

Geological Storage of Carbon Dioxide
and Environmental Monitoring

二氧化碳地质封存 和环境监测

蔡博峰, [澳大利亚] 格雷格·利蒙 (Greg Leamon), 刘兰翠
编 著



化学工业出版社

Geological Storage of Carbon Dioxide
and Environmental Monitoring

二氧化碳地质封存 和环境监测

蔡博峰, [澳大利亚] 格雷格·利蒙 (Greg Leamon), 刘兰翠
编 著



化学工业出版社

·北京·

地质封存是 CCS 中技术上最具挑战性的一个环节,也是环境风险和环境影响最大的环节。环境监测是保证 CO₂ 地质封存全球大规模应用的关键步骤。本书较为系统地介绍了 CO₂ 地质封存过程中环境监测的主要方法和技术。本书适合于关注 CO₂ 地质封存的政府部门、环境相关科研工作者和高校学生。

Geological storage of anthropogenic CO₂ is the most challenging part, as well as with the most significant environmental risks and impacts, in the CCS process. Environmental monitoring is the decisive step for the application of CO₂ sequestration at the global scale. This book describes in detail the environmental monitoring methods and measurements for the geological storage of CO₂, and is applicable for governments, researchers and university students.

图书在版编目 (CIP) 数据

二氧化碳地质封存和环境监测/蔡博峰, [澳大利亚]利蒙 (Leamon, G.), 刘兰翠编著. —北京: 化学工业出版社, 2012. 11

ISBN 978-7-122-15400-2

I. ①二… II. ①蔡…②利…③刘… III. ①二氧化碳-大气监测-研究 IV. ①X831

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 232679 号

责任编辑: 宋湘玲

装帧设计: 张 辉

责任校对: 宋 玮

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 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 7% 彩插 4 字数 147 千字 2013 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

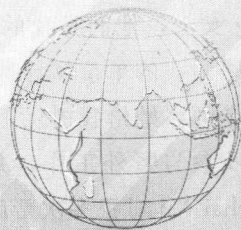
购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

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: 42.00 元

版权所有 违者必究



前言

CCS (CO₂ 捕获和封存) 技术在中国受到了越来越广泛的重视和关注。中国政府和许多企业都认为 CCUS (CO₂ 捕捉、利用和封存) 将在中国中长期 CO₂ 减排战略中发挥重要作用。CO₂ 地质封存是 CCS 技术的核心, 也是主要环境风险环节。中国在 CO₂ 地质封存方面取得了很大进展。中国神华集团 2011 年已经开始了深部咸水层的 CO₂ 注入工程。环境风险和环境影晌是 CO₂ 地质封存受争议的焦点之一, 因而严格、系统的环境监测成为决定 CO₂ 封存项目成败的关键因素之一。中国在 CO₂ 地质封存的环境监测方面尚缺乏经验。因而本书的目的是探索性地讨论 CO₂ 地质封存中如下几点问题: ① CO₂ 地质封存项目为什么要开展环境监测; ② CO₂ 地质封存的环境风险和潜在环境影晌都有哪些; ③当前有哪些成熟技术和潜在技术可以用于 CO₂ 地质封存的环境监测; ④国际上已经开展的大型 CO₂ 地质封存项目都采用了哪些环境监测技术; ⑤ CO₂ 地质封存环境监测的法律法规。

2011 年 9 月 21 日至 12 月 17 日, 我有幸得到中国-澳大利亚 CO₂ 地质封存项目 (CAGS) 支持, 赴澳大利亚地质局进行交流访问。在此期间, 我较为系统地了解和学习了澳大利亚在 CO₂ 地质封存环境监测方面的方法和技术, 参加了澳大利亚地质局 CO₂ CRC 的 Otway 项目和 Emerald 项目的环境监测野外工作。同时访问了新南威尔士大学石油工程学院和澳大利亚气候变化和能源效率部等研究机构。

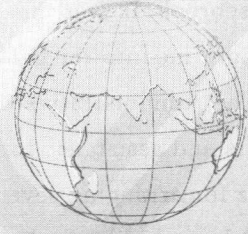
本书是我、澳大利亚地质局的 Greg Leamon 先生及刘兰翠博士基于本次访问活动和我们在 CO₂ 地质封存方面研究的一个成果汇总。

非常感谢 Jessica Gurney 女士, 她从我申请访问直到离开澳大利亚, 一直给予我热情的帮助, 事无巨细都认真负责。感谢 Rick Causebrook 先生, 事实上, 我了解 CO₂ 地质封存是从 Rick Causebrook 先生在环境保护部环境规划院的一次报告开始的, 是他的工作和学术研究吸引了我开始关注 CO₂ 地质封存问题, 此后他也在地质封存的科学问题方面给予我多次帮助。感谢澳大利亚地质局的 Liuqi Wang 老

师对本书稿提出的建议。感谢澳大利亚地质局的 Junhong Chen 先生和 Ziqing Hong 女士，他们对我的野外工作给予了多方帮助，为我提供了出野外的必需装备。感谢我的单位领导曹东主任对访问的支持。感谢中国 21 世纪议程管理中心的贾莉老师，她给我提供了热情的指导和帮助。感谢 Andrew Feitz 先生多次帮助和支持我参与野外工作，并且给我讲授了大量 CO₂ 监测方面的知识和技术。感谢 Donghai Xu 对我多次帮助和良好的建议。感谢刘梅博士和她的丈夫李发鹏，正是与他们的友情，使我消除了在堪培拉的孤独寂寞。感谢中国科学院武汉岩土力学研究所李琦老师的热情帮助和指导，同时感谢 Richard Dunsmore, Tehani Kuske, Liuqi Wang, Zhi Huang, Aleks Kalinowski, Ron Zhu, Jingming Duan, Karen Higgins, Henry Berko 和那些曾经帮助过我们的人。

蔡博峰

2012. 10



Foreword

There is growing recognition and acceptance by the Chinese central government and companies that CCUS (Carbon Capture, Use and Storage) will play a key role in China's climate change abatement strategies, particularly in the medium to long term. China has been making good progress in geological storage of CO₂. Some state-owned companies, such as Shenhua group, have started the injection of CO₂ into geological formations. Considering that environmental issues have become more important for the geological storage of CO₂, and the environmental monitoring in this field in China is currently minimal or lacking, the purpose of this study is monitoring knowledge and experiences of geological storage of CO₂.

I was honoured to have an opportunity to visit Geoscience Australia (GA) in Canberra, Australia, as an exchange researcher during 21 Sep. 2011 to 17 Dec. 2011. My visit was a part of *China Australia Geological Storage of CO₂* project. During my visit, I had a good communication with The University of New South Wales in Sydney, and the Australian Federal Department of Climate Change and Energy Efficiency in Canberra, and visited the famous Otway CO₂ injection project in Victoria. Most of my time in GA was used on the literature reviews, asking questions and communications with different people. This report is a summary of my studies and meetings in Australia.

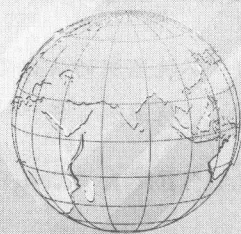
This book is the achievements and results of this visit and research of Mr. Greg Leamon and Dr. Lancui Liu.

I would like to thank the CAGS project and Geoscience Australia for giving me such a valuable opportunity to visit Australia. I am sincerely grateful to Jessica Gurney for her help, from the application of this visit to the end of my trip. She helped

me in every possible way and in detail. I would like to express my gratitude to Rick Causebrook. It was his work and presentations that intrigued my interests and brought me into the geological storage research. Many thanks to Li Jia, affiliated to The Administrative Centre for China's Agenda 21 (ACCA21) for her arrangements and assistance in the preparations for my visit. I would like to thank Andrew Feitz for arranging several visits to the field and teaching me so much about monitoring. I would like to thank Junhong Chen and his wife Ziqing Hong for providing me the equipments for the fields works. I would like to thank Donghai Xu for his help and suggestions.

I would like to thank Mei Liu and her husband Fapeng Li, their company and our friendship keep me away from loneliness and made my time in Canberra a happy one. Many thanks to Dr. Li Qi in Institute of Rock and Mechanics, CAS, for his help and suggestions. I would like to express my gratitude to Richard Dunsmore, Tehani Kuske, Liuqi Wang, Zhi Huang, Aleks Kalinowski, Ron Zhu, Jingming Duan, Karen Higgins, Henry Berko and all those who helped me. Because of the people above, that my time in GA became interesting and meaningful. Especially, I would like to give my special thanks to my wife Nan Zhao whose patient love enabled me to complete my overseas work.

Bofeng Cai
October, 2012



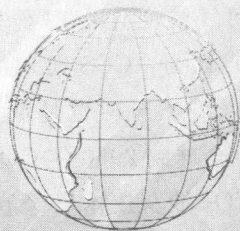
目 录

第 1 章 二氧化碳地质封存概况	1
1.1 二氧化碳捕集和封存在全球温室气体减排中的作用	1
1.2 二氧化碳地质封存基本原理	3
1.3 二氧化碳地质封存类型	4
1.4 二氧化碳地质圈闭机理	5
1.5 全球二氧化碳地质封存项目概况	7
1.6 中国二氧化碳地质封存	7
第 2 章 二氧化碳地质封存的环境风险	11
2.1 二氧化碳地质封存的泄漏风险	12
2.2 二氧化碳泄漏的环境影响	14
2.3 二氧化碳地质封存风险评估研究	17
第 3 章 典型二氧化碳地质封存项目的监测技术和方法	23
3.1 工业规模水平的二氧化碳地质封存项目监测技术	24
3.2 实验规模水平的二氧化碳地质封存项目环境监测技术	27
第 4 章 二氧化碳地质封存的环境监测	31
4.1 环境监测的必要性	31
4.2 环境监测方法	33
4.3 环境监测技术	36

第 5 章 二氧化碳地质封存的环境监测相关法规	43
5.1 环境监测的法规要求	43
5.2 环境监测责任	45
CHAPTER 1 General information of geological storage of CO₂	49
1.1 CCS in global greenhouse gases mitigation	50
1.2 Mechanism of Geological Storage of CO ₂	53
1.3 Modes of CO ₂ storage formation	54
1.4 Trapping mechanism	57
1.5 Global geological storage of CO ₂	59
1.6 Advances of geological storage of CO ₂ in China	61
CHAPTER 2 Environmental risk of geological storage of CO₂	65
2.1 Risk of leakage associated with geological storage of CO ₂	66
2.2 Environmental impact of CO ₂ leakage	69
2.3 Risk assessment studies	73
CHAPTER 3 Monitoring technologies in typical geological storage of CO₂ projects	81
3.1 Industrial scale projects for geological storage of CO ₂	86
3.2 Experimental scale projects for geological storage of CO ₂	88
CHAPTER 4 Environmental monitoring for geological storage of CO₂	91
4.1 Monitoring Rationale	91
4.2 Monitoring Methods	94
4.3 Monitoring Techniques	97
CHAPTER 5 Legal and regulatory aspects of environmental monitoring for geological storage of CO₂	107
5.1 Regulatory requirements for monitoring	107
5.2 Monitoring liability	109
参考文献	113

第1章

二氧化碳地质封存概况



CO₂ 捕集与封存 (CCS) 是 CO₂ 捕集、运输和地质封存的一个完整系统的过程。CCS 被认为是当前解决全球温室气体减排的重要措施之一。CCS 技术是沟通当前低碳转型和未来替代能源的桥梁性技术。它提供了一种切实可行的方案,采用已经成熟的技术,使得大规模减排 CO₂ 在经济成本上成为可行。

CO₂ 地质封存是 CCS 技术中的核心内容之一,也是 CCS 整个过程中技术上最具挑战性的一个环节。自然界的 CO₂ 地质封存过程已经发生了百万年。但人工将 CO₂ 注入到地层中却是上世纪才开始。最早将 CO₂ 注入地下的项目是 20 世纪 70 年代美国德克萨斯州的 CO₂ 驱油提高采收率 (EOR) 项目。此后,利用 CO₂ 注入地下油藏进行提高采收率的活动逐渐多了起来。将 CO₂ 封存于地下作为人类活动温室气体的减排手段,最早是 20 世纪 70 年代提出的,但到 20 世纪 90 年代,也没有开展太多深入研究。但 20 世纪 90 年代以后,这一观点受到许多研究团体的关注 (IPCC, 2005)。从 20 世纪 90 年代至今,CO₂ 地质封存已经从当初的一个未受关注的理论概念,发展成为广被了解并被认为是全球温室气体减排的重要手段之一。

但如果 CO₂ 地质封存要在全球温室气体减排中发挥实质性贡献的话,则必须要在安全、环保和经济的条件下大规模地推广和实施。

1.1 二氧化碳捕集和封存在全球温室气体减排中的作用

国际能源署 (International Energy Agency, IEA) 在研究报告中认为,全球要实现 2℃ 升温控制,则必须将大气中 CO₂ 的浓度控制在 450 ppm,即需要 2050 年的温室气体相比 2010 年减排 50%,而 CCS 将在总减排量中贡献 19% (彩图 1-1) (IEA, 2010)。2025~2030 年期间,CCS 将会有较快发展,因为届时低成本的

能效提高和可再生能源发展空间已经非常有限，而 CCS 则变得具有成本竞争优势。政府间气候变化专门委员会（The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）认为，CCS 到 2100 年在全球的累计减排量中会占到 15%~55%（IPCC, 2005）。CCS 同时也是低成本温室气体减排技术方案的重要组成部分。如果没有 CCS，全球到 2050 年 CO₂ 减排 50% 的成本会提高 70%（IEA, 2009）。

CO₂ 捕获技术已经在工业界使用了很多年，主要用来去除气体中不需要的 CO₂，或者是捕获 CO₂ 将其作为副产品。CO₂ 的运输在北美已经开展了近 30 年，每年有近 30Mt 来自人工和自然源的 CO₂ 通过 6200km 的运输管线在美国和加拿大之间运送。天然气管道运输的历史更长，其可以为 CO₂ 运输提供良好的借鉴经验。而 CO₂ 地质封存技术相对捕获和运输技术，则经验要少得多。2010 年以前，除了 Sleipner, In Salah 和 Snøhvit 项目外，所有 CO₂ 地质封存项目都是 CO₂ 驱油项目，真正单纯 CO₂ 地质封存项目极少。当前对于全球 CO₂ 地质封存的地质条件、特征和资源的了解几乎都是基于石油和天然气开采。而对 CO₂ 地质封存最有潜力和封存能力最大的地下咸水层，我们却知之甚少，对 CO₂ 封存特征、环境风险等都未有深入了解。全球地质层的 CO₂ 封存潜力评估见表 1-1 和表 1-2。

表 1-1 IPCC 全球 CO₂ 地质封存潜力评估

储层类型	封存能力下限/Gt CO ₂	封存能力上限/Gt CO ₂
油气藏	675	900
不可开采煤层	3~15	200
深部咸水层	1,000	不确定,但可能在 10 ⁴ 量级

数据来源：IPCC, 2005.

表 1-2 IEA 全球不同地区 CO₂ 地质封存潜力评估

区域	理论封存能力 /Gt CO ₂	2020 年总 CO ₂ 封存量/Mt	2050 年总 CO ₂ 封存量/Mt
OECD 北美	2,170~4,650	520	38,100
OECD 欧洲	120~940	170	15,600
OECD 太平洋	800~900	130	14,300
中国和印度	1,520~3,020	170	37,500
其他非 OECD	3,480~5,990	250	39,100
全球	8,090~15,500	1,240	144,600

注：OECD——经济合作与发展组织。

数据来源：IEA, 2009.

IEA 在其 CCS 技术路线图中提出为了实现 2050 年 50% 的减排目标，需在

2010~2050 年期间累计地质封存 145Gt CO₂。这意味着到 2050 年将有超过 3400 个 CO₂ 地质封存项目。尽管全球有许多地方具有 CO₂ 地质封存的巨大潜力（彩图 1-2），但同时，许多地质断层也和这些区域临近存在，此外区域水平更加详细的科学评估当前依然缺乏。

将 CO₂ 封存于地层深处的挑战是缺乏经验和对封存地质的了解不充分，一个 CO₂ 地质封存项目的成功与否最终取决于其是否安全可靠和环境友好。

1.2 二氧化碳地质封存基本原理

完整的 CO₂ 地质封存过程包括 4 个阶段：选址和评价（约 3~10 年），运行地下注入（几十年），关闭（几年）和关闭后。CO₂ 被注入到深部地层（通常深度超过 1000m）的岩石空隙中，从而被封存在地层中。一旦 CO₂ 被安全地注入到地层中时，其可能被封存长达地质时期之久。

为了能更好地地质封存 CO₂，需要将 CO₂ 压缩，使 CO₂ 的密度状态达到“超临界”。CO₂ 的密度会随注入深度的增加逐渐增加，当深度达到或者超过 800m 时，CO₂ 的密度将会达到超临界状态，此时随着注入深度的增加，CO₂ 的密度变化会很小。处于超临界状态的 CO₂ 密度约为 750kg/m³，此时，CO₂ 以气体状态充满岩石空隙，同时又具有黏稠性，即其状态介于气态和液态之间。地表 1,000m³ 的 CO₂ 注入到地下，在地下 800m 达到超临界状态，在地下 2km 的注入深度，其体积从地表的 1,000m³ 锐减到 2.7m³（图 1-3）。这种特性使得大规模地质封存 CO₂ 具有很大的吸引力和应用价值（CO₂GeoNet, 2010）。

在以往的区域或者盆地 CO₂ 地质封存能力评估中，通常认为处于超临界状态的 CO₂ 的密度基本在 650~750kg/m³ 之间，但 CO₂ 密度很大程度上受地热梯度和流体静压力的影响。澳大利亚最新的研究表明，在具有很强地热梯度的盆地（“热”盆地），CO₂ 进入超临界状态时的密度仅为 200kg/m³，这一“热”盆地以外的区域，CO₂ 进入超临界状态时的密度为 450kg/m³（Causebrook, 2010）。

决定地层储存 CO₂ 能力的主要因素有 5 个：地层厚度（即具有空隙岩石的地层有多厚）；储层地层的面积；岩石的孔隙度（岩样中所有孔隙空间体积之和与该岩样体积的比值，以百分数表示，它决定了地层中有多少空间可以储存 CO₂）；CO₂ 密度；岩石渗透性（岩石被流体渗过的性能，它决定 CO₂ 注入到地层某处时，是否能顺利地扩散到地层的其他地方）。孔隙度大于 10% 的碳酸盐岩地层和孔隙度大于 15% 的碎屑岩地层都是比较理想的 CO₂ 储层。但具有较好孔隙度的岩石，其渗透性却可能变化很大，从 0.1 毫达西（mD）（非常密实）到几个达西（D）（渗

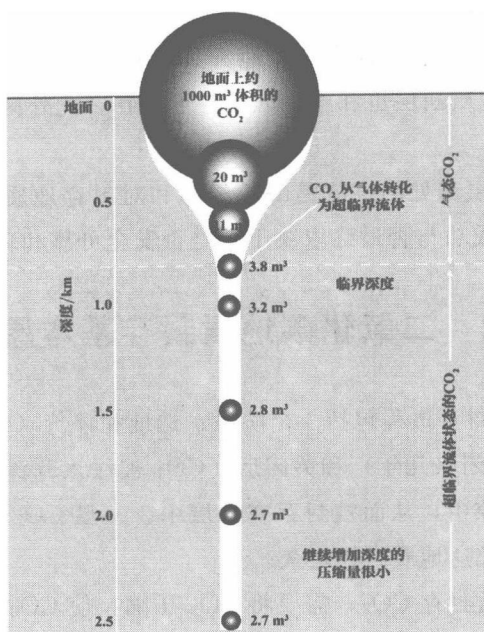


图 1-3 CO₂ 密度随注入深度变化

数据来源: CO₂GeoNet, 2010.

透性非常好)。石油工业通常使用毫达西作为渗透性的单位。理论上, CO₂ 地质储层需要较高的渗透性 (大于 100mD), 较高的渗透性, 可以使在注入井注入的 CO₂ 迅速扩散开来, 从而充分利用储层的空间。

1.3 二氧化碳地质封存类型

能实现 CO₂ 地质封存的地层需要满足几个主要条件:

- ① 充足的储存空间和可注入性 (足够的孔隙度和渗透性);
- ② 安全的封层 (盖层), 即位于储层之上具有不可渗透岩石层, 这样可以防止 CO₂ 向上移动和渗漏 (彩图 1-4);
- ③ 地层需要深于 800m, 这样压力和温度才能足够高, 使得注入的 CO₂ 达到超临界状态, 从而最大化地封存 CO₂。

CO₂ 地质封存可以在许多类型的沉积岩盆地中进行。适宜 CO₂ 封存的地层主要可以分为 4 大类 (彩图 1-5):

- ① 枯竭的油藏、气藏;
- ② CO₂ 提高油/气采收率;

③ CO₂ 提高煤层气采收率；

④ 深部咸水层。

枯竭的油藏、气藏是当前最为现实和具有可操作性的 CO₂ 封存地层类型。因为这些油气藏已经被研究得较为彻底，所以数据资料丰富且容易获取，从而可以直接、有效地支持 CO₂ 地质封存评估以及理解 CO₂ 注入地层后的动态情况。同时，这些地层的压力状态都比较适宜 CO₂ 的注入和封存。可以利用现有的钻井评估和地层监测数据分析研究 CO₂ 地质封存。但同时，已有钻井也是破坏地层完整性的潜在因素，需要进一步评价、修复和监测。通过注入 CO₂ 从而实现 EOR 和 EGR (CO₂ 提高天然气采收率) 是当前 CO₂ 地质封存中唯一经济可行 (具有成本效益) 的类型。CO₂ 在石油行业被用于 EOR 已有几十年的历史，通常能提高原油采收率 7%~23% (平均为 13.2%)。

石油行业基于 CO₂ 和石油的混合状态特征，利用注入的 CO₂ 提高石油采收。注入的约 50%~67% 的 CO₂ 会随着石油开采返回到地面，但之后会被再次分离出来重新注入油井中加以循环利用。剩下的 CO₂ 则会通过各类机制被油藏捕获。

深部咸水层是最具潜力的 CO₂ 地质封存地层。因为其覆盖范围广且地质特征接近 CO₂ 地质封存要求。具有良好封存条件的深部咸水层往往和油气藏分布在同样的盆地中，并且其地质条件和天然油气藏也比较相似。

煤层是 CO₂ 地质封存类型中较为独特的一种。因为注入的 CO₂ 很大程度上是取代煤层气 (主要是甲烷) 而吸附于煤基质上，因为 CO₂ 比煤层气更加容易吸附于煤基质上。总体上，有观点认为，既然煤层可以储存煤层气达百万年，它也可以储存 CO₂ 达到同样的时间尺度。但 CO₂ 和煤基质之间的反应仍需要进一步深入研究。特别是在 CO₂ 注入煤层后的化学反应和物理过程，以及它们对煤层储存完整性的影响，这些方面当前都缺乏深入的研究和了解。

1.4 二氧化碳地质圈闭机理

CO₂ 注入地层后，是依靠一系列的地质圈闭过程将其永久封存于地层中的。其主要有 4 种圈闭过程：结构和地层圈闭；残余圈闭；溶解圈闭和矿化圈闭。如彩图 1-6 所示。随着时间的推移，物理圈闭过程 (结构和地层圈闭，残余圈闭) 发挥的作用将会逐渐降低，而地球化学圈闭过程 (溶解圈闭，矿化圈闭) 的作用则会逐步增加，并且封存的安全性也随之逐步得到提高 (图 1-7)。

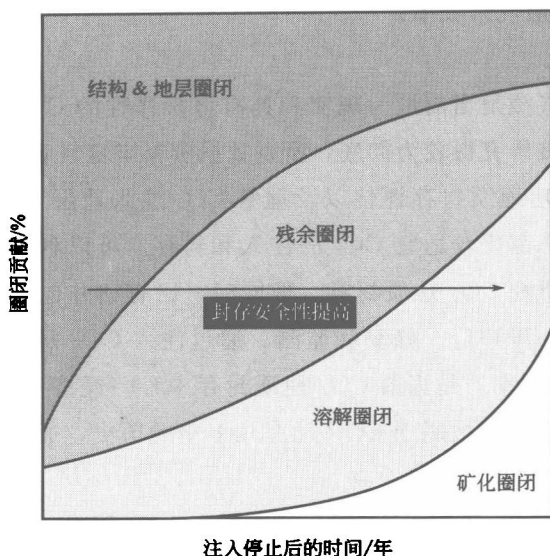


图 1-7 CO₂ 地质圈闭机理

数据来源：IPCC，2005。

(1) 结构 & 地层圈闭

当 CO₂ 注入到地层中后，CO₂ 会进入岩石空隙，而这些岩石空隙往往被盐水充满，所以在注入压力下，CO₂ 会挤压盐水，充满岩石空隙，并和盐水混合。因为 CO₂ 的密度要低于盐水，所以处于超临界状态的 CO₂ 会受浮力的作用向上移动。但 CO₂ 向上移动到盖层时就停止移动，因为盖层渗透性极低，使其无法通过。通常盖层岩石都是泥岩等。盖层相当于盖子，将 CO₂ 限制其内，防止其向上移动，因而在有地质褶皱或隆起的地方，盖层下面就会逐渐累积起大量的 CO₂。这种过程就是结构和地层圈闭。

(2) 残余圈闭

残余圈闭发生在储层中岩石空隙较小的情况中，当 CO₂ 通过时，少量的 CO₂ 由于受毛细作用力而存留下来，尽管这时 CO₂ 和周围盐水之间仍存在着密度差异。总体上讲，残余圈闭是大量 CO₂ 在移动过程中，在岩石缝隙中残留一定量 CO₂ 的过程，这种过程会逐渐削弱 CO₂ 的移动范围。残余圈闭也是一种非常重要的 CO₂ 地质圈闭过程。

(3) 溶解圈闭

CO₂ 可以溶解于水或油中，溶解圈闭就是 CO₂ 在地层溶液中的溶解过程。溶解圈闭的优势在于，当 CO₂ 溶解于盐水中时，它便不再是一种独立的状态，从而

控制了 CO₂ 向上的浮力作用。并且溶解有 CO₂ 的盐水要比没有溶解 CO₂ 的盐水重, 这便使得 CO₂ 随溶解盐水向地层下部移动, 提高了 CO₂ 封存的安全性。Sleipner 项目的粗略估计表明, 大约 15% 的注入 CO₂ 在 10 年之后会处于溶解状态。

(4) 矿化圈闭

溶解于盐水的 CO₂ 会与岩石发生反应, 反应结果是部分 CO₂ 转化为碳酸盐, 这便是矿化圈闭。矿化圈闭是 CO₂ 地质圈闭中最具永久性和安全性的圈闭过程。但矿化圈闭过程相当缓慢, 通常要经过上千年甚至更长。Perkins 等人 (2005) 估计所有注入到 Weyburn 油田的 CO₂ 大概要经过 5000 年才会最终转化为碳酸盐。

1.5 全球二氧化碳地质封存项目概况

全球 CCS 研究所 (Global CCS Institute) 在其《全球 2011 年 CCS 现状》中称, 2011 年全球处于不同状态 (确认、评价、决定、执行和运行) 的大规模完整 CCS 项目[●] (相当于工业规模水平 CCS 项目) 共有 74 个。在这 74 个项目中, 8 个处于运行状态, 6 个正在施工建设, 这 14 个项目总 CO₂ 封存能力达到每年 33Mt。

从彩图 1-8 和彩图 1-9 中可以看出, 北美和欧洲是工业规模水平 CO₂ 地质封存项目的主要地区。北美和欧洲的大规模完整 CCS 项目[●] 分别有 25 个和 21 个, 之和占总项目的 62%, 其次是加拿大 (9 个项目), 澳大利亚 (6 个项目) 和中国 (6 个项目)。

美国是 CCS 项目研究进行最为活跃的地区, 不仅项目数量位居全球第一, 而且总 CO₂ 封存量也居世界第一。2011 年全球大规模完整 CCS 项目中的大部分都是预计在 2015~2020 年才开始实施。

从 CO₂ 地质封存类型上看 (彩图 1-10), 46% 的全球大规模完整 CCS 项目属于 EOR 项目, 26% 属于陆地咸水层项目, 14% 属于海上咸水层项目, 7% 属于海上枯竭油气藏项目, 另外其他 7% 处于不确定和其他类型。

1.6 中国二氧化碳地质封存

中国是全球 CO₂ 地质封存项目发展最具潜力的国家。因为中国的 CO₂ 排放量

● 大规模完整 CCS 项目定义为: 包括 CO₂ 捕捉、运输和储存过程。并且规模应为: 煤电厂每年 CO₂ 储存量不少于 80 万吨; 或者其他高能耗设施每年 CO₂ 储存量不少于 40 万吨。

很大，并且中国以煤为主的能源结构决定了 CO₂ 地质封存在中国具有很大的应用价值和潜力。大规模成功应用 CO₂ 地质封存，可以保证中国继续利用煤炭资源，并且产生较低的 CO₂ 排放。

中国政府和企业对于 CO₂ 捕获、利用和地质封存 (CCUS) 的认知和接受程度也在不断提高，并且认为 CCUS 会在中期和长期，在中国应对气候变化战略和 CO₂ 减排中发挥重要作用。《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 (2007 年)》提出“研发 CO₂ 捕集、利用与封存关键技术与措施；制订 CO₂ 捕集、利用与封存技术路线图，开展 CO₂ 捕集、利用与封存能力建设、工程技术示范”；《中国应对气候变化的政策与行动 (2011)》中，中国政府总结了 2011 年的 CCS 发展成果，总结认为，中国应“加强碳捕集和封存 (CCS) 技术的研发应用，研究、制订了碳捕集与封存利用技术 (CCUS) 发展路线图并筹建了 CCUS 产业技术创新联盟。在项目布局上探索将 CO₂ 捕集与封存与强化采油技术 (EOR) 相结合，中国神华、华能集团等企业开展了 CCS 全流程示范项目建设，建成了世界上规模最大的燃煤电厂 CO₂ 捕获工程”。

中国同时也在 CCS 理论研究上取得了很大进展。中国和英国共同完成了中英煤炭利用近零排放 (NZEC) 项目。该项目研究了中国开展 CCS 的各类可能途径和优劣势，包括在中国开展 CCS 的潜力。2010 年，由中国地质调查局水文地质环境地质调查中心、中国地质大学、北京大学、中国神华煤制油化工有限公司、中国地质科学院地质力学研究所、中国科学院武汉岩土力学研究所等单位承担的国土资源部 CO₂ 地质储存综合研究项目“我国 CO₂ 地质储存调查”立项，拟对我国 CO₂ 地质储存适宜性及潜力进行评价和区划，并选定典型地区开展储存示范工程。2010 年，中国和澳大利亚共同启动中澳 CO₂ 地质封存项目 (CAGS)，旨在研究中国 CO₂ 地质封存的评价指标、选址、监测及 CO₂ 地质封存的环境影响等。

企业层面上，中国在 CO₂ 地质封存方面也取得了很大进步。中国石油天然气股份有限公司已于 2009 年在吉林油田开始了每年 1.2×10^5 t 的 CO₂ 驱油项目 (EOR)；中国石油化工股份有限公司于 2010 年，在山东省胜利油田开始 CO₂ 驱油项目 (EOR)，每年注入 4×10^4 t CO₂。

神华集团，是中国最大的煤炭集团和全球最大的煤炭供应商，于 2011 年在内蒙古鄂尔多斯启动了 CO₂ 深部咸水层注入项目。该项目共投资 2.1 亿人民币，设计每年注入 10^5 t CO₂，每小时 12t，以后注入量会逐渐增加至每年 1~3Mt。从项目启动至 2011 年 10 月，共注入 10^4 t CO₂。注入深部咸水层的 CO₂ 来自神华的煤