

文章编号: 1000-7598(2009)09-2674-06

# 我国 CO<sub>2</sub> 捕集与封存的技术路线探讨

李小春, 方志明, 魏宁, 白冰

(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)

**摘要:** 地球温暖化问题已引起全球的密切关注, CO<sub>2</sub> 是促成地球温暖化的主要因素。为了缓解地球温室效应, 将大气温室气体浓度稳定在一个安全的水平上, 必须减少 CO<sub>2</sub> 排放。CO<sub>2</sub> 捕集与封存 (CCS) 是一种新型岩土工程, 具有规模大、潜力大、成本较低、技术成熟度较高、与化石能源结构相容性好等特点, 被认为可能具有较高减排贡献度, 能够降低综合减排成本和减缓能源结构转变带来的经济冲击。国外已投入了很大的研发资金并且制定了研发路线。中国的研究才刚刚起步, 尚未制定开发路线。根据大量调查分析, 提出了中国中长期 CCS 研发技术路线。

**关键词:** 地球温暖化; CO<sub>2</sub>; 封存; 技术路线

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

## Discussion on technical roadmap of CO<sub>2</sub> capture and storage in China

LI Xiao-chun, FANG Zhi-ming, WEI Ning, BAI Bing

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Global warming has aroused a close attention all over the world. Emission of CO<sub>2</sub>, as a major greenhouse gas, must be reduced for the purpose of stabilizing the concentration of CO<sub>2</sub> at a safe level. CO<sub>2</sub> capture and storage (CCS), a new kind of geotechnical engineering, is a potential cost-effective and fossil energy-compatible technology, which is considered to play a significant role in global emission control and be helpful in reducing the total greenhouse gas control cost and mitigating the economic impact caused by the drastic transformation of energy structure. Industrialized countries have drawn up CCS R&D roadmap. CCS research is just getting started in China and the R&D roadmap has not been drawn up. A mid-long term R&D technical roadmap of CCS in China is presented based on authors' investigations and analyses.

**Key words:** global warming; CO<sub>2</sub>; storage; technical roadmap

### 1 引言

地球温暖化问题已引起全球的密切关注, 促成了《气候变动框架条约》(1992年5月9日通过, 1994年3月21日生效)和《京都议定书》的生效(1997年12月11日通过, 2005年2月16日生效)。《气候变动框架条约》的最终目标是, 实现将大气温室气体浓度稳定在一个安全的水平上, 防止人类活动对气候系统的危险干预。尽管还没有就具体的温室气体浓度控制目标达成一致, IPCC第3次评估报告预计, 本世纪内需要减排几亿吨到几亿吨的CO<sub>2</sub>。《京都议定书》规定了一部分发达国家和中

等发达国家在2008~2012年间的温室气体减排指标, 是人类朝着稳定大气温室气体浓度的目标所走出的重要的一步。

中国已经是第二大CO<sub>2</sub>排放国, 并且将长期主要依赖化石燃料特别是煤作为能源, 因此, 是潜在的第一大排放国。承担减排义务只是一个时间的问题。CO<sub>2</sub>的减排任务非常艰巨, 没有任何单一的技术方案能够全面满足这一要求, 而是需要各种减排技术的组合。

CO<sub>2</sub>捕集与地质封存技术(CCS)可以使这一目标的实现变得更为容易, 从而受到许多国家的重视。CCS是指将CO<sub>2</sub>从工业生产或能源转化过程中

收稿日期: 2008-10-08

基金项目: 中国科学院“百人计划”资助项目。

第一作者简介: 李小春, 男, 1964年生, 博士, 研究员, 主要从事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方面的研究工作。E-mail: xcli@whrsm.ac.cn

分离出来，输送到一个封存地点，注入地下具有密封性能的地层中使之长期与大气隔绝的一个过程<sup>[1]</sup>。其系统要素包括：排放源设施、捕集设施、输送设施、注入设施。

CCS 是一种新型岩土工程，具有规模大、潜力大、成本较低、技术成熟度较高、与化石能源结构相容性好等特点，被认为可能具有较高减排贡献度，有助于降低综合减排成本和减缓能源结构转变带来的经济冲击。国外已投入很大的研发资金并且制定了研发路线。我国的研究才刚刚起步，尚未制定开发路线。为此根据大量调查分析，提出了我国中长期 CCS 研发技术路线。

## 2 中国 CO<sub>2</sub> 捕集与封存研究进展

我国 CCS 研究工作虽然近几年才刚刚起步，但进展比较快，已经初步完成了 CO<sub>2</sub> 排放源调查、CCS 封存潜力评估、CCS 关联技术要素的现状调查等工作。

### 2.1 CO<sub>2</sub> 排放源调查

摸清 CO<sub>2</sub> 排放源尤其是集中排放源的现状是进行源汇匹配以及减排方案制定的重要依据。因此，要进行 CO<sub>2</sub> 捕集与封存研究首要任务是对 CO<sub>2</sub> 排放源进行调查。白冰，李小春等<sup>[2]</sup>对 2004 年中国火电、水泥、钢铁、炼油、乙烯、合成氨、环氧乙烷、制氢 8 类企业的 CO<sub>2</sub> 排放量进行了调查。调查结果表明，2004 年上述 8 类企业 CO<sub>2</sub> 排放量约为 29.6 亿吨。其集中排放源状况有以下特点：

- (1) 煤电厂为主，占总集中排放源的 63%。
- (2) 低浓度排放源比例高，燃煤电厂、水泥、钢铁排放量之和占总集中排放量的 91% 以上（图 1），而且都是浓度小于 20% 的低浓度排放源。
- (3) 也有高浓度排放源（CO<sub>2</sub> 浓度在 95% 以

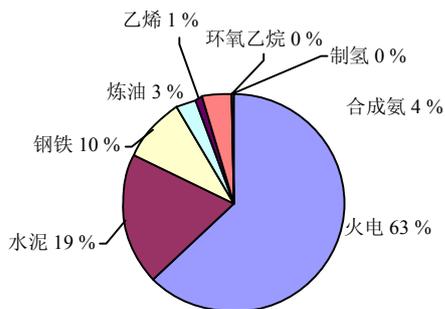


图 1 2004 年中国 8 类企业 CO<sub>2</sub> 排放构成  
Fig.1 CO<sub>2</sub> emission structure of eight industries, China 2004

上）。高浓度排放源主要来自合成氨产业，年排放量为 1.2 亿吨。

(4) 排放源主要分布在东部沿海和平原地区（图 2）。一半以上的排放源位于沉积盆地中，而封存场地也在盆地之中（图 3）。这意味着一部分排放源附近能够找到封存场地，可以减少运输成本。

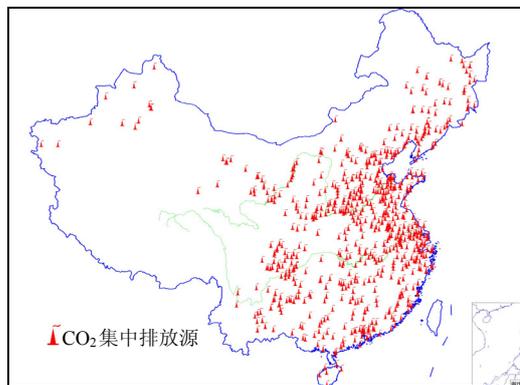


图 2 2004 年中国 8 类 CO<sub>2</sub> 集中排放源分布图  
Fig.2 CO<sub>2</sub> source distribution map of Chinese eight sorts industries in China in 2004

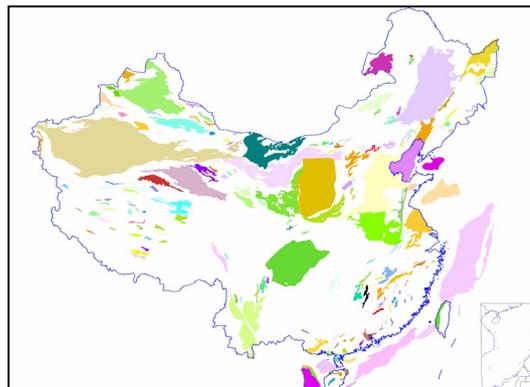


图 3 中国主要沉积盆地分布图  
Fig.3 Distribution map of main sedimentary basins in China

### 2.2 CO<sub>2</sub> 封存潜力评估

欧、美、日等发达国家的研究经验表明，各种封存方式的封存潜力是研究 CCS 战略和开发路线的主要依据。刘延锋，李小春等<sup>[3-5]</sup>对中国 CO<sub>2</sub> 各种封存方式的封存潜力做了初步评估，结果见表 1。

表 1 中国 CO<sub>2</sub> 封存潜力  
Table 1 CO<sub>2</sub> storage capacity in China

封存场地类型	CO <sub>2</sub> 最低值 /10 <sup>8</sup> t	CO <sub>2</sub> 最高值 /10 <sup>8</sup> t
CO <sub>2</sub> 驱油	48	101
枯竭天然气田	41	305
CO <sub>2</sub> 驱煤层气	121	484
深部含水层	1 600	14 513
总量	1 810	15 403

尽管封存潜力评估结果有较大的不确定性,但总封存潜力在 1 810 亿吨以上,估计可以供我国利用 100 年以上。

### 2.3 CO<sub>2</sub> 封存关联技术要素的现状<sup>[6]</sup>

CO<sub>2</sub> 封存技术在发达国家已有十几年的研究历史。从一般概念、基本理论到实施系统的各环节都进行了广泛深入的研究。目前,我国在这方面的研究工作刚刚起步。CO<sub>2</sub> 地质封存过程主要包括 3 个要素:从发电厂或者工业生产过程中捕集 CO<sub>2</sub>;将 CO<sub>2</sub> 运送到封存场地;CO<sub>2</sub> 注入与封存<sup>[7]</sup>。其中的很多技术在现有工业以及石油、天然气开采等行业中已经存在,因此,对这些技术现状进行调查,摸清情况,是开展 CO<sub>2</sub> 捕集与封存研究工作至关重要的一步。李小春,方志明<sup>[6]</sup>于 2007 年对我国现有工业以及石油、天然气开采等行业中涉及到的 CO<sub>2</sub> 回收、运输以及注入与埋存等技术的现状进行了初步调查。

#### 2.3.1 捕集技术现状

捕集成本高是 CO<sub>2</sub> 捕集与地质封存技术的关键障碍之一<sup>[8]</sup>。目前,我国工业过程 CO<sub>2</sub> 回收技术已经达到“一定条件下经济可行”的水平,但与大规模地质封存的要求,尤其是在设备产能和成本上还存在很大的差距。在燃烧前捕集、燃烧后捕集和氧燃烧方面还处于基础研究阶段。

#### 2.3.2 运输技术现状

商业规模的 CO<sub>2</sub> 运输主要使用的是 CO<sub>2</sub> 运输管道,轮船和罐车。目前我国在 CO<sub>2</sub> 运输技术方面相对比较薄弱。

我国工业用 CO<sub>2</sub> 主要通过罐车运输,这种运输方式显然不能满足大规模 CO<sub>2</sub> 地质封存的需求。

我国在大规模 CO<sub>2</sub> 管道运输上还是具备一定的技术基础的。大庆油田萨南东部过渡带 EOR 先导性试验中曾经用管道将距试验场地 6.5 km 的大庆炼油厂加氢车间副产品 CO<sub>2</sub> 低压输送到试验场地<sup>[9]</sup>。CO<sub>2</sub> 运输管道的铺设与油气管道在技术方面有很多类似之处。主要不同点是 CO<sub>2</sub> 运输管道在防腐保温技术上的要求更高。我国在防腐保温管道方面有一定的技术水平和施工能力。尽管经验不多,但 CO<sub>2</sub> 管道输送技术比较成熟,离实用化的距离并不远。

#### 2.3.3 注入与封存技术进展

CO<sub>2</sub> 地质封存中的很多相关技术在现有工业以及石油、天然气开采等行业中已经存在。

基于石油工业的技术经验,在 CO<sub>2</sub> 注入井的钻井、完井、CO<sub>2</sub> 的注入与监控等技术方面,我国有一定的基础,并且已经达到相当高的水平。已有 6

次 EOR 先导试验,2 次 ECBM 先导试验经验(见表 2)。

表 2 中国的 CO<sub>2</sub> 捕集与封存项目

Table 2 Projects of CCS in China

项目	规模	开始时间 /年-月	封存方式
大庆油田	先导试验	1990	驱油
江苏油田	先导试验	1998-12	驱油
辽河油田	先导试验	2001	驱油
中原油田	先导试验		驱油
吉林油田	先导试验	1994	驱油
胜利油田	先导试验		驱油
沁水煤田	先导试验	2003	驱煤层气
平顶山煤田 +武汉岩土所	先导试验	2006-09	混合气体 驱煤层气

#### 2.3.4 CO<sub>2</sub> 捕集与封存关联技术的成熟度

我国 CO<sub>2</sub> 捕集与封存关联技术要素的成熟度情况见表 3。

总的来讲,EOR 最为成熟,已经接近实用化,其次为 ECBM。目前 EOR 和 ECBM 之所以发展较快,主要是因为他们具有附带经济利益,企业愿意自主实施。含水层封存和气田封存是纯粹的环保措施,在没有行政或财税政策刺激的情况下,研发和实施动力不足。气田封存由于尚无枯竭气田,而且容量不大,前景还很难说。含水层封存的容量占整个地质封存容量的 80%左右,并且分布较均匀,容易在排放源附近找到,将是我国东南、华中、华南、四川地区的主要地质封存方式。因此,要加强含水层封存研发,作好技术储备。

## 3 中国 CO<sub>2</sub> 捕集与封存技术路线

### 3.1 CO<sub>2</sub> 封存的主要方式

根据我国 CO<sub>2</sub> 排放源的调查结果<sup>[2]</sup>可以看出,燃煤电厂(Pulverized Coal power plant, PC)的 CO<sub>2</sub> 排放量约为 1 863.091 9 Mt,占 2004 年总排放量近 63%,是第 1 位的 CO<sub>2</sub> 排放源,也是 CO<sub>2</sub> 封存的主要对象;从封存潜力方面看,含水层(Deep Saline Formation, DSF)的封存潜力占到 80%以上,是主要的封存场所。因此,燃煤电厂排放的 CO<sub>2</sub> 含水层封存(PC+DSF)将是中国 CO<sub>2</sub> 长期、深度减排的主要途径。

CO<sub>2</sub> 含水层封存基本概念如图 4 所示是指将浓度达 99%以上的 CO<sub>2</sub> 注入地下深处具有封闭条件的含水层中封存起来。含水层中的 CO<sub>2</sub> 在很长时间内以超临界形式存在(密度为 0.6~0.7 g/cm<sup>3</sup>)。

**表 3 CO<sub>2</sub> 捕集与封存关联技术要素的成熟度**  
**Table 3 Current maturity of the technical factors of CCS**

地质埋存主要要素	技术	研究阶段 <sup>(a)</sup>	示范阶段 <sup>(b)</sup>	在特定条件下经济可行 <sup>(c)</sup>	成熟化市场 <sup>(d)</sup>
捕集	燃烧前	✓			
	燃烧后	✓			
	氧燃料燃烧	✓			
	工业分离（天然气加工，氨水生产）				✓
运输	管道	✓			
	船运	✓			
封存	驱油（EOR） <sup>(e)</sup>			✓	
	废弃油气田封存	✓			
	咸水含水层封存	✓			
	驱煤层气（ECBM）	✓			

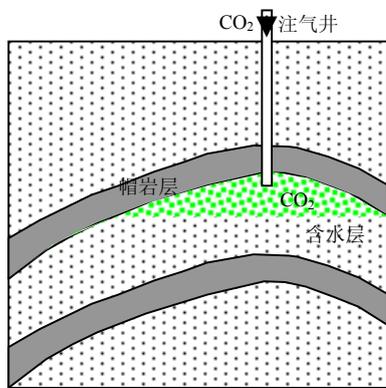
注：（a）“研究阶段”指虽然基础科学知识已在掌握之中，但当前技术上正处于概念设计阶段或是在实验室规模上进行测试，尚未在试点厂示范。

（b）“示范阶段”表示该项技术已经建立并在试点厂范围内进行了应用，但作为一个全面的系统进行设计和构建之前还需要更进一步开发。

（c）“在特定条件下的经济可行”是指这项技术在经过选择的商业应用中已为人很好地理解和使用，例如在税收优惠制度下或是缝隙市场中，以少量的相同技术（少于 5 个），每年至少可以加工 0.1 Mt CO<sub>2</sub>。

（d）“成熟的市场”表示该项技术正在世界范围内以商业规模和多种应用方式运行。

（e）对于 EOR 的 CO<sub>2</sub> 注入是一项成熟的市场技术，但当这项技术用于 CO<sub>2</sub> 地质封存时，仅是“在特定条件下经济可行”。



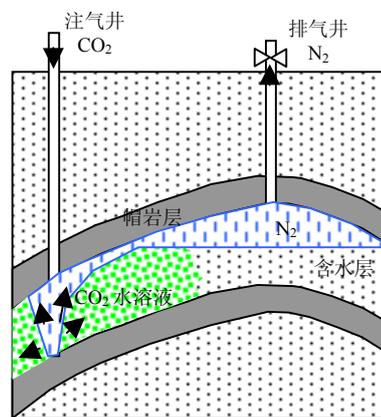
**图 4 CO<sub>2</sub> 含水层封存概念图**  
**Fig.4 Schematic diagram of CO<sub>2</sub> storage in aquifer**

影响含水层封存的主要因素是经济性和安全性。经济性是影响含水层可行性的决定性因素。经济性可用每吨 CO<sub>2</sub> 的封存成本来表现。封存成本包括捕集成本、输送成本和注入成本<sup>[1]</sup>。据 IPCC<sup>[10]</sup> 估计，PC 电厂的 CO<sub>2</sub> 捕集成本为 15~75 \$/t；按 250 km 距离的管道或轮船每年输送 5~40 Mt CO<sub>2</sub> 计算，输送成本为 1~8 \$/t；注入成本为 0.5~8 \$/t。其中，捕集成本占总封存成本的 82%~91%。安全性主要取决于注入地下的 CO<sub>2</sub> 的泄漏率是否达到影响浅层地下与地面环境及人身健康的程度<sup>[1]</sup>。这主

要取决于帽岩的密封性。由于 CO<sub>2</sub> 的密度小于水，有上浮趋势，而含水层上覆帽岩的密封性没有经过像油气田帽岩那样的自然证明，因此，泄漏风险较高。

因此，捕集的高成本和封存的安全性是目前含水层封存面临的主要困难，是决定 PC+DSF 对 CO<sub>2</sub> 减排的贡献度的主要因素。

为了克服含水层封存的捕集成本高和泄漏风险两大技术障碍，笔者提出了 N<sub>2</sub> 自分离 CO<sub>2</sub> 含水层封存的新方法（图 5，简称自分离封存）。与常规方法不同，本方法有注气井和排气井，前者处于低位，后者处于高位。将中等浓度 CO<sub>2</sub> 气体（比如 50%~80% 左右，其余主要是 N<sub>2</sub>）通过注气井注入含水层；混合气体由于密度低于水，将向高位的排气井流动；在此过程中，CO<sub>2</sub> 由于溶解度较大（CO<sub>2</sub> 溶解度是 N<sub>2</sub> 的 44 倍），将逐步溶解于水中，而 N<sub>2</sub> 难溶于水，继续向排气井流动。前者以溶解方式停留于地层，后者通过排气井放入大气。这样，自分离封存方法利用气体在地层内迁移过程中的一些特性，实现 N<sub>2</sub> 的自分离。其效果是一方面降低了 CO<sub>2</sub> 的浓度要求，从而降低了捕集成本；另一方面由于 CO<sub>2</sub> 溶解水的密度大于水，无上浮趋势，从而降低了地层的密封要求，提高了安全性。



**图 5 N<sub>2</sub> 自分离含水层封存概念图**  
**Fig.5 Schematic diagram of CO<sub>2</sub> storage in aquifer for N<sub>2</sub> self-separation**

如果整体煤气化联合循环发电（Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC）产生的 CO<sub>2</sub> 浓度达到自分离封存的要求，就可以免除捕集环节，封存成本会进一步降低。

### 3.2 我国 CO<sub>2</sub> 封存的早期机会

含水层封存虽然封存潜力最大，但毕竟是一种纯粹的 CO<sub>2</sub> 减排技术，无附带经济效益，而且封存

成本高,因此,只可能作为我国长期、深度减排而必须坚持的一条路线。而像 EOR、ECBM 这样具有附带经济效益,而且封存成本较低,能为企业带来效益的减排方式才是符合我国当前实施可持续发展战略要求的早期实施机会。

根据刘延锋<sup>[3-5]</sup>等的研究,中国 CO<sub>2</sub> 煤田封存的潜力是 120.78×10<sup>8</sup> t CO<sub>2</sub>, 并且可以增采 0.667×10<sup>12</sup> m<sup>3</sup> 煤层气(主要成分 CH<sub>4</sub>)。而甲烷的温室效应是 CO<sub>2</sub> 的 16 倍,同时 CH<sub>4</sub> 又是一种比煤炭更好的燃料。利用 CO<sub>2</sub>-EOR 技术,大约可增采原油 32.33×10<sup>8</sup> t, 相应的 CO<sub>2</sub> 储存容量约为 (26.07~139.15)×10<sup>8</sup> t, 相当于 2002 年全国 CO<sub>2</sub> 排放总量的 0.8~4.2 倍; 根据探明石油地质储量, 全国范围内利用 CO<sub>2</sub>-EOR 技术, 可以增采原油约 15.03×10<sup>8</sup> t, 相应的 CO<sub>2</sub> 储存容量约为 12.15~64.92×10<sup>8</sup> t, 相当于 2002 年全国 CO<sub>2</sub> 排放总量的 0.4~2 倍。还有研究还表明, 从合成氨厂、制氢厂、生物乙醇厂捕集 CO<sub>2</sub> 的成本更低, 而在我国, 这些排放源的年排放量在 1 亿吨以上。因此, 在这些排放源附近选择那些封存潜力大、渗透系数高的油田和煤田作为封存场地才是我国目前 CCS 的早期实现机会。

目前 EOR 的技术比较成熟, 只要成本降低到足够低(一些能源经济分析报告指出, CCS 经济可行的总成本为 20~30 \$/t) 就会大规模实施。

ECBM 现在还处于基础研究阶段, 主要技术问题除了 CO<sub>2</sub> 捕集成本高外, 就是我国煤田渗透率普遍很低, 不利于 CO<sub>2</sub> 的注入和煤层气的开采。

为了克服这两个技术障碍, 笔者建议在我国实施混合气体驱替煤层气, 其主要思路是: 直接将 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 以及其他少量气体组成的混合气体(如: 烟道气、空气等) 作为驱替气体注入煤层。这样, 一方面降低了 CO<sub>2</sub> 的捕集成本; 另一方面利用 N<sub>2</sub> 的增渗作用, 提高了煤的渗透系数, 有利于煤层气的开采。笔者 2007 年在平顶山的肥煤中采用完全国产技术进行了混合气体驱替煤层气先导试验, 取得了成功, 目前正在潞安的焦煤中进行第 2 次试验。如果效果仍然不错, 计划 2009 年开展中间试验。

### 3.3 我国 CO<sub>2</sub> 捕集与封存技术成熟化所需时间

技术的成熟所需时间主要受市场需求的形成时机和解决技术及其他障碍所需要的时间决定。确切的讲是两者中的长者决定的。

市场需求方面。《京都议定书》2012 年到期。下一个议定书的减排额度会更加严格, 目标年估计在 2025~2030 年前后。这一点决定了市场对技术的需求。无论中国是否承担减排义务, 义务有多大,

由于排放权交易机制的存在使中国技术的需求取决于全球减排总量。

在技术方面。根据技术的现状水平, 考虑到基础研究、示范工程、技术推广所需的时间, 大致可以估计实用化的时期。EOR 最先实用化是因为它现状水平最高、成本低, 其次是 ECBM。虽然现在还处于基础研究阶段, 低成本使得它成为煤炭企业的优先选择。然后是含水层, 含水层的技术难度并不比前两者大, 由于成本较高, 市场需求形成较晚, 从而其实用化较迟。

我国 CO<sub>2</sub> 捕集与封存技术成熟化所需时间见表 4。

表 4 我国 CO<sub>2</sub> 捕集与封存技术成熟化所需时间  
Table 4 Time required for maturity of CCS in China

封存方式	时间 / 年			
	基础研究	示范工程	特定条件 经济可行	成熟化所需 总时间
CO <sub>2</sub> 驱油			5~10	5~10
CO <sub>2</sub> 驱煤层气	5~7	4~6	5~10	14~23
深部含水层	7~10	5~7	5~10	17~27

## 4 结 语

地球温暖化问题已引起全球的密切关注, CO<sub>2</sub> 是促成地球温暖化的主要因素。为了缓解地球温暖化, 将大气温室气体浓度稳定在一个安全的水平上, 必须减少 CO<sub>2</sub> 排放。CO<sub>2</sub> 捕集与封存 (CCS) 被认为是一种可能具有较高减排贡献度, 有助于降低综合减排成本和减缓能源结构转变带来的经济冲击的减排方式。根据大量调查分析, 提出了我国中长期 CCS 研发技术路线, 确定了以 EOR 和 ECBM 为早期实现机会, 以含水层封存为长期、深度减排途径的 CCS 战略, 具体可归纳为以下几点:

(1) PC+DSF 路线虽然技术不成熟, 但可能是长期、深度减排的一条出路, 应该坚持。

(2) IGCC—非纯 CO<sub>2</sub> 含水层封存的结合与匹配可能是大幅度降低成本的途径之一。N<sub>2</sub> 自分离含水层封存不仅可以降低成本, 还可以提高安全性。

(3) 充分利用“清洁发展机制 (CDM)”, 积极寻求企业支持, 抓住早期实施机会, 展示其经济性和安全性, 提升相关能力, 为含水层封存打下坚实基础。

## 参 考 文 献

- [1] 李小春, 小出仁, 大隅多加志. 二氧化碳地中隔离技术及其岩石力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 989—994.

## 参 考 文 献

- [1] 国家电力公司华东勘测设计研究院. DL5108—1999 混凝土重力坝设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [2] 潘家铮. 重力坝设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [3] 陈祖煜. 岩质边坡稳定分析—原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [4] 周泽, 周峰, 潘军校, 等. 重力坝深层抗滑稳定计算探讨[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1719—1722.  
ZHOU Ze, ZHOU Feng, PAN Jun-xiao, et al. Study on stability against deep sliding of gravity dam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(6): 1719—1722.
- [5] 蒋春艳, 常晓林, 周伟, 等. 混凝土重力坝多折面建基面稳定安全分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1480—1484.  
JIANG Chun-yan, CHANG Xiao-lin, ZHOU Wei, et al. Stability analysis of multi-zigzag plane base surface of concrete gravity dams[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(9): 1480—1484.
- [6] UGAI K. A method of calculation of total of safety of slopes by elastic-plastic FEM[J]. **Soils and Foundations**, 1989, 29(2): 190—195.
- [7] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(3): 387—403.
- [8] GOODMAN R E, TAYLOR R L, BREKKE T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division**, 1968, 94: 637—659.
- [9] 卓家寿, 章青. 不连续介质力学问题的界面元法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [10] KAWAI T. A new discrete model for analysis of solid mechanics problem[J]. **Seisan Kenkyu**, 1997, 29(4): 204—207.
- [11] ZHANG Qing, SHAO Guo-jian, ZHOU Jia-shou. Research on abutment stability of high arch dam[C]//Proc. 4th Intern. Conf. on Dam Engineering. London: Balkema Publishers, 2004: 1059—1066.
- LI Xiao-chun, KOIDE H, OHSUMI T. CO<sub>2</sub> aquifer storage and the related rock mechanics issues[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(6): 989—994.
- [2] 白冰, 李小春, 刘延锋, 等. 中国 CO<sub>2</sub> 集中排放源调查及其分布特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, (Supp.1): 2918—2923.  
BAI Bing, LI Xiao-chun, LIU Yan-feng, et al. Preliminary study of CO<sub>2</sub> industrial point sources and their distribution in China[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, (Supp.1): 2918—2923.
- [3] 刘延锋, 李小春, 白冰. 中国 CO<sub>2</sub> 煤层储存容量初步评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2947—2952.  
LIU Yan-feng, LI Xiao-chun, BAI Bing. Preliminary estimation of CO<sub>2</sub> storage capacity of coalbeds in China[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(16): 2947—2952.
- [4] 李小春, 刘延锋, 白冰, 等. 中国深部含水层 CO<sub>2</sub> 储存优先区域选择[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 963—968.  
LI Xiao-chun, LIU Yan-feng, BAI Bing, et al. Ranking and screening of CO<sub>2</sub> saline aquifer storage zones in China[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(5): 963—968.
- [5] 刘延锋, 李小春, 方志明, 等. 中国天然气田 CO<sub>2</sub> 储存容量初步评估[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2277—2281.  
LIU Yan-feng, LI Xiao-chun, FANG Zhi-ming, et al. Preliminary estimation of CO<sub>2</sub> storage capacity in gas fields in China[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(12): 2277—2281.
- [6] 李小春, 方志明. 中国 CO<sub>2</sub> 地质埋存关联技术的现状[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2229—2233.  
LI Xiao-chun, FANG Zhi-ming. Status quo of connection technologies of CO<sub>2</sub> geological storage in China[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2229—2233.
- [7] JOHN GALE, JOHN DAVISON. Transmission of CO<sub>2</sub>—safety and economic considerations[J]. **Energy**, 2004, 29: 1319—1328.
- [8] VAN BERGEN F, GALE J, DAMEN K J, et al. Worldwide selection of early opportunities for CO<sub>2</sub>-enhanced oil recovery and CO<sub>2</sub>-enhanced coal bed methane production[J]. **Energy**, 2004, 29: 1611—1621.
- [9] 谢尚贤, 韩培慧, 钱昱. 大庆油田萨南东部过渡带注 CO<sub>2</sub> 驱油先导性矿场试验研究[J]. 油气采收率技术, 1997, 4(3): 13—19, 41.
- [10] IPCC, Special Report on CO<sub>2</sub> Capture and Storage[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

上接第 2678 页