

# 我国燃煤发电 CCS/CCUS 技术发展方向及 发展路线图研究

叶云云<sup>1</sup>, 廖海燕<sup>2</sup>, 王鹏<sup>2</sup>, 王军伟<sup>3</sup>, 李全生<sup>4</sup>

(1. 神华浙江国华浙能发电有限公司, 浙江宁波 315612; 2. 神华国华(北京)电力研究院有限公司, 北京 100025;  
3. 广东国华粤电台山发电有限公司, 广东台山 529228; 4. 国家能源投资集团有限责任公司, 北京 100011)

**摘要:** 我国目前是世界第一大碳排放国, 煤炭占我国能源消费碳排放的 75% 以上, 面临较大的减排压力。本文提出了碳捕获和埋存 / 碳捕获、利用和埋存 (CCS/CCUS) 技术发展方向, 按时间节点制定了我国 CO<sub>2</sub> 捕集技术和输送技术发展路线图、CO<sub>2</sub> 化工、微藻生物制油和矿化等利用技术发展路线图; 对 2020、2030、2050 年可能达到的全国碳排放量进行测算, 对节能降耗、调整能源结构、CCS/CCUS 技术对 CO<sub>2</sub> 减排的贡献度进行了评估, 并提出了推广应用建议。

**关键词:** 燃煤发电; 碳捕获、利用和埋存; 技术路线图; 排放量预测; 政策建议

**中图分类号:** T-0 **文献标识码:** A

## Research on Technology Directions and Roadmap of CCS/CCUS for Coal-Fired Power Generation in China

Ye Yunyun<sup>1</sup>, Liao Haiyan<sup>2</sup>, Wang Peng<sup>2</sup>, Wang Junwei<sup>3</sup>, Li Quansheng<sup>4</sup>

(1. Shenhua Zhejiang Guohua Zheneng Group Power Generation Co., Ltd., Ningbo 315612, Zhejiang, China; 2. Shenhua Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100025, China; 3. Guangdong Guohua Yuedian Taishan Power Generation Co., Ltd., Taishan 529228, Guangdong, China; 4. National Energy Investment Group Co., Ltd., Beijing 100011, China)

**Abstract:** China is currently the world's largest carbon emitter, and faces great pressure in emission reduction, with coal accounting for more than 75% of China's carbon emissions in energy consumption. In this paper, development directions of a carbon capture and storage (CCS) / carbon capture, utilization and storage (CCUS) technology in China are researched and proposed, roadmaps for CO<sub>2</sub> capture technologies and transportation technologies, CO<sub>2</sub> chemical industry, and micro-algae bio-oil production and mineralization technology are developed by time nodes, national carbon emissions that may be achieved by 2020, 2030, and 2050 are calculated, contributions of energy saving and consumption reduction, energy structure adjustment, the CCS/CCUS technology to CO<sub>2</sub> emission reduction are evaluated, and recommendations for popularization and application of the CCS/CCUS technology are proposed.

**Keywords:** coal-fired generation; carbon capture, utilization and storage; technology roadmap; emission forecast; policy proposal

收稿日期: 2018-05-09; 修回日期: 2018-05-16

通讯作者: 叶云云, 神华浙江国华浙能发电有限公司, 高级工程师, 主要从事燃煤清洁高效发电及能源发展战略研究等;

E-mail: 16124001@shenhua.cc

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国能源技术革命的技术方向和体系战略研究”(2015-ZD-09)

本刊网址: www.enginsci.cn

## 一、前言

《巴黎协定》为 2020 年后全球应对气候变化行动作出安排,它是世界各国向低碳经济转型的承诺。 $\text{CO}_2$  引起的气候变化问题已成为国际社会普遍关心的重大全球性问题,正在对人类的生存与发展产生深刻影响。大气中  $\text{CO}_2$  浓度的大幅增加,主要源自于人类生产和生活过程中燃烧大量化石燃料,引起全球气候变暖,导致一些动植物灭绝和极端恶劣天气增多。我国  $\text{CO}_2$  排放量世界第一,并将继续增加,正面临日益强烈的减排要求。因此,我国迫切需要采取有效措施,减少  $\text{CO}_2$  排放量,减缓  $\text{CO}_2$  排放强度。

$\text{CO}_2$  捕集、封存与利用技术,是一项新兴的、具有较大潜力减排  $\text{CO}_2$  的技术,有望实现化石能源的低碳利用,被认为是应对全球气候变化、控制温室气体排放的重要技术之一 [1]。但是,由于存在安全隐患、成本较高、能耗较大、 $\text{CO}_2$  利用市场容量未知等多方面的挑战,发展碳捕获和埋存/碳捕获、利用和埋存 (CCS/CCUS) 技术还广受争议。

本文通过调研 CCS/CCUS 技术的现状与发展前景,提出我国 CCS/CCUS 技术的发展思路、发展目标,预测我国  $\text{CO}_2$  排放量及使用 CCS/CCUS 技术的减排量,提出我国 CCS/CCUS 技术发展的保障措施及政策建议,以期为推动我国能源生产和消费革命提供参考依据。

## 二、发展现状和国内外对比

CCS/CCUS 技术涉及整个技术链条,包括二氧化碳捕集技术、二氧化碳运输技术和二氧化碳埋存/利用技术。

### (一) 二氧化碳捕集技术

当前常用的二氧化碳捕集技术可分成三大类:燃烧后捕集技术、富氧燃烧技术和燃烧前捕集技术。

#### 1. 燃烧后捕集技术

燃烧后捕集技术就是从燃烧生成的烟气中分离二氧化碳,主要包括化学吸收法、物理吸附法、膜分离以及低温分馏等技术。燃烧后捕集是一种很好的方式,因为它不影响上游燃烧工艺过程,并且不受烟气中  $\text{CO}_2$  浓度影响,适合所有的燃烧过程 [2]。

2014 年,加拿大边界大坝电厂 3 号机组燃烧后碳捕集全流程示范项目建成并投入运营,是目前世界上最大规模的燃烧后碳捕集项目 [3]。自 2007 年 12 月,华能北京热电厂建成我国第一个燃煤电厂燃后捕集示范项目以来,我国已经建成多个示范工程项目。2017 年我国神华国华锦界电厂  $1.5 \times 10^5 \text{ t/a}$  CCS 全流程项目完成设计工作,开始建设。

#### 2. 富氧燃烧技术

富氧燃烧技术是用高纯度的氧代替空气作为主要的氧化剂燃烧化石燃料的技术 [4]。它在保留原来的发电站结构的基础上,把深冷空气分离过程与传统燃烧过程结合起来,使烟气中的  $\text{CO}_2$  浓度可达到 80% 或更高,再经过提纯过程可以达到 95% 以上,从而满足大规模管道输送以及封存的需要。

富氧燃烧技术已在世界范围内成为研究和发展的主题,国内外已建成多套试验装置和系统,中国、美国和英国等国家均在积极开展示范工程,但到目前为止,还没有一家大规模全流程的富氧燃烧 CCS 示范电站建成 [3]。

目前,制约富氧燃烧技术发展最大的瓶颈在于制氧设备投资和成本太高 [5],而近期出现的一些新的制氧技术,如变压吸附、膜分离等技术,可望大幅度地降低制氧成本,但这些新技术尚未成熟,没有大规模的商业应用。

#### 3. 燃烧前捕集技术

燃烧前捕集技术主要是指燃料燃烧前,将碳从燃料中分离出去,参与燃烧的燃料主要是  $\text{H}_2$ ,从而使燃料在燃烧过程中不产生  $\text{CO}_2$ 。该技术的主要优点是  $\text{CO}_2$  浓度较高,捕集系统小、能耗低,主要缺点是系统较为复杂,其应用的典型案例是整体煤气化联合循环系统 (IGCC)。

自 20 世纪 80 年代中期开始运行第一台 IGCC 电站以来,现在全世界已建、在建和拟建的 IGCC 电站近 30 座。我国现已具有多套 300 MW 级容量 IGCC 机组的气化炉设计及建设经验,以及 200 MW 级及以下容量 IGCC 机组气化炉设计、建设、运行等业绩。

### (二) 二氧化碳运输技术

#### 1. 罐车运输技术

用罐车运输  $\text{CO}_2$  的技术目前已经成熟,而且我国也具备了制造该类罐车和相关设备的能力。

罐车分为公路罐车和铁路罐车两种。公路罐车具有灵活、适应性强和方便可靠的优点，但是运量小、运费高且连续性差。铁路罐车可以长距离运输大量 CO<sub>2</sub>，但是除考虑到当前铁路的现实条件，还需考虑在铁路沿线配备 CO<sub>2</sub> 装载、卸载以及临时储存等相关设施，势必大大提高运输成本，因此目前国际上还没有用铁路运输的先例。

## 2. 船舶运输技术

从世界范围看，船舶运输还处于起步阶段，目前只有几艘小型的轮船投入运行，还没有大型的用于运输 CO<sub>2</sub> 的船舶。但是必须注意到，当海上运输距离超过 1 000 km 时，船舶运输被认为是最经济有效的 CO<sub>2</sub> 运输方式，运输成本将会下降到 0.1 元 / (t·km) 以下。

## 3. 管道运输技术

由于管道运输具有连续、稳定、经济、环保等多方面优点，而且技术成熟，对于 CCS 这样需要长距离运输大量 CO<sub>2</sub> 的系统来说，管道运输被认为是最经济的陆地运输方式。但是，由于海上管道建设难度较大，建设成本较高，因此目前还没有用于 CO<sub>2</sub> 运输的海上管道。

从 CO<sub>2</sub> 运输技术的整体发展来看，国外已有 40 多年用管道输送 CO<sub>2</sub> 的实践，积累了丰富的输送经验。国外管道输送的主要做法是将捕集到的气态 CO<sub>2</sub> 加压至 8 MPa 以上，提升 CO<sub>2</sub> 密度，使其成为超临界状态，避免二相流，便于运输和降低成本。目前，全球约有 6 000 km 的 CO<sub>2</sub> 运输管线，每年运输大约  $5 \times 10^7$  t CO<sub>2</sub>，其中美国有超过 5 000 km 的 CO<sub>2</sub> 运输管线。

在利用管道输送 CO<sub>2</sub> 时，最重要的问题是控制上游气源的含水量符合管道输送要求，同时要做好 CO<sub>2</sub> 泄漏检测的报警工作，有条件时可采用音波泄漏检测系统，实时检测管道的泄漏点。在高压泄放时，要防止人员冻伤。考虑 CO<sub>2</sub> 对橡胶的溶解性，清管器密封圈以及阀门和泵类密封材料都要选择强度高的橡胶材料。

对于 CO<sub>2</sub> 输送成本，点对点式 CO<sub>2</sub> 输送管道在初始阶段建设成本较低，经济性高于管网式，但随着运营时间延长和规模增加，管网式 CO<sub>2</sub> 输送管道的成本会大幅下降，更适于大规模 CCS/CCUS 技术应用。

我国 CO<sub>2</sub> 输送以陆路低温储罐运输为主，尚无

商业运营的 CO<sub>2</sub> 输送管道，只有几条短距离试验用管道。如大庆油田在萨南东部过渡带进行的 CO<sub>2</sub>-EOR 先导性试验中所建的 6.5 km 的 CO<sub>2</sub> 输送管道，用于将大庆炼油厂加氢车间的副产品 CO<sub>2</sub> 低压输送至试验场地。目前，我国有关 CO<sub>2</sub> 运输技术的研究刚刚起步。与国外相比，主要技术差距在 CO<sub>2</sub> 源汇匹配的管网规划与优化设计技术、大排量压缩机等管道输送关键设备、安全控制与监测技术等方面。

## (三) 二氧化碳利用技术

二氧化碳利用技术主要包括 CO<sub>2</sub> 地质利用技术、CO<sub>2</sub> 化工利用技术以及 CO<sub>2</sub> 生物利用技术。

### 1. 二氧化碳地质利用技术

CO<sub>2</sub> 地质利用是指将 CO<sub>2</sub> 注入地下，利用地下矿物或地质条件生产或强化有利用价值的产品，且相对于传统工艺可减少 CO<sub>2</sub> 排放的过程 [6,7]。目前，CO<sub>2</sub> 地质利用技术主要包括以下几种。

(1) CO<sub>2</sub> 强化石油开采技术：将 CO<sub>2</sub> 注入油藏，利用其与石油的物理化学作用，以实现增产石油并封存 CO<sub>2</sub> 的工业过程。

(2) CO<sub>2</sub> 驱替煤层气技术：将 CO<sub>2</sub> 或者含 CO<sub>2</sub> 的混合气体注入深部不可开采的煤层中，以实现 CO<sub>2</sub> 长期封存，同时强化煤层气开采的过程。

(3) CO<sub>2</sub> 强化天然气开采技术：注入 CO<sub>2</sub> 到即将枯竭的天然气气藏底部，将因自然枯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 CO<sub>2</sub> 封存于气藏地质结构中。

(4) CO<sub>2</sub> 增强页岩气开采技术：利用 CO<sub>2</sub> 代替水来压裂页岩，并利用 CO<sub>2</sub> 吸附页岩能力比 CH<sub>4</sub> 强的特点，置换 CH<sub>4</sub>，从而提高页岩气开采率，并实现 CO<sub>2</sub> 封存的过程。

### 2. 二氧化碳化工利用技术

CO<sub>2</sub> 化工利用是指以化学转化为主要特征，将 CO<sub>2</sub> 和共反应物转化成为目标产物，从而实现 CO<sub>2</sub> 的资源化利用 [8]。目前，已经实现了 CO<sub>2</sub> 较大规模化学利用的商业化技术主要包括以下技术。

(1) CO<sub>2</sub> 与甲烷重整制备合成气技术：在催化剂作用下，CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 反应生成合成气 (CO 和 H<sub>2</sub> 的混合物) 的过程。

(2) CO<sub>2</sub> 经 CO 制备液体燃料技术：将 CO<sub>2</sub> 裂解成为 CO 和 O<sub>2</sub>，并与后续成熟技术衔接合成各类液体燃料或化学品的过程。

(3) CO<sub>2</sub>加氢合成甲醇技术：在一定温度、压力下，利用H<sub>2</sub>与CO<sub>2</sub>作为原料气，通过在催化剂(铜基或其他金属氧化物催化剂)上加氢反应催化转化生产甲醇。

(4) CO<sub>2</sub>合成碳酸二甲酯技术：以CO<sub>2</sub>为原料，在催化剂的作用下，直接或间接合成碳酸二甲酯的系列技术。

### 3. 二氧化碳生物利用技术

CO<sub>2</sub>生物利用技术是指以生物转化为主要特征，通过植物光合作用等，将CO<sub>2</sub>用于生物质的合成，从而实现CO<sub>2</sub>资源化利用。当前，CO<sub>2</sub>生物利用技术还处于初期发展阶段，其研究主要集中在以下几个方面。

(1) 微藻固定CO<sub>2</sub>转化为生物燃料和化学品技术：利用微藻的光合作用，将CO<sub>2</sub>和水在叶绿体内转化为单糖和氧气，单糖可在细胞内继续转化为中性甘油三酯(TAG)，甘油三酯酯化后形成生物柴油。

(2) 微藻固定CO<sub>2</sub>转化为生物肥料技术：利用微藻的光合作用，将CO<sub>2</sub>和水在叶绿体内转化为单糖和氧气；同时丝状蓝藻能将空气中的无机氮转化为可被植物利用的有机氮。

(3) 微藻固定CO<sub>2</sub>转化为食品和饲料添加剂技术：利用部分微藻的光合作用，将CO<sub>2</sub>和水在叶绿体内转化为单糖，接着将单糖在细胞内转化为不饱和脂肪酸和虾青素等高附加值次生代谢物。

(4) CO<sub>2</sub>气肥利用技术：将来自能源和工业生产过程中捕集、提纯的CO<sub>2</sub>注入温室，增加温室中CO<sub>2</sub>的浓度来提升作物光合作用速率，以提高作物产量的CO<sub>2</sub>利用技术。

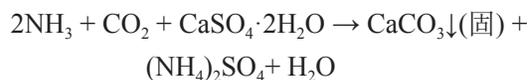
### 4. 二氧化碳矿化利用技术现状

CO<sub>2</sub>矿化是近年来提出的一种CO<sub>2</sub>利用方法，主要利用地球上广泛存在的橄榄石、蛇纹石等碱土金属氧化物与CO<sub>2</sub>反应，将其转化为稳定的碳酸盐类化合物，从而实现CO<sub>2</sub>减排。该技术的优点为：可规避CO<sub>2</sub>地质封存的各种风险和不确定性，从而保证了CO<sub>2</sub>末端减排技术的经济性、安全性、稳定性和持续性；CO<sub>2</sub>矿化量大，若将地壳中1%的钙、镁离子进行CO<sub>2</sub>矿化利用，按50%转化率计，可矿化约2.56×10<sup>15</sup>t CO<sub>2</sub>，可满足人类约8.5万年的CO<sub>2</sub>减排需求；若再利用钾长石(总量约为9.56×10<sup>13</sup>t)，理论上可再处理超过3.82×10<sup>12</sup>t CO<sub>2</sub>。因此，CO<sub>2</sub>矿化是实际可行的大规模减排并

开发利用CO<sub>2</sub>的有效办法。该技术的缺点是在常温常压下，矿物与CO<sub>2</sub>反应速率相当缓慢。因此，提高碳酸化反应速率成为矿物储存技术的关键。

国外一些研究人员开发了基于氯化物的CO<sub>2</sub>矿物碳酸化反应技术、湿法矿物碳酸法技术、干法碳酸法技术以及生物碳酸法技术等，实验结果均不是很理想。中国石油化工集团公司与四川大学合作开发了CO<sub>2</sub>矿化磷石膏(CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O)技术，采用石膏氨水悬浮液直接吸收CO<sub>2</sub>尾气制硫铵，已建成100 Nm<sup>3</sup>/h的尾气CO<sub>2</sub>直接矿化磷石膏联产硫基复合肥中试装置，尾气CO<sub>2</sub>直接矿化为碳酸钙使磷石膏固相CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O转化率超过92%，72 h连续试验中尾气CO<sub>2</sub>捕获率为70%。

其反应式如下：



该技术在国内外率先提出低浓度尾气CO<sub>2</sub>直接矿化磷石膏联产硫基复合肥与碳酸钙的一步法新工艺，以氨为耦合媒介，将含CO<sub>2</sub>的烟气与磷石膏转化耦合，把烟气中的CO<sub>2</sub>转移到磷石膏悬浮液中，并通入氨气使之形成气-液-固三相循环流化转化过程，半成品料浆经后续加工可得到硫基复合肥——硫酸铵((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)和沉淀碳酸钙(CaCO<sub>3</sub>)两种产品。

磷石膏是生产湿法磷酸过程中形成的废渣，每生产1 t湿法磷酸约产生5~6 t磷石膏废渣，我国每年产生磷石膏废渣5×10<sup>7</sup> t左右，每年需新增堆放场地2 800 km<sup>2</sup>。由于磷石膏中含有少量磷、氟等杂质，这些杂质会通过雨水流到地下水或附近流域，因此磷石膏长期堆放，不仅占用大量土地，而且会因堆放场地处理不规范对周边环境产生污染，更严重的会产生溃坝事件；另一方面，我国缺乏硫资源，每年需要进口大量硫磺维持磷复肥生产。开发利用磷石膏制取硫酸铵和碳酸钙技术，不仅可以解决磷石膏废渣综合利用问题，制取的硫酸铵作为肥料，副产的碳酸钙可以作为生产水泥的原料。

CO<sub>2</sub>矿化磷石膏制硫铵技术的创新点为：以废治废、提高CO<sub>2</sub>和磷石膏资源化利用的经济性，从而实现工业固体废物矿化CO<sub>2</sub>联产化工产品。此技术改变了传统“捕集+封存”的低碳路径，通过对含CO<sub>2</sub>气体的直接化学利用，消除了CO<sub>2</sub>捕集和封存的耗费和风险，将低碳的经济性和可靠性得以

最大化。同时，此技术通过将废弃的磷石膏转化为有用的硫胺和碳酸钙，有助于消除磷石膏对土地的占用和环境的污染。

#### （四）国内外对比

CCS/CCUS 技术尽管在国外已有十几年的研究历史，但大部分主要技术不同程度地处于理论研究、实验室研究、工业示范和小范围商业性运作阶段，尚处于“特定条件下经济可行”阶段。在 CO<sub>2</sub> 捕集分离方面，目前虽然燃烧后捕集和燃烧前捕集技术已经成熟，可以大规模实践，但其能耗和成本还较高；而富氧燃烧捕集技术尚不成熟。在 CO<sub>2</sub> 驱油、驱气和封存方面，驱油技术虽较为成熟，但多数国家缺乏低成本的 CO<sub>2</sub> 气源；驱煤层气受到的影响因素较多；封存地点尚未进行全面地质勘查，缺乏安全监测技术。在 CO<sub>2</sub> 化工利用方面，多数技术刚开始工业化、成熟度不高、产品成本较高，能吸纳的 CO<sub>2</sub> 有限。在 CO<sub>2</sub> 微藻制油方面，技术尚不成熟，还处于中试阶段，占地大、投资多、能耗高、成本高。在 CO<sub>2</sub> 矿化方面，技术还处于实验室阶段。总体上，国际上尚缺乏该技术全链条（捕集—运输—埋存/利用）的大规模工程示范。

CCS/CCUS 的技术研发起源于欧美等发达国家，但通过国际合作和交流，近年来我国 CCS/CCUS 技术的发展速度较快。目前，我国在燃煤电厂烟气的 CO<sub>2</sub> 后捕集、煤制油和 IGCC 的 CO<sub>2</sub> 前捕集，均有工业规模的示范工程在运行。因此，我国在捕集技术研发和应用上落后并不多，甚至有些方面在工程应用上还处于领先地位。但在 CO<sub>2</sub> 的运输管道建设、化学链燃烧等前沿技术、CO<sub>2</sub> 利用等方面，与美国等发达国家相比还比较落后。

### 三、CCS/CCUS 技术的发展方向

#### （一）二氧化碳捕集技术路线

##### 1. 燃烧后捕集技术

该技术国内外应用比较成熟，但主要应用于水泥窑炉和冶炼炉，应用于商业规模电厂的燃烧后捕集技术仅仅处于示范阶段。针对燃烧后捕集 2020 年以前重点发展醇胺法捕集技术，开展工业示范和规模化技术推广；进行热钾碱法捕集技术研发。2020—2030 年实现醇胺法捕集技术商业化推广，进

行热钾碱法捕集技术示范；2030—2050 年形成低成本燃烧后捕集技术体系并商业化应用。

##### 2. 富氧燃烧捕集技术

2020 年以前重点开展低能耗、低成本氧气提纯技术，降低大型空分工艺能耗；研发高温耐热材料及燃烧锅炉设备，降低空气污染。2020—2030 年积极开展大型富氧燃烧捕集技术示范，进一步评价技术的可行性和经济性。2030 年后实现超超临界富氧燃烧技术规模化应用。

##### 3. 燃烧前捕集技术

以 IGCC 建设为基础，2020 年以前加大高温燃气净化技术研发、低能耗高效率燃气轮机的研发、高效气化炉研制及低能耗制氧空分系统和蒸汽循环系统探究，开展 IGCC 项目中试示范；2020—2030 年通过新技术研发和耦合新能源工艺流程的优化，形成低成本、低能耗、高性能燃烧前捕集技术，并进行工业示范，2030 年以后达到成熟应用、工业推广、商业化运营阶段。

#### （二）二氧化碳运输技术路线

通过管道运输 CO<sub>2</sub> 是 CCS 的首选，但是这并不意味着对于 CCS 系统来说，罐车、船舶等运输方式没有可行性。待 CCS 系统发展到一定程度后，其余几种运输方式可以作为管道运输的补充，从而使 CO<sub>2</sub> 的运输更加高效完善。

到 2020 年，建立并形成完善的 CO<sub>2</sub> 管道输送相关标准体系，健全安全控制技术体系，建成百万吨级全流程示范，输送管长达到 200 km，成本控制到 80 元/t，年输送能力超过 1×10<sup>6</sup>t；到 2030 年全面掌握产业化技术能力，输送管长达到 1000 km 以上，成本控制到 70 元/t，年输送能力超过 1×10<sup>7</sup>t；到 2050 年，全面推广实施应用 CO<sub>2</sub> 输送技术，建设超过 5000 km 的 CO<sub>2</sub> 输送管道，成本控制到 70 元/t 以下，年输送能力超过 5×10<sup>7</sup>t。

#### （三）二氧化碳利用技术路线

##### 1. 二氧化碳地质利用技术

CO<sub>2</sub> 驱油技术：CO<sub>2</sub> 驱油技术发展最早也是最成熟的埋存技术。到 2020 年，在详细资源评估的基础上，结合 CO<sub>2</sub> 集中排放源的分布，优化源—汇匹配研究，完成源—汇匹配规划方案设计，跨行业、跨部门合作开展 CO<sub>2</sub> 捕集—驱油—埋存一体化技

术研发,做到方案设计、技术实施、经济评估一体化统筹规划,加大CO<sub>2</sub>驱油应用力度,投入6000~12000 t储量进行CO<sub>2</sub>驱油;2030年以后进入商业化、规范化的推广应用,大力实施CO<sub>2</sub>捕集-驱油-埋存一体化项目,累积投入储量 $5\times 10^8\sim 1\times 10^9$ t。

CO<sub>2</sub>驱煤层气技术:该技术尚未成熟,目前处于机理研究和井组试验阶段。到2020年完成源-汇匹配优化研究及规划,开展区块先导试验示范工程建设;2030年大力开展CO<sub>2</sub>捕集-驱气-埋存一体化、CO<sub>2</sub>捕集-埋存一体化技术研发,实施大型一体化示范工程项目,落实环境安全监测方法及长期埋存安全性监测技术研究;到2050年实现全流程技术推广和规模化、商业化项目实施。

## 2. 二氧化碳化工利用

CO<sub>2</sub>化工产品利用:到2020年加大CO<sub>2</sub>化学转化制取合成气、甲醇、聚氨酯等新产品技术的研发,建立万吨以上化工利用工程示范;到2030年建立10万吨级以上大规模产业化工程示范,开展CO<sub>2</sub>化学转化制取能源、化工产品技术产业化优化与装备研发;到2050年建立完整的CO<sub>2</sub>化工应用与产品体系,形成商业化推广应用技术能力,大规模工业化推广CO<sub>2</sub>化工利用新技术。

## 3. 二氧化碳生物利用

微藻生物固定CO<sub>2</sub>转化技术:当前重点攻关低成本养殖及制油技术研发,建立微藻养殖及制油中试示范工程,以此为载体开展提高光合效率技术研发和高值副产品生物炼制技术研究;到2030年形成高值副产品生物炼制技术,开展微藻养殖与土地资源合理布局优化,推广高产微藻养殖技术,开展低成本、低能耗收获及加工技术研发,建立示范工程;2050年形成微藻研制及制油技术、副产品加工技术商业生产能力,开展商业化技术推广。

## 4. 二氧化碳矿化利用

2020年建立若干CO<sub>2</sub>矿化技术工业示范装置,逐步扩大示范工程规模;到2050年实现商业化应用,技术成熟、能耗降低。

## (四) 技术路线

### 1. 二氧化碳捕集技术

对于二氧化碳捕集技术的发展,根据我国实际情况,建议我国中长期碳捕集技术路线图如图1所示。

2015—2020年:

(1) 对于燃后捕集技术:重点发展醇胺法捕集

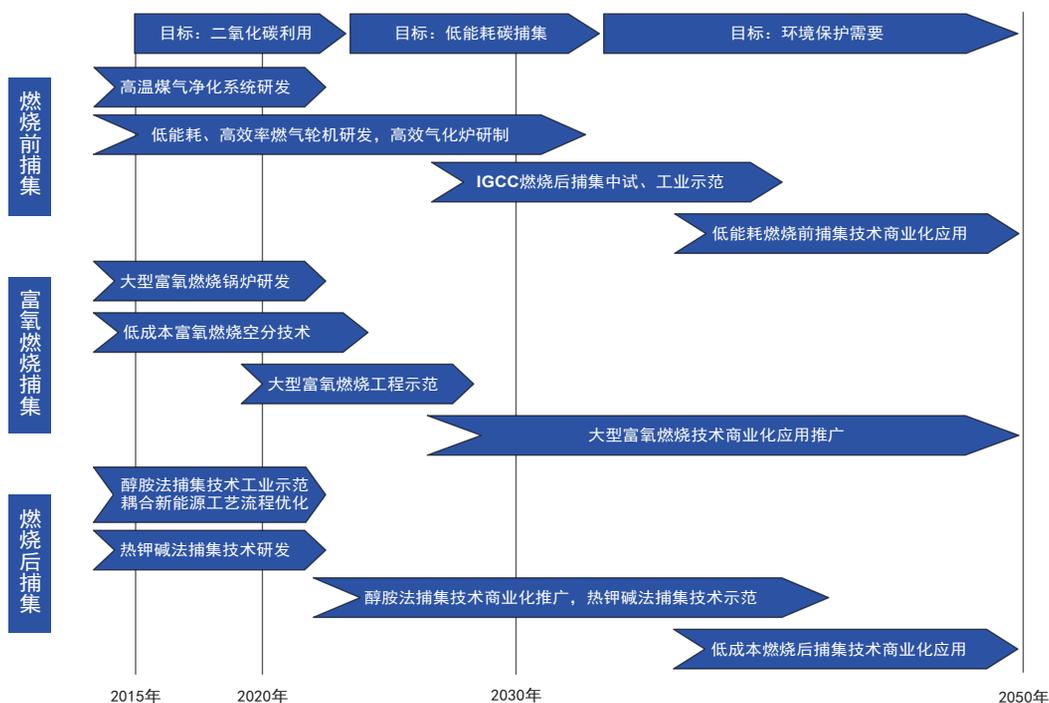


图1 我国中长期碳捕集技术路线图

技术，开展工业示范和规模化技术推广，进行热钾碱法捕集技术研发；

(2) 对于富氧燃烧技术：重点开展低能耗、低成本氧气提纯技术，降低大型空分工艺能耗，研发高温耐热材料及燃烧锅炉设备，减少空气污染；

(3) 对于燃烧前捕集技术：加大高温煤气净化技术研发、低能耗高效率燃气轮机的研发、高效气化炉研制及低能耗制氧空分系统和蒸汽循环系统探究，开展 IGCC 项目中试示范。

2020—2030 年：

(1) 对于燃烧后捕集技术：实现醇胺法捕集技术商业化推广，进行热钾碱法捕集技术示范；

(2) 对于富氧燃烧技术：积极开展大型富氧燃烧捕集技术示范，进一步评价技术的可行性和经济性；

(3) 对于燃烧前捕集技术：通过新技术研发和耦合新能源工艺流程的优化，形成低成本、低能耗、高性能燃烧前捕集技术，并进行工业示范。

2030—2050 年：

(1) 对于燃烧后捕集技术：形成低成本燃烧后捕集技术体系并商业化应用；

(2) 对于富氧燃烧技术：实现超超临界富氧燃烧技术规模化应用；

(3) 对于燃烧前捕集技术：达到成熟应用，工业推广，商业化运营。

## 2. 二氧化碳运输技术

对于二氧化碳运输技术的发展，建议其技术发展时间表和各阶段里程碑事件如下。

2015—2020 年：

建立并形成完善的 CO<sub>2</sub> 管道输送相关标准体系，健全安全控制技术体系，建成百万吨级全流程示范，输送管长达到 200 km，成本控制到 80 元/t，年输送能力超过 1×10<sup>6</sup>t。

2020—2030 年：

全面掌握产业化技术能力，输送管长达到 1 000 km 以上，成本控制到 70 元/t，年输送能力超过 1×10<sup>7</sup>t。

2030—2050 年：

全面推广实施应用 CO<sub>2</sub> 输送技术，建设超过 5 000 km 的 CO<sub>2</sub> 输送管道，成本控制到 70 元/t 以下，年输送能力超过 5×10<sup>7</sup>t。

## 3. 二氧化碳利用技术

对于二氧化碳利用技术，根据我国目前的技术

发展和经济情况，建议其技术发展时间表和各阶段里程碑事件如下。

2015—2020 年：

(1) 对于 CO<sub>2</sub> 地质利用技术：详细地做好资源评估，并开展及扩大相应的实验研究；

(2) 对于 CO<sub>2</sub> 化工利用技术：进一步推广和扩大传统 CO<sub>2</sub> 化工产品利用技术，开展耦合新能源的低能耗、低成本 CO<sub>2</sub> 化工产品生产工艺技术研究；

(3) 对于 CO<sub>2</sub> 生物利用技术：推广气肥利用技术；以微藻固碳为重点，研发和示范先进 CO<sub>2</sub> 生物利用技术 [9]。

2020—2030 年：

(1) 对于 CO<sub>2</sub> 地质利用技术：完成源—汇匹配优化研究及规划，开展区块先导试验示范工程建设；

(2) 对于 CO<sub>2</sub> 化工利用技术：加大 CO<sub>2</sub> 化学转化制取合成气、甲醇、聚氨酯等新产品技术的研发，建立万吨以上化工利用工程示范；

(3) 对于 CO<sub>2</sub> 生物利用技术：以微藻固碳为重点，建立若干 CO<sub>2</sub> 生物利用的规模化能源农场，利用 CO<sub>2</sub> 增强生物质液体燃料、化工品等生物能源产出。

2030—2050 年：

(1) 对于 CO<sub>2</sub> 地质利用技术：实现技术推广，实施规模化、商业化的项目。

(2) 对于 CO<sub>2</sub> 化工利用技术：2030 年，建立 10 万吨级以上大规模产业化工程示范，开展 CO<sub>2</sub> 化学转化制取能源、化工产品技术产业化优化与装备研发；到 2050 年，建立完整的 CO<sub>2</sub> 化工应用与产品体系，形成商业化推广应用技术能力，进行 CO<sub>2</sub> 化工利用新技术的大规模工业化推广。

(3) 对于 CO<sub>2</sub> 生物利用技术：应用推广以微藻固碳为重点的先进 CO<sub>2</sub> 生物利用技术。

## (五) 技术经济性分析

目前，CCS/CCUS 主要核心技术尚不成熟，大部分处于理论研究、实验室研究、工业示范和小范围商业性运作阶段，尚处于“特定条件下经济可行”阶段。CCS/CCUS 技术的成本和能耗较高、经济性较差，其中 CO<sub>2</sub> 捕集成本占整个 CCS 总成本的 70% 以上。根据联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 估算，燃烧后 CO<sub>2</sub> 的捕集成本约为 29~51 美元/t，IGCC 中 CO<sub>2</sub> 的捕集成本为 13~37 美元/t；超临界电厂、天然气联合循环 (NGCC) 电厂和

IGCC 电厂若要捕集 90% 的  $\text{CO}_2$ ，每千瓦时的能耗分别要增加 24%~40%、11%~20% 和 14%~25%。在目前的技术水平下， $\text{CO}_2$  驱油、驱煤层气、盐水层埋存、微藻生物制油可实现  $\text{CO}_2$  净减排，但矿化和化工利用却不能实现净减排。另外， $\text{CO}_2$  驱油长周期埋存存在安全性问题，输送和盐水层埋存也存在泄漏影响环境、诱发地震等风险。

#### 四、我国 $\text{CO}_2$ 排放量及 CCS/CCUS 技术减排量预测

情景一：根据 2005—2017 年我国  $\text{CO}_2$  实际排放量，利用增长趋势法预测未来我国  $\text{CO}_2$  的排放量，基本维持现状，在没有考虑采取新措施的情况下，结果如图 2 所示。

情景二：不考虑能源结构的调整，不采用 CCS/CCUS 技术，仅考虑采取节能措施减少我国  $\text{CO}_2$  排放量，结果如图 3 所示。

情景三：考虑采取情景一节能措施及情景二国家能源消费结构调整平稳发展方案，预测 2020 年、2030 年、2050 年  $\text{CO}_2$  排放量。

综合考虑合理控制能源消费总量和调整能源结构，基于现有可预期的政策及技术条件，对 2020 年、

2030 年和 2050 年我国一次能源生产总量和结构目标进行预测。预测采用间接法，以国内生产总值和单位 GDP 能耗为变量，建立生产能源需求预测函数。所引用历史数据来源于《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》、课题组调查数据等 [10,11]，结果如图 4 所示。

考虑采取情景二节能措施及国家能源消费结构调整积极推进方案，预测 2020 年、2030 年、2050 年  $\text{CO}_2$  排放量，如图 5 所示。

情景四：考虑在情景三平稳发展与积极推进基础上采取本文提出的 CCS/CCUS 技术措施，预测 2020 年、2030 年、2050 年  $\text{CO}_2$  排放量，如图 6、图 7 所示。

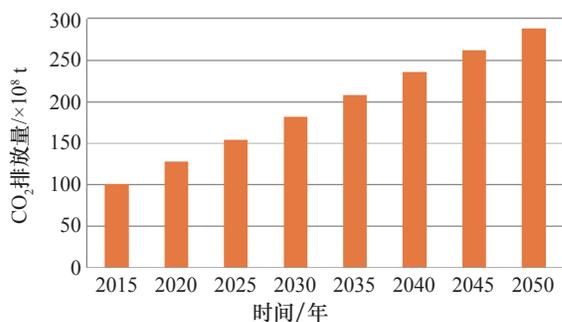


图 2 情景一我国  $\text{CO}_2$  排放量预测

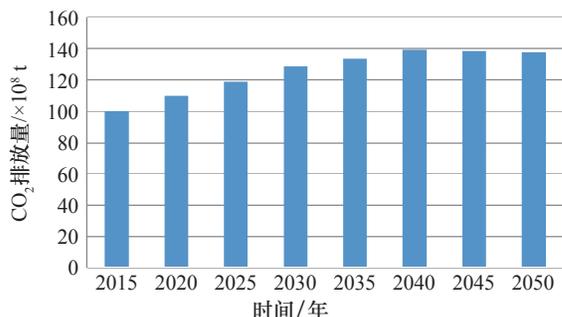


图 3 情景二我国  $\text{CO}_2$  排放量预测

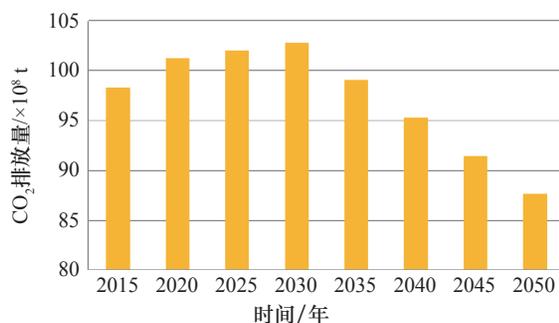


图 4 情景三我国  $\text{CO}_2$  排放量预测（平稳发展方案）

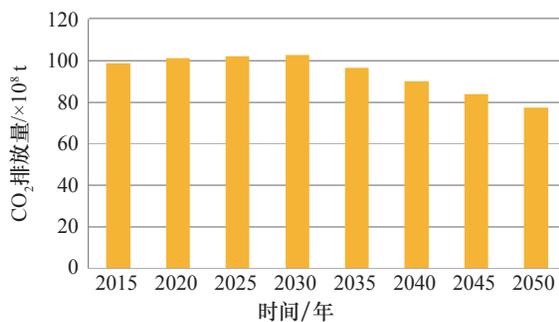


图 5 情景三我国  $\text{CO}_2$  排放量预测（积极推进方案）

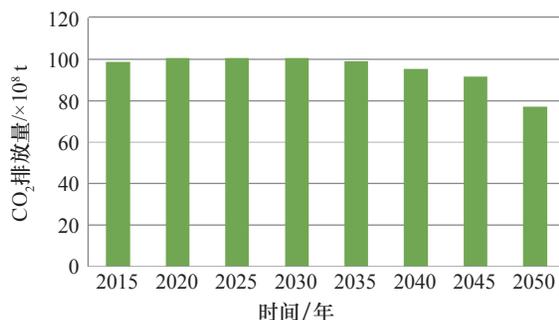


图 6 情景四我国  $\text{CO}_2$  排放量预测（平稳发展方案）

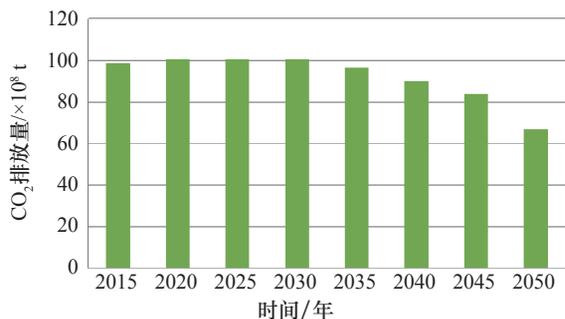


图7 情景四我国 CO<sub>2</sub> 排放量预测 (积极推进方案)

通过上述四种情景的分析预测,若不采取任何新措施,到2050年我国 CO<sub>2</sub> 排放量将达到  $2.8875 \times 10^{10}$  t;如果采取节能措施,到2050年我国 CO<sub>2</sub> 排放量将降至  $1.3781 \times 10^{10}$  t;如果进一步采取调整能源结构、发展低碳能源措施,在平稳发展方案条件下,到2050年我国 CO<sub>2</sub> 排放量可降至  $8.769 \times 10^9$  t,在积极推进方案条件下,CO<sub>2</sub> 排放量可降至  $7.771 \times 10^9$  t;如果再进一步采取 CCS/CCUS 措施,平稳发展方案条件下,到2050年我国 CO<sub>2</sub> 排放量可降至  $7.719 \times 10^9$  t,在积极推进方案条件下,CO<sub>2</sub> 排放量可降至  $6.721 \times 10^9$  t。四个情景相比,不同时期各种减排措施的贡献情况如图8~图11所示。

由图8~图11可以看出,对于减排 CO<sub>2</sub> 来说,最主要的措施是节能降耗,贡献度达65%~71%;其次是调整能源结构,贡献度达24%~32%;CCS/CCUS 技术的贡献度为2%~5%,但在2020—2030年

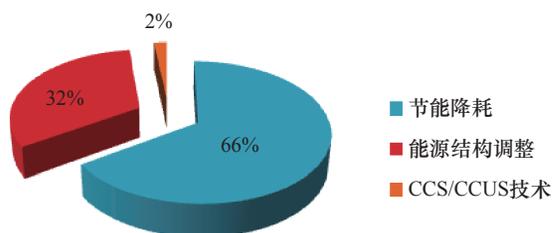


图8 2020年碳减排措施贡献度

二氧化碳排放增长缓慢的情况下,CCS/CCUS 技术将使得二氧化碳排放峰值提前到达。

## 五、结论及政策建议

(1) CCS/CCUS 技术处于研发和示范阶段,相关技术尚不成熟。应立足国情,从全生命周期角度充分分析碳排放、安全性和经济性指标,战略性开展低能耗燃烧后捕集、燃烧前捕集、富氧燃烧捕集等大规模 CO<sub>2</sub> 捕集技术的研究和示范;推动 CO<sub>2</sub> 驱油、驱煤层气、化工、生物利用等 CO<sub>2</sub> 利用技术及工艺的创新开发和应用,努力降低成本,降低二次污染物生成和间接碳排放,取得技术、经济和环保的综合效益。

(2) CCS/CCUS 技术减排 CO<sub>2</sub> 数量有限,我国要大量减排 CO<sub>2</sub>,需要优先考虑强化节能、降耗、减排措施,其次是调整能源结构,大力发展新能源技术。

(3) 政府应加快推进应对气候变化和低碳发展法律、政策的制定,明确低碳发展工作的范围、目标、原则和主要内容,规范不同社会主体的责任、权利和义务,加强政策措施、体制机制、科技支撑等方面的保障。

(4) 开展前瞻性 CCS/CCUS 技术研发,需要理顺企业风险投融资体制,在财政、税收等方面采取激励措施,鼓励节能、高效技术的开发和商业化,

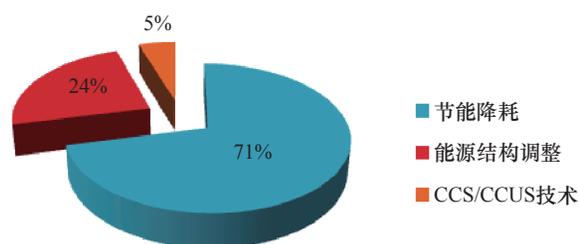


图10 2050年碳减排措施贡献度 (平稳发展方案)

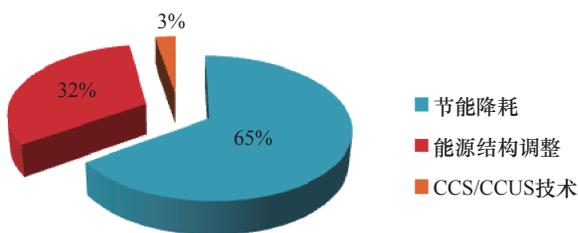


图9 2030年碳减排措施贡献度

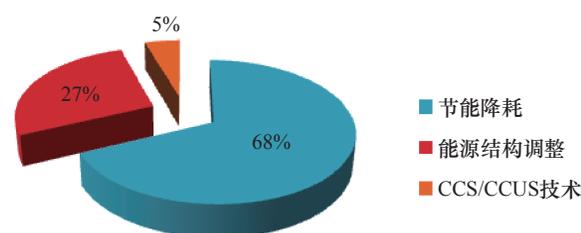


图11 2050年碳减排措施贡献度 (积极推进方案)

鼓励企业开发低碳等先进技术。

(5) 把握国际 CCUS 技术发展趋势, 积极开展 CCUS 国际科技合作, 将 CCUS 技术纳入多边、双边国际科技合作, 推动建立国际前沿水平的国际合作平台。

#### 参考文献

- [1] 金涌, 朱兵, 胡山鹰, 等. CCS, CCUS, CCRS, CMC 系统集成 [J]. 中国工程科学, 2010, 12(8): 49-55.  
Jin Y, Zhu B, Hu S Y, et al. System integration of CCS, CCUS, CCRS, CMC [J]. Strategic Study of CAE, 2010, 12(8): 49-55.
- [2] Hylkema H, Read A. Reduction of freshwater usage of a coal fired power plant with CCS by applying a high level of integration of all water stream [J]. Energy Procedia, 2014 (63): 7187-7197.
- [3] Global CCS Institute. The global status of CCS: 2014 [R]. Beijing: Global CCS Institute, 2014.
- [4] 骆仲洪, 方梦祥, 李明远, 等. 二氧化碳捕集封存和利用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.  
Luo Z Y, Fang M X, Li M Y, et al. Carbon dioxide capture, storage and utilization technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [5] Matuszewski M, Brasington R, Woods M. Advancing oxycombustion technology for bituminous coal power plants: An R&D guide [R]. U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, 2012.
- [6] U.S. Geological Survey Geologic Carbon Dioxide Storage Resources Assessment Team. National assessment of geologic carbon dioxide storage resources-results [R]. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2013.
- [7] CCOP Technical Secretariat. CCOP guideline on the methodologies for selecting geological carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) storage and estimation of storage capacities [C]. Bangkok: Coordinating committee for geoscience programmes in east and southeast Asia (CCOP), 2014.
- [8] 中国21世纪议程管理中心. 中国二氧化碳利用技术评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
China Twenty-First Century Agenda Management Center. China CO<sub>2</sub> utilization technology assessment report [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2014.
- [9] Asian Development Bank. Roadmap for carbon capture and storage demonstration and deployment in the People's Republic of China [R]. Manila: Asian Development Bank, 2015.
- [10] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴2017 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.  
Energy Statistics Department, National Bureau of Statistics. China energy statistics yearbook 2017 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [11] 黄其励, 袁晴棠. 能源生产革命的若干问题研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.  
Huang Q L, Yuan Q T. Research on several issues of energy production revolution [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2017.