

# CO<sub>2</sub> 收集封存战略及其对我国远期减缓 CO<sub>2</sub> 排放的潜在作用

陈文颖, 吴宗鑫, 王伟中

(清华大学能源环境经济研究院, 北京 100084)

**摘要:** 碳收集封存 (CCS) 已被广泛地认为是一种潜在的、可供选择的 CO<sub>2</sub> 减排方案, 以稳定大气中 CO<sub>2</sub> 浓度、减缓气候变化。本文介绍了 CCS 的 3 大环节: 碳的捕获、运输与储存, 对不同捕获技术及其技术经济参数进行分析评价, 介绍了不同碳地质储存的机理、潜力与成本, 以及 CCS 的应用对全球减缓碳排放的作用。更新中国 MARKAL 模型, 加入各种可能的 CCS 技术, 特别是考虑 CCS 的煤间接液化以及多联产技术, 以同时考虑石油安全与 CO<sub>2</sub> 减排。通过设置不同的情景, 应用中国 MARKAL 模型研究了 CCS 对我国远期 (到 2050 年) 减缓 CO<sub>2</sub> 排放的潜在作用, 结果表明, CCS 技术的应用不仅可能减少我国的碳排放, 降低边际减排成本 (碳减排率 50% 时, 下降率达 45%), 减轻高减排率时对核电的高度依赖, 还可能使我国更长时间地清洁利用煤炭资源 (在 C70 情景下, 2050 年煤在一次能源消费中的比例可从 10% 增到 30%)。我国应重视对 CCS 技术的研发以及示范项目的建设。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 减排; 碳收集封存; 中国 MARKAL 模型; 情景; 边际减排成本

**中图分类号:** X37; X38 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2007)06-1178-05

## Carbon Capture and Storage (CCS) and Its Potential Role to Mitigate Carbon Emission in China

CHEN Wen-ying, WU Zong-xin, WANG Wei-zhong

(Energy, Environment and Economy Research Institute, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Carbon capture and storage (CCS) has been widely recognized as one of the options to mitigate carbon emission to eventually stabilize carbon dioxide concentration in the atmosphere. Three parts of CCS, which are carbon capture, transport, and storage are assessed in this paper, covering comparisons of techno-economic parameters for different carbon capture technologies, comparisons of storage mechanism, capacity and cost for various storage formations, and etc. In addition, the role of CCS to mitigate global carbon emission is introduced. Finally, China MARKAL model is updated to include various CCS technologies, especially indirect coal liquefaction and polygeneration technologies with CCS, in order to consider carbon emission reduction as well as energy security issue. The model is used to generate different scenarios to study potential role of CCS to mitigate carbon emissions by 2050 in China. It is concluded that application of CCS can decrease marginal abatement cost and the decrease rate can reach 45% for the emission reduction rate of 50%, and it can lessen the dependence on nuclear power development for stringent carbon constrains. Moreover, coal resources can be cleanly used for longer time with CCS, e. g., for the scenario C70, coal share in the primary energy consumption by 2050 will increase from 10% when without CCS to 30% when with CCS. Therefore, China should pay attention to CCS R & D activities and to developing demonstration projects.

**Key words:** carbon emission reduction; carbon capture and storage; China MARKAL model; scenarios; marginal abatement cost

### 1 碳收集封存 (CCS) 的提出与进展

碳收集封存 (carbon capture and storage, CCS) 即把化石燃料燃烧产生的 CO<sub>2</sub> 进行收集并将其安全地存储于地质结构层中, 从而减少 CO<sub>2</sub> 排放。在工程上 CO<sub>2</sub> 被注入地下地质岩层, 首先于 70 年代初在美国 Texas 用于强化开采石油。CO<sub>2</sub> 的地质埋存, 在 70 年代被提出, 但直到 90 年代初, 这种概念才得到认可。目前 CO<sub>2</sub> 地质埋存已被广泛认为是一种潜在的、可供选择的减排方案。世界上已有 CO<sub>2</sub> 捕获示范项目 11 个、捕获研发项目 35 个、地质埋存示范项

目 26 个、地质埋存研发项目 74 个。其中挪威的 Sleipner 项目从 1996 年开始每年把 1 Mt 的 CO<sub>2</sub> 注入到 900 m 深处的盐水层中, 加拿大的 Weyburn 项目从 2000 年开始, 每天将 5 000 t 的火力发电厂排放的 CO<sub>2</sub> 灌注到油田中。据估计, 2015 年全球发电厂示范项目将会有 10 Mt 的 CO<sub>2</sub> 捕获能力, 每年至少有 10 个 100 万 t 规模的新封存项目<sup>[1,2]</sup>。

收稿日期: 2006-06-22; 修订日期: 2006-09-18

基金项目: 国家“十五”科技攻关计划项目 (2004-BA611B-03-03)

作者简介: 陈文颖 (1969~), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为能源环境模型、气候变化对策, E-mail: chenwy@tsinghua.edu.cn

### 2 CCS 的 3 大环节

CCS 主要有 3 个环节构成:碳的捕获、运输与储存.碳的捕获,指将 CO<sub>2</sub> 从化石燃料燃烧产生的烟气中分离出来,并将其压缩至一定压力,以超临界的状态有效地储存于地质结构层中.运输,指将分离并压缩后的 CO<sub>2</sub> 通过管道或运输工具运至存储地.输送大量 CO<sub>2</sub> 最经济的方法是通过管道运输.管道运输的成本主要有 3 部分组成:基建费用、运行维护成本以及其它的如设计、保险等费用.特殊的地理条件,如人口稠密区等对成本很有影响.陆上管道要比同样规模的海上管道成本高出 40% ~ 70%.对于 250 km 的运距,管道运输 CO<sub>2</sub> 的成本一般为 1 ~ 8

US \$/t<sup>[2]</sup>.当运输距离较长时,船运将具有竞争力,船运的成本与运距的关系极大.碳的地质储存,指将运抵储存地的 CO<sub>2</sub> 注入到诸如地下盐水层、废弃油气田、煤矿等地质结构层中.储存场址必须有合适的容量和可注入性、有满意的密封盖岩、有足够稳定的地质环境.

### 3 碳捕获的技术经济评价

碳捕获的主要目标是化石燃料电厂、钢铁厂、水泥厂、炼油厂、合成氨厂等 CO<sub>2</sub> 的集中排放源.针对电厂排放的 CO<sub>2</sub> 捕获分离系统主要有 3 类:燃烧后系统、富氧燃烧系统以及燃烧前系统,如图 1 所示<sup>[1,2]</sup>.

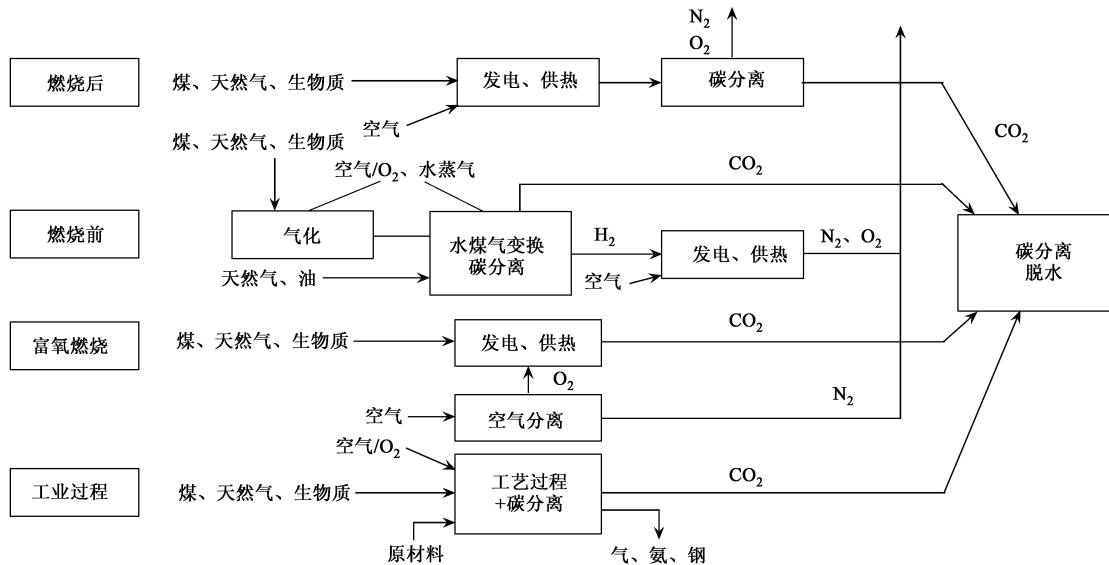


图 1 碳的捕获分离技术

Fig.1 Carbon capture processes and systems

燃烧后捕获与分离主要是烟道气中 CO<sub>2</sub> 与 N<sub>2</sub> 的分离,CO<sub>2</sub> 浓度较低(3% ~ 15%),一般采用化学溶剂吸收法.富氧燃烧系统是用纯氧或富氧代替空气作为化石燃料燃烧的介质,燃烧产物主要是 CO<sub>2</sub> 和水蒸气,CO<sub>2</sub> 浓度在 80% ~ 98% 之间.在富氧燃烧系统中,由于 CO<sub>2</sub> 浓度较高,因此捕获分离的成本较低,但是供给的富氧成本较高.目前 O<sub>2</sub> 的生产主要通过空气分离方法,包括使用聚合膜、变压吸附和低温蒸馏等.燃烧前捕获系统主要有 2 个阶段的反应:首先化石燃料先同 O<sub>2</sub> 或者蒸汽反应,产生以 CO 和 H<sub>2</sub> 为主的合成气;待合成气冷却后,再经过蒸汽转化反应,使合成气中的 CO 转化为 CO<sub>2</sub>,并产生更多的 H<sub>2</sub>,干燥的混合气中 CO<sub>2</sub> 的含量可达 15% ~

60%;最后将 CO<sub>2</sub> 与 H<sub>2</sub> 通过变压吸附、变温吸附或膜分离法等进行分离,CO<sub>2</sub> 被封存于地质结构层中,H<sub>2</sub> 被用作燃气联合循环的燃料送入燃气轮机,进行燃气轮机与蒸汽轮机联合循环发电.除了发电,还可考虑制氢或氢与电的多联产,以及将合成气用以生产甲醇、二甲乙醚等液体燃料,在这些过程中都可考虑 CO<sub>2</sub> 的收集封存.

图 2 对不同新建火电厂与制氢厂考虑碳捕获后技术经济参数变化幅度进行比较.可以看出,考虑捕获后,新建的 IGCC 电厂(燃烧前捕获)的能源损失率(单位产出能源投入增加率)、发电成本的增加率以及 CO<sub>2</sub> 减排成本都要低于新建的 PC 电厂(燃烧后捕获),前者的代表值分别为 19%、33%、23

US \$/t,后者分别为 31%、57%、41US \$/t. 考虑捕获的制氢厂(包括氢电多联产)可以进一步降低能源损失率、发电成本增加率与减排成本.

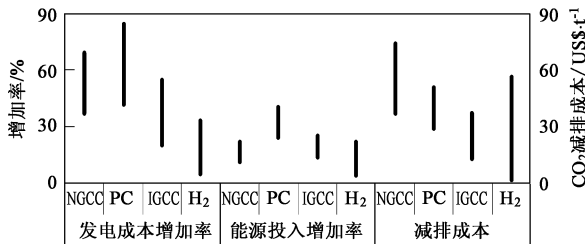


图 2 不同新建火电厂与制氢厂考虑碳捕获后技术经济参数变化幅度比较

Fig. 2 Carbon capture costs for thermal power plants and hydrogen making plants

旧电厂应用捕获技术,CO<sub>2</sub> 减排的成本大约比新电厂高 35%. 在建新电厂时,考虑 CO<sub>2</sub> 的回收预留将可能获得潜在的回报. 根据英国帝国理工学院的研究结果,对于 IGCC 与 PC 电厂,采取捕获措施后,考虑回收预留与不考虑回收预留可分别节约投资成本 15%、25%,发电成本的增幅分别降低约 20%、27%.

#### 4 碳封存的潜力与成本

碳地质储存的机理主要有:体积捕获,存储的容量等于可用体积(孔隙空间或洞穴)与该处压力和温度下 CO<sub>2</sub> 密度的乘积;溶解捕获,存储的容量由 CO<sub>2</sub> 在岩层流体(油贮藏库中的油、盐水层中的含盐水)中能够溶解的数量决定;吸附捕获,存储的容量由煤体积和 CO<sub>2</sub> 吸附能力的乘积决定;矿物捕获,存储的容量根据可形成碳酸盐沉淀的矿物量和在反应中使用的 CO<sub>2</sub> 量决定. 全球油/气田 CO<sub>2</sub> 储存潜力约 900~1 200 Gt(其中气田 800 Gt),煤层 15~200 Gt,盐水层 1 000~10 000 Gt,可见全球碳地质储存的潜力是巨大的<sup>[2]</sup>.

表 1 对 CCS 的 3 个环节的成本进行了比较<sup>[2]</sup>. 其中捕获分离的成本(包括压缩成本)最大,降低其成本是未来 CCS 技术研发的重点. CO<sub>2</sub> 强化开采油可使采收率提高 7%~23%、强化开采煤层气有可能使采收率由 50%提高到 90%,两者可能具有净效益,对于发展中国家应是碳储存的首选.

#### 5 CCS 对全球减缓碳排放的作用

IEA (international energy agency) 应用能源技术

表 1 CCS 的 3 个环节的成本比较

环节	项目	单位 CO <sub>2</sub> 成本/US\$ t <sup>-1</sup>
碳捕获	燃煤或燃气电厂	15~75
	合成氨	5~25
	其它工业过程	5~115
运输		1~8
地质储存	盐水层	0.5~8
	废弃的油气田	2~6
	强化开采油	-12~3
	强化开采煤层气	-5~10
地质储存的监测		0.1~0.3

展望模型分析了 CCS 技术对全球未来碳减排的潜在作用<sup>[3]</sup>. 在 50 US \$/t 的碳税(以 CO<sub>2</sub> 计)情景(GLO50)下,CCS 技术将于 2015 年开始得到应用,至 2020 年、2030 年、2050 年,约 2.3、8.5、18.1 Gt 的 CO<sub>2</sub> 将分别被捕获并且埋存. 到 2020 年、2030 年、2050 年,发电厂的捕获量将分别占有所有 CO<sub>2</sub> 捕获量的 53%、70%、80%,其余的捕获量来自燃料加工处理和制造业(比如合成氨、钢铁、水泥的生产). 而且使用 IGCC 或基于 IGCC 的多联产技术将在未来 CCS 技术的发展中发挥着举足轻重的作用,到 2030 年它们捕获 CO<sub>2</sub> 的量将占据所有捕获量的一半.

应用 CCS 的发电技术的发电量将从 2030 年的 27 EJ 增加到 2050 年的 60 EJ,见图 3<sup>[3]</sup>. 到 2030 年、2050 年,考虑 CCS 技术的燃煤发电厂的发电量将分别占到 60%、69%,而考虑碳收集与埋存的燃气发电厂的的比例分别为 28%、23%. 从 2025 年开始,基于 IGCC 的多联产技术将快速发展,其中 3/4 的合成燃料为氢. 到 2050 年,这些多联产技术的 CO<sub>2</sub> 捕获量将达到 10 Gt(其中 2/3 来自电、氢联产系统),占总捕获量的 54%.

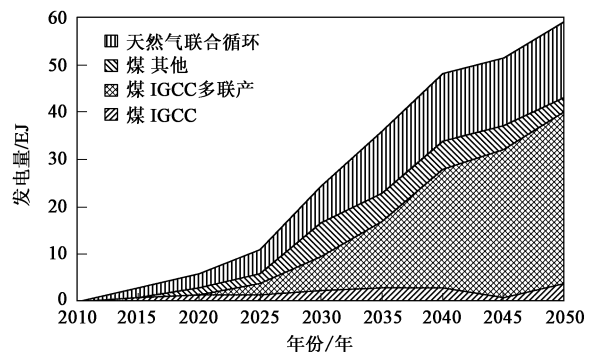


图 3 GLO50 情景下发电部门应用的碳收集与埋存技术

Fig. 3 Electricity production from power plants with CCS by technology in GLO50

### 6 CCS 对我国远期减缓碳排放的潜在作用

#### 6.1 模型工具与情景设置

更新已建立的中国 MARKAL 模型<sup>[4-6]</sup>,在模型中加入各种可能的 CCS 技术,并通过设计考虑 CCS 技术的碳减排情景来分析我国远期减缓碳排放的潜在作用.情景的设置主要分为 3 类:基准情景、不考虑与考虑 CCS 的减排情景.在所有的减排情景中,碳减排约束通过将规划期内总的碳排放量控制在 70~95 Gt (以碳计) 来设置,并分别标以 C70、C75、C80、C85、C90、C95.在考虑 CCS 的减排情景中,也同时考虑了油气进口依存度约束,油的供需缺口将通过进口与考虑 CCS 技术的煤间接液化以及多联产技术满足,这些情景以油气进口依存度的限制(30%、40%、50%、60%)与碳减排约束值共同标记,如 O30C70、O30C75、O30C80、O30C85、O40C90 等.

#### 6.2 模型模拟结果

在对未来人口、经济等社会发展进行合理的假设基础上,预测了未来各终端需求部门的有用能,输入到中国 MARKAL 模型中.具体的假设以及模型的技术经济参数见文献[1,4~6].

模型结果表明,未来一次能源消费量将持续增长,从 1995 年的 1 308 Mt (以标煤计,下同) 增长到 2020 年的 3 320 Mt、2050 年的 5 386 Mt,1995~2050 年间年均的增长速度为 2.6%,能源消费弹性系数 0.42.在一次能源消费构成中,煤仍将是未来我国主要的能源,但其构成将由 1995 年的 75% 下降到 2050 年的 45%,油气的消费比重将从 1995 年的 19% 上升到 2050 年的 31%,核电的消费比重将从 1995 年的 0.4% 增加到 2050 年的 10%,水电的比重将从 1995 年的 5.5% 增加到 2050 年的 7.5%,其它可再生能源的比重将增加到 2050 年的 5%.具体见图 4.

随着一次能源消费量的增长,CO<sub>2</sub> 排放量也将不

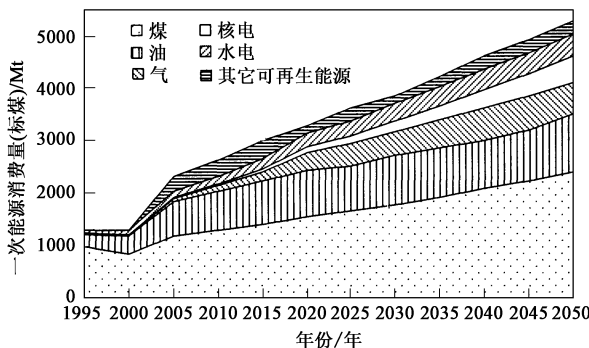


图 4 基准情景下一次能源消费与构成

Fig. 4 Primary energy consumption and its mix for the reference scenario

可避免地继续增长.到 2050 年,碳排放总量将由 1995 年的 835 Mt (以碳计,下同)、2000 年的 805 Mt 增加到 2050 年的 2 576 Mt,55 a 累积碳排放总量将达到 103 Gt.虽然未来产业结构、产品结构的调整;能源效率的提高以及新能源与可再生能源的发展,将对减缓碳排放量的增长起到重要的积极作用,但是未来 50 a 碳排放年均增长速度还将维持在 2% 左右.

图 5 对考虑 CCS 技术与否的减排情景的一次能源消费构成进行了比较.在无 CCS 技术的减排情景中,由于我国油气资源有限、可开发的水利资源仅 300 GW 左右,可再生能源技术大规模应用的前景还不够确定,大幅度地碳减排将大力依靠核电的发展,在 C70 情景下,2050 年核电在一次能源消费中的比例将超过 50%.但是这么大规模利用核电将受到核电站选址、公众可接受性、投资、减排成本、安全、核废料处理等方面的制约.CCS 技术的应用将大大降低核电的比例,可以缓解未来较大幅度的碳减排对核电发展的高度依赖,而且可以使在较高减排率下煤在一次能源消费中的比例仍占到 30% 左右.

图 6、7 分别给出了考虑 CCS 技术与否的边际减

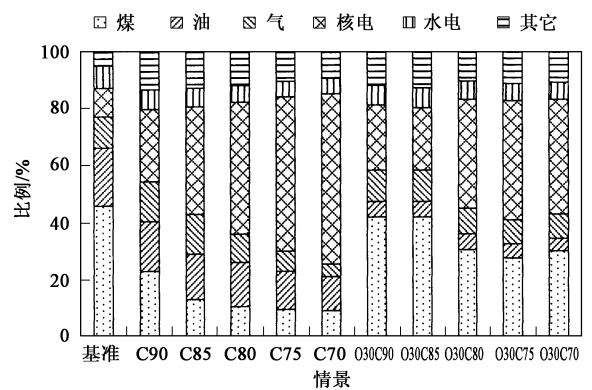


图 5 不同减排约束下考虑 CCS 技术与否对一次能源消费构成的影响

Fig. 5 Impact of CCS on primary energy mix under different carbon mitigation scenarios

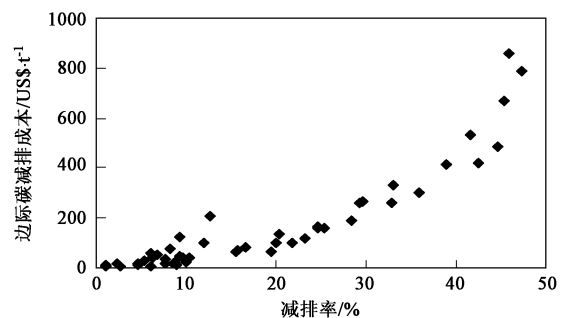


图 6 无 CCS 技术时的边际碳减排成本

Fig. 6 Marginal carbon abatement cost when without CCS

排成本. 在低减排率下, 考虑 CCS 技术应用与否对边际碳减排成本影响不大. 但随着减排率的升高, CCS 技术的应用对降低边际碳减排成本的作用将越来越显著, 当减排率高达 40%、50% 时, CCS 技术的应用将可能使边际碳减排成本分别下降 25%、45%.

图 8 给出了在不同的油气进口依存度以及碳减排约束情景下规划周期内总碳封存量. 可以看出,

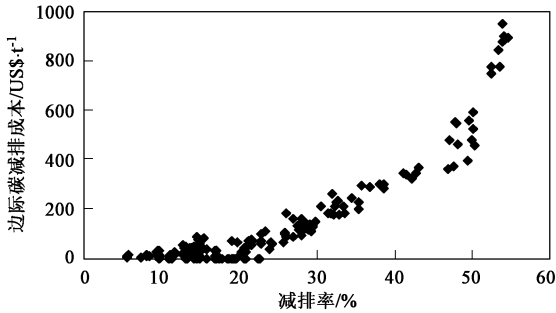


图 7 考虑 CCS 技术时的边际碳减排成本

Fig. 7 Marginal carbon abatement cost when with CCS

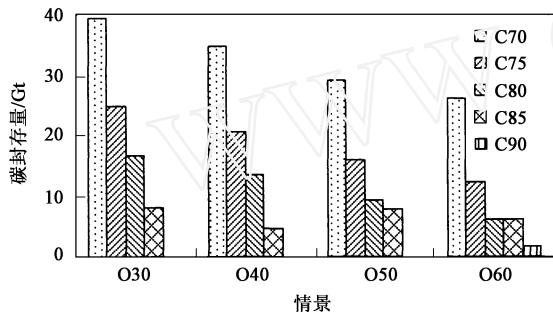


图 8 在不同石油进口约束与碳封存减排情景下规划周期内总碳封存量

Fig. 8 Total sequestered carbon amount in the planning period under different oil import constraint and carbon mitigation scenarios

在同样的减排力度下, 对油气进口依存度的约束越大, 碳封存的量也越多, 在 O30C70 情景下, 规划期内的碳总封存量将接近 40 Gt.

## 7 结论

我国是世界上 CO<sub>2</sub> 的第 2 大排放国, 随着经济的发展、人民生活水平的提高, 我国未来的能源消费以及 CO<sub>2</sub> 排放还将持续增长. 在能源资源方面, 我国又是 1 个富煤贫油气的国家. 因此, CCS 技术的应用不仅可能减少我国的碳排放, 降低边际碳减排成本, 减轻高减排率时对核电的高度依赖, 还可能使我国更长时间地清洁地利用煤炭资源. 我国应尽快和重点开展以下几方面的研究: 地质埋存潜力与地理分布以及源与汇的匹配、CCS 技术发展的路线图、关键技术的研发、相关的政策机制、通过国际合作开展示范项目等.

## 参考文献:

- [ 1 ] 陈文颖, 吴宗鑫, 王伟中, 等. 减缓气候变化技术创新的作用与影响评价[R]. 北京: 清华大学核能与新能源技术研究院, 2005. 96 ~ 132.
- [ 2 ] IPCC. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage [M]. Geneva: WMO/UNDP, 2006. 3-1 ~ 3-112; 5-1 ~ 5-133.
- [ 3 ] International Energy Agency (IEA). Prospects for CO<sub>2</sub> capture and storage [M]. Paris: IEA, 2004. 101 ~ 141.
- [ 4 ] DeLaquil P, Chen W Y, Larson E. Modeling China's Energy Future [J]. Energy for Sustainable Development, 2003, 7(4): 40 ~ 56.
- [ 5 ] Chen W Y, Wu Z X. Current status, challenges, and future sustainable development strategies for China energy [J]. Tsinghua Science & Technology, 2004, 9(4): 460 ~ 467.
- [ 6 ] Chen W Y. The costs of mitigating carbon emissions in China: findings from China MARKAL-MACRO modeling [J]. Energy Policy, 2005, 33(33): 885 ~ 896.