



# 中国二氧化碳地质封存环境 风险评估培训教材

中国二氧化碳地质封存环境风险研究组 编写

 化学工业出版社



# 中国二氧化碳地质封存环境 风险评估培训教材

中国二氧化碳地质封存环境风险研究组 编写



化学工业出版社

· 北京 ·

《中国二氧化碳地质封存环境风险评估培训教材》共分六章。第1章主要介绍二氧化碳捕集、利用与封存的缘起和技术特征；第2章主要介绍二氧化碳捕集、利用与封存在全球中长期减缓气候变化中的作用，及大规模实施和推广二氧化碳捕集、利用与封存的重要意义；第3章主要介绍当前国际上二氧化碳捕集、利用与封存理论、标准及具体工程进展情况，以及中国各类规模的二氧化碳捕集、利用与封存项目的特征；第4章主要介绍二氧化碳捕集、利用与封存可能存在的环境风险和环境影响；第5章选择了国际和国内典型的二氧化碳捕集、利用与封存项目作为案例，分析其运行特征和环境评估；第6章主要介绍《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南（试行）》的核心内容，当前存在的问题和不足，以及下一步的重点研究方向。

《中国二氧化碳地质封存环境风险评估培训教材》可供环境领域从事二氧化碳捕集的工程技术人员，从事二氧化碳利用、封存的研发人员，企业和政府从事二氧化碳地质封存环境风险评估管理的管理人员阅读参考。

### 图书在版编目（CIP）数据

中国二氧化碳地质封存环境风险评估培训教材/中国二氧化碳地质封存环境风险研究组编写. —北京：化学工业出版社，2017.7  
ISBN 978-7-122-29682-5

I. ①中… II. ①中… III. ①二氧化碳-石油天然气地质-评估-中国 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆CIP数据核字（2017）第090703号

---

责任编辑：宋湘玲 王淑燕  
责任校对：王 静

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：北京东方宝隆印刷有限公司

850mm×1168mm 1/32 印张3¼ 字数94千字

2017年7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：39.80元

版权所有 违者必究

## 编写人员名单

### 全书统稿

蔡博峰 李琦 曹丽斌

### 各章编写人员

第一章 李琦 蔡博峰 刘桂臻 曹丽斌

第二章 蔡博峰 曹丽斌 李琦

第三章 李琦 刘桂臻

第四章 李琦 蔡博峰 刘桂臻 曹丽斌

第五章 张徽 胡丽莎 李琦 刘桂臻

第六章 张战胜 陈帆 崔青 祝秀莲 曹丽斌



# 前 言

FOREWORD

二氧化碳捕集、利用与封存是以减少人为二氧化碳排放为目的的技术体系，通过二氧化碳捕集、利用与封存技术有望实现化石能源使用的近零排放，因此受到国际社会特别是发达国家的重视。中国政府已经先后资助吉林油田、神华集团、胜利油田和延长油田等开展二氧化碳捕集、利用与封存示范项目。

从国际经验看，环境安全性问题始终是二氧化碳捕集、利用与封存的重要关注点。中国目前在示范项目的选址、建设、运营和地质利用与封存场地关闭及关闭后的环境风险评估和监控等方面均一定程度缺乏相关法律法规。2013年中国环境保护部印发的《关于加强碳捕集、利用和封存试验示范项目环境保护工作的通知》（环办[2013]101号）中提出“探索建立环境风险防控体系”“推动环境标准规范制定”等要求。为落实该要求，环境保护部科技标准司组织环境保护部环境规划院、中国科学院武汉岩土力学研究所、环境保护部环境工程评估中心、中国地质调查局水文地质环境地质调查中心等单位，开展了《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南（试行）》（简称《指南》）的研究制定工作，并于2016年6月21日正式发布。

《中国二氧化碳地质封存环境风险评估培训教材》是为了积极

配合《指南》的推广和应用，由环境保护部科技标准司气候处组织，由中国二氧化碳地质封存环境风险研究组编写的教材，旨在从基本概念入手，深入浅出地介绍二氧化碳捕集、利用与封存的技术特征和环境风险。由于水平有限，内容难免存在不足，敬请读者不吝批评指正。

编写者

2017年4月



# 目 录

CONTENTS

## 1 什么是二氧化碳捕集、利用与封存 (CCUS) … 001

- 1.1 CCUS的缘起 …………… 002
- 1.2 地质封存与利用的主要技术 …………… 003
- 1.3 地质封存的原理 …………… 007
  - 1.3.1 二氧化碳相态…………… 007
  - 1.3.2 二氧化碳密度…………… 008
  - 1.3.3 储盖组合…………… 009
  - 1.3.4 二氧化碳圈闭机理…………… 011

## 2 为什么开展二氧化碳捕集、利用与封存 …… 015

- 2.1 二氧化碳捕集、利用与封存在温室气体减排中的作用 …………… 016
- 2.2 全球CCUS定位与走向 …………… 023
- 2.3 中国CCUS的政策及法律支持 …………… 023

## 3 全球和中国CCUS现状 …………… 031

- 3.1 CCUS的全球项目分布 …………… 032
- 3.2 全球CCUS技术示范类型 …………… 034
- 3.3 CCUS相关地区、行业及公益组织 …………… 036
- 3.4 CCUS相关法律法规和国际标准 …………… 037
- 3.5 中国CCUS的项目分布 …………… 039
- 3.6 中国CCUS的重点资助情况 …………… 044
- 3.7 中国CCUS的国家路线图 …………… 044

**4 CCUS的环境风险和环境影响 ..... 047**

- 4.1 CCUS的环境风险 ..... 048
- 4.2 CCUS的环境影响 ..... 052
- 4.3 CCUS环境风险评估方法 ..... 055

**5 案例分析 ..... 057**

- 5.1 国际案例 ..... 058
  - 5.1.1 加拿大Weyburn项目 ..... 058
  - 5.1.2 澳大利亚Gorgon项目 ..... 059
- 5.2 中国案例 ..... 061
  - 5.2.1 中国神华煤制油深部咸水层二氧化碳地质封存示范工程... 061
  - 5.2.2 中国二氧化碳地质封存监测研究平台 ..... 065

**6 中国CCUS环境风险评估技术指南 ..... 069**

- 6.1 出台背景 ..... 070
- 6.2 《指南》与现行的法律法规的关系 ..... 072
- 6.3 《指南》内容解读 ..... 074
  - 6.3.1 评估流程 ..... 075
  - 6.3.2 评估范围 ..... 076
  - 6.3.3 风险源识别及风险受体 ..... 076
  - 6.3.4 推荐评估方法 ..... 081
  - 6.3.5 风险管理 ..... 083
- 6.4 《指南》完善方向 ..... 087

**附录1 主要术语解释 ..... 089**

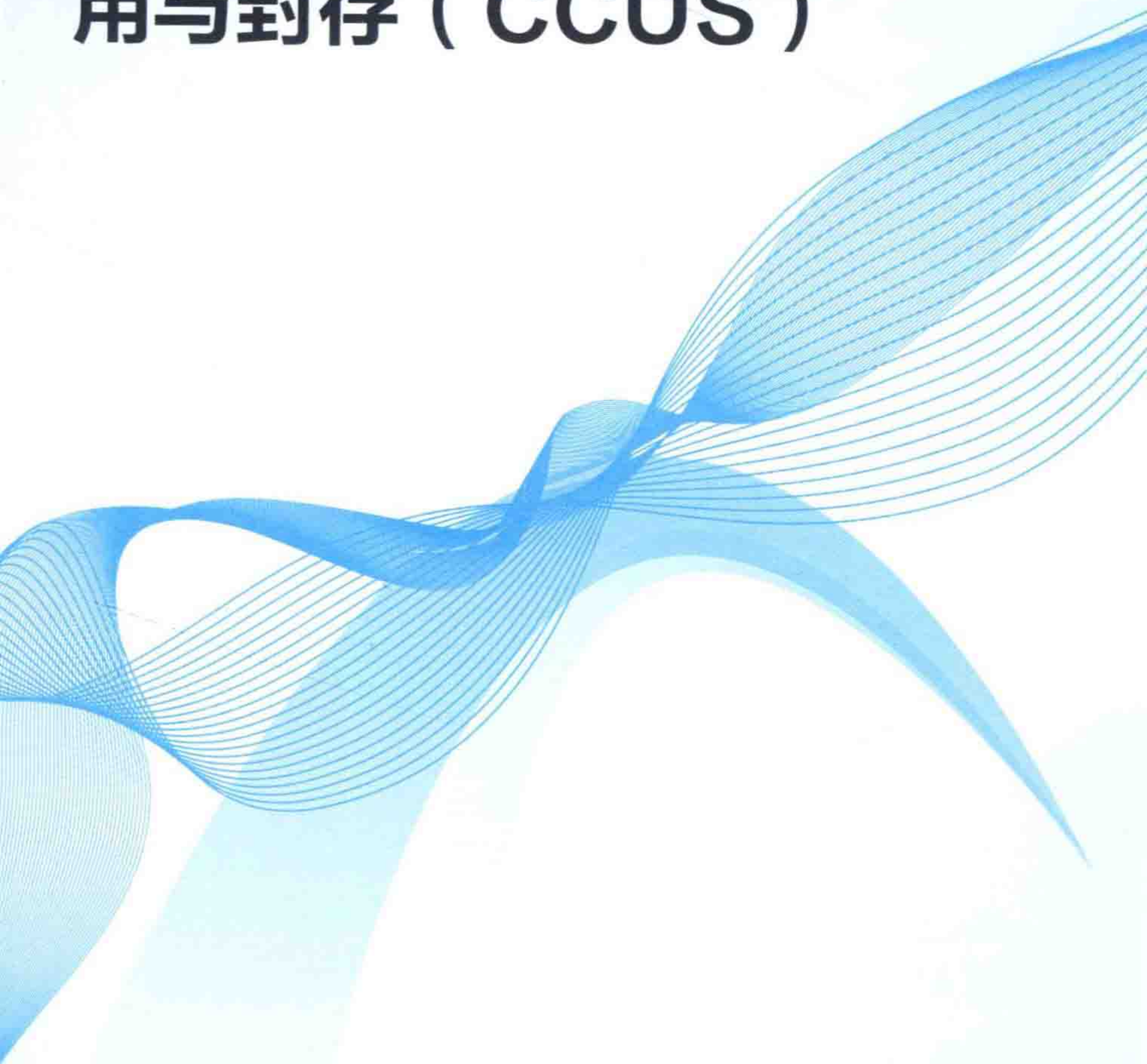
**附录2 二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估  
技术指南（试行） ..... 091**

**参考文献 ..... 107**



1

# 什么是二氧化碳捕集、利用与封存（CCUS）





## 1.1 CCUS 的缘起

二氧化碳捕集、利用与封存（CCUS）（国际上常使用二氧化碳捕集与封存，CCS）是指将二氧化碳从工业或相关能源产业的排放源中捕集分离出来，封存在地质构造中或加以利用，并长期与大气隔绝的过程，是以减少人为二氧化碳排放为目的的技术体系（图 1）。通过 CCUS 技术有望实现化石能源使用的近零排

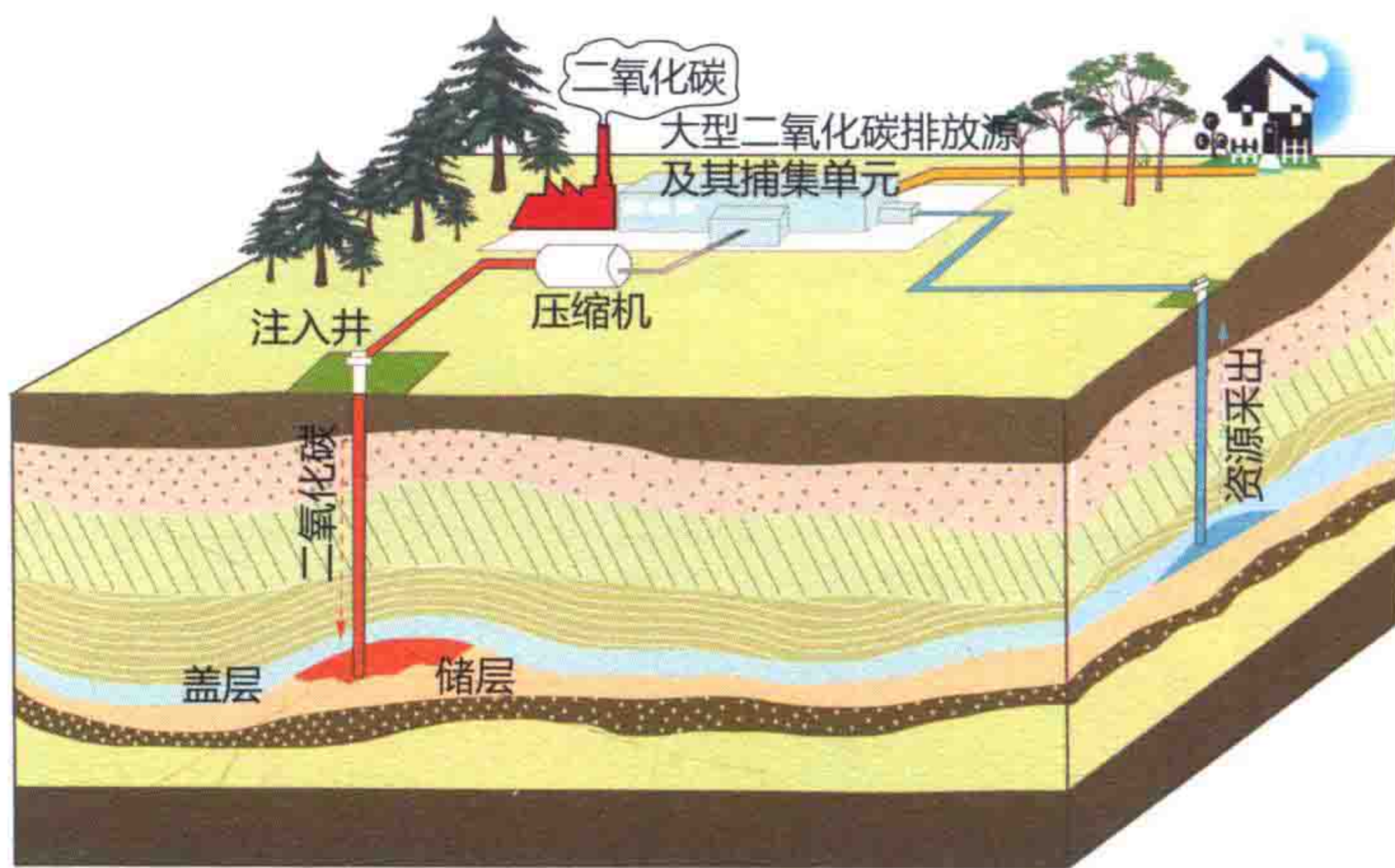


图 1 二氧化碳捕集、利用与封存概念图

放，减排潜力巨大，因此受到国际社会，特别是发达国家的重视。二氧化碳捕集、利用与封存在二氧化碳捕集与封存（CCS）的基础上增加了“利用（Utilization）”，这一理念主要是在中国的大力倡导下形成的，目前在国际上已经获得普遍认同。根据学科领域（原理）的不同，二氧化碳利用主要分为地质利用、化工利

# 1 什么是二氧化碳捕集、利用与封存 (CCUS)

用和生物利用三大类。本书重点讨论二氧化碳地质封存与利用。

## 1.2 地质封存与利用的主要技术

二氧化碳地质封存与利用主要包括二氧化碳强化石油开采 (CO<sub>2</sub>-EOR)、二氧化碳驱替煤层气 (CO<sub>2</sub>-ECBM)、二氧化碳强化天然气开采 (CO<sub>2</sub>-EGR)、二氧化碳增强页岩气开采 (CO<sub>2</sub>-ESGR)、二氧化碳增强地热系统 (CO<sub>2</sub>-EGS)、二氧化碳铀矿浸出增采 (CO<sub>2</sub>-EUL)、二氧化碳强化深部咸水开采 (CO<sub>2</sub>-EWR) 以及枯竭油气藏、煤层、咸水层内的单纯地质封存 (图 2)。

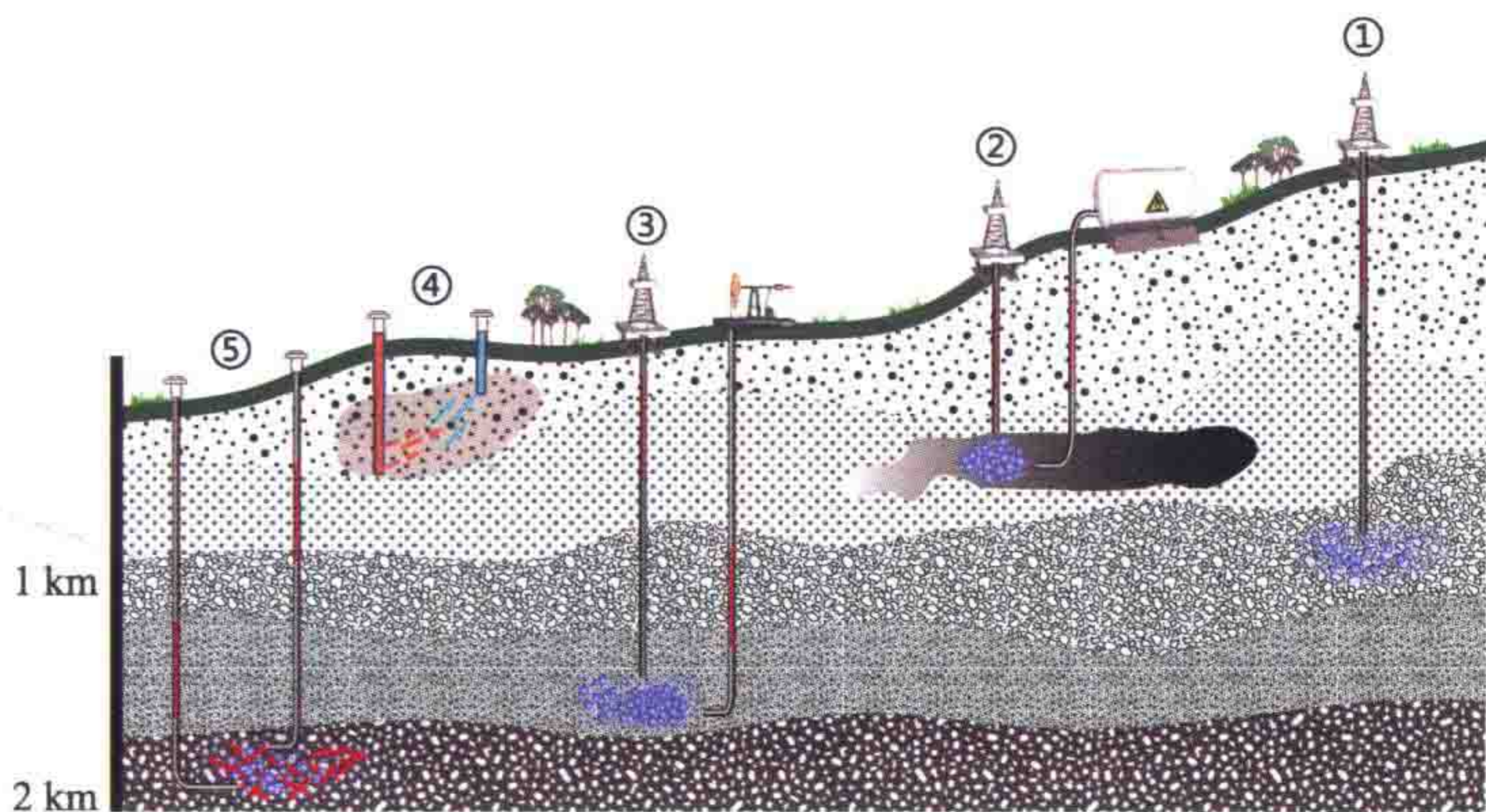


图2 二氧化碳地质封存与利用类型概念图

- ① 枯竭的油气藏、煤层、咸水层内部单纯封存
- ② CO<sub>2</sub>-ECBM (增产煤层气)
- ③ CO<sub>2</sub>-EOR/EGR/ESGR/EWR (强化油/气/深层咸水开采)
- ④ CO<sub>2</sub>-EUL (铀矿浸出增采)
- ⑤ CO<sub>2</sub>-EGS (增强地热系统)



二氧化碳强化石油开采技术是指将二氧化碳注入油藏，利用其与石油的物理化学作用，实现增产石油并封存二氧化碳的工业工程（图3）。强化采油技术是一项有望提高原油采收率，同时封存二氧化碳的三次采油技术。根据初步评价，中国强化采油的二氧化碳封存容量在20亿吨以上，可增采原油7亿吨以上。渤海湾、松辽、塔里木、鄂尔多斯、准噶尔等9个盆地是开展强化采油技术潜力最大的盆地。二氧化碳强化采油技术在国际上已经处于商业应用水平，在中国处于工业应用的初期到中期水平。

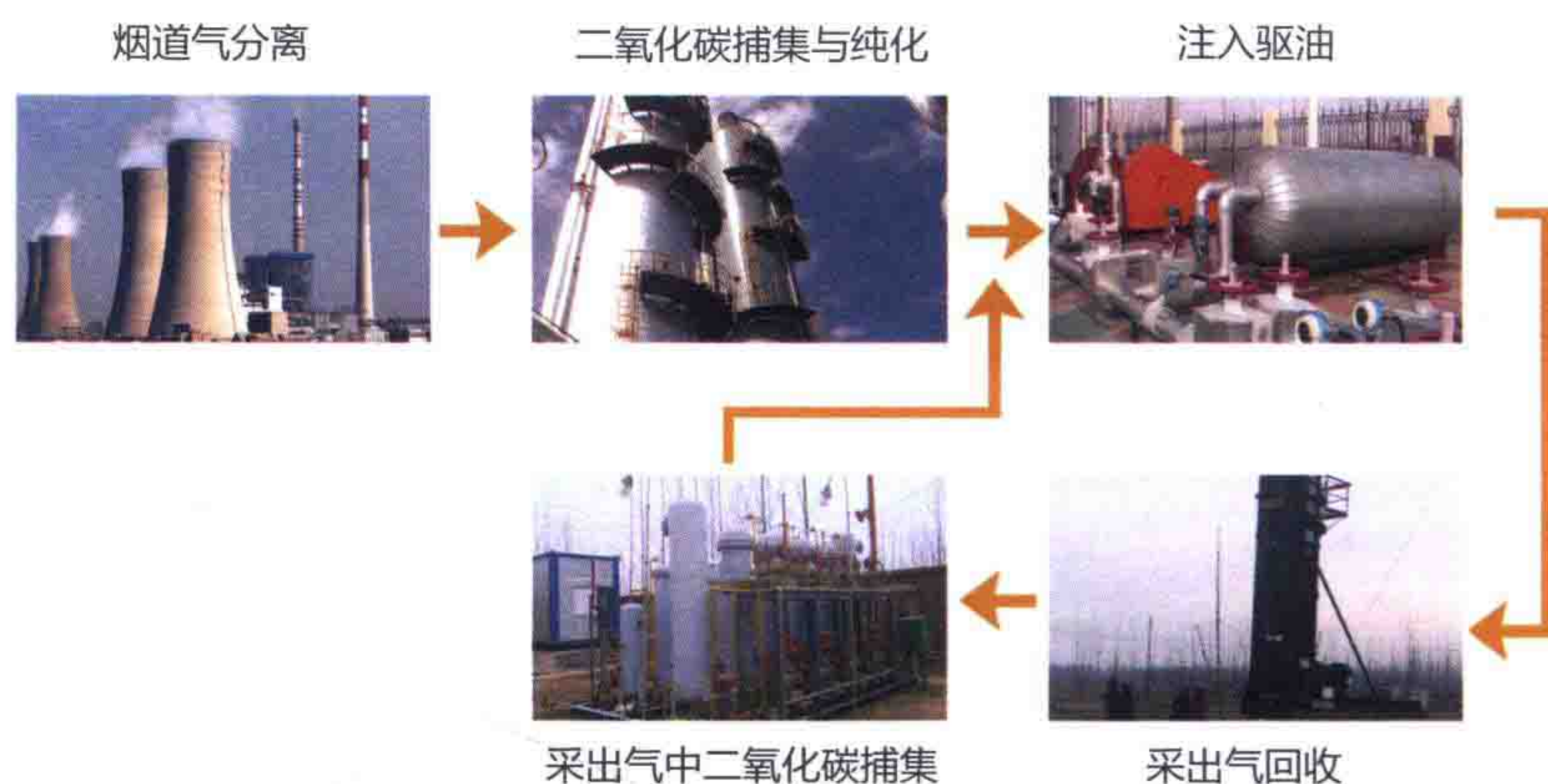


图3 胜利油田二氧化碳强化石油开采工程流程图

二氧化碳驱替煤层气技术是指将二氧化碳或者含二氧化碳的混合气体注入深部不可开采的煤层中，以实现二氧化碳长期封存，同时强化煤层气开采的工业过程（图4）。中国煤层气资源丰富，而目前采收率较低，开采周期长，成本较高。驱替煤层气技术是一项有望大幅提高煤层气采收率、缩短开采周期、降低开采成本的下一代二氧化碳捕集、利用与封存技术。根据

## 1 什么是二氧化碳捕集、利用与封存 (CCUS)

初步评价，在中国煤层进行驱替煤层气可以直接减排容量为98.8亿吨，可生产煤层气13.47万亿立方米。驱替煤层气技术在国际上已经处于工业应用的初期水平，在中国处于技术示范的初期水平。

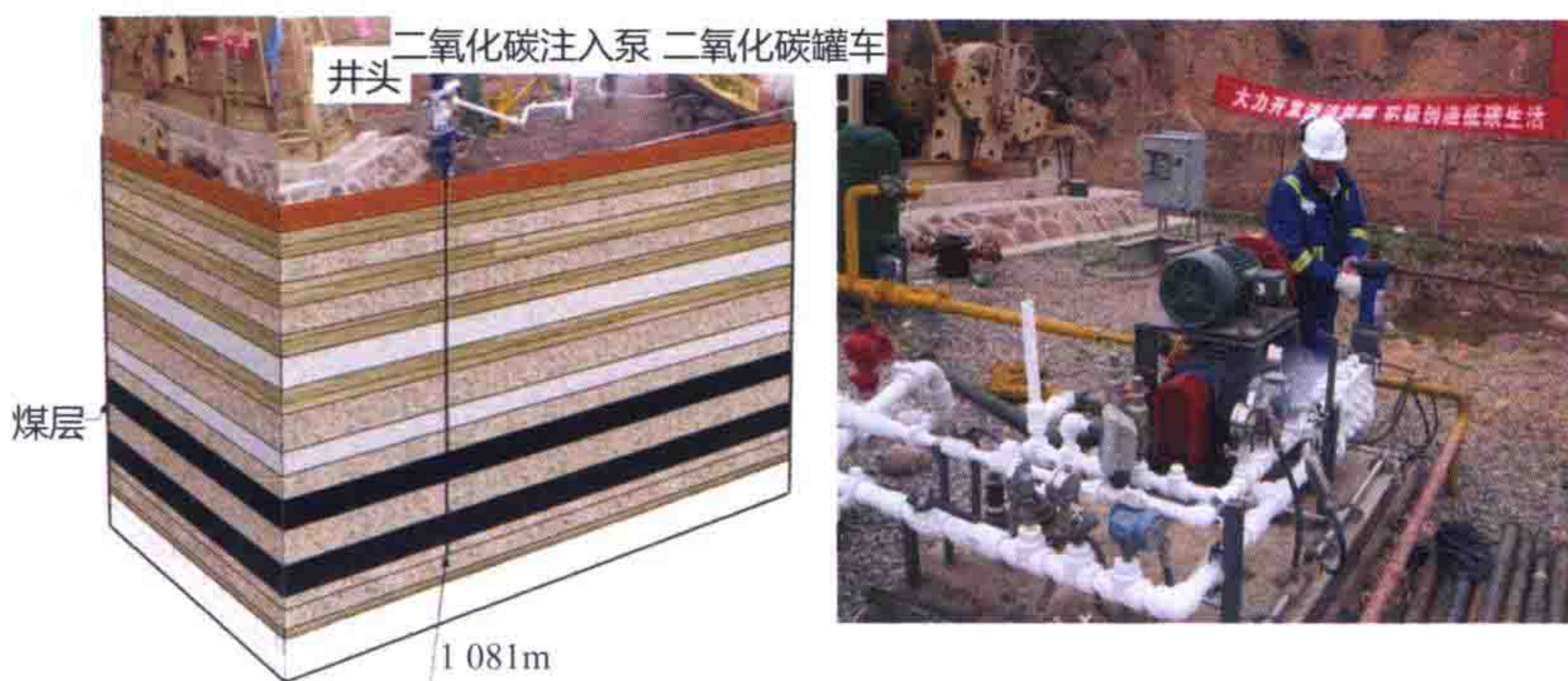


图4 中联煤沁水盆地二氧化碳驱替煤层气示范工程

二氧化碳强化天然气开采技术，是指注入二氧化碳到即将枯竭的天然气气藏底部，将因自然衰竭而无法开采的残存天然气驱替出来从而提高采收率，同时将二氧化碳封存于气藏地质结构中实现二氧化碳减排的过程。

二氧化碳铀矿浸出增采技术，是指将二氧化碳与溶浸液注入砂岩型铀矿层，通过抽注平衡维持溶浸流体在铀矿床中运移，并与含铀矿物选择性溶解，采出铀矿同时实现二氧化碳封存的过程（图5）。

二氧化碳增强页岩气开采技术是指利用二氧化碳代替水来压裂页岩，并利用二氧化碳吸附页岩能力比甲烷强的特点，置换甲烷，从而提高页岩气开采率，并实现二氧化碳封存的过程。

二氧化碳增强地热系统，是将二氧化碳注入深层热储，并通



过生产井回采，以二氧化碳为工作介质的地热开采利用过程。

二氧化碳强化深部咸水开采技术，是指将二氧化碳注入深部咸水层或卤水层，驱替高附加值液体矿产资源（如锂盐、钾盐、溴素等）或深部水资源的开采，同时实现二氧化碳长期封存的一种过程。强化采水从产品类型分主要包括两类：①利用二氧化碳驱替高附加值液体矿产资源技术或二氧化碳驱替卤水技术；②利用二氧化碳驱替深部咸水并淡化利用技术或二氧化碳驱替咸水技术。

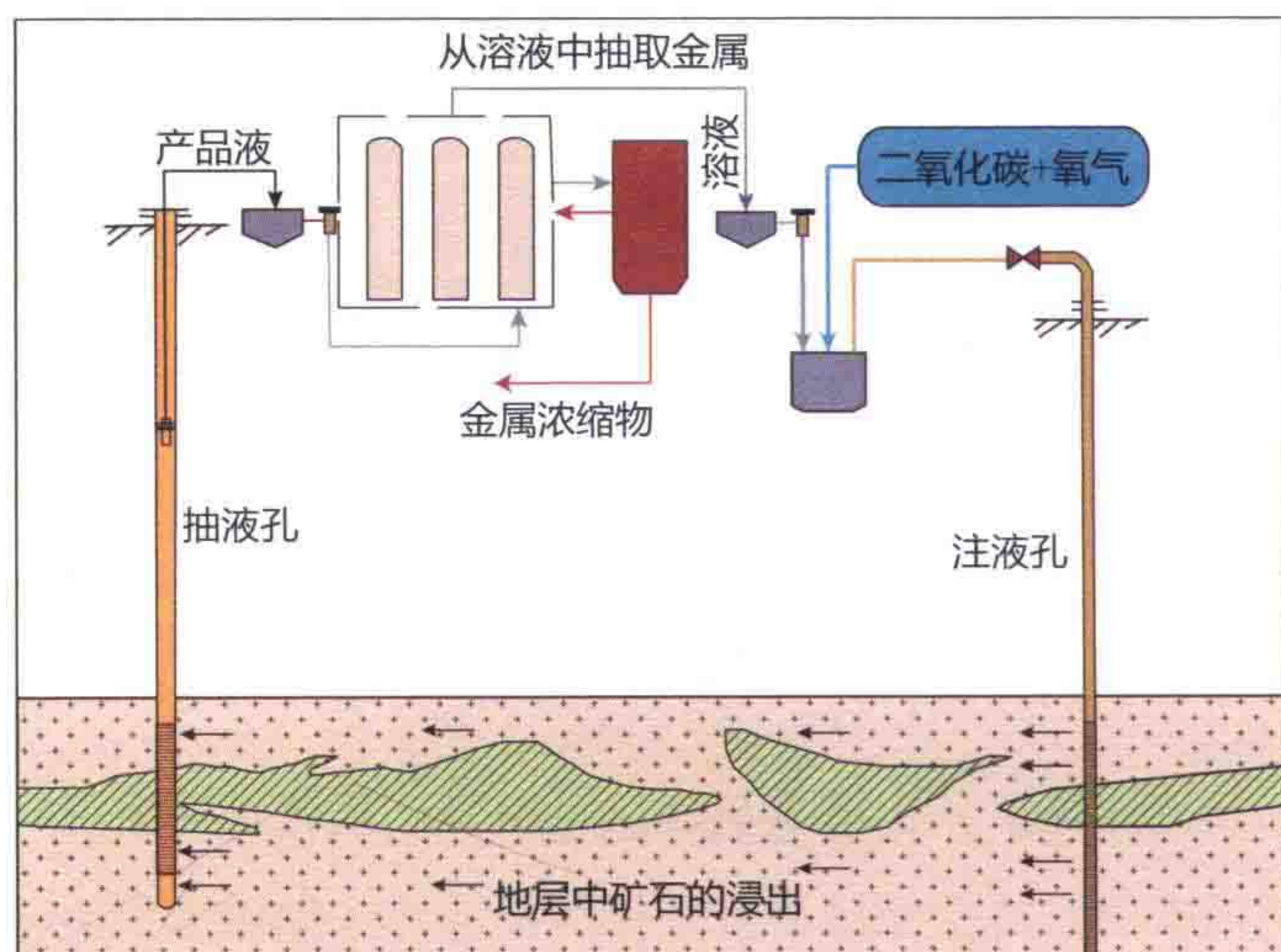


图5 二氧化碳铀矿浸出增采技术原理图

联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第五次评估报告（2014年）中强调了生物质能源技术和CCUS结合起来的新型CCUS技术（BECCS），包括生物质燃料发电、热电联产、造纸、乙醇生产、生物质制气等，将生产排放的二氧化碳利用CCUS技术消减掉。BECCS最大的特点是可以实现二氧化碳负排放，因

## 1 什么是二氧化碳捕集、利用与封存 (CCUS)

为生物生长吸收二氧化碳，而 CCUS 技术又能把工业生产过程排放的二氧化碳储存在地下，从而实现了二氧化碳的净吸收（负排放）（图 6）。

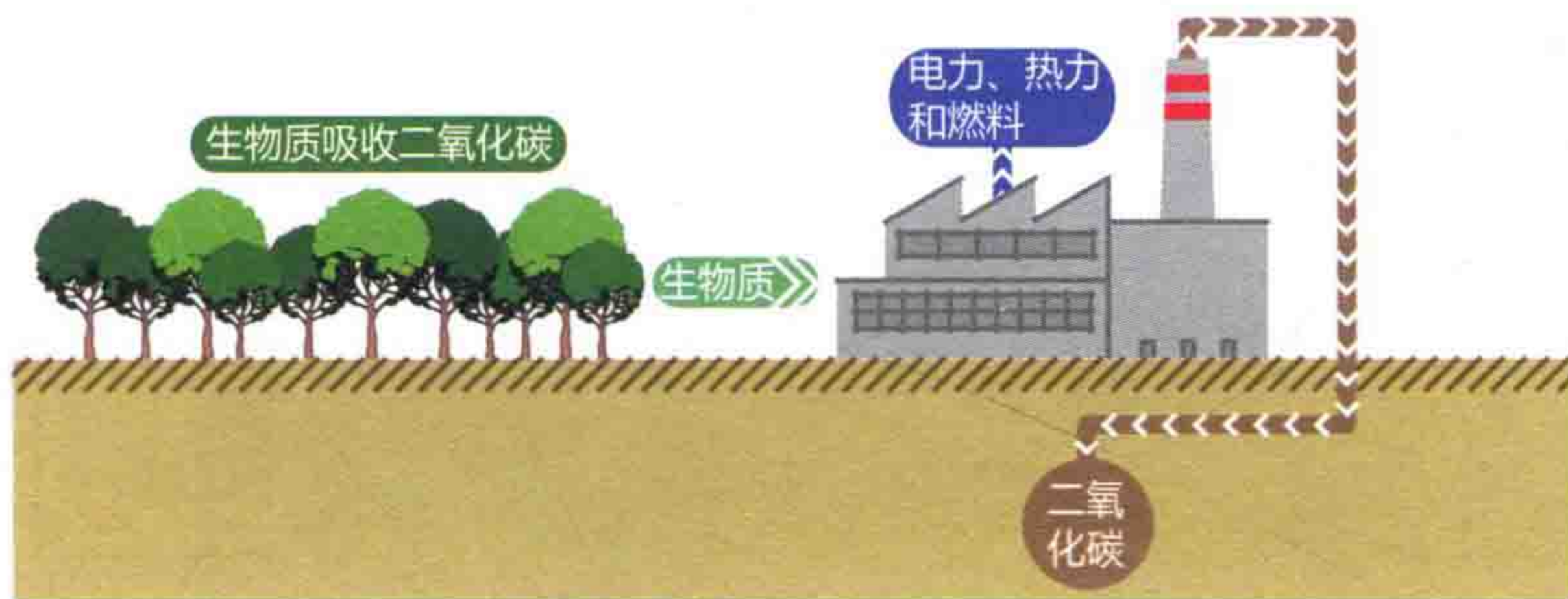


图 6 生物质+CCUS 技术原理图

## 1.3 地质封存的原理

### 1.3.1 二氧化碳相态

二氧化碳是空气中常见的温室气体，室温条件下是一种无色、无味、不助燃的气体。随着温度和压力的变化，存在气态、液态、固态三种状态（图 7）。当温度低于  $-78^{\circ}\text{C}$ （沸点）时，二氧化碳以固态形式存在，即干冰。温度高于沸点时，干冰升华为二氧化碳气体。当温度高于  $30.98^{\circ}\text{C}$ 、压力大于  $7.38\text{ MPa}$  ( $73.77\text{ bar}$ )，二氧化碳进入超临界相态。在固态和超临界相态之间，则是二氧化碳的气态和液态，当气体压力较大时呈液态，压



力降低后又将变成气态，其相态随温度压力变化。

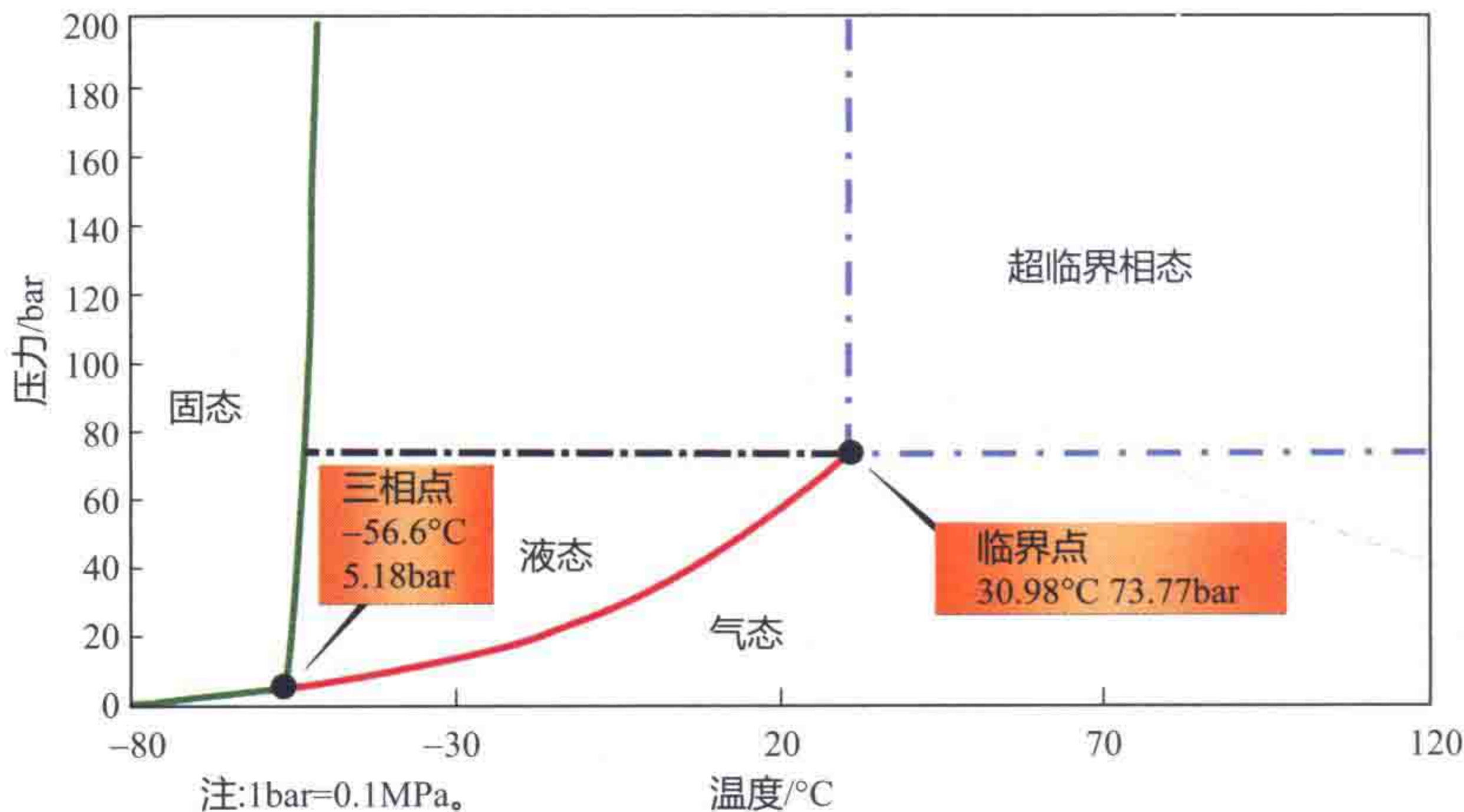


图7 二氧化碳相态图

### 1.3.2 二氧化碳密度

为了能更好地地质封存二氧化碳，需要将二氧化碳压缩，使二氧化碳达到“超临界”状态。二氧化碳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 800 m 时，二氧化碳将会达到超临界状态，此时随着注入深度的增加，二氧化碳的密度变化很小。处于超临界状态的二氧化碳密度约为  $750\text{kg/m}^3$ ，此时，二氧化碳以气体状态充满岩石空隙，同时又具有液体的黏稠性，即其状态介于气态和液态之间。地表  $1000\text{m}^3$  的二氧化碳注入地下，在地下约 800m 达到超临界状态，在地下 2km 的注入深度，其体积从地表的  $1000\text{m}^3$  锐减到  $2.7\text{m}^3$ （图 8）。这种特性使得大规模地质封存二氧化碳具有很大的吸引力和应用价值。



# 1 什么是二氧化碳捕集、利用与封存 (CCUS)

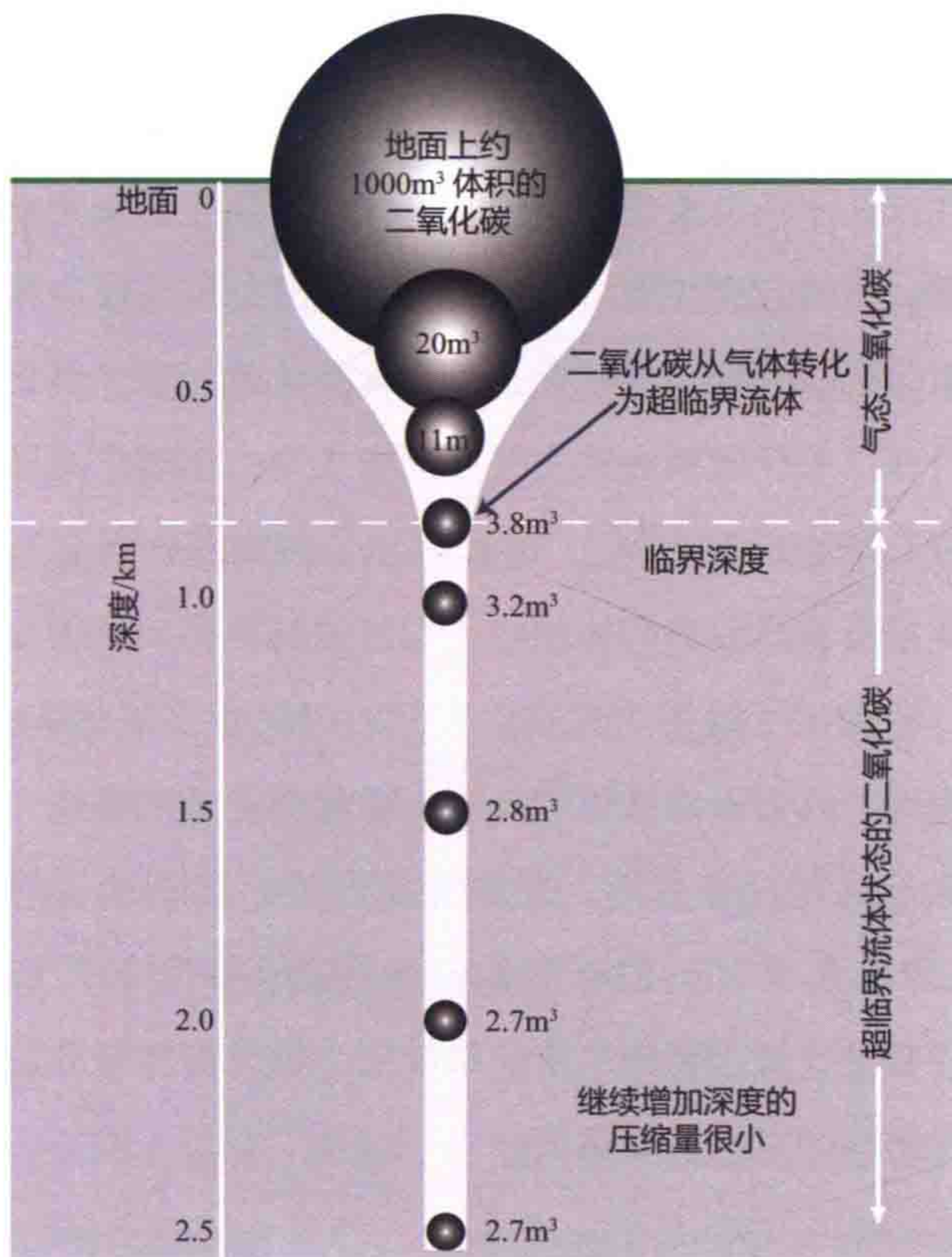


图8 单位体积二氧化碳随注入深度变化而变化

## 1.3.3 储盖组合

超临界二氧化碳密度大、占体积空间小、可注入量更多，是较为理想的储存相态，因此储层要达到一定的深度。除此以外，需要有一定的储存空间，即要求储层岩石具有一定的孔隙度和渗透率，同时储层必须有严密的上覆盖层，这样才能将二氧化碳安全、稳定地“封闭”于地下。一般，能实现二氧化碳地质封存的