the scale-up problems of all key technologies of CCUS technology. Finally, it is shown that when setting new targets for a coming China's CCUS roadmap (updated edition), in addition to considering the development level of mainstream technologies and emerging technologies, the impact of national policies on choices and applications of the technologies for CCUS projects should be considered.

Keywords climate change; carbon dioxide capture; utilization and storage; full-chain demonstration project; national policy ●



(责任编辑 王志敏)