

CO₂

捕集与封存技术 100 问

CO₂ BUJI YU FENGCUN JISHU 100WEN

《CO₂ 捕集与封存技术 100 问》编写组 编著

中国环境出版社

CO₂ 捕集与

封存技术 100 问

《CO₂ 捕集与封存技术 100 问》编写组 编著

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (C I P) 数据

CO₂ 捕集与封存技术 100 问 / 《CO₂ 捕集与封存技术 100 问》编写组编著. —北京: 中国环境出版社, 2016.9
ISBN 978-7-5111-2874-4

I . ① C… II . ① C… III . ① 二氧化碳—收集—问题解答② 二氧化碳—储存—问题解答 IV . ① X701.7-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 170082 号

出版人 王新程
责任编辑 李卫民
责任校对 尹芳
封面设计 岳帅
内文排版 杨曙荣

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街16号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67112735 (第一分社)
发行热线: 010-67125803 010-67113405 (传真)

印 刷 北京盛通印刷股份有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2016年9月第1版
印 次 2016年9月第1次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 4.75
字 数 90千字
定 价 28.00元

【版权所有。未经许可，请勿翻印、转载，违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量，请寄回本社更换。

编写组成员

高 林 黄 斌 胥蕊娜 邹乐乐 尹 乐

李 胜 朱 磊 郭敏晓 安洪光 佟义英

陈 济 曾荣树 王 灿 张九天 白 冰

感 谢

本书的出版是在全球碳捕集与封存研究院（GCCSI）的支持下完成的。本书在编写和出版过程中，还得到了亚洲开发银行（ADB）、世界银行（WB）、陕西延长石油（集团）有限责任公司研究院等机构的大力支持与帮助，在此深表感谢。

目 录

第 1 章 综合认识 CCS	1
引言：起步中的 CCS 技术	1
CCS 是什么？	2
1. 什么是 CCS 技术？有什么特点？	2
2. 什么是 CCUS？为什么要提出 CCUS 技术？	3
3. CCS 是新技术吗？	4
为什么需要 CCS？	5
4. 节能和利用可再生能源能够减排 CO ₂ ，为什么还需要 CCS？	5
5. 什么情况下，CCS 将是必需的？什么情况下，CCS 将失去意义？	5
6. CCS 是发达国家为发展中国家设定的陷阱吗？	6
7. 国际应对气候变化谈判涉及 CCS 技术吗？	6
8. 为什么可再生能源和节能技术获得了大量政策和资金支持，但 CCUS 尚没有相关政策？	6
9. 各方观点如何？争议的焦点是什么？	7
CCS 技术可行吗？	8
10. CCS 技术未来的发展空间大吗？	8
11. CCS 技术成熟了吗？CCS 技术处于哪个技术生命期？	8
12. CCS 技术成本高吗？	9
13. CCUS 项目各环节可能存在什么风险？	11

展的政策环境，与其他具有二氧化碳减排效果的项目相比，CCS 项目通常融资难度更大。今后，应当按照“立足国情、着眼长远、积极引导、有序推进”的方针，加大政策支持力度，通过进一步的技术研发、试验、示范不断提高 CCS 的技术水平、降低 CCS 项目的运行成本，建立 CCS 与其他减排技术的比较优势，充分释放 CCS 的二氧化碳减排潜力。

本书试图用一种通俗易懂、简便快捷、生动形象的方法介绍、观察、评估 CCS 技术，解答围绕 CCS 技术的一系列疑问，使大家更科学、更客观地了解 CCS 的方方面面，从而推动 CCS 技术在中国的健康有序发展。

国家发展与改革委员会
应对气候变化司副司长

李 高

2015 年 6 月 5 日

第 3 章 CO ₂ 捕集	32
引言：CO ₂ 捕集的核心问题是什么？	32
CO ₂ 捕集是什么？	32
33. 为什么碳捕集环节的能耗最高？	32
34. CO ₂ 分离技术在化工中都已成熟，为什么在 CCS 中还需要大力研究这些技术？	33
35. 捕集对象有哪些？何谓高浓度排放源？高浓度排放源有什么优势？	33
36. 电力行业应该承担捕集的主要责任吗？	33
37. 在中国，除了电力行业还有哪些行业适合应用碳捕集技术？	34
38. 何谓捕集预留？如何实现捕集预留？	34
39. 捕集工艺对捕集对象会产生哪些影响？燃料 / 捕集对象的工艺过程对捕集会 产生什么影响？	34
捕集技术的发展现状	35
40. 现有的捕集技术有哪几个方向？研发前沿与热点有哪些？	35
41. 燃烧后捕集的优势和不足是什么？	35
42. 燃烧前捕集的优势和不足是什么？	35
43. 富氧燃烧的优势和不足是什么？	35
44. 燃烧前捕集、燃烧后捕集以及富氧燃烧技术分别可以通过哪些方式降低 能耗？	36
45. 研发中的新型捕集技术有哪些？	36
46. 化学链燃烧富集 CO ₂ 技术属于哪一类呢？它有哪些关键技术和优势？	36
47. 哪条捕集技术路线更有前景？	37
捕集能耗和成本	37
48. 如何降低捕集能耗？	37
49. 捕集成本占 CCS 全环节成本的 80%，为什么这么高？	38
50. 如何降低捕集成本？	38
51. 捕集成本的下降潜力如何？会像脱硫一样急剧下降吗？	38
52. 捕集是否会产生其他环境问题，比如多耗水和新增污染物排放？	38

第 4 章 CO ₂ 运输	40
引言：CO ₂ 运输的核心问题是什么？	40
CO ₂ 运输技术概述	40
53. 都有哪些 CO ₂ 运输方式？成本如何？	40
54. 如何选择 CO ₂ 的运输方式？如何确定 CO ₂ 输送相态？	40
55. CO ₂ 输送与油气输送有何异同？	41
CO ₂ 管道运输	41
56. CO ₂ 运输管道如何设计？关键技术参数如何选取？	41
57. CO ₂ 管道建设需要考虑哪些因素？	42
58. 捕集得到的 CO ₂ 不同程度地含有杂质，这些杂质对于运输有什么影响？	42
CO ₂ 运输安全、风险及监测	43
59. CO ₂ 管道运输安全吗？存在哪些风险？	43
60. 监测方法有哪些？运行时该如何监测？	43
61. 如何应对泄漏等紧急事故？有无成熟的应急处理措施？	43
第 5 章 地质封存	44
引言：地质封存的核心问题是什么？	44
CO ₂ 地质封存技术概述	44
62. CO ₂ 地质封存的原理是什么？如何实现 CO ₂ 的长期地质封存？	44
63. CO ₂ 在地下是什么状态？	44
64. CO ₂ 封存系统由哪些部分构成？	45
65. 都有哪些 CO ₂ 地质封存方式？	45
66. 如何选址？基本原则是什么？	45
封存潜力、源汇匹配和封存成本	45
67. 如何评估封存潜力？我国的封存潜力大吗？重点区域有哪些？	45
68. 我国源与汇的匹配情况如何？	47
69. CO ₂ 封存设备的国产化程度如何？	47
70. CO ₂ 封存的成本如何？	47
71. 如何降低封存成本？	47

安全、风险及监测问题	48
72. 地质封存存在哪些风险?	48
73. CO ₂ 地质封存的安全性如何?	49
74. 有哪些 CO ₂ 地下运移情况监测方法?	49
75. 如何监测和应对封存风险?	49
76. 何谓项目关闭? 关闭之后如何进行管理和监测?	50
77. 封存过程中是否产生二次污染?	50
第 6 章 CO ₂ 利用	51
CO ₂ 利用技术	51
78. 什么是 CO ₂ 利用技术?	51
79. 利用和封存的主要差别在哪里? 前者的优势和不足有哪些?	51
80. 我国 CO ₂ 利用的潜力和中长期发展前景如何? 对减排的贡献如何? ..	51
81. CO ₂ 利用技术在我国温室气体减排战略中扮演什么角色? CO ₂ 利用能替 代 CO ₂ 封存吗?	52
82. CO ₂ 利用的重点技术有哪几类?	52
以 CO ₂ -EOR 和 CO ₂ -ECBM 为代表的地质利用技术	52
83. 地质利用技术的原理有哪些? (CO ₂ -EOR、CO ₂ -ECBM 和 CO ₂ -EGR 等 技术原理).....	52
84. CO ₂ -EOR 和 CO ₂ -ECBM 与二氧化碳咸水层封存的区別是什么?	55
85. CO ₂ -EOR 和 CO ₂ -ECBM 的技术优势是什么?	55
86. 在 CO ₂ -EOR 和 CO ₂ -ECBM 的过程中主要能耗和成本构成如何? 主要的 监测指标和相关技术是什么? 涉及哪些技术装备?	55
CO ₂ 化工、生物利用和其他的处理技术	56
87. CO ₂ 化工和生物利用的代表性技术有哪些?	56
88. CO ₂ 矿化技术发展现状如何?	56
89. CO ₂ 利用技术目前还有哪些研究热点?	56
第 7 章 CO ₂ 工程实践	58
90. 全球 CCS 大型示范工程有几个? 主要集中在哪些国家和地区?	58
91. 这些示范项目都处于哪个阶段? 共有多少个运行中的大型示范工程? ...	58
92. 从全球范围看, 电力行业的 CCS 示范情况如何?	60
93. 全球 CCS 大型示范工程成功的案例有哪些? 具有哪些共性特征?	60

94. 全球 CCS 示范的发展态势如何？问题在哪里？ 61
95. 我国 CCS 示范的现状如何？存在哪些问题？ 62
96. 我国存在哪些 CCS 示范的早期机会？ 62
97. 我国实施 CCS 早期示范的重点地域有哪些？ 62
98. CO₂ 捕集的实施流程是什么？ 62
99. CO₂ 运输的实施流程是什么？ 63
100. 封存的实施流程是什么？ 63

第 1 章 综合认识 CCS

引言：起步中的 CCS 技术

1896 年，诺贝尔化学奖得主、瑞典化学家阿伦尼乌斯（S. Arrhenius）提出气候变化的科学假设，认为“化石燃料燃烧将会增加大气中的 CO_2 浓度，从而导致全球变暖”。20 世纪 70 年代，欧美学者就提出了 CO_2 深海封存的概念。1996 年，联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第二次评估报告正式提及碳捕集与封存（carbon capture and storage, CCS）技术，同年，在美国召开的第三届全球温室气体控制技术大会上，将 CO_2 捕集与封存技术作为保护气候的一种方案提出。2001 年，CCS 首次作为减少 CO_2 排放的主要手段而受到广泛的关注。《京都议定书》签订后，各发达国家意识到 CCS 技术对减排目标的重要性，开始将 CCS 技术纳入 CO_2 减排技术组合。2005 年，IPCC 发布的 CCS 特别报告中详细介绍了 CCS 技术，认为 CCS 技术是未来温室气体减排的重要手段之一。

从发展态势上来看，全球 CCS 技术发展可以概括为三个阶段：① 20 世纪 70 年代到 2005 年的蛰伏期，在这一阶段，所有商业运行 CCS 项目的 CO_2 气源均为天然气开采或化工生产，而 CO_2 埋存手段多为强化驱油（EOR）。可以说，这些项目的主要目的不是 CO_2 的捕集与埋存，而是天然气和石油开采，因此不能称为严格意义的 CCS 项目。② 2005—2010 年的高速启动期，由于 IPCC 特别报告的发布，CCS 技术广受关注，各方对 CCS 技术发展的期待稍显乐观。世界各国在这个阶段集中发布了各自的 CCS 技术发展规划或路线图。其中以欧盟为代表，2007 年启动的旗舰计划试图在 2015 年以前建设 12 座大规模示范工程。然而，自 2010 年起，由于受全球应对气候变化谈判进展缓慢以及全球经济危机暴发等因素的影响，每年都有示范项目计划被取消，仅有较少的项目得到落实。③ 2010 年以来的理性发展期，考虑到 CCS 技术 2020 年减排目标的预计完成度将低于 20%，国际能源署（IEA）于 2013 年发布修订版全

球 CCS 技术路线图，降低了 CCS 占总减排量的份额（由 19% 降低到 1/6），将 2020 年预计示范项目数由 100 个减少为 30 个。而全球计划、在建和运行的大规模 CCS 示范项目总数一直维持在 70~80 个并以每年近 10 个项目的速度稳步增长，其中进展较为顺利的代表性示范项目为加拿大萨斯喀彻温省的边界大坝 100 万 t 级全流程示范项目。与 2010 年前的高速启动期相比，可以说目前全球 CCS 技术的进展渐渐趋于理性，各方正在重新认知 CCS 发展的难题与挑战。

CCS 是什么？

1. 什么是 CCS 技术？有什么特点？

通俗地讲，CCS 是一种 CO₂ 回收技术，通过将原本要排放到大气中的 CO₂ 收集、运输和封存起来，以减少 CO₂ 向大气的排放。

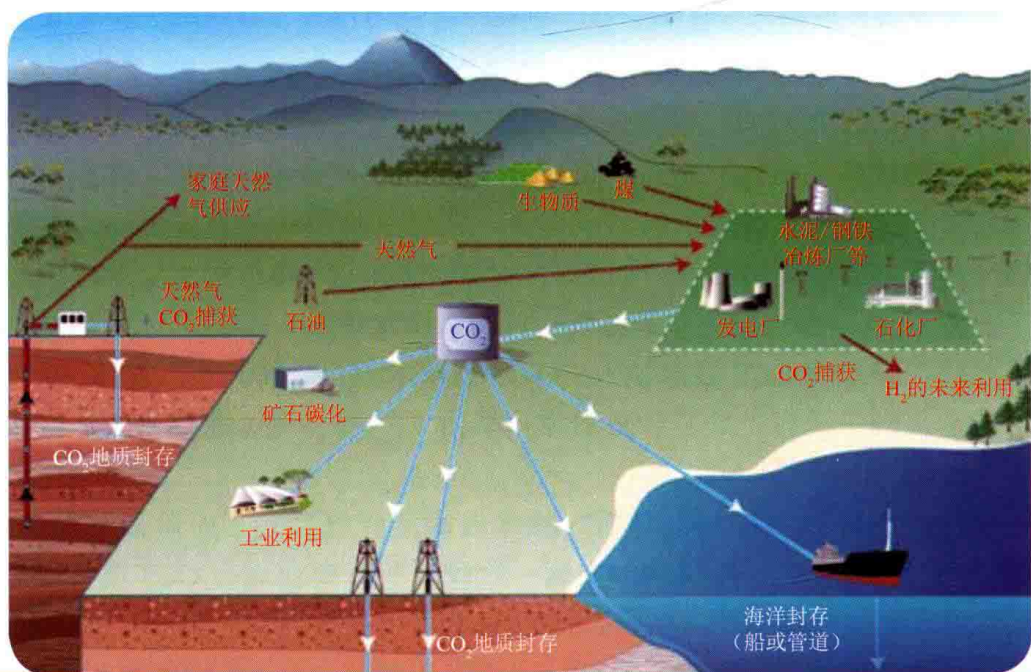


图 1-1 CCS 概念图 (IPCC 报告, 2005)

2005 年 IPCC 特别报告定义 CCS 为“从工业和能源相关的生产活动中分离 CO₂，运输到储存地封存，使 CO₂ 长期与大气隔绝的一个过程”（图 1-1），这一表述包含以下几方面内容：

1) CCS 的范畴：CCS 是由 CO₂ 捕集、运输和封存构成的系统，不是孤立的 CO₂ 捕集或封存环节，因此考虑 CCS 技术应该系统全面。

2) 捕集的对象（也称为“源”）：通常是大规模消耗化石能源的工业生产活动，如发电、冶金、水泥或化工等固定排放源；而人类其他活动排放的 CO₂

(如交通、农业甚至呼吸等) 则由于量小且相对分散而不适于作为捕集对象。

3) CCS 需要具有规模性和时效性: CCS 需要在相当大的规模尺度上(数百万吨到数亿吨)和相当长的时间尺度上(数十年到数百年)阻止所捕集的 CO_2 排放到大气中。

与节能和利用可再生能源相比, CCS 的特点可以概括为如下几点(表 1-1):

表 1-1 CCS 技术的特点

CCS 技术的特点	
实现直接减排 CO_2 的效果	节能与利用可再生能源通过减少化石燃料的使用来间接减排 CO_2 , 而 CCS 则直接回收化石燃料产生的 CO_2 , 效果直接
需要支付额外的能耗和成本	为了捕集、运输和封存埋藏 CO_2 , 不仅要在现有能源设施的基础上添加相应设备, 还将额外消耗能量, 为此, CCS 一般需要支付额外能耗和成本
兼容现有的化石能源利用技术	CCS 可以升级化石能源利用技术(如燃煤电厂), 使之实现零排放, 从而无须彻底放弃已有的技术和能源基础设施
受地质封存条件的客观限制	能够找到与捕集量相匹配的 CO_2 地质封存, 封存空间是大规模推广 CCS 技术的必要条件
与减缓气候变化的政治意愿有很大的关联	CCS 是减缓气候变化的专门技术, CO_2 是否大规模应用 CCS 技术很大程度上取决于各国政府的政治决心

2. 什么是 CCUS? 为什么要提出 CCUS 技术?

碳捕集、利用和封存简称为 CCUS。与 CCS 相比, CCUS 增加了利用 (utilization), 即 CO_2 利用, 二者既有区别又有联系。二氧化碳利用技术是指利用 CO_2 的物理、化学或生物等作用, 生产具有商业价值的产品, 且与其他生产相同产品或者具有相同功效的工艺相比, 可实现 CO_2 减排效果的工农业利用技术。该类技术强调将 CO_2 资源化应用于工农业的生产, 而不是纯粹的自然过程, 同时兼具 CO_2 直接参与、附带经济效益和净减排效果的特点。

提出 CCUS 的初衷在于通过 CO_2 利用降低 CCS 的整体应用成本。与 CCS 相比, CCUS 在减排 CO_2 的同时, 往往能够产生附带的经济效益, 从而补偿 CO_2 捕集环节的投入(图 1-2 和图 1-3)。

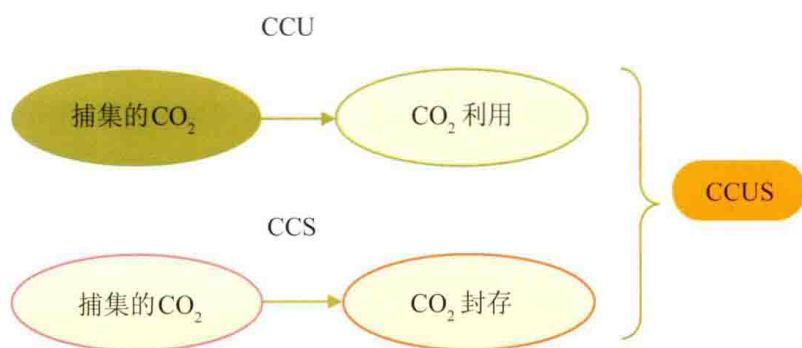
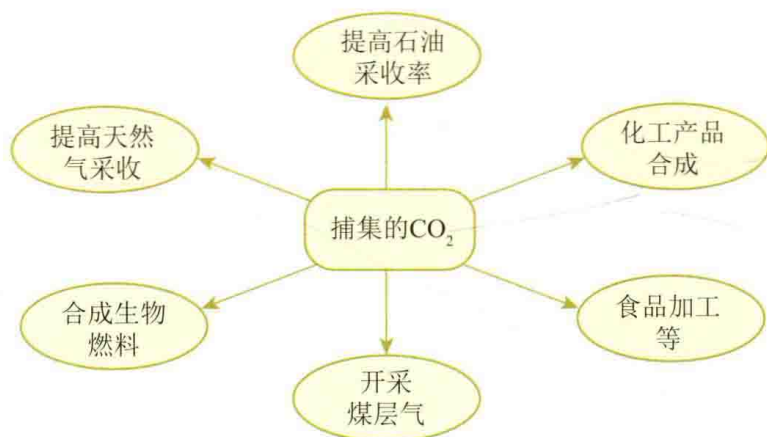


图 1-2 CCU、CCS 和 CCUS 的区别和联系



注：通过利用 CO₂ 带来收益，降低 CCUS 整体成本

图 1-3 CO₂ 利用技术 (CCUS)

3. CCS 是新技术吗?

从构成 CCS 技术全链的各个环节技术来看，无论是捕集、运输，还是封存，都已经有数十年的应用经验。比如捕集技术，其核心工艺就是化工工业常见的气体分离技术。而封存，早在 20 世纪 70 年代，欧美学者就提出了 CO₂ 深海封存的概念。1972 年，CO₂ 强化驱油 (CO₂ enhanced oil recovery, CO₂-EOR) 技术在美国得克萨斯州油田首次得到商业化应用。可以说，部分 CCS 技术是由现有技术构成的。

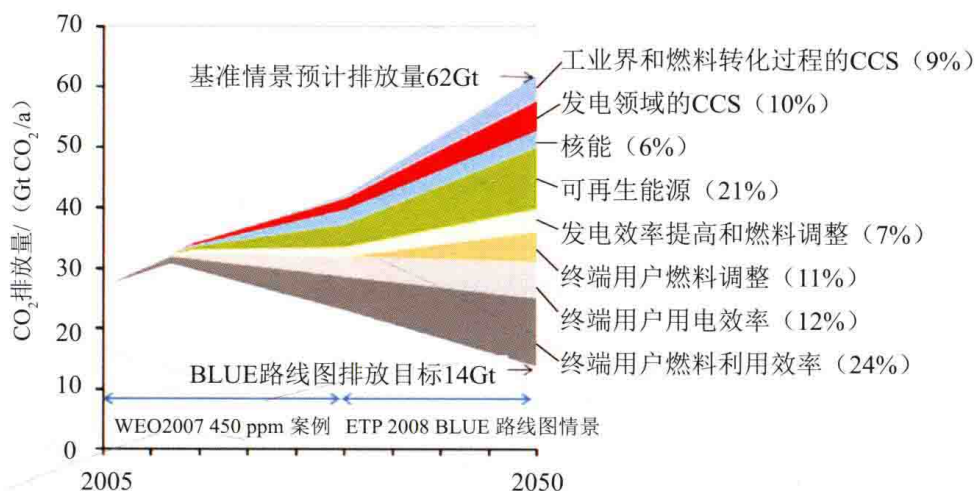
但是，从两方面来看，CCS 应该属于新技术：首先，将不同的环节技术组合而成一个整体技术链，其集成即属于新技术。而将 CO₂ 捕集技术应用于发电厂等能源利用系统，也是前所未有的。其次，CCS 技术还在不断创新，新技术方向和技术突破（如化学链、膜分离等）不断涌现，从这个角度来看，CCS 技术仍然是一项有生命力的新技术。

为什么需要 CCS ?

4. 节能和利用可再生能源能够减排 CO₂，为什么还需要 CCS ?

应对减排压力的客观需要：如果仅依靠节能和利用可再生能源，无法达到全球 CO₂ 减排目标，那么 CCS 就将成为实现减排目标的必要手段。

整体减排成本的权衡：IEA 在其 2008 年发布的《全球能源技术展望》(Energy Technology Perspectives) 中指出，在 2050 年全世界 CO₂ 排放减半（相对于 2005 年）的目标前提下，CCS 技术将贡献 19% 的减排量（图 1-4）。而如果不采用 CCS 技术，仅依靠提高能效与利用可再生能源等减排成本更高的减排方法，将导致全球整体减排成本上升 70%。另外，IEA 在 2013 年发布的 CCS 技术路线图中指出，在 2°C 情景下，CCS 将贡献总减排量的 1/6。



来源：IEA. 能源技术展望 (2008a)。

注：1ppm=10⁻⁶。

图 1-4 CCS 对减排的贡献 (IEA, 2008)

我国以煤为基础的能源结构特殊性的需求：CCS 的重要特征之一在于能够零排放地使用化石燃料，尤其是高碳的化石燃料。这一特点使得 CCS 对于高度依赖化石燃料的经济体具有重要意义。以中国为例，考虑到能源供应安全和能源供应成本，以煤为基础的能源结构短期内难以改变。要实现高碳燃料的低碳利用，可以说 CCS 技术是必不可少的。

5. 什么情况下, CCS 将是必需的? 什么情况下, CCS 将失去意义?

可以说，CCS 技术和化石燃料的使用是密切相关的。如果我们能够找到可

以替代化石燃料的能源供应技术（如核聚变技术），或低碳化石燃料开采和利用技术（如页岩气或可燃冰），从而使 CO₂ 排放大幅减少，那么可以说 CCS 技术无须大规模推广。但恰恰如前所述，时间、成本和技术能力这三方面因素必须综合考虑。时间，意味着在气候变化所允许的减排时限内；成本，意味着新技术或燃料的价格要可接受；而技术能力则意味着该新技术的规模、效率等能够和传统化石燃料相抗衡。

6. CCS 是发达国家为发展中国家设定的陷阱吗？

作为一种减排 CO₂ 的技术，CCS 是全人类应对气候变化挑战的重要手段，这是科学层面的论断。陷阱论的核心则在于发达国家和发展中国家在排放空间和减排责任问题上的博弈，是一种政治层面的论断。换言之，CCS 技术能否减缓气候变化是科学问题，但由谁来大规模推广 CCS 技术并承担相应的代价则是政治问题。因此，简单地认为 CCS 技术是发达国家为发展中国家设定的陷阱，是不客观也不全面的。

7. 国际应对气候变化谈判涉及 CCS 技术吗？

国际气候变化谈判在两方面涉及 CCS 技术。一是将 CCS 纳入清洁发展机制（CDM）项目的活动。清洁发展机制是《京都议定书》下的三个灵活机制之一。该机制允许发展中国家通过开发减排项目获得低成本减排量，并以“减排许可”的形式交易给发达国家，后者用于履行其在《京都议定书》下的减排义务。目前，CDM 项目类型涉及风力发电、小水电、工业节能、垃圾填埋气发电等，相比之下，CCS 技术具有更大规模减排的能力。在气候变化谈判中推动 CCS 成为 CDM 项目的最主要考虑是为尚未商业化的 CCS 项目创造更多样的融资渠道，促进 CCS 技术在发展中国家的发展，但从目前 CDM “减排许可”低迷的市场价格和不断萎缩的市场需求等方面看，CDM 对 CCS 发展的促进作用有限。

二是在各国提高 2020 年前减排力度中，加强 CCS 所发挥的作用。在《联合国气候变化框架公约》第 17 次缔约方会议上启动了一个新的谈判进程，进程的两个核心议题之一是如何提高 2020 年前各国减排力度。在全球范围内积极推动 CCS 发展被认为是提高减排力度的有效途径之一，受到各国的广泛关注。

8. 为什么可再生能源和节能技术获得了大量政策和资金支持，但 CCUS 尚没有相关政策？

可再生能源和节能技术的最大特点和优势在于其区别于传统化石能源的