

陆相低渗咸水层CO₂封存关键技术与应用

赵兴雷 李小春 陈茂山 主编



化学工业出版社

陆相低渗咸水层CO₂ 封存关键技术与应用

赵兴雷 李小春 陈茂山 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

针对未来中国大规模碳减排的技术需求,本书结合鄂尔多斯盆地存在的大量低渗咸水层及周边大量的 CO₂ 排放源减排压力,阐述了低渗咸水层场地适宜性评价、多地层分类改造、高效注入、多维度监测与安全预警等成套 CO₂ 地质封存关键技术及其在示范工程中的应用。

本书可供从事全球碳减排等环境领域研究及油藏、煤层气、页岩气、水合物、地热岩等地质资源开采相关工作的研究和设计人员、施工人员、工程技术人员、运行管理人员使用,也可供相关专业院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

陆相低渗咸水层 CO₂ 封存关键技术与应用/赵兴雷, 李小春, 陈茂山主编. —北京: 化学工业出版社, 2018. 1
ISBN 978-7-122-31252-5

I. ①陆… II. ①赵…②李…③陈… III. ①陆相油气田-低渗透油气藏-二氧化碳-驱油-研究 IV. ①TE357.45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 330460 号

责任编辑: 刘军 冉海滢
责任校对: 边涛

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装: 三河市延风印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张15 字数282千字 2018年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 80.00 元

版权所有 违者必究



以 CO₂ 为主的温室气体的大量排放被认为是造成气候变暖的主要原因，成为全人类面临的最严峻的挑战之一。为了有效应对全球气候变化，2015 年 12 月 12 日在巴黎气候变化大会上通过了《巴黎协定》。各方将加强对气候变化威胁的全球应对，在本世纪末把全球平均气温较工业化前水平的上升值控制在 2℃ 之内，并为把升温控制在 1.5℃ 之内而努力。全球将尽快实现温室气体排放达峰，本世纪下半叶实现温室气体净零排放。

中国经济高位增长带动能源消费量迅速攀升，目前中国已跨升为世界上最大的能源消费国。2007 年，中国 CO₂ 排放量首次超过美国，成为全球第一大碳排放国。而中国“富煤、贫油、少气”的资源现状，决定了未来相当长时期内以煤炭为主的化石能源消费仍会排放大量的 CO₂。

碳捕集与封存技术（Carbon Capture and Storage，简称 CCS）是最有潜力实现化石能源 CO₂ 大规模减排的技术。国际能源署评估 CCS 技术在 2050 年之前对于实现《巴黎协定》碳减排的贡献占 14%~17%，而其大规模推广成本也比现有其他技术低 60%。国家发改委 2015 年底提出了中国 CCS 技术路线图，指出到 2020 年每年将通过 CCS 技术实现 1000 万吨减排量，2040 年实现 CCS 技术商业化推广。

CCS 技术成功实施的关键是找到合适的封存场所，掌握核心的封存关键技术及装备。尽管中国政府组织了数个 CCS 项目，但这些项目的成果大多没有进行较为系统的总结。神华鄂尔多斯 CO₂ 地质封存项目是中国第一个较大规模的陆相低渗咸水层封存项目，产生了很好的国际与国内影响。将该项目丰富的地质封存研究成果以书籍的形式进行科学总结与系统阐述，有助于推动该项目在中国的发展与应用，并为全球 CCS 技术的进一步发展提供宝贵的借鉴意义。

本书由北京低碳清洁能源研究所 CO₂ 地质封存研究组牵头组织编写，编写单位还包括神华集团有限责任公司、中国神华煤制油化工有限公司鄂尔多斯煤制油分公司、中国科学院武汉岩土力学研究所、北京师范大学、中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所、中国矿业大学等国内主要的 CO₂ 封存研究与应用单位。本书第 1 章由李井峰博士与赵兴雷博士编写，主要介绍 CO₂ 减排的目的、意义、主要方式及开展 CO₂ 地质封存的必要性；第 2 章由魏宁博士、胡立堂博士与崔振东博士编写，主要介绍 CO₂ 封存项目的选址技术；第 3 章由胡立堂博士、魏宁博士与王永胜工程师编写，主要介绍 CO₂ 封存项目的注入技术；第 4 章由马瑞工程师、张峰工程师、任艳华硕士、侯湖平副教授与赵兴雷博士编写，主要介绍 CO₂

封存项目的监测技术；第5章由王保登工程师、崔倩工程师、刘莘博士与赵兴雷博士编写，主要介绍CO₂封存项目的安全评价技术；第6章由王永胜工程师与魏宁博士编写，主要介绍CO₂封存技术的应用。全文由赵兴雷博士统一进行校对。

值此书出版之际，感谢国家科技支撑计划及神华集团公司多年来对我们研究工作的资助，感谢化学工业出版社的支持与帮助，感谢本书中引用其著述的中外作者。

由于我们的学识水平有限，特别是本书涉及学科较多、知识面较广，书中无疑有欠妥之处，热忱欢迎各领域的专家及读者指教。

赵兴雷

2017年12月于北京低碳清洁能源研究所

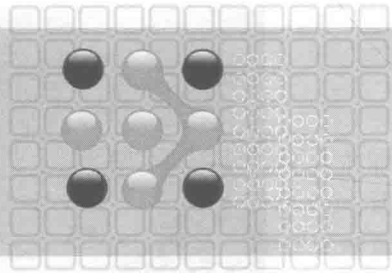


1 碳捕集与封存技术概述	001
1.1 气候变化已成为全球性挑战	001
1.2 化石能源 CO ₂ 排放与减排需求	003
1.3 CCS 对化石能源 CO ₂ 减排作用巨大	003
1.4 中国 CCS 技术的发展现状和趋势	005
参考文献	007
2 陆相低渗咸水层 CO₂ 封存场地评价技术	008
2.1 场地适宜性评价	008
2.1.1 次盆地尺度场地适宜性评价方法的特点	008
2.1.2 场地适宜性评价的关键要素	009
2.1.3 场地适宜性评价的指标体系	011
2.1.4 目标地层筛选的标准	013
2.1.5 场地筛选方法在本项目中的应用	015
2.2 刘家沟复合盖层的密封性评价	016
2.2.1 复合盖层的密封效果分析	017
2.2.2 复合盖层密封效果的影响因素	021
2.2.3 对 CO ₂ 地质封存风险的影响	023
参考文献	023
3 陆相低渗咸水层 CO₂ 注入技术	024
3.1 多地层分类改造	024
3.1.1 各储层测试结果	024
3.1.2 各储层改造方案	025
3.1.3 不稳定试井解释分析	028
3.2 注入方案设计	029
3.2.1 无压裂恒定速率注入	031
3.2.2 无压裂非恒定速率注入	034
3.2.3 有压裂恒定速率注入	037
3.3 基于压力的注入参数控制技术	040
3.3.1 基于砂岩透镜体模型的注入井井口 (1698m) 压力估算	040
3.3.2 基于漂移流模型的注入井井口 (1698m) 压力估算	042

3.4 注入模拟技术	046
3.4.1 模拟器开发	046
3.4.2 模拟和预测软件的测试	050
参考文献	072
4 陆相低渗咸水层 CO₂ 封存监测技术	075
4.1 监测方案设计	075
4.1.1 地下监测方案设计	077
4.1.2 地表监测方案设计	082
4.1.3 地上空间监测方案设计	086
4.1.4 CO ₂ 咸水层封存项目监测体系设计总结	090
4.2 监测技术开发与应用	091
4.2.1 地下监测系统	091
4.2.2 地表监测系统	107
4.2.3 地上空间监测系统	132
4.3 监测装置的自主开发与应用	142
4.3.1 地下原位取样装置	142
4.3.2 地下原位 CO ₂ 通量监测装置	146
4.3.3 自校正井中压力温度监测装置	149
4.3.4 压力平衡自动测量土壤 CO ₂ 气体浓度的装置	154
4.3.5 CO ₂ 泄漏对浅层土壤和植物影响评估的模拟装置	155
4.3.6 基于多传感器的区域 CO ₂ 浓度的检测装置	157
参考文献	158
5 CO₂ 安全预警技术	161
5.1 CO ₂ 安全预警技术构建	161
5.1.1 CO ₂ 封存的安全性评估	161
5.1.2 CO ₂ 地下运移预测	168
5.1.3 CO ₂ 泄漏情景下地表扩散模拟	178
5.1.4 CO ₂ 泄漏预警	193
5.1.5 泄漏应急处置	197
5.2 CO ₂ 封存监测、安全性评估与泄漏预警系统的开发	200
5.2.1 系统结构设计	201
5.2.2 系统数据库设计	204
5.2.3 系统界面设计	204
5.2.4 典型模拟泄漏案例分析	212

参考文献	214
6 陆相低渗咸水层 CO₂ 封存技术应用	217
6.1 选址	217
6.1.1 平面位置选择	217
6.1.2 储盖组合选择	217
6.2 地下注入工程	219
6.2.1 注入过程测试	219
6.2.2 注入过程	223
6.2.3 最大注入能力分析	223
6.3 监测与安全预警	228
6.3.1 监测示范工程	228
6.3.2 安全预警系统	230
6.4 结论与展望	230
参考文献	231

1



碳捕集与封存技术概述

1.1 气候变化已成为全球性挑战

大气监测结果表明,大气层中 CO_2 含量正在增加,与工业化以前的 $280\text{mL}/\text{m}^3$ 的水平相比,目前的大气层中 CO_2 浓度接近 $400\text{mL}/\text{m}^3$ 。大气层中 CO_2 浓度的增加,使其吸收了更多的原本向太空辐射的地球红外线,最终导致全球变暖。全球平均温度在 20 世纪上升了大约 0.74°C ,并且升温速率也在逐渐加快,全球的最热记录也在不断刷新^[1,2]。自有记录的 1895 年以来,2012 年是美国 48 个州最热的年份,而 2012 年也是排名第十的最热年份,已统计的 10 个最热年份中 9 个出现在 2000 年以后。

全球气候变暖带来的主要危害包括冰川加速融化、海平面持续上升、极端气候增加、农作物大量减产、物种灭绝加速,给人类的生存和社会的发展带来严峻挑战。

据 2014 年世界气象组织报告,由于冰川融化,进入 21 世纪以来全球海平面每年上升 0.3cm ,而在 20 世纪该上升速率为每年 0.16cm 。如果按照目前的趋势继续发展,全球一半人口生活的沿海区域将被淹没。太平洋岛国目前已经感受到了被淹没的危险(图 1-1),图瓦卢则被称为“即将消失的海上明珠”^[3]。在 2009 年 11 月发布的《长江流域气候变化脆弱性与适应性》报告指出,近 30 年来,中国上海沿海海平面上升了 11.5cm ,高于全国沿海平均上升的 9cm 。到 2030 年,上海相对海平面将比 2010 年上升 12cm ,到 2050 年上升 25cm 。如果不采取积极的防御措施,到 2050 年,上海存在被海水侵入的可能。

由于全球气候变暖,极端天气事件诸如飓风、干旱、极端热浪、厄尔尼诺现象等也频频出现,物种灭绝也在逐渐加速。研究表明,在气候变暖的影响下,极端热浪的发生频率已经由每 1000 天 1 次变为每 200 天 1 次(图 1-2)。《自然》杂志上发表的文章指出,到 2050 年全球气候变暖将使得地球上 $15\%\sim 37\%$ 的物种灭绝(图 1-3)。生物多样性的大幅下降,将使人类的生存环境受到很大的威胁^[4]。



图 1-1 南太平洋岛国基里巴斯范宁岛（面临被淹没的危险）



图 1-2 2014 年法国格拉贝尔跨夜暴雨后景象

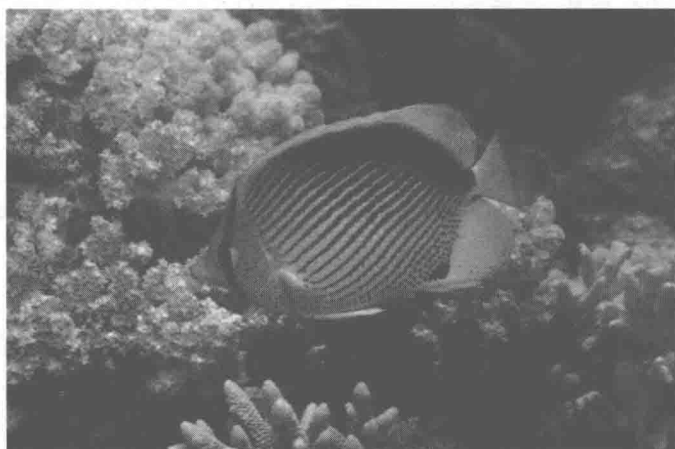


图 1-3 正在消失的珊瑚礁

1.2 化石能源 CO₂ 排放与减排需求

在所有 CO₂ 排放源中，与化石能源燃烧相关的 CO₂ 排放占排放总量的近 60%。据国际能源署（IEA）的统计，2011 年全球来自化石能源燃烧的 CO₂ 达到了创纪录的 316 亿吨左右。IEA 预计，在现行政策下，虽然可再生能源发电量有可能会快速增长，但太阳能、风能和水电的发展仍无法赶上石油和煤炭的消费增长。据 IEA 预测，2030 年化石燃料将占全球一次能源消费总量的 82%，到 2035 年，化石燃料会占 75% 的份额^[5]。在现有技术条件下使用化石能源必然导致大气中 CO₂ 浓度的不断增加，而气候变化的风险对 CO₂ 减排提出了迫切的要求。

中国经济高位增长带动能源消费量迅速攀升，目前中国已跨升为世界上最大的能源消费国，而以煤为主的能源结构特点导致 CO₂ 排放量的持续快速增长。2007 年，中国 CO₂ 排放量首次超过美国，成为全球第一大碳排放国。2013 年，中国碳排放量达到 95.24 亿吨，占全球总排放量（350.94 亿吨）的 27.14%。

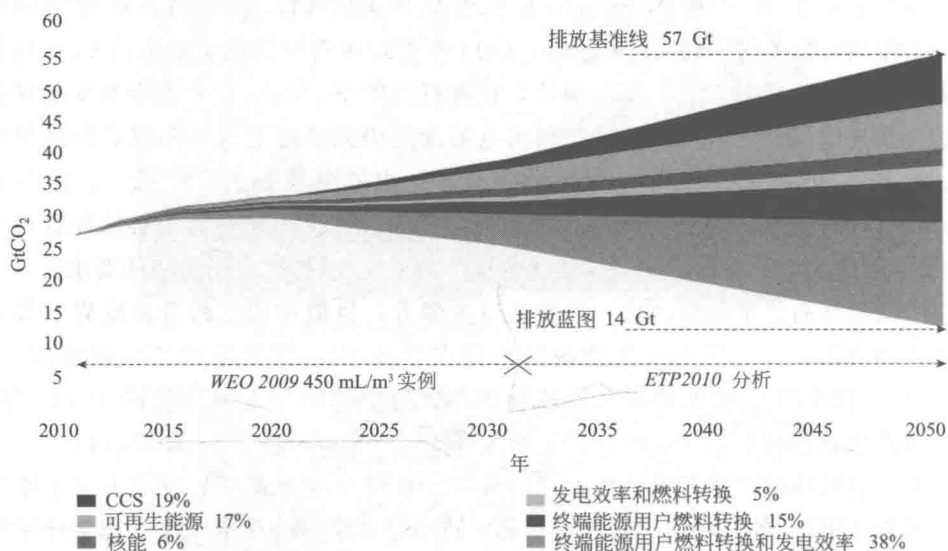
为了有效应对全球气候变化，2015 年 12 月 12 日在巴黎气候变化大会上通过了《巴黎协定》。各方将加强对气候变化威胁的全球应对，在本世纪末把全球平均气温较工业化前水平的上升值控制在 2℃ 之内，并为把升温控制在 1.5℃ 之内而努力。全球将尽快实现温室气体排放达峰，本世纪下半叶实现温室气体净零排放。中国在巴黎大会召开前提交的“国家自主贡献文件”中，提出将于 2030 年左右使二氧化碳排放达到峰值，并争取尽早实现，2030 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%~65%，非化石能源占一次能源消费比重达到 20% 左右。

《巴黎协定》的主要目标是减少化石能源使用，实现 CO₂ 减排，但我国“富煤、贫油、少气”的能源禀赋决定了我国长期以来以煤为主的能源结构（例如煤炭占一次能源消费的比例为 60%~70%）。根据 IEA、BP 和中国工程院等机构的预测，到 2030 年煤炭占中国一次能源消费的比例仍将在 50%~55%。在碳约束下要继续大规模利用煤炭为经济社会发展提供能源支撑，则必须大规模发展煤炭低碳化利用和减排技术。

1.3 CCS 对化石能源 CO₂ 减排作用巨大

国际能源署指出，在最低成本减排方案中，碳捕集与封存技术（Carbon Capture and Storage，简称 CCS）在 2050 年之前对于全球实现《巴黎协定》碳减排的贡献将占 14%~17%^[6]，超出了可再生能源减排的贡献，并且是核能减排贡献量的 3 倍（具体数据见图 1-4）。IEA 预计，不推广 CCS 实现 2050 年 50% 的减排量所需的成本比推广 CCS 技术要高出 70%。因此 CCS 作为一种能够减少由于

利用化石能源产生的二氧化碳排放量的工程方法，始终是全球应对气候变化的重要选项之一。在此背景下，CCS 技术与煤炭资源转化利用的结合将是未来煤炭工业实现低碳发展的重要战略方向。



来源:IEA(2010a,p75)

图 1-4 2050 年前全球可利用 CO₂ 减排手段及其贡献

CCS 是指将来自大型碳排放源的 CO₂ 捕集、分离、压缩，通过管道或其他方式输送，最终封存于深部地层，从而实现长期与大气隔绝的一系列过程。CCS 技术是一个系统技术工程，包括 CO₂ 捕集、运输和封存三个阶段（图 1-5）。

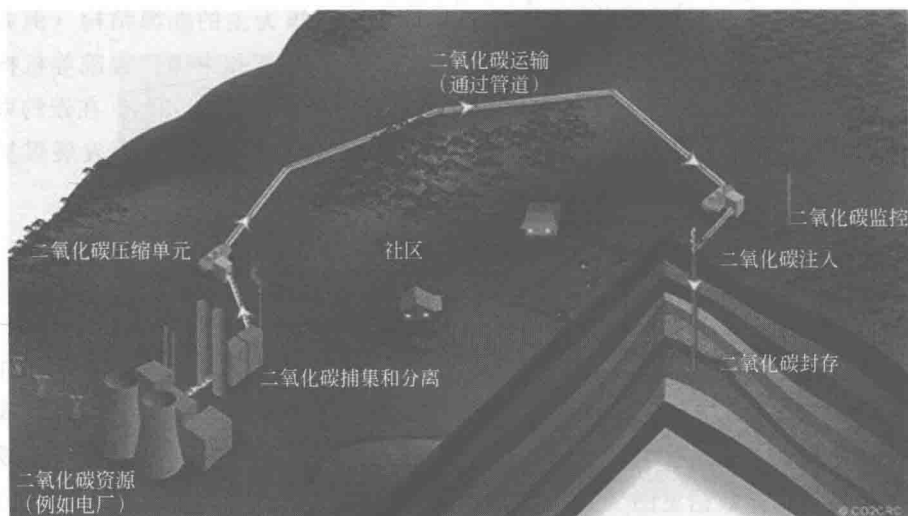


图 1-5 CO₂ 捕集与封存技术

目前,世界 CCS 项目(包括单一捕集、运输或封存环节项目和全流程项目)超过 300 个,其中大规模 CCS 全流程项目 65 个(图 1-6),12 个处于“运行”状态的全流程项目分别分布在美国、欧洲、加拿大等国家和地区,均与石油、天然气领域直接相关,其规模在百万吨以上,并已达到工业化生产能力。



图 1-6 大规模 CCS 全流程项目世界现状

作为 CCS 技术中的关键环节,CO₂ 封存是指把 CO₂ 注入到地下咸水层或枯竭油(气)储层,从而实现永久封存的过程^[7]。目前主要的 CO₂ 封存方式包括咸水层封存、CO₂ 强化石油开采(CO₂-EOR)与 CO₂ 驱煤层气(CO₂-ECBM)等。

全球 CO₂ 总体封存量达数万亿吨至十万亿吨量级^[1]。中国油气田 CO₂ 理论封存容量可达 20 亿~40 亿吨,而咸水层封存理论容量超过 1.5 万亿吨,占封存总量的 90%以上^[8]。咸水层主要分布在沉积盆地内,适合开展 CO₂ 地质封存的咸水层地层主要为 1~4km 深度范围内的陆相沉积体。国外几个主要咸水层封存项目的渗透系数范围均大于 10mD,但是低渗与特低渗储层(渗透系数<10mD)资源特别丰富,尤其是中国存在大量的低渗盆地,在低渗区域开展 CO₂ 咸水层封存具有很重要的现实意义。

1.4 中国 CCS 技术的发展现状和趋势

中国政府高度重视 CCS 技术的发展,从“十一五”开始,国家科技部在碳捕

集与封存领域资助了一批项目（图 1-7），开展关键技术研发和工程示范，并积极开展国际合作（表 1-1）。

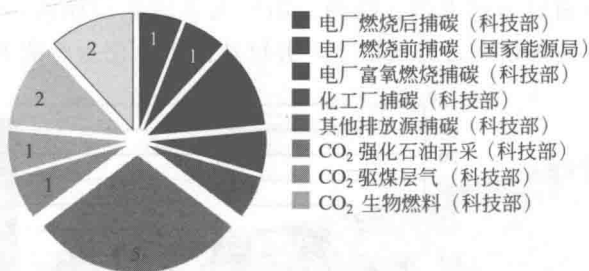


图 1-7 中国政府支持的主要 CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage, 碳捕集、利用与封存技术) 相关研发项目

表 1-1 中国参与的 CCUS 相关的主要国际合作项目

项目名称	资助来源	实施时间	主要合作伙伴
中澳 CO ₂ 地质封存 (CAGS) 合作项目	中国科技部、澳大利亚资源、能源与旅游部	2009—2011	中方: 21 世纪议程管理中心、中国地质调查局、清华大学等 澳方: 澳大利亚地球科学局
中美整体煤气化联合循环的低排放技术联合研究	中国科技部、美国能源部	2010—2012	中方: 中国科学院 美方: 国家能源实验室、西北太平洋国家实验室
中意 CCS 技术合作项目	中国科技部、意大利环境部	2010—2012	中方: 21 世纪议程管理中心、华能集团、清华大学、中国科学院等 意方: 意大利环境、领土和海洋部, Enel 公司等
中欧碳捕集与封存合作项目 (COACH)	中国科技部、欧盟等	2006—2009	中方: 21 世纪议程管理中心、华能集团、清华大学、浙江大学、中国科学院等 欧方: 帝国理工大学、空气产品公司、阿尔斯通、壳牌石油、英国地质调查局、SINTEF 研究所等
中英近零排放合作 (NZE) 项目	中国科技部、英国环境、食品和农业事务部等	2007—2009 (I 期) 2010—2012 (II 期)	中方: 21 世纪议程管理中心、西安热工研究院、清华大学、浙江大学、中国科学院等 英方: 阿尔斯通、英国地质调查局、BP 公司、壳牌石油、斯伦贝谢、斗山巴布科克公司、剑桥大学等
中美清洁能源联合研究中心	中国科技部、能源局美国能源部	2010—2015	中方: 华中科技大学、住建部科技和产业化发展中心、清华大学等 美方: 西弗吉尼亚大学、劳伦斯伯克利国家实验室、密歇根大学等

国家发改委 2015 年底提出了中国 CCS 技术路线图，提出 2020 年通过 CCS 技术（包括 CCUS 技术）实现 1000 万吨/年减排量，2040 年实现商业化推广，彰显了我国作为负责任大国的良好形象^[9]。

CO₂ 咸水层封存是实现 CCS 技术的重要组成部分，也是真正实现 CO₂ 大规模减排的关键。而源汇匹配问题是评价 CO₂ 咸水层封存项目选址可行性的主要因素。我国 CO₂ 集中排放源主要集中在东部和沿海区域，但由于存在场地筛选条件

等制约因素(例如东部城市、人口、水源和经济非常集中),导致东部地区丰富的高渗咸水层资源利用程度有限。在CO₂地质封存高贡献率的前提下,源汇匹配性决定了CO₂咸水层封存大部分集中在低渗区域,以鄂尔多斯、准噶尔等中低渗储层为主的盆地成为CO₂咸水层封存的首选。特别是鄂尔多斯盆地,近年来已成为我国重要的能源化工基地,产生了大量的中高浓度的CO₂排放源。如果能实现这些高浓度CO₂排放源的就地封存,就能显著地降低封存成本,从而找到一种适合中国国情的CCS技术发展模式。

基于上述原因,在国家科技支撑计划的支撑下,项目承担单位联合国内外CCS领域的主要研究单位开展了全球首个陆相低渗(mD级)咸水层CO₂封存关键技术与应用研究,并聚焦以下制约陆相低渗(mD级)咸水层CO₂封存项目的关键难题:

(1) 场地适宜性评价 针对目前低渗咸水层的选址难题,提出适合中国国情的场地适宜性评价方法,提高详细场地表征之前的场地筛选精度。

(2) 低渗咸水层规模注入技术 针对低渗(mD级)咸水层很难用于规模化注入CO₂的传统认识,通过创造性的新技术,提高低渗咸水层的注入能力与稳定性。

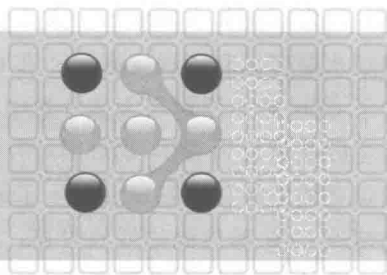
(3) 封存监测安全预警技术 针对低渗咸水层CO₂运移规律,开展适宜性的监测技术开发,解释地下注入CO₂的运移范围及环境影响,并预测封存CO₂的长期安全性。

(4) 陆相低渗咸水层封存技术应用 在开发低渗咸水层封存CO₂成套技术的基础上,建成全球首个陆相低渗(mD级)咸水层封存示范工程并运行,大幅提升咸水层封存CO₂的地质适用范围。

参 考 文 献

- [1] IPCC. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [2] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [3] The paper International Energy Agency(IEA). Energy Technology Perspectives 2014. Paris, IEA/OECD, 2014.
- [4] Thomas C D, Cameron A, Green R E, et al. Extinction risk from climate change. Nature, 2004, 427: 145-148.
- [5] IEA. Technology Roadmap: Carbon Capture and Storage 2009. 2009.
- [6] IEA. Technology Roadmap: Carbon Capture and Storage 2013. 2013.
- [7] 王建秀, 吴远斌, 于海鹏. 二氧化碳封存技术研究进展. 地下空间与工程学报, 2013, (01).
- [8] Wei N, Li X. A preliminary sub-basin scale evaluation framework of site suitability for onshore aquifer-based CO₂ storage in China. International Journal of Greenhouse Gas Control[J], 2013, 12: 231-246.
- [9] 国家发改委. http://wenku.baidu.com/link?url=-IKGfoFbZ-g9R2IZAdXyrtHg0EDC Y8EckiFk3y1s59 F_0ck_6eKYkGGUmrcGEQwy2mCi0DmQds2FfkNIFgc-tAtIVBJ4s_eyyxgalKrBfo7.

2



陆相低渗咸水层 CO₂ 封存 场地评价技术

2.1 场地适宜性评价

目前国外针对 CO₂ 地质封存场地适宜性的评估开展了大量工作，如美国能源部能源技术国家实验室 (NETL)、英国地质调查局 (BGS)、澳大利亚 CO₂ CRC 等分别开发了以庞大的 GIS 数据库和地质资料为支撑的适于本国的 CO₂ 地质封存场地适宜性评价体系。其中较为经典的是美国 NETL 推荐的场地评估方法，该方法高度依赖于场地尺度的场地表征数据（通过 2D 地震、3D 地震、钻井、测井数据等数据综合形成的场地模型），并在此基础上开展数值模拟和场地性能评估。

我国也需要发展适合中国国情和针对中国地质特征的场地适宜性评价的方法。中国现有的场地表征数据分散，总量有限，而且获取渠道匮乏，无法直接采用 NETL 推荐的场地评价方法。另外，NETL 的方法无法考虑大尺度地质特征的影响，导致该方法的评估精度有限。因此，有必要开发一套兼具大尺度盆地特征与小尺度场地特征的方法，提高无大量精细场地表征数据条件下的场地筛选精度，满足大幅度精细场地表征的要求，为下一步精细场地适宜性评价奠定基础。

2.1.1 次盆地尺度场地适宜性评价方法的特点

次盆地尺度场地适宜性评价是主要基于多目标评价方法和 GIS 数据开展的评估方法。多目标分析评价方法在考虑了地质条件、风险、社会、规章制度等因素的基础上，形成了包含三个因素的多目标评价体系。三个主要因素包括：封存技术与经济条件优化，风险最小化和符合社会、法律、法规、环境保护与资源开发要求。GIS 数据包含地层厚度分布、沉积相、地热、沉积环境、地质构造、能源

矿产、地质信息、地应力、水文地质、排放源、自然矿产资源、地震、岩性、河流、城市、人口、经济、交通、气候与盆地属性等信息。

2.1.2 场地适宜性评价的关键要素

次盆地尺度场地筛选采用的多目标分析评价方法的筛选要素如下所述：

(1) 封存技术经济条件优化 封存容量和注入性是评价封存技术经济条件的两个指标。封存容量受孔隙率、地应力、储层温度、置换系数（流体和岩层复杂性所致）、注入压力、盖层的突破（排替）压力、地下深层盐水的溶解性和断层的复发性等多种因素影响。根据沉积地层的详细资料和数值模拟来估算封存容量，根据有效厚度、孔隙率、置换率来确定盆地尺度和区域尺度的容量^[1]。注入速率和咸水层的注入厚度、渗透系数、储层与盖层的力学特性和热力学条件有关，其中热力学条件影响 CO₂ 的密度和黏性^[2]。目前，场地的注入性依据咸水层的渗透系数和砂层厚度综合判断，注入性上限由注入压力阈值（包括盖层突破压、厚度、力学强度等因素）确定。

(2) 风险最小化 控制封存风险需考察注入压力、盖层完整性、地质构造、活动断层与资源冲突等因素。

① 最大注入压力 美国环境保护局提出“封存注入压力不得超过注入区域岩体起裂压力的 90%”。注入压力主要受封存地层尤其是盖层致裂压力的影响较大。当孔隙应力超过岩体的最小主应力与岩体强度之和时，裂隙就开始扩展，这与岩层的力学性质和地应力场有关。注入压力不得超过盖层的致裂压力，否则在注入期间和封存期间会引起 CO₂ 泄漏。估算岩体破裂压力的方法有许多，包括最小主应力法、水压力致裂法等。场地初评时，亦可以通过经验公式开展 CO₂ 注入场地的筛选。

② 盖层的完整性 盖层的完整性是一个非常重要且复杂的问题。它与岩石力学性质、地层展布、水动力学、地应力场、CO₂ 与盖层相互作用等因素相关。注入方式有单井注入、多井注入和结合地层流体回收的多井注入（回收流体主要是盐水）等。研究表明，传统的 CO₂ 大规模注入方式可能会导致 CO₂ 通过断层、盖层和废弃井泄漏。Chiaromonte 等在美国 Wyoming 地区进行了试点试验，研究了盖层的地质力学特征及 CO₂ 通过断层泄漏的风险^[3]。注入压力增加会增大孔隙压力，改变储层的有效应力，而注入压力过大会导致盖层破裂或者导致断层错动甚至断层活化。

③ 活动断层 研究表明，大部分断层和裂隙在注入时会闭合，一般不会扩展。地层可以储集大量的油气资源的现象表明，断层围封的区域具有良好的密闭性，因此从理论上说部分断层可以封存 CO₂。然而，CO₂ 通常也可以沿着断层和裂隙逐渐泄漏到地表并扩散。CO₂ 会在地表和地下水位之间的区域积聚，这主要