

中国二氧化碳地质储存 地质基础及场地地质评价

张森琦 郭建强 等编著



地质出版社

调查局项目资助

中国二氧化碳地质储存 地质基础及场地地质评价

张森琦 郭建强 李旭峰 范基姣 刁玉杰 等编著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书重点论述了二氧化碳地质储存机理、二氧化碳地质储存研究现状与发展趋势和资源化二氧化碳地质储存的理念；阐述了中国沉积盆地地质特征与矿产资源分布；提出了储、盖层地质评价、二氧化碳地质储存安全及环境风险评价、深部咸水含水层二氧化碳地质储存选址及评价方法。主要包括：二氧化碳地质储存概述、二氧化碳地质储存介质类型、二氧化碳地质储存与沉积盆地、中国陆相沉积盆地、储盖层及圈闭地质评价、中国沉积盆地矿产资源、沉积盆地天然二氧化碳气田、二氧化碳地质储存安全及环境风险、深部咸水含水层二氧化碳地质储存选址评价九大部分。本书的出版将对全国二氧化碳地质储存潜力与适宜性评价、深部咸水含水层二氧化碳地质储存选址评价和相关研究起到积极的推动作用。

本书可供从事二氧化碳地质储存基础地质、水文地质、工程地质、环境地质调查研究的科研人员参考使用，也可供高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国二氧化碳地质储存地质基础及场地地质评价 /
张森琦等编著. —北京：地质出版社，2011.8

ISBN 978-7-116-07290-9

I. ①中… II. ①张… III. ①二氧化碳-地下储存-
地质调查-中国 IV. ①P562

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 149727 号

ZHONGGUO ERYANGHUATAN DIZHI CHUCUN DIZHIJICHU JI CHANGDI DIZHI PINGJIA

责任编辑：吴宁魁

责任校对：李 玫

出版发行：地质出版社

社址邮编：北京海淀区学院路 31 号，100083

电 话：(010)82324508 (邮购部)；(010)82324513 (编辑室)

网 址：<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱：zhs@gph.com.cn

传 真：(010)82310759

印 刷：北京天成印务有限责任公司

开 本：889mm×1194mm 1/16

印 张：23.5

字 数：650 千字

印 数：1—700 册

版 次：2011 年 8 月北京第 1 版

印 次：2011 年 8 月北京第 1 次印刷

审图号：GS (2011) 934 号

定 价：68.00 元

书 号：ISBN 978-7-116-07290-9

(如对本书有建议或意见，敬请致电本社；如本书有印装问题，本社负责调换)

序

鉴于全球气候变化引发的潜在危害以及人类共同的利益，二氧化碳地质储存受到包括中国在内的多个国家的高度关注。为此，国土资源部于2009年组织启动了应对全球气候变化地质学方面的研究工作，内容包括全球气候变化的地质记录、土壤与岩溶地质碳汇、二氧化碳地质储存和地热能开发利用四大领域。

我国二氧化碳地质储存的研究目前主要以借鉴发达国家经验为主，基本上处于探索与起步阶段，主要工作多分散在科研院所的相关研究之中，研究重点为二氧化碳地质储存的机理、数值模拟和其他有关科学问题，宏观层面的研究和工程性实践探索刚刚起步。为此，国土资源部以政府职能的形式把二氧化碳地质储存研究提到了议事日程。面对这一崭新的地学应用问题，以及如何开展这一庞杂的系统工程，需要进行深入探索与研究。首先是需要充分掌握二氧化碳地质储存的基本原理和机理；其次是从宏观层面上了解全国范围内储存二氧化碳的地质条件，整理、归纳和解决相应的地质问题；然后是按需求进行不同层次的评价，选择可以储存的地质区域；最后是有选择性地开展示范工程，总结经验、积累技术，最终形成二氧化碳地质储存的科学技术体系，为大规模工程实践提供科技支撑。

研究我国二氧化碳地质储存条件，开展全国沉积盆地二氧化碳地质储存潜力与适宜性评价必须对中国的地质构造、沉积环境以及地热、油气、煤炭等矿产资源进行系统的分析。二氧化碳地质储存研究工作涉及区域地质、矿产地质、石油地质、煤炭地质、水文地质、工程地质、环境地质等学科，地球物理、遥感技术、钻探工程、环境监测等技术，以及大气、生态环境及人群健康等诸多问题。二氧化碳地质储存工程实践则更是一项复杂的系统工程，涉及大量的科学和技术问题。仅地下储存目标库就包括深部咸水含水层、开采中或已废弃的油气藏和因技术原因或经济原因而弃采的煤层等多种类型。储存场地的选择需要遥感地质、地面地质调查和地球物理勘查等多方面工作的配合。二氧化碳地质储存工程以选址及其适宜性和潜力评价为先导，以钻探工程为纽带，使碳源与地下二氧化碳地质储存库相联系，数值模拟、环境监测和分析测试等方法技术将贯穿全过程。因此，二氧化碳地质储存研究属交叉学科领域，研究范围是极其广泛的。

有鉴于此，国土资源部张洪涛总工程师2009年曾经这样定位与评价全球气候变化地质研究和二氧化碳地质储存的地学意义：“全球气候变化”扩大了传统地学的范围，增强了地质学家服务社会的责任感，同时要高度重视“全球气候变化”对传统地学向

现代地学转变的“引擎作用”。全球气候变化已经成为世界性问题和科学热点，当今科学家、政治家联手开展全球气候变化研究，制定应对措施。影响全球气候变化的因素既有自然因素，也有人类活动因素。地质学家不仅可以对引起全球气候变化的自然规律有深刻认识，而且在减少二氧化碳排放、二氧化碳捕获与储存等方面可以大有作为。与此同时要通过广泛的国际合作，引进发达国家的新理论、新认识、新观念，加强创新和拓展，逐步改变我们的观念、学科设置和工作重点。

致力于二氧化碳地质储存基础地质研究，并将广博的地学基础理论引入二氧化碳地质储存研究，丰富和发展二氧化碳地质储存的理论与方法，目前在地学界尚不多见。本书试图对地质基础理论在二氧化碳地质储存研究方面的应用进行探讨，对二氧化碳地质储存机理、二氧化碳地质储存介质类型、中国沉积盆地地质特征、中国沉积盆地矿产资源、中国沉积盆地天然二氧化碳气田作一较为系统的介绍；初步提出二氧化碳地质储存储盖层评价、二氧化碳地质储存安全性及环境风险评价、深部咸水含水层二氧化碳地质储存选址及评价的基本思路，以引起同行们的高度关注，促进我国二氧化碳地质储存研究的深入发展。

相信本书的出版将对全国二氧化碳地质储存潜力与适宜性评价、深部咸水含水层二氧化碳地质储存选址评价和相关研究能起到积极的推动作用，我期待着本书尽早与读者见面。

中国科学院院士



2011年7月10日

前 言

为贯彻落实国家应对全球气候变化的战略部署,2009 年—2010 年 4 月,国土资源部地质环境司组织中国地质调查局和相关科研单位就“应对全球气候变化地质响应与对策”,进行周密的项目策划研究,形成了具体的行动方案。

2010 年 5 月,国土资源部办公厅下发了国土资源部《关于做好“应对全球气候变化地质响应与对策”有关工作的通知》(国土资厅发〔2010〕30 号),计划用三年时间,完成全球气候变化地质记录研究、全国地质碳汇潜力研究、全国二氧化碳地质储存调查和全国地热资源调查四项工作。通知指出“我国二氧化碳地质储存调查”项目主要目的是圈定我国具有二氧化碳地质储存潜力的区域,选择典型地段开展二氧化碳储存示范工程,并初步形成二氧化碳地质储存基本理论和技术方法体系。

为做好“我国二氧化碳地质储存调查”项目,中国地质调查局高度重视,多次组织专家咨询论证,明确工作思路,确定目标与任务,确定项目名称为“全国二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程”,并对项目实施提出了具体要求。

二氧化碳捕集与储存技术(CO₂Capture and Storage, CCS)是指将二氧化碳从工业或相关能源的源分离出来,输送到一个储存地点将其储存,并长期与大气隔离的过程。政府间气候变化专门委员会(IPCC)特别报告认为,CCS 是稳定大气温室气体浓度减缓行动组合中的一种选择方案。从应用层面上简单地说,CCS 技术就是把化石燃料燃烧产生的二氧化碳进行捕集并将其安全地储存于地下深处具有适当封闭条件的地层中,从而减少二氧化碳向大气环境的排放。二氧化碳地质储存场所多种多样,主要有沉积盆地内的深部咸水含水层、开采中或已废弃的油气田和因技术原因或经济原因而弃采的煤层。此外,还有开采过的大洞穴、盐丘以及废弃的矿藏等。

由于 CCS 技术能够有效减少碳排放,减缓全球变暖效应,受到许多国家的重视。目前,美国、欧盟、加拿大、澳大利亚、日本和韩国等国已经提出了各自的 CCS 技术发展路线图。上述各国均计划利用 15~25 年的时间研发和实施二氧化碳地质储存工程以及储存后的监测等工程。

全球气候变化已严重威胁着人类赖以生存的地球环境,减少二氧化碳排放以应对全球气候变化,是世界各国保证可持续发展面临的共同挑战。2005 年《京都议定书》的生效,“碳汇、碳储、节能、减排”越来越成为政府、学术界关注的首要话题。2009 年哥本哈根气候变化峰会,我国提出到 2020 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~45%,需要付出艰苦卓绝的努力。因此,开展全国二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程,对于应对全球气候变化、履行国际承诺、树立负责任大国形象和提高国际谈判地位具有重大意义。

我国是二氧化碳排放大国,目前正处于能源需求巨大的经济快速发展时期,以消耗化石燃料煤、石油和天然气为主的能源结构在近期内不会发生大的变化,减排任务艰巨。已有研究结果表明,我国二氧化碳地质储存条件较好,通过有效地发挥我国地质科技优势,开展全国二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程、积累二氧化碳地质储存技术能够为国家二氧化碳增汇减排和缓解温室气体效应作出重要贡献。

同欧美等发达国家已开展的室内实验研究、计算机模拟研究、工程实践相比,我国在二氧化碳地质储存科学问题研究上还处于探索阶段,尤其是具有巨大储存潜力的深部咸水含水层二氧化碳地质储存研究则刚刚起步,诸多科学问题需要深入研究。因此,发展适合中国国情的二氧化碳地质储

存理论,形成具有自主知识产权的二氧化碳地质储存综合技术方法体系,使我国二氧化碳地质储存研究赶超国际前列水平,已成为实施我国二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程的重任。

“全国二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程”计划项目是一项基础性、综合性、跨专业的综合性研究项目,旨在提高我国二氧化碳地质储存潜力与适宜性评价水平,为我国二氧化碳地质储存科学规划和二氧化碳地质储存工程实施提供技术支撑。主要任务是以地球系统科学理论为指导,通过主要沉积盆地二氧化碳地质储存适宜性与潜力评价,编制全国 1:500 万二氧化碳地质储存成果图系;以沉积盆地为单位,编制二氧化碳地质储存潜力与适宜性评价图集,圈定一批二氧化碳地质储存目标靶区;选择典型地区开展二氧化碳地质储存示范工程和二氧化碳地质储存机理与数值模拟研究;建设二氧化碳地质储存地理信息系统;开展我国二氧化碳地质储存基础理论、技术方法和评价方法研究,形成完整的二氧化碳地质储存场地选址、调查、勘查、监测和评价技术方法体系,开展国际交流与合作,加快技术进步和成果集成,为我国二氧化碳地质储存科学规划和地质环境保护提供地学依据,为二氧化碳地质储存工程提供技术支撑。

“全国二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程”项目的实施,涉及区域地质、矿产地质、石油地质、煤炭地质、水文地质、工程地质、环境地质、地球物理勘查、遥感地质、地下空间资源调查、地质环境监测和仪器研发、钻探工程、地学空间数据库建设等地质专业和相关的全国性地质资料。同时二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程实施又是一项复杂的系统工程,涉及社会、经济、生态环境、安全、公众意识等诸多方面。中国沉积盆地数目多,条件各异,因此需要对其进行潜力与储存适宜性评价。为建立统一、完善的二氧化碳地质储存潜力与适宜性评价指标、选择深部咸水含水层实施二氧化碳地质储存示范工程,开展中国二氧化碳地质储存地质基础及场地地质评价十分必要,这也是编写本书的主要目的。

本书共分九章,约 65 万字,历时 1 年半完成。

第一章为二氧化碳地质储存概述。重点论述了二氧化碳捕获与储存(CCS)、超临界二氧化碳流体、二氧化碳地质储存机理、二氧化碳地质储存研究现状与发展趋势和资源化二氧化碳地质储存的理念。

第二章为二氧化碳地质储存介质类型。重点对深部咸水含水层二氧化碳地质储存、油气藏二氧化碳地质储存、不可开采煤层二氧化碳地质储存、盐岩溶腔二氧化碳地质储存和基性-超基性岩储层二氧化碳固化的储存机理和二氧化碳储存容量评估进行了介绍。

第三章为二氧化碳地质储存与沉积盆地。包括中国沉积盆地的复杂性与研究思路、沉积盆地的定义与分类、中国沉积盆地的分布及特点和中国沉积地层主要特征等内容。

第四章为中国陆相沉积盆地。主要论述了中国陆相沉积盆地的分布、陆相盆地沉积体系及沉积相模式、中国陆相低渗透储层主要特征和中国陆相沉积盆地的圈闭。

第五章为储、盖层及圈闭地质评价。重点对储层地质评价、盖层地质评价和圈闭地质评价进行了阐述。

第六章为中国沉积盆地矿产资源。着重介绍了中国沉积盆地大中型气田、主要陆相油藏分布、煤及煤层气盆地地质、沉积盆地深部咸水含水层分布和中国沉积盆地地热资源分布特征与二氧化碳地质储存地地质条件。

第七章为中国沉积盆地天然二氧化碳气田。总结了我国天然二氧化碳气田的分布、中国典型二氧化碳气田地质特征和二氧化碳突出与二氧化碳腐蚀,对天然二氧化碳气田与二氧化碳地质储存进行了初步类比研究。

第八章为二氧化碳地质储存安全及环境风险。由二氧化碳地质储存环境与安全风险及其基本概念、二氧化碳地质储存逃逸通道、二氧化碳地质储存环境风险评价、二氧化碳地质储存安全风险评价四部分组成。

第九章为深部咸水含水层二氧化碳地质储存选址研究。包括二氧化碳地质储存选址评价研究现

状、深部咸水含水层二氧化碳地质储存选址原则与程序、深部咸水含水层二氧化碳地质储存选址指标体系、二氧化碳地质储存压覆矿产资源评估和二氧化碳输送管线地质问题五大部分。

本书是在大量公开发表的论文和专著的基础上编写的，谨此对所有被引用的成果资料、文献的作者和单位表示诚挚的谢意。

本书是“全国二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程”计划项目的研究成果之一。张森琦和郭建强完成了主要章节的编写。李旭峰、范基姣、刁玉杰、张徽、张晓娟、张杨、李胜涛、贾小丰、郑宝锋、金晓琳、葛秀珍，以及中国石油大学（北京）彭勃教授、中国地质大学（武汉）刘延峰教授、长安大学付国民教授和环境保护部环境规划院刘兰翠博士参加了部分章节的编写。张森琦统撰并修改了全文。

本书承蒙文冬光、李文鹏、甘行平、孙建平、史云、王宇、苑惠明教授级高级工程师，以及前辈刘炳鑫和杨开春先生审阅，并提出了诸多宝贵的意见和建议。在本书的编写及出版过程中，中国科学院院士汪集旸研究员给予了悉心指导，百忙之中为本书作序，使我们备受鼓舞；中国地质调查局、中国地质调查局水文地质环境地质调查中心领导给予了极大地支持和鼓励，在此一并致以衷心的感谢！

由于笔者水平有限，提出的一些看法与观点难免有不当或错误之处，敬请批评指正。

郭建强 张森琦
2011年7月于保定

目 录

序

前 言

第一章 二氧化碳地质储存概述	(1)
第一节 二氧化碳捕获与储存	(1)
第二节 超临界二氧化碳流体	(7)
第三节 二氧化碳地质储存机理	(15)
第四节 二氧化碳地质储存研究现状与发展趋势	(20)
第五节 资源化二氧化碳地质储存的理念	(33)
第二章 二氧化碳地质储存介质类型	(36)
第一节 深部咸水含水层二氧化碳地质储存	(36)
第二节 油气藏二氧化碳地质储存	(60)
第三节 不可开采煤层二氧化碳地质储存	(73)
第四节 盐岩溶腔二氧化碳地质储存	(76)
第五节 基性—超基性岩储层二氧化碳固化	(86)
第三章 二氧化碳地质储存与沉积盆地	(90)
第一节 中国沉积盆地的复杂性与研究思路	(90)
第二节 沉积盆地的定义与分类	(99)
第三节 中国沉积盆地的分布及特点	(108)
第四节 中国沉积地层主要特征	(114)
第五节 中国主要沉积盆地最终定型期构造变形特征	(119)
第四章 中国陆相沉积盆地	(126)
第一节 中国陆相沉积盆地	(126)
第二节 陆相沉积盆地沉积体系及沉积相模式	(129)
第三节 中国陆相低渗透储层	(153)
第四节 中国陆相沉积盆地的圈闭	(157)
第五章 储、盖层及圈闭地质评价	(162)
第一节 储层地质评价	(162)
第二节 盖层地质评价	(176)
第三节 圈闭地质评价	(185)
第六章 中国沉积盆地矿产资源	(192)
第一节 沉积盆地大中型气田	(192)
第二节 石油天然气	(196)
第三节 煤及煤层气地质	(198)

第四节 地下盐卤水及深层承压水 (202)
 第五节 沉积盆地地热资源 (214)
 第七章 沉积盆地天然二氧化碳气田 (229)
 第一节 中国天然二氧化碳气田的分布 (229)
 第二节 中国典型二氧化碳气田 (234)
 第三节 二氧化碳突出与二氧化碳腐蚀 (253)
 第四节 天然二氧化碳气田与二氧化碳地质储存类比研究 (257)
 第八章 二氧化碳地质储存安全及环境风险 (262)
 第一节 二氧化碳地质储存安全与环境风险 (262)
 第二节 中国二氧化碳地质储存安全及环境风险地质背景 (270)
 第三节 二氧化碳地质储存泄漏通道综合分析 (284)
 第四节 二氧化碳地质储存安全风险评价 (301)
 第五节 二氧化碳地质储存环境风险评价 (313)
 第九章 深部咸水含水层二氧化碳地质储存选址评价 (317)
 第一节 二氧化碳地质储存选址评价研究现状 (317)
 第二节 深部咸水含水层二氧化碳地质储存选址原则与程序 (325)
 第三节 深部咸水含水层二氧化碳地质储存选址指标体系 (330)
 第四节 二氧化碳地质储存压覆矿产资源评估 (348)
 第五节 二氧化碳输送管线地质问题 (351)
 参考文献 (357)

第一章 二氧化碳地质储存概述

第一节 二氧化碳捕获与储存

CO₂ 捕获与储存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 技术的雏形源于 20 世纪 70 年代美国用 CO₂ 进行驱油来提高石油采收率 (Enhanced Oil Recovery, EOR) 的技术。经过近 40 年的研究和实践, 逐步发展成为气候变化背景下减排温室气体的一项重要技术手段之一。近年来, 欧洲成为 CCS 技术研发的先驱 (中科院武汉文献情报中心, 2011)。

根据《IPCC 特别报告——二氧化碳捕获和封存》(政府间气候变化专门委员会 (IPCC), 2005, 以下简称“IPCC 特别报告”), CCS 技术是指把 CO₂ 从工业或相关能源的源里分离出来, 输送到一个储存场地, 并长期与大气隔绝的过程。

IPCC 特别报告认为, CCS 技术是稳定大气温室气体浓度减缓行动组合中的一种选择方案 (IPCC, 2005)。尚包括提高能源效率、向低含碳量燃料转变、核能、可再生能源、增加生物汇以及非 CO₂ 温室气体的减排等。从应用层面上简单地说, CCS 技术就是把化石燃料燃烧产生的 CO₂ 进行捕获并将其安全地储存于地下深部的地质构造中 (陈文颖等, 2007), 从而减少 CO₂ 向大气环境的排放。

一、二氧化碳捕获和储存的主要组成部分

CCS 技术主要包括 CO₂ 捕获、运输和储存三大主要环节 (图 1-1)。

1. 碳源

联合国气候变化框架公约 (UNFCCC, 1992) 将温室气体的“源”定义为任何向大气中释放产生温室气体、气溶胶或其前体的过程、活动或机制。温室气体的“汇”为从大气中清除温室气体、气溶胶或其前体的过程、活动或机制。“点源”是指局限在一个单点位置的排放源 (ICPP, 2005)。

CO₂ 主要由化石燃料燃烧所排放, 排放源既包括大型燃烧设备, 如燃煤发电厂; 也包括小型分散源, 如汽车发动机、居民和商业用户使用的燃烧炉。还可从一些工业生产过程、石油天然气加工处理以及焚烧森林植物等过程中排放。CO₂ 的捕获主要用于较大的 CO₂ 点源, 包括大型化石燃料或生物能源设施、主要 CO₂ 排放工业企业、天然气生产、合成燃料厂以及基于化石燃料的制氢工厂等 (师春元等, 2006)。

全球大于 $10 \times 10^4 \text{ t/a}$ 的 CO₂ 固定排放源情况见表 1-1。这些排放源分布在全球各地, 其中北美 (美国中西部 and 东部)、欧洲 (西北部地区)、东亚 (中国东部沿海) 和南亚 (印度次大陆) 是四个特殊的排放群。相比之下, 大范围的生物质排放源数量则要少得多。同时, 上述排放源并不都适合进行 CO₂ 的捕获。

目前, 中国各区域 CO₂ 排放量差异显著, 呈现由东南部沿海向中部和西部地区递减的趋势。高排放区域主要集中在东南部沿海经济发达地区和内蒙古、河南等少数内陆省份, 总体形成内蒙古—河北—辽宁—山东—江苏—浙江的高排放带 (以环渤海区和长三角区为主) 和珠三角高排放区。

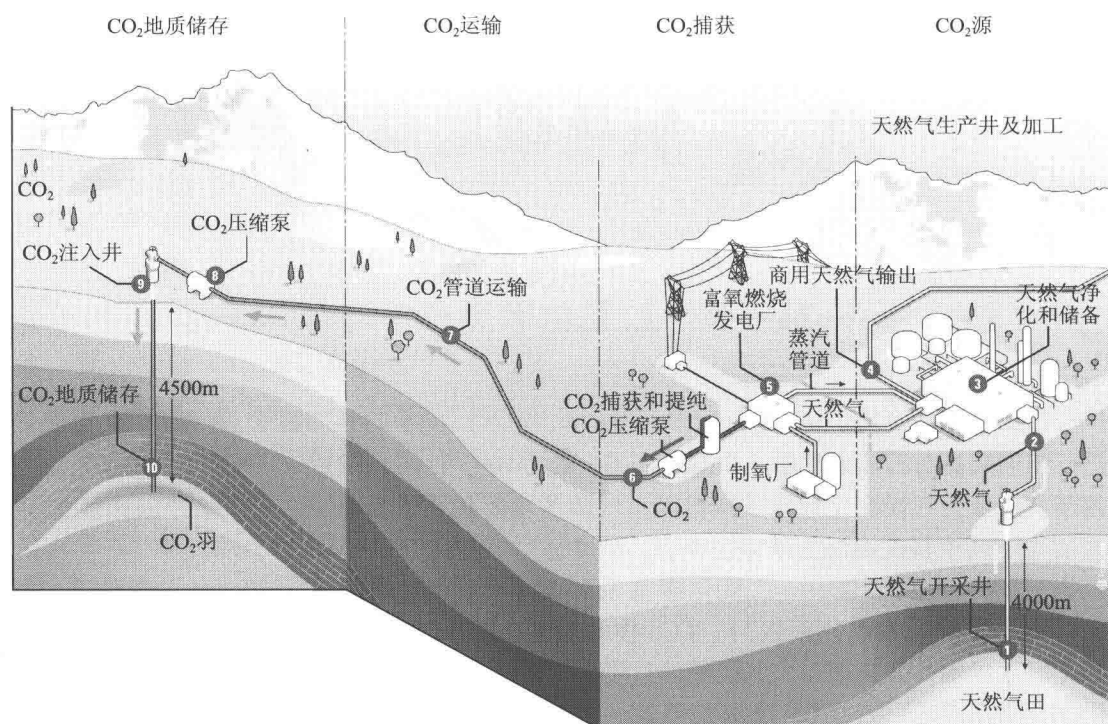


图 1-1 CO₂ 捕获和储存 (CCS) 主要组成部分示意图

(据 Capture Ready. com 新闻通讯双周刊, 2011)

表 1-1 全球大于 10 × 10⁴t/a 的 CO₂ 排放量固定排放源情况

项目名称		排放源的个数	CO ₂ 排放量/10 ⁶ t · a ⁻¹
化石燃料	电力 (煤、气、石油及其他)	4942	10539
	水泥生产	1175	932
	石油炼制	638	798
	钢铁工业	269	646
	石化工业	470	379
	石油与天然气处理加工	(不详)	50
	其 他	90	33
生物质	生物乙醇和生物能	303	91
合计		7887	13466

(据 IPCC, 2005)

2. 捕获

CO₂ 的捕获 (Capture) 是指将 CO₂ 从化石燃料燃烧产生的烟气中分离出来, 并将其压缩的过程。对于大量分散型的 CO₂ 排放源尚难实现碳的捕获 (ICPP, 2005; 巢清尘等, 2006)。CO₂ 的捕获主要用于大规模排放源, 如大型化石燃料或生物能源设施、主要 CO₂ 排放型工业、天然气生产、合成燃料工厂以及基于化石燃料的制氢工厂等。

目前, 燃煤电厂主要有燃烧前脱碳、燃烧后脱碳和富氧燃烧技术 3 种不同的捕获技术 (许世森等, 2009)。

燃烧前脱碳技术 (PCDC): 是指在碳基燃料燃烧前, 首先将其化学能从碳中转移出来, 然后再将碳和携带能量的其他物质进行分离, 这样就可以实现碳在燃料利用前进行捕获。最典型的是整体煤气化联合循环发电技术 (IGCC)。IGCC 是结合了煤气化技术与联合循环发电技术的新型发电

技术。它对气化得到的煤气进行变换反应，使煤气转变为 CO_2 和 H_2 ，最终将燃料化学能转移到 H_2 上，然后再对 CO_2 和 H_2 进行分离。

基于 IGCC 的 PCDC 处理的气体具有高的气体压力和 CO_2 浓度，从而使得物理吸附法比化学吸附法更能体现出优势。分离 CO_2 的典型物理吸收法是聚乙二醇二甲醚法（Selexol 法）和低温甲醇法（Rectisol 法）。这两种方法都属于低温吸收过程，Selexol 法的吸收温度一般为 $-10 \sim 15^\circ\text{C}$ ，低温甲醇法的吸收温度一般为 $-75 \sim 0^\circ\text{C}$ 。另外，这两种技术能够同时脱除 CO_2 和 H_2S ，且净化度较高，可在系统中省去脱硫单元，但相应需要采用耐硫变换技术。

目前国内外提出的多项降低 CO_2 排放的洁净煤发电计划中，绝大部分是基于 IGCC 发电技术的，并集成了燃料电池、氢气轮机、碳捕获与储存等技术手段，最终实现包括 CO_2 在内的温室气体近零排放。

燃烧后脱碳技术（PCC）：是在燃烧设备（锅炉或燃机）后的烟气中捕获或者分离 CO_2 。该技术几乎可用于任何现有的煤基电厂，并且对原有的电厂系统改动较小。现有的绝大多数火力发电技术，包括新建和改造，都只能采用 PCC 的方法进行 CO_2 的分离。但另一方面，采用 PCC 方法需要处理的烟气量大、排放压力低、 CO_2 的分压小，投资和运行成本较高。

富氧燃烧技术：是利用空分系统获得富氧或纯氧，然后将燃料与氧气一同进入专门的纯氧燃烧炉进行燃烧，一般需要对燃烧后的烟气进行重新回注燃烧炉。一方面降低了燃烧温度；另一方面进一步提高了 CO_2 的体积分数。由于烟气中 CO_2 的体积分数高，可显著降低 CO_2 捕获的能耗，但必须采用专门的纯氧燃烧技术，需要专门材料的纯氧燃烧设备以及空分系统，这将大幅度提高系统的投资成本。目前，大型富氧燃烧技术仍处于研究阶段（黄斌等，2007）。

3. 运输

所谓 CO_2 运输（Transport），就是将 CO_2 从捕获地运往地质储存场地的过程。 CO_2 的运输方式主要有管道运输、公路槽车运输、铁路运输和船舶运输四种。这四种方式各有优缺点，都存在一定的适用范围。在技术上，公路槽车和铁路罐车也是切实可行的方案。然而，除小规模运输之外，这类运输与管道和船舶运输相比则不经济，不大可能用于大规模的 CO_2 运输（ICPP，2005）。

公路槽车运输 CO_2 时，可利用绝缘罐将液态 CO_2 进行运输。一般而言，公路槽车运输成本最高，运输费用可达 17 美元/（100km·t），但相对灵活，适合于运量小的场地。

铁路运输的成本比汽车槽车低，运输量比汽车槽车大，但必须依托现有的火车铁路运输设施，否则初期投资相对较大。

在某些情况下，需要长途运输或需将 CO_2 运至海外时，使用船舶运输 CO_2 则更为经济，但因需求有限，加之存储 CO_2 的设备必须要承受高压或低温条件，该类运输规模较小。

目前，最可行的办法是利用管道输送。管道是一种已成熟的市场技术，一般将气态的 CO_2 进行压缩提高密度，以降低管道的运输成本。据 APEC 官方统计，管道运输成本最低。如果每年管道的运输量大于 $1000 \times 10^4 \text{t}$ ，运输费用为 2~6 美元/（100km·t），但管道运输只适用于特定的条件，尤其是要解决运输过程中的 CO_2 腐蚀和泄漏问题。

4. 储存

CO_2 储存（Storage）是指把捕获、压缩后的 CO_2 运输到指定的地点进行长期储存的过程（刘嘉等，2009）。目前，主要的储存方式有地质储存、海洋储存、矿物固化以及森林和陆地生态系统储存等。另外，一些工业流程也可在生产过程中利用和存储少量被捕获的 CO_2 。

二、二氧化碳主要储存技术

目前潜在的可用于储存 CO_2 的技术有地质储存、海洋储存、矿物固化以及森林和陆地生态系

统储存（师春元等，2006）。尽管用于工业生产中也是 CO_2 储存的一种途径，但由于储存量少，对减少 CO_2 排放的贡献率相对较小。

图 1-2 给出了可能的 CCS 系统组成示意图。图中集中展示了 CO_2 可能的来源、运输以及储存方案。

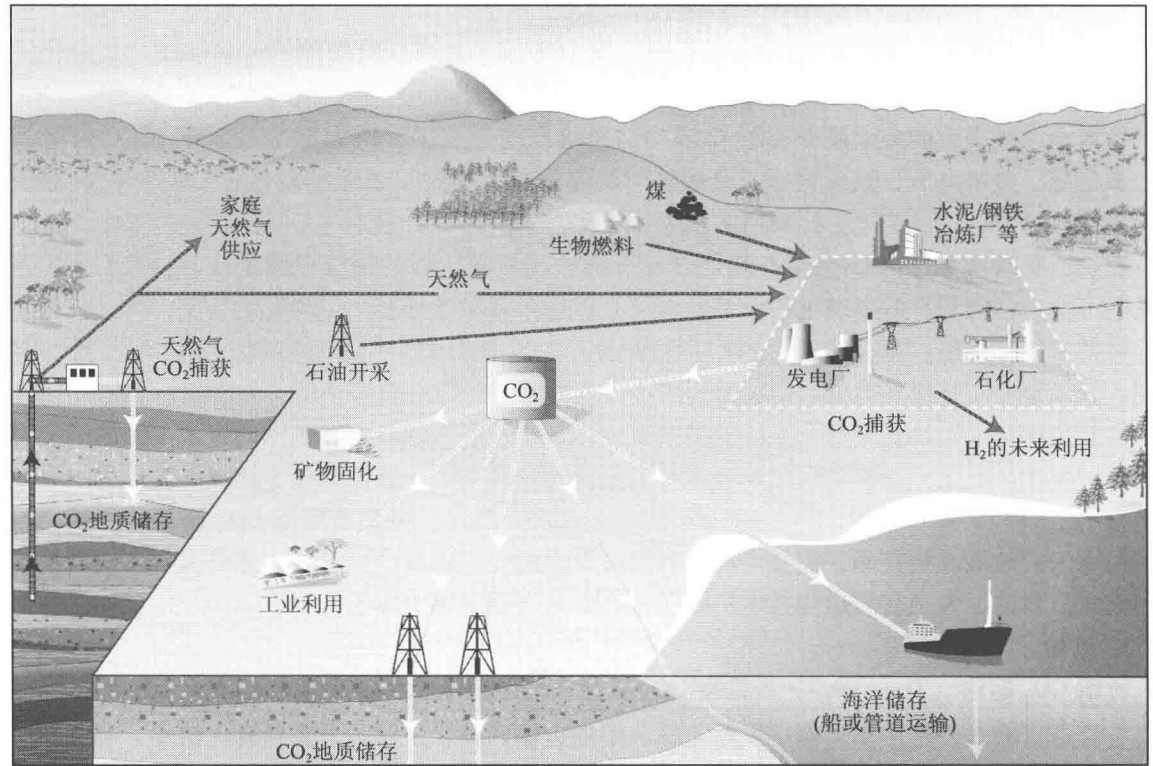


图 1-2 可能的 CCS 系统构成示意图
(据 IPCC, 2005)

1. 地质储存

CO_2 地质储存 (CO_2 geological storage, CGS) 就是把从集中排放源分离得到的 CO_2 注入地下深处具有适当封闭条件的地质构造中储存起来。 CO_2 地质储存场所多种多样，主要有沉积盆地内的深部咸水含水层、开采中或已废弃的油气藏和因技术或经济原因而弃采的煤层，以及开采过的大洞穴、盐岩溶腔和废弃的矿藏等（李小春等，2003；张洪涛等，2005；沈平等，2009）。 CO_2 地质储存的主要技术方案见图 1-3。

CO_2 地质储存就是利用 CO_2 具有的超临界特点，即当温度高于 31.1°C 、压力高于 7.38 MPa 时， CO_2 进入超临界状态。在超临界状态， CO_2 是一种高密度气体，并不会液化，只是密度增大，具有类似液态的性质，同时还保留着气体的性能。超临界 CO_2 的典型物理特性为密度近于液体，是气体的几百倍，使得储存空间大大减少；黏度近于气体，与液体相比，要小两个数量级；扩散系数介于气体和液体之间，约为气体的 $1/100$ ，比液体大几百倍，因而具有较大的溶解能力（韩布兴，2005）。

碳封存领导人论坛（Carbon Sequestration Leadership Forum, CSLF）（2008）指出 CO_2 地质储存机理可以分为两大类：物理贮存和化学贮存。其中，物理贮存包括构造地层贮存、束缚贮存和水动力贮存；化学贮存包括溶解贮存和矿化贮存。

欲实现 CO_2 地质储存必须满足 CO_2 以超临界流体态的形式储存于地下，埋藏深度必须 $\geq 800\text{ m}$ ， CO_2 -EOR（ CO_2 -EOR 即“二氧化碳提高石油回采率”技术，下同）和 CO_2 -ECBM（ CO_2 -ECBM 即“二氧化碳提高煤层气采收率”技术，下同）除外。 CO_2 地质储存相当于营造一个地下

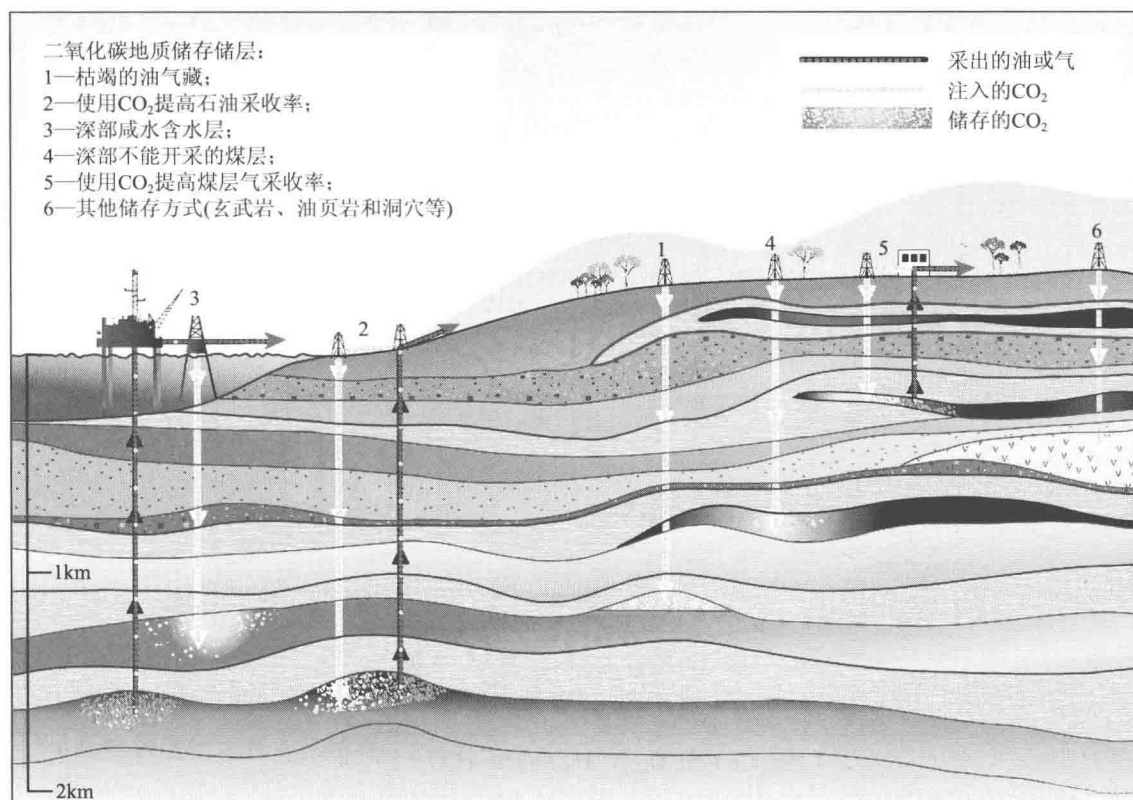


图 1-3 CO₂ 地质储存方案示意图

(据 IPCC, 2005)

人工气藏，其选址条件主要考虑以下因素：位于地质构造稳定的地区，地震、火山、活动断裂不发育，所储存的 CO₂ 向大气泄漏的可能性微小；储层孔隙度和渗透率高，有一定厚度，能达到所需要的存储库容；上覆有不透气的封闭盖层。

与天然气储气库储层条件不同的是还要考虑以下因素：储层压力超过 CO₂ 的临界值，在这种压力下 CO₂ 受到压缩，密度达到 $600 \sim 800 \text{ kg/m}^3$ ，浮力低于天然气而高于原油；较低的地热梯度和地热流值，使 CO₂ 在较小的深度下能达到较高的密度；对人类社会和自然环境、资源带来的负面影响小（沈平等，2009）。

IPCC 的研究表明，CO₂ 性质稳定，可以在相当长的时间内被储存。若地质储存场地是经过谨慎选址和精心论证、设计、施工与管理的，注入其中的 CO₂ 的 99% 都可储存 1000 年以上。

2. 海洋储存

海洋储存 CO₂ 有两种潜在的途径。一种是经固定的管道或船舶运输将 CO₂ 注入并溶解到海洋水体中（以 1000m 以下最为典型）；另一种是经由固定的管道和安装在深度 3000m 以下海床上的海上钻井平台将其沉淀，在海底形成一个 CO₂ “湖”，从而延缓 CO₂ 分解于周围环境中（图 1-4）。

被溶解和分解在海洋里的 CO₂ 将成为全球碳循环的一部分，并最终与大气中的 CO₂ 达到平衡。在目前进行的一系列实验室和小规模试验中，已针对各种方案的技术可行性、相关的物理化学现象以及对海洋生态系统的影响进行了初步研究。现阶段，海洋储存 CO₂ 技术仍处于研究阶段，尚未得到应用。

3. 矿物固化

CO₂ 的矿物固化是模仿自然界中钙/镁硅酸盐矿石的侵蚀和风化过程来实现的，由瑞士学者 W. Seifritz 于 1990 年率先提出。该反应过程的通式为：

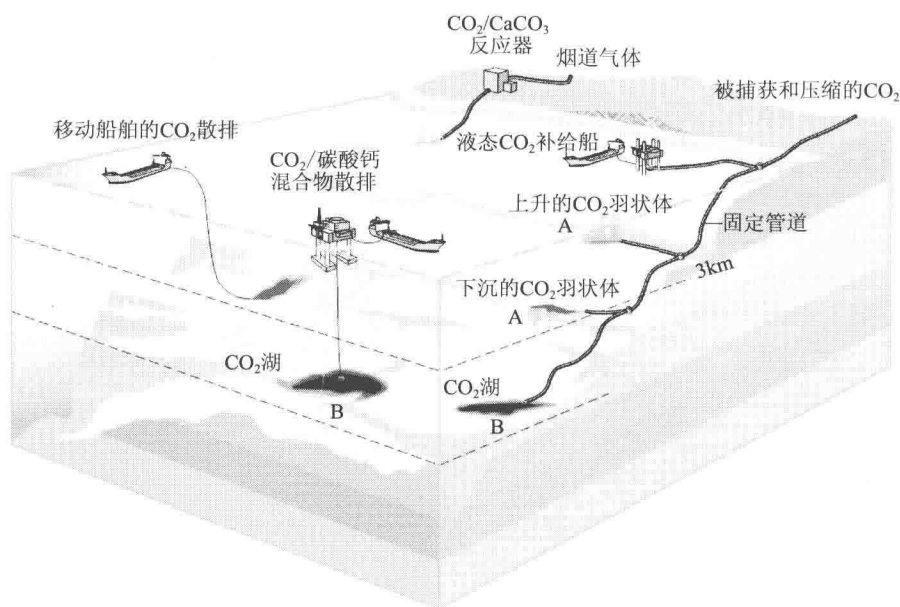
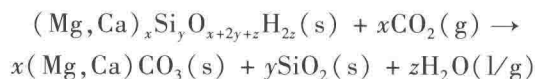


图 1-4 海洋储存 CO₂ 方法示意图

(据 IPCC, 2005)

A—溶解型; B—湖泊型



随后, Dunsmore (1992) 研究了用钙/镁碳酸盐矿物固化 CO₂ 的方法。这个过程也被称作增强自然风化, Lackner 等 (1995) 详细研究了该过程的细节问题。此后, 矿物碳酸盐化研究开始加速, 欧美许多国家纷纷设立专门研究机构开展 CO₂ 的矿物固化研究工作。

矿物固化主要是指利用含有碱性和碱土金属氧化物的矿石与 CO₂ 反应将其固化, 生成永久的、更为稳定的诸如碳酸镁 (MgCO₃) 和碳酸钙 (CaCO₃) 之类碳酸盐的一系列过程。

在自然界中, 本来就存在着大量的钙/镁硅酸盐矿物, 如硅灰石 (CaSiO₃)、橄榄石 (Mg₂SiO₄)、蛇纹石 [Mg₃Si₂O₅(OH)₄] 和滑石 [Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂] 等。这些钙/镁硅酸盐矿石与 CO₂ 之间的反应可以自发地进行, 生成稳定的碳酸盐, 但反应过程极其缓慢, 不能直接用于工业过程。矿物固化应用于 CO₂ 固定时, 需要通过过程强化, 加速 CO₂ 与矿石之间的化学反应, 从而达到工业上可行的反应速率并使工艺流程更加节能。除天然的硅酸盐矿石外, 某些含有钙/镁的固体废物也可以作为矿物固化的原料。

CO₂ 以及所有碳酸盐化合物中, 碳元素都处于最高价态形式, 相对最稳定。但由于碳酸盐的标准吉布斯自由能较 CO₂ 更低, 因而碳酸盐化合物形式相比 CO₂ 更为稳定。矿物固化 CO₂ 具有以下优势 (陈骏, 2009)。

1) 遵循了自然界中 CO₂ 的矿物吸收过程, 即含碱金属或碱土金属的矿石与 CO₂ 反应, 生成热力学上更为稳定的碳酸盐矿物, 从而实现 CO₂ 的永久固化。由于没有泄漏的风险, 因而不需要长期投资进行监测;

2) 原料十分丰富, 包括含钙/镁的天然矿石, 如镁橄榄石、蛇纹石、滑石和水镁石等, 以及超基性岩和基性岩 (如玄武岩) 等, 均可实现大规模 CO₂ 地质处置;

3) 天然矿石的副产品具有较高的经济价值, 使得矿物固化具有商业化应用潜力;

4) 可因地制宜实现排放源的就地固化或者矿石所处的原位固化。因此, 研究 CO₂ 的矿物固化技术对未来 CO₂ 减排具有广阔的应用前景。

目前, 国际上提出了两种 CO₂ 的矿物固化方式: 一种为异地 (ex-situ) 固化。即将矿石等固化

原料运送到 CO₂ 排放源附近，通过反应装置将 CO₂ 碳酸盐化，从而达到固化目的；另一种为原位（in-situ）固化。即将 CO₂ 直接注入地下多孔的基性—超基性岩体中，使 CO₂ 与岩石矿物直接反应，转变为碳酸盐（图 1-5）。

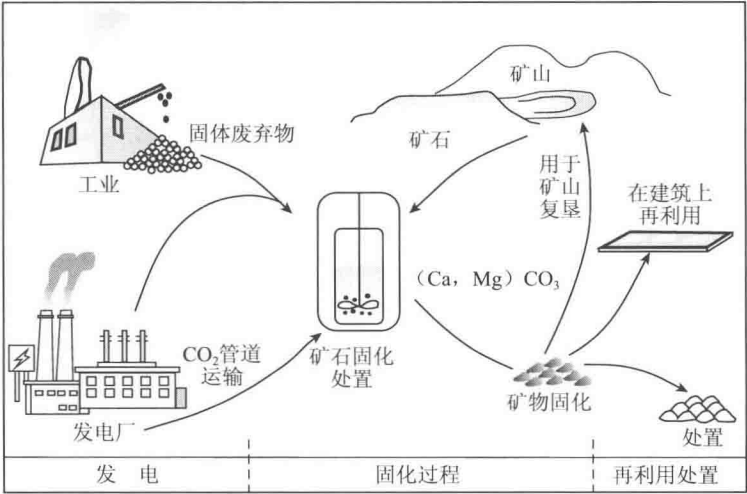


图 1-5 矿物固化 CO₂ 流程示意图
(据 IPCC, 2005)

4. 森林和陆地生态系统储存

最近研究表明，全球生物生长可储存 CO₂ 约 $20 \times 10^8 \text{ t/a}$ （光合作用吸收 $600 \times 10^8 \text{ t/a}$ CO₂，通过有机物质的分解又有 $580 \times 10^8 \text{ t/a}$ 被释放出来）。在一个典型森林的生命周期中，每万平方米森林每年的生物质增长量为 3~10t（干基），约相当于固定等重的 CO₂。由于森林的成熟需要 100 年甚至更长的时间，部分储存的碳可通过树木的腐烂或燃烧重新释放回环境。一旦森林成熟，CO₂ 的吸收就增加较少了（师春元等，2006）。

近 20 年来，中国森林吸收温室气体 CO₂ 的能力明显增加，每年工业排放出的 CO₂ 平均有 5%~8%，约 $2600 \times 10^4 \text{ t}$ 被吸收，从而为缓解全球温室效应作出了积极贡献。研究发现，20 世纪 70 年代中期以前，由于毁林开荒等因素，中国森林向大气净排放了大量的 CO₂。但在最近 20 年里情况发生了逆转，森林净吸收 CO₂ 的功能明显增强，近 20 年共净吸收约 $4.5 \times 10^8 \text{ t}$ 碳，相当于 20 世纪 90 年代中期中国工业 CO₂ 年均排放量的一半。在被“固定”的碳中，人工林占了 80%。据悉，中国人工林累计面积目前已居世界第一位，森林覆盖率也上升到 16.55%（师春元等，2006）。

第二节 超临界二氧化碳流体

研究超临界 CO₂ 流体的物理性质有助于对 CO₂ 地质储存机理、CO₂ 地质储存量计算以及 CO₂ 地质储存工程注入安全性控制等一系列问题的深入研究。

任何一种物质都存在气、液、固三种相态。三相成平衡态共存的点叫三相点。气、液两相成平衡状态的点叫临界点。在临界点时的温度和压力称为临界温度（ T_c ）和临界压力（ P_c ），不同物质的临界点所要求的温度和压力各不相同。

所谓超临界状态是指物质的温度和压力高于临界点后，物质不再有液态和气态的区别，而呈现均匀流体的状态。超临界状态下的 CO₂ 具有类似液体的高溶解性和气体的高扩散性与穿透性。处于超临界状态时，气液两相性质非常相近，向该状态气体加压，气体不会液化，只是密度增大，具有类似液态的性质，同时还保留有气体性能，这种状态的流体称为超临界流体（师春元等，2006）。