

# 电力系统中的碳捕集电厂: 研究综述及发展新动向

程耀华<sup>1</sup>, 杜尔顺<sup>1</sup>, 田旭<sup>2</sup>, 张宁<sup>1\*</sup>, 康重庆<sup>1</sup>

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084;

2. 国网青海省电力公司经济技术研究院, 青海省 西宁市 810008)

## Carbon Capture Power Plants in Power Systems: Review and Latest Research Trends

CHENG Yaohua<sup>1</sup>, DU Ershun<sup>1</sup>, TIAN Xu<sup>2</sup>, ZHANG Ning<sup>1\*</sup>, KANG Chongqing<sup>1</sup>

(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering,

Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;

2. State Grid Qinghai Electric Power Company Economic and Technological Research Institute, Xining 810008, Qinghai Province, China)

**Abstract:** The carbon capture power plant (CCPP) is one of the most important low carbon technologies. It can facilitate the sustainable development of the power industry. In this paper, the basic principle and development prospects of a CCPP were first introduced. The operation characteristics of CCPP were then analyzed. Subsequently, we reviewed the literature from three aspects: operation optimization of power systems with CCPP, power system planning considering CCPP and investment-benefit analysis of CCPP. Finally, the latest research trends of CCPP in power systems were prospected from the following five aspects: supporting low-inertia power systems via dynamic control, facilitating high penetration of renewable energy, supporting the net-zero emission power systems, participating in the joint market of power and carbon trading, as well as assisting the development of integrated energy systems.

**Keywords:** low carbon economy; carbon capture power plants; power system operation; power system planning; investment-benefit analysis

**摘要:** 碳捕集电厂是当前最为关键的低碳技术之一, 有利于实现电力行业可持续发展, 具有广泛的应用前景。从碳捕集电厂的基本原理与发展前景出发, 分析了碳捕集电厂的运行特性, 综述了含碳捕集电厂的电力系统运行优化、优化规划以及碳捕集电厂的投资效益分析3个方面的研究现状, 最后从动态控制支撑低惯量电力系统、支撑高比例可再生能源并网、支撑净零排放电力系统、参与电力和碳交易联合市场、助力综合能源系统等5个方面对碳捕集电厂的研究新动向进行了展望。

**关键词:** 低碳经济; 碳捕集电厂; 电力系统运行; 电力系统规划; 投资效益分析

## 0 引言

全球气候变化是当前人类社会面临的巨大挑战之一, 严重威胁人类的可持续发展。为应对气候变化, 各国政府和相关部门都采取了积极的应对措施, 通过提高能源综合利用效率、发展可再生能源等方式, 大力探索低碳发展新途径<sup>[1]</sup>。

自1990年《联合国气候变化框架公约》达成以来, 国际社会形成了一系列重要的气候变化协定。2015年11月在巴黎举办的气候大会上通过了《巴黎气候变化协定》, 明确指出在本世纪把全球平均气温控制在工业化前水平以上2℃之内, 并努力将气温限制在工业化前水平以上1.5℃之内。各国政府纷纷响应国际社会达成的气候变化控制目标, 做出了各自国家的减排承诺, 并逐步将其提上立法日程。中国是全球碳排放最大的国家, 实施低碳发展战略, 是中国实现可持续发展的必然选择。作为一个负责任的大国, 中国政府也做出应对气候变化的庄严承诺: 到2020年单位国内生产总值CO<sub>2</sub>排放量比2005年下降40%~45%, 到2030年单位国内生产总值CO<sub>2</sub>排放量比2005年下降60%~65%<sup>[2]</sup>。从碳排放结构上看, 电力行业是CO<sub>2</sub>排放的主要来源之一, 呈现碳排放量大、增速快的特点。低碳经济下, 电力行业势必成为碳减排的主力军, 面临着巨大的减排压力。但与此同时, 电力行业可通过产业升级、设备改造、规划运行模式调整等措

基金项目: 国家自然科学基金重点国际(地区)合作研究项目(51620105007)。

Major International (Region) Cooperation Research Project of National Natural Science Foundation of China (51620105007).

施有效降低碳排放，具有明显的碳减排潜力。

碳捕集与封存 (carbon capture and storage, CCS) 技术是实现电力系统低碳化的关键技术，已经受到越来越多的关注。电力行业的碳排放主要来自于大型火力发电厂，排放源少、排放量大，便于集中管理，适合采用CCS技术<sup>[3]</sup>。联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 的第5次评估报告中明确指出，CCS技术对于实现零碳排放和负碳排放至关重要<sup>[4]</sup>。对于中国而言，当前火电仍然占据主导地位，通过在传统火电厂中引入碳捕集系统，将其改造成具有低碳属性的碳捕集电厂 (carbon capture power plant, CAPP)，可有效缓解化石燃料利用与碳减排之间的矛盾，具有广泛的应用前景<sup>[5]</sup>。

在此背景下，开展针对碳捕集电厂的相关研究，具有重大的战略意义与现实价值。此外，碳捕集电厂的引入将对传统电力系统的规划与运行等各方面产生深远的影响，赋予其新的特征。各国学者已经针对碳捕集电厂做了许多创新和富有意义的工作，现有研究的框架如图1所示。本文首先介绍碳捕集电厂的基本原理与运行特性，在此基础上归纳总结碳捕集电厂及其对电力系统的影响相关研究，最后对碳捕集电厂在电力系统中的发展新动向进行展望。

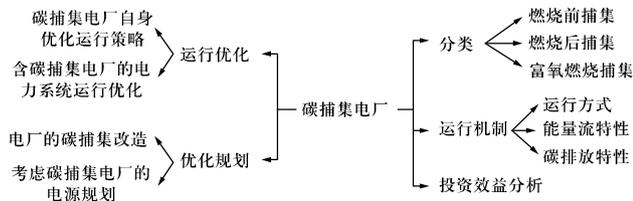


图1 碳捕集电厂的相关研究现状框架

Fig. 1 Framework of the research on the carbon capture power plant

## 1 碳捕集电厂的原理与发展前景

### 1.1 碳捕集电厂的基本原理

CCS技术将CO<sub>2</sub>从相关排放燃烧源中捕获并分离出来，输送到油气田、海洋等地点进行长期封存，从而阻止或显著减少温室气体的排放<sup>[6]</sup>，主要包括捕集、传输与封存3个环节，其中与发电厂密切相关的是碳捕集环节<sup>[4]</sup>。碳捕集技术可以分为燃烧后捕集、燃烧前捕集和富氧燃烧捕集3种<sup>[5,7]</sup>。

燃烧后捕集是指利用合适的捕集方法从电厂化石燃料燃烧后的烟气中分离CO<sub>2</sub>，其原理简单，而且不

改变火电厂的原有发电流程，大多数的碳捕集电厂都采用这一技术。对电厂烟气中的CO<sub>2</sub>进行捕集的方法主要有化学吸收法、物理吸附法以及薄膜法。

燃烧前捕集是将化石燃料通过气化反应生成合成气，进一步将合成气转换成H<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>，再通过物理吸收将CO<sub>2</sub>分离出来。因为变换器中CO<sub>2</sub>浓度高，因而可以采用能耗较低的物理吸收工艺。这种燃烧前捕集技术是整体煤气化联合循环 (integrated gasification combined cycle, IGCC) 电厂的最佳选择。

富氧燃烧捕集是指用富氧甚至纯氧代替空气助燃，使烟气中的CO<sub>2</sub>浓度大大提高，便于进一步提纯和储存。富氧燃烧电厂的系统主要由空气分离装置、燃烧/热转化/气体质量控制系统和CO<sub>2</sub>提纯装置组成。

3种捕集方式各有优缺点<sup>[5,8]</sup>、经济成本也存在差异，对比如表1所示。燃烧后捕集的优点在于原理简单、适用性广，可以直接应用于现有的大多数火电厂，但是由于CO<sub>2</sub>在烟气中的浓度很低，因而该技术的碳捕集能力较弱，且能耗高、设备占地大；燃烧前捕集所需分离的气体较少，CO<sub>2</sub>浓度上升，从而可降低捕集能耗并提高捕集能力，但是该技术需要改变发电流程，在对已有电厂的改造上受到较大的限制，适用范围较窄；富氧燃烧捕集综合了以上2种技术的优势，不会对常规电厂的发电流程造成太大影响，碳捕集能力也较强，但是富氧燃烧需要创造高氧环境，带来了较高的制氧成本，同时对燃料本身的清洁性要求较高，不适宜应用于燃煤电厂。

表1 三种碳捕集技术的优缺点和成本比较

Table 1 Comparison of advantages, disadvantages, and costs of the three carbon capture technologies

碳捕集类型	优点	缺点	成本
燃烧后捕集	原理简单、适用性广	捕集能力较弱、能耗高、设备占地大	投资成本最低、捕集成本最高
燃烧前捕集	捕集能耗低、捕集能力强	改变了发电流程，对现有电厂改造较难	投资成本最高、捕集成本最低
富氧燃烧捕集	捕集能力较强、对发电流程的改变较小	较高的制氧成本、不适宜用于燃煤电厂	投资成本和捕集成本居中

从成本上看，目前燃烧后捕集技术的投资成本最低，但是由于能耗大导致碳捕集成本最高；燃烧前捕集技术的投资成本最高，但是运行环节捕集成本很

低；富氧燃烧捕集技术的投资成本和捕集成本介于二者之间。

## 1.2 碳捕集电厂的现状与前景

经过一段时间的发展，碳捕集电厂现在已经在世界各国得到实践。美国政府发布了对于CCS技术的科技专项基金资助<sup>[9]</sup>，英国和欧盟政府更是规定所有新建燃煤电厂必须具有碳捕集的资质<sup>[10]</sup>。

与此同时，中国也采取了积极的行动大力发展碳捕集技术。2008年，华能北京热电厂投产了年捕集能力为3000 t的示范性碳捕集系统<sup>[11]</sup>；华能上海石洞口二厂在其二期新建的超超临界机组上安装碳捕集装置，年捕获CO<sub>2</sub> 10万t，该项目已于2009年12月30日正式投入运营；2017年，陕西榆林建成了第1个大型碳捕集封存示范项目，通过从煤化工厂捕集CO<sub>2</sub>，提纯后注入油田进行驱油和封存，该项目计划每年捕获41万t CO<sub>2</sub>；2019年5月，广东省碳捕集测试项目在华润电力海丰电厂正式投产，标志着亚洲首个基于超超临界燃煤发电机组的碳捕集技术测试平台正式投入运行；2019年11月，国华电力公司15万t/a碳捕集和封存示范项目开工建设。

根据国际能源组织发布的2050年中国与世界碳捕集技术发展路线图，碳捕集技术将在未来几十年迅猛发展<sup>[12-13]</sup>。从目前来看，高昂的成本仍然是制约碳捕集电厂大规模建设的主要原因。但可以预见的是，随着碳捕集技术的成熟、成本的下降以及国家相关政策的支持，碳捕集电厂将会受到越来越多关注并迎来快速发展，逐渐取代常规火电。

## 2 碳捕集电厂的运行机制研究

### 2.1 碳捕集电厂的灵活运行特性

在传统火电厂原有发电设备的基础上引入碳捕集系统，即形成碳捕集电厂。碳捕集电厂的发电系统与碳捕集系统间，以及碳捕集系统各个功能单元间并不存在流程上的耦合。通过引入辅助设备，碳捕集系统的运行状态可以在一定程度上独立于发电系统，其内部各单元的运行状态也可在一定程度上解耦<sup>[14-16]</sup>。通过控制碳捕集电厂在各个单元之间的能量分配，可独立调整其发电功率与碳捕集水平。碳捕集电厂的这种结构特征和运行机理使其具有灵活运行的潜力<sup>[17]</sup>。

从现有相关研究来看，碳捕集电厂主要利用燃烧后捕集技术，其灵活运行方式主要有2种类型<sup>[14,17-20]</sup>。

#### 1) 分流式运行方式。

碳捕集电厂的分流式运行有富液分流与烟气流分2种实现方式。富液分流是指通过控制阀门使一部分富液直接返回吸收塔，而烟气流分则是通过旁路系统使一部分烟气直接排放到大气中。通过增大返回吸收塔的富液比例或直接排放烟气的比例，同步减小抽取蒸汽的比例，即可降低碳捕集系统的运行水平，增大碳捕集电厂的有功净出力，反之亦然。

#### 2) 溶液存储式运行方式。

碳捕集电厂可以在吸收塔和解析塔之间安装一组溶液存储器，分别存储富液与贫液，使吸收塔中流出的富液与流入再生塔中的富液不再相等，进而使CO<sub>2</sub>吸收过程与溶液再生过程相对独立。如果流入再生塔中的富液超过吸收塔流出的富液，则碳捕集水平提升，电厂的有功净出力减小；反之，则碳捕集水平降低，电厂的有功净出力增加。

## 2.2 碳捕集电厂的能量流与碳排放特性

碳捕集设备的安装将改变原有发电设备的结构，造成一部分的能量损失，这部分能量损失约占碳捕集电厂总出力的1/5。此外，在捕获CO<sub>2</sub>的同时，也会消耗一部分的能量。因而，在显著降低碳排放的同时，碳捕集电厂也带来了系统发电功率的损失，主要来源于2类能量损耗<sup>[8,21]</sup>。

第1类能量损耗与碳捕集系统的运行状态无关，主要是由于引入碳捕集系统造成电厂结构变化和运行工况的改变所引起的能耗，称为基准能耗 $P_B^{CCS}$ 。基准能耗不随电厂运行状态的变化而变化，可认为是一个固定值。

第2类能量损耗是碳捕集系统在吸收、分解、压缩CO<sub>2</sub>的过程中产生的能量损失，与碳捕集系统的运行水平有关，称为运行能耗 $P_R^{CCS}$ 。碳捕集量越大，对应的运行能耗也越大。大量文献的实测结果表明<sup>[22-23]</sup>，捕集单位CO<sub>2</sub>所消耗的功率大致为常数，记为 $\lambda_{GE}$ 。因而，可得到运行能耗的表达式为

$$P_R^{CCS} = \lambda_{GE} E_G^{CC} \quad (1)$$

式中： $E_G^{CC}$ 表示碳捕集电厂捕集的CO<sub>2</sub>量。

假设碳捕集电厂的碳排放强度（单位电能对应的碳排放量）为 $e_G$ ，碳捕集电厂的等效输出功率（即化石燃料燃烧产生的有功功率）为 $P$ 。定义碳捕集电厂的碳捕集水平 $\beta^{CC}$ 为捕集的CO<sub>2</sub>与燃料燃烧产生的CO<sub>2</sub>之比，则捕集的CO<sub>2</sub>量 $E_G^{CC}$ 表达式为

$$E_G^{CC} = \beta^{CC} e_G P \quad (2)$$

根据式(1), 可进一步得到运行能耗为

$$P_R^{CCS} = \lambda_{GE} \beta^{CC} e_G P \quad (3)$$

碳捕集电厂的等效输出功率扣除基准能耗和运行能耗之后, 就是碳捕集电厂对外输出的有功功率, 称为净输出功率 $P_N^{CCS}$ :

$$P_N^{CCS} = (1 - \lambda_{GE} \beta^{CC} e_G) P - P_B^{CCS} \quad (4)$$

根据式(4), 可以得到碳捕集电厂的最大、最小有功净输出为

$$P_{N,max}^{CCS} = P_{max} - P_B^{CCS} \quad (5)$$

$$P_{N,min}^{CCS} = (1 - \lambda_{GE} \beta_{max}^{CC} e_G) P_{min} - P_B^{CCS} \quad (6)$$

式中:  $\beta_{max}^{CC}$ 是碳捕集水平的最大值;  $P_{max}$ 与 $P_{min}$ 则分别对应最大与最小等效输出功率。在最大净输出情况下, 碳捕集水平为零, 此时不捕集 $CO_2$ 。

根据碳捕集电厂的特性, 可得到其碳排放量为

$$E_N^{CC} = (1 - \beta^{CC}) e_G P \quad (7)$$

将式(4)代入可得到<sup>[24]</sup>

$$E_N^{CC} = \frac{(1 - \beta^{CC}) e_G}{1 - \beta^{CC} e_G \lambda_{GE}} (P_N^{CCS} + P_B^{CCS}) \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 与传统火电厂不同, 碳捕集电厂的净输出功率与碳排放不再是一一对应的关系, 而是同时与等效输出功率和碳捕集水平有关。

此外, 由式(5)与式(6)可进一步得到碳捕集电厂的净输出功率变化范围:

$$\Delta P_N^{CCS} = P_{N,max}^{CCS} - P_{N,min}^{CCS} = P_{max} - P_{min} + \lambda_{GE} \beta_{max}^{CC} e_G P_{min} \quad (9)$$

可见, 相对于常规火电厂, 碳捕集电厂的运行区间更大, 具有更大的灵活性, 将对传统电力系统规划与运行等方面带来新的影响。

### 3 含碳捕集电厂的电力系统运行优化

#### 3.1 碳捕集电厂自身的运行优化策略

对于单个碳捕集电厂而言, 不同的碳捕集水平对应的有功输出不同。相同净输出功率的情况下, 碳捕集量的增加同时也带来了运行成本的增大, 因此需要根据外部环境的变化确定最优的碳捕集水平, 优化碳捕集电厂的运行策略。

文献[25-28]针对碳捕集电厂自身的运行优化策略开展了相关研究。文献[25]建立了考虑售电损失的碳捕集水平优化模型, 并运用该模型计算了发电厂参与碳捕集的碳排放价格敏感区间, 实现不同碳排放价格

下碳捕集电厂的优化运行。文献[26]系统性地对碳捕集技术为传统火电厂带来的运行灵活性进行了量化评估, 且分析了影响电厂灵活性的因素。文献[27]在碳捕集电厂灵活运行模式的基础上, 定义了相对碳捕集度, 以碳排放量和运行成本为目标函数, 通过优化相对碳捕集度使决策者在更广泛的区间根据实际需求选择碳捕集设备的运行策略, 实现碳捕集电厂的灵活运行。文献[28]考虑了碳捕集电厂正常、启动、停机以及待机4种状态, 建立了考虑碳捕集电厂动态行为的混合整数线性规划模型, 通过所建立的模型优化碳捕集电厂的运行方式, 实现最优的决策。

#### 3.2 含碳捕集电厂的电力系统运行优化

碳捕集电厂具有灵活的运行特性, 可快速跟踪负荷, 具有良好的调峰性能和备用特性, 因而碳捕集电厂的引入将改变传统电力系统的调峰与备用机制, 为电力系统的运行带来更大的灵活性。此外, 传统电力系统的机组优化组合与调度模式下, 仅仅以运行成本最小作为目标, 没有考虑碳排放等外部成本的影响。随着低碳发展的需求, 碳排放成为电力系统的重点关注对象。碳捕集电厂由于其自身可以捕集 $CO_2$ , 可显著降低火电厂的碳排放量, 将对低碳经济下的电力系统机组组合和经济调度产生影响。因而, 有必要对碳捕集电厂引入以后电力系统的运行优化进行研究。

文献[29]详细分析了碳捕集电厂的调峰效益, 并将其与电力系统常规调峰手段进行对比, 提出了基于电力系统调峰成本曲线的分析方法, 研究了考虑碳捕集电厂的电力系统最优调峰策略。文献[30]将碳捕集电厂的灵活运行特性应用到备用模型中, 研究了考虑碳捕集电厂的电力系统最优备用, 并通过算例分析了碳捕集电厂带来的系统总运行成本的下降。文献[31]在考虑碳捕集电厂煤耗成本和排放特征的基础上, 以煤耗成本、碳排放量和网损最小作为研究目标, 提出了一种考虑碳捕集电厂的多目标最优潮流模型。文献[32]在碳捕集电厂灵活运行模式的基础上, 将 $CO_2$ 处理与风电弃风相结合, 分析了碳捕集电厂的直接风电消纳能力和间接风电消纳能力, 得到了碳捕集电厂的风电消纳区间。

文献[33-37]就含碳捕集电厂的电力系统机组优化组合与优化调度开展了相关研究。文献[33]提出了一种在碳减排日指标约束下的碳捕集调度策略, 通过厂内减排的机组组合与厂网协调的机组优化出力之间的协调实现碳减排任务。文献[34]在低碳调度模型中同

时考虑碳捕集电厂和风电接入，算例结果表明碳捕集电厂的灵活运行特性可有效促进风电的消纳。文献[35]通过引入碳捕集系统爬坡以及碳捕集效率等约束条件，建立了碳市场环境计及碳捕集电厂和换电站的电力系统优化调度模型。文献[36-37]在碳捕集电厂灵活运行机制的基础上，分析了碳捕集电厂的有功出力特性和碳排放特性，将其纳入低碳调度模型中，较为全面地研究了引入碳捕集电厂的电力系统优化调度问题。文献[38-40]提出了碳捕集技术与电转气技术的联合循环运行系统，可实现CO<sub>2</sub>的循环利用，定义了联合系统的基础运行方式和灵活运行方式，并对对比了2种运行方式的效益。文献[39]的算例结果显示，通过碳捕集与P2G（power-to-gas，电转气）的联合运行可减少40%的弃风并降低20%的碳排放。

上述文献虽然对引入碳捕集电厂的电力系统经济调度、调峰与备用等各方面都有涉及，但对于碳捕集电厂与可再生能源的协调运行关注较少。实际上，碳捕集电厂的灵活运行和快速响应特性，使得其与风电、光伏等间歇性可再生能源的协调运行能力也优于常规的火电厂，可以有效提升电力系统对可再生能源的消纳能力，优化系统的电源结构，促进低碳减排。文献[41-43]研究了碳捕集电厂与风电、光伏、水电的协调调度运行方法，结果表明通过灵活调整碳捕集机组的出力，可以减少储能电池的投资容量、提升可再生能源的利用率，获得明显的减排效益和经济效益。此外，对于碳捕集电厂的现有研究大多停留在静态和定性分析上，对其动态特性的研究相对缺乏，而随着碳捕集电厂的大规模应用，其动态特性将对电力系统的暂态稳定造成影响，需要进一步关注。

## 4 含碳捕集电厂的电力系统优化规划

作为一类关键的低碳技术，碳捕集技术将显著降低火电厂的碳排放。从电力系统规划层面出发，考虑碳捕集技术的影响，将有利于打破传统火电厂的“碳锁定”效应，实现电力系统的低碳发展。除了新建碳捕集电厂外，在碳捕集技术尚未成熟阶段，还可以建设碳捕集预留电厂，然后进一步将其改造成碳捕集电厂<sup>[5]</sup>。

当前关于碳捕集电厂对电力系统电源规划的影响研究主要分为2类。一类是从电厂层面出发，只考虑常规火电厂的碳捕集改造；另一类将碳捕集电厂纳入电源规划环节，同时考虑碳捕集技术的引入对于各类

电源在装机容量和发电特性上的协调，从更为广泛的角度研究含碳捕集电厂的电源规划。本章将从以上2个方面对考虑碳捕集电厂的电源规划相关研究进行综述。

### 4.1 电厂层面的碳捕集改造

碳捕集电厂可以降低火电厂碳排放，带来显著的环境效益。但与此同时，碳捕集设备的运行造成了一定的能量消耗，额外增加了火电厂的发电成本。因此，在对常规火电厂进行碳捕集改造的时候，需要平衡降低碳排放与增加发电成本两者之间的矛盾，依照现实需求实现最优决策。

文献[44]总结并比较了电力行业中各种碳捕集技术的成本，分析了影响成本的重要因素，并对碳捕集过程中的效率损失、能源需求以及资源消耗等进行了量化评估；文献[45]则对中国现有燃煤电厂进行碳捕集改造的潜力进行了评估，分析了改造潜力的主要影响因素，结果表明，中国45%的大型火电厂需要配备碳捕集技术以解除“碳锁定”效应。以上研究侧重于对碳捕集技术的成本和发展潜力的评估，并没有关注火电厂中碳捕集系统优化配置的问题。

文献[46]基于欧洲碳排放交易市场，运用二维二项晶格推导了火电厂实现碳捕集改造的临界碳排放价格，得到了火电厂的最优投资策略。文献[47-48]从火电厂CO<sub>2</sub>排放现状和对碳捕集系统的需求情况出发，考虑发电成本和技术的不相容性，建立了以碳减排量最大化为目标的碳捕集系统优化配置模型。该模型仅以碳减排作为优化目标，必然导致成本急剧增加，在当前情况下并不现实。在上述文献的基础上，文献[49]进一步考虑碳捕集技术发展的阶段性与不确定性，以综合费用最小为目标函数，并考虑了总碳减排约束，实现了不同减排场景下火电厂的碳捕集系统最优配置。

### 4.2 考虑碳捕集电厂的电源优化规划

为了充分发挥碳捕集电厂的低碳效益与灵活运行特性，除了考虑电厂层面的碳捕集改造外，还需要研究碳捕集电厂与其他电源协调规划，引导电力系统在电源规划环节的优化决策。碳捕集电厂的引入，将使传统的电源规划在决策内容上得到极大的补充，提高了模型的规模与复杂度。

文献[50-51]借助实例分析了碳捕集电厂对电源规划问题的影响。文献[52]研究了碳捕集发电厂与间歇式能源大规模并网的能源规划问题，分析了未来的最

佳发电技术组合。文献[53]分析了电力系统低碳化的关键要素，将碳捕集技术纳入传统的电源规划环节，并考虑了碳捕集技术的技术进步率，建立了面向低碳目标的电源规划基本框架。在文献[53]的基础上，文献[54]将火电厂的碳捕集改造作为待选电源加入规划模型中，同时在目标函数中考虑传统火电的改造费用，通过算例结果验证了碳捕集电厂对实现碳减排目标的贡献。文献[53-54]重点关注低碳经济下的电源规划问题，对于碳捕集电厂成本及收益的考虑相对简单。文献[55]应用模糊集、概率分布等方法刻画系统的多重不确定因素，研究了考虑了碳捕集电厂的随机电源规划问题，并验证了碳捕集技术在火电主导的电力系统中的综合效益。该研究的结果表明，碳捕集技术本身存在的一些不确定因素将对其综合效益造成较大影响，而系统面临的强制性减排约束又将有效激励碳捕集技术和可再生能源发电的投资。

以上文献对含碳捕集电厂的电源规划问题进行了初步的探讨，但所建立的模型大多较为简单，尤其是没有全面考虑碳捕集技术的不同配置选项。文献[56]将新建碳捕集电厂、新建碳捕集预留电厂以及碳捕集预留电厂改造为碳捕集电厂同时作为决策变量，在电源规划模型中统一考虑投资决策与运行模拟两个问题。该模型充分考虑了碳捕集技术的不同配置选项和发展路线，较为全面地研究了含碳捕集电厂的电源规划问题。

## 5 碳捕集电厂的投资效益分析

成本问题是目前制约碳捕集技术在电力行业大规模运用的最主要原因之一。首先，碳捕集过程总能耗提高了电厂的运行成本；其次，火电厂烟气排放量大，要求引入大规模的硬件设备以及配套的占地、材料等条件，提高了投资门槛<sup>[5]</sup>。表1给出的不同技术比较中，目前燃烧后捕集技术的投资成本最低、捕集成本最高；燃烧前捕集技术的投资成本最高、捕集成本很低；而富氧燃烧捕集技术的投资成本和捕集成本介于二者之间。文献[57]比较了3种技术的成本，考虑技术学习效应，当总装机容量达到一定规模，3种技术的成本将十分接近。因而，在目前技术和商业模式尚未完全成熟的情况下，有必要对碳捕集电厂的投资效益问题开展分析。

文献[58-59]采用学习曲线的方法对未来碳捕集成本的变化趋势做出了预测，虽然相关成果发表较早，

但是所提出的方法仍具有很强的指导意义。文献[60]以德国为实例，分析了未来的碳捕集技术与可再生能源的发展前景，认为在现有能源政策下没有必要投资碳捕集技术。文献[61]基于传统风险理论、项目管理理论以及碳捕集技术应用项目的特征，对碳捕集应用项目风险评价开展了研究。文献[62-63]也对碳捕集电厂的投资评估进行了研究。然而，上述文献的研究大多基于基准状态下的静态成本效益分析，没有考虑碳捕集电厂的灵活运行，无法真实体现碳捕集电厂的成本效益。

引入碳捕集系统，可以使电厂有效规避碳价波动的影响，锁定投资收益。当碳排放价格处于高位时，电厂可以提高碳捕集水平，通过出售碳排放额度获得高额的碳交易收益；而当碳排放价格处于低位时，可以降低碳捕集水平，以避免支付捕集系统的额外运行成本。因此，引入碳捕集技术相当于为电厂购买了一定额度的碳排放实物期权，如果忽略了这种期权，将低估碳捕集电厂的投资效益<sup>[8]</sup>。

文献[64-66]运用实物期权理论对碳捕集电厂的投资效益进行了研究。文献[64]从短期规划和长期规划两个方面对碳捕集系统的投资问题进行研究，短期规划考虑期权价值，长期规划则以全生命周期的碳减排量作为目标。文献[65]打破了传统的静态成本效益分析方法，将投资效益与电力企业的生产与运行等环节结合起来，考虑投资的实物期权价值，以及各类激励措施的影响，从而建立一个完整的碳捕集投资效益分析框架。在此基础上，文献[66]进一步考虑政府宏观政策的影响，建立了基于实物期权理论的碳捕集系统最佳投资时机决策数学模型，对碳捕集技术进行了动态全面的投资效益分析。

## 6 碳捕集技术大规模推广应用面临的挑战

尽管碳捕集与封存技术被广泛认为是应对气候变化挑战、实现碳排放控制目标的有效手段和解决方案，但是目前取得的只是初步成果，碳捕集技术的大规模推广应用仍然面临着较大的经济和技术挑战。

碳捕集技术无法迅速得到推广的首要原因是高昂的投资和运营成本。燃煤电厂部署碳捕集装置需要增加额外的投资成本，具体成本与采取的捕集技术有关。研究表明，电厂的碳捕集改造将会额外增加约50%~100%的投资成本。此外，碳捕集过程中需要消耗电能，增加了电厂的发电损耗，带来了运营成本上升。

碳捕集技术的另一个问题是CO<sub>2</sub>的长期存储问题。CO<sub>2</sub>的存储需要大量场地，且存储的安全性尚未得到完全的证明。封存CO<sub>2</sub>，一般要求注入距离地面一定深度的地下岩层，使其不易泄漏；也可注入废弃煤层和天然气、石油储层等。存储环节的碳泄露风险普遍存在，如废弃的注水井、毗邻的钻井或未被发现的地震造成的岩层断裂。需要采取相关监控措施，保证存储场地的安全运营，以减少CO<sub>2</sub>的泄露。此外，CO<sub>2</sub>通过管道运输的安全性问题也值得关注<sup>[4]</sup>。

同时，碳捕集技术的发展不可避免地受到市场和政策因素的影响。首先，碳价的高低直接影响到碳捕集技术的投资回收能力。从现有碳交易市场的运行情况看，目前各国主要的碳市场的交易价格都处于较低水平<sup>[67]</sup>。以全球最大的欧盟碳交易市场EU ETS为例，该市场的交易价格虽然在近期有所回升，但也仅为24欧元/t左右。过低的碳价影响了投资者对碳捕集技术的信心，未来需要通过市场与政策机制的完善进一步引导市场合理碳价的形成，增加碳捕集技术的投资效益。

另一方面，全球各国政府对碳捕集技术的态度及政策支持仍然存在较大分歧，也存在诸多不确定性因素。欧盟一直是碳捕集技术的积极推动者，但各成员国针对该技术的态度有所不同，导致欧盟无法制定一项长期稳定的CCS政策。虽然碳捕集技术在英国前期发展比较缓慢，但随着新修订的《气候变化法案》出台，碳捕集技术在英国迎来了发展的春风。2018年11月，英国政府发布了碳捕集技术部署路线图，列出了政府、行业和企业的行动计划。位于英格兰西北部的全球最大碳捕集示范项目将于2021年问世，而“净零排放”的发展目标也使得碳捕集技术有望在英国迎来加速发展。2019年5月，碳捕集联盟（Carbon Capture Coalition）发布了美国国家政策蓝图，明确了未来的政策行动愿景，包括将碳捕集纳入更广泛的国家基础设施，但目前美国的碳捕集技术发展节奏仍然略显平缓。碳捕集技术在中国面临同样的境地，科技部发布了《中国碳捕集利用与封存技术发展路线图（2019版）》<sup>[68]</sup>，提出了中远期发展目标和优先方向，但碳捕集技术的发展仍然任重道远。

此外，目前还没有针对碳捕集技术的有效法律和监管框架，碳捕集项目缺乏统一的准则，这也给碳捕集技术的推广应用带来了额外难题。

在传统碳捕集技术面临发展瓶颈的同时，各国也开始开发新型的碳捕集技术，主要包括碳捕集、利

用与封存技术（carbon capture, utilization and storage, CCUS）和生物质碳捕集技术（bioenergy with CCS, BECCS）。CCUS可以将CO<sub>2</sub>捕集以后直接利用，提升了CO<sub>2</sub>的利用率，同时也减轻了存储的压力。但是，CCUS目前仍然处于示范项目阶段，技术还不成熟，成本也十分昂贵。BECCS通过将生物能源用途与地质碳捕获和储存相结合，产生负CO<sub>2</sub>排放，被认为是达到碳排放控制目标进而实现“碳中和”的关键技术<sup>[4,69-70]</sup>。

## 7 碳捕集电厂在电力系统中的发展新动向

### 7.1 碳捕集电厂的动态控制支撑低惯量电力系统

随着电力系统中以风电、光伏、直流输电为代表的各类电力电子设备的接入，电力系统的惯性明显减弱，系统调频资源应对不平衡功率的能力降低，系统频率稳定受到挑战。相比于常规电厂，碳捕集电厂可以更加灵活地调节净出力，提高二次调频的响应速度，甚至能够结合虚拟同步控制技术，更好地支撑低惯量电力系统的运行。现有研究对于碳捕集电厂运行特性的研究大多集中于稳态，对碳捕集电厂动态特性的关注较少。电厂引入碳捕集系统后，内部结构和运行工况均发生了变化，进而使得其有功出力调节等动态特性与传统火电机组呈现较大区别。未来需要研究包含碳捕集化学过程的碳捕集电厂机电暂态模型，研究其提供惯量的能力、调频能力等动态特性，提升低惯量电力系统的频率稳定性。

### 7.2 碳捕集电厂支撑高比例可再生能源并网

高比例可再生能源并网是未来电力系统的重要发展趋势，将使系统的规划运行方式发生显著变化。风电、光伏等可再生能源具有明显的时空相关性和出力波动性，电力系统呈现出运行方式多样化的特点。碳捕集电厂具备良好的灵活运行特性，有助于解决电力系统灵活性资源稀缺问题。一方面，可以通过灵活调整碳捕集电厂的运行状态，平抑可再生能源的出力间歇性，弱化系统的不确定性；另一方面，相比于常规火电厂，碳捕集电厂有更大的运行区间，带来了良好的调峰、备用和负荷跟踪能力。尽管碳捕集电厂的投资与发电成本高昂，但是与额外建设储能电站、引入虚拟同步等技术手段相比，碳捕集电厂的综合成本仍然非常具有竞争力。未来需要深入研究碳捕集电厂在高比例可再生能源电力系统中的配置和运行方法以发挥其最大效益。

### 7.3 碳捕集电厂支撑净零排放电力系统

气候变化与《巴黎气候变化协定》的签署无疑使得能源系统面临巨大的转型挑战,建设净零排放电力系统成为未来必然的选择。为实现电力系统的净零排放,除了要大力发展可再生能源之外,碳捕集电厂也是重要技术手段。碳捕集电厂既可以像传统火电机组一样提供灵活性支撑作用,又能很大程度降低自身的碳排放,有望在未来电力系统中起到“压舱石”作用。除了常规碳捕集技术,CCUS和BECCS技术也开始得到关注。不同类型的碳捕集技术各有千秋,技术特性也有差别。未来需要综合分析不同碳捕集技术的成本及其效益,研究系统中不同碳捕集技术手段的优化配置组合及发展路线,为净零排放电力系统的建设提供技术储备。

### 7.4 碳捕集电厂参与电力和碳交易联合市场

中国新一轮电力体制改革正在稳步进行,现货市场试点有序推进。全国统一的碳交易市场也已经正式启动。电力市场和碳交易市场的开展,将给碳捕集电厂带来了更大的市场参与空间,有望改变碳捕集电厂由于成本居高不下带来的“叫好不叫座”的尴尬局面。市场环境下,碳捕集电厂可以同时参与电力市场和碳交易市场,根据市场的交易情况合理确定碳捕集水平,与传统火电厂相比具有更大的灵活性,具备更大的利益空间。此外,碳捕集电厂良好的调峰与备用能力可使其充分参与电力辅助服务市场的竞争。因此,需要从电厂利益最大化的角度出发,研究灵活运行机制下碳捕集电厂参与电力市场和碳交易市场的联合竞价策略,这有助于提升碳捕集电厂的投资回报率、加强其竞争优势。

### 7.5 碳捕集电厂助力综合能源系统

综合能源系统实现了多种形式能源在不同时间、空间维度的耦合,提升了系统的灵活性及综合利用效率,具有良好的发展前景。在综合能源系统环境下,一方面碳捕集过程涉及到热量的交换,可以与电厂供热以及制冷系统联合形成综合能源供应,增加了系统运行灵活性。多能集成环境下,需要研究碳捕集电厂与其他灵活性资源(如储热、电转气、电锅炉等)的相互协调与容量优化配置,充分发挥多种设备之间的互补特性,实现电、热、冷的联合最优供应;另一方面,电转气设备的甲烷化过程需要消耗大量CO<sub>2</sub>,通

过碳捕集电厂与电转气设备的联合运行可以实现碳的循环利用,也有助于解决捕集后CO<sub>2</sub>的存储难题。目前已有部分文献对此开展了初步的研究,未来需要对二者联合运行进行深入的探索,包括技术成熟度、经济性、综合运行效益等。

## 8 结语

《巴黎气候变化协定》提出的2 °C和1.5 °C低碳发展目标为全球各国应对气候变化挑战指明了方向。低碳经济发展模式是中国电力行业实现可持续发展的必经之路。碳捕集电厂作为促进电力系统低碳发展的有效手段,已经得到了越来越多的关注,具有良好的发展前景。本文首先介绍了碳捕集电厂的基本原理和发展现状,分析了碳捕集电厂运行机制,然后从含碳捕集电厂的电力系统运行优化、含碳捕集电厂的电力系统优化规划以及碳捕集电厂的投资效益分析等方面出发,对现有的研究进行了归纳总结。最后,结合电力系统的最新发展趋势,对碳捕集电厂的研究新动向进行了展望,希望能为今后的研究提供参考。

在电力系统的运行和规划中考虑碳捕集技术,可提升优化决策的维度,利用碳捕集电厂的低碳效益,有效应对电力行业的碳排放约束。此外,利用碳捕集电厂的运行灵活性,有助于促进系统中间歇性可再生能源的消纳,进一步降低系统排放,显著提升系统的低碳水平。当前碳捕集技术的发展面临多方面挑战,而其中高昂的投资成本是其规模化发展的主要制约因素。作为一种低碳减排的手段,碳捕集技术的成本仍然高于新建可再生能源(可再生能源电能替代)、煤改气等措施。然而,要实现2 °C和1.5 °C的深度减排目标,火电厂的碳捕集改造必不可少。未来需要在技术、市场、政策等各方面共同努力,为促进碳捕集技术的发展、顺利实现全球低碳发展目标提供助力。

## 参考文献

- [1] 康重庆,陈启鑫,夏清. 低碳电力技术的研究展望[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 1-7.  
KANG Chongqing, CHEN Qixin, XIA Qing. Prospects of low-carbon electricity[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 1-7(in Chinese).
- [2] 国务院新闻办公室. 强化应对气候变化行动—中国国家自主贡献[EB/OL]. (2015-11-18) [2020-01-08]. <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/xwfbh/wqfbh/35861/37265/xgzc37271/Document/1603661/1603661.htm>.

- [3] 乌若思, 苏文斌, 郑松. 挑战全球气候变化—二氧化碳捕集与封存[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 1-58.
- [4] IPCC. Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2014.
- [5] 康重庆, 陈启鑫, 夏清. 应用于电力系统的碳捕集技术及其带来的变革[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 1-7.  
KANG Chongqing, CHEN Qixin, XIA Qing. Innovation incurred by carbon capture technologies utilized in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 1-7(in Chinese).
- [6] 张卫东, 张栋, 田克忠. 碳捕集与封存技术的现状与未来[J]. 中外能源, 2009, 14(11): 7-14.  
ZHANG Weidong, ZHANG Dong, TIAN Kezhong. Carbon capture and sequestration technology[J]. Sino-Global Energy, 2009, 14(11): 7-14(in Chinese).
- [7] 田贺永, 王万福, 王任芳, 等. 二氧化碳捕集技术研究[J]. 能源环境保护, 2012, 26(6): 39-41.  
TIAN Heyong, WANG Wanfu, WANG Renfang, et al. Carbon dioxide capture technology research[J]. Energy Environmental Protection, 2012, 26(6): 39-41(in Chinese).
- [8] 陈启鑫. 低碳电力系统的理论与方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [9] 张利军. 中美关于应对气候变化的协商与合作[M]. 北京: 世界知识出版社, 2008: 22-27.
- [10] Commitment on Climate Change UK. Building a low-carbon economy—the UK's contribution to tackling climate change[R/OL]. 2008: 182-187. <https://www.theccc.org.uk/publication/building-a-low-carbon-economy-the-uks-contribution-to-tackling-climate-change-2/>.
- [11] 黄斌, 许世森, 郜时旺, 等. 华能北京热电厂CO<sub>2</sub>捕集工业试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(17): 14-20.  
HUANG Bin, XU Shisen, GAO Shiwang, et al. Industrial test of CO<sub>2</sub> capture in Huaneng Beijing coal-fired power station[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(17): 14-20(in Chinese).
- [12] AKASH A R, RAO A B, CHANDEL M K. Prospects of implementing CO<sub>2</sub> capture and sequestration (CCS) in the proposed supercritical coal power plants in India[J]. Energy Procedia, 2016, 90: 604-612.
- [13] TCVETKOV P, CHEREPOVITSYN A. Prospects of CCS projects implementation in Russia: environmental protection and economic opportunities[J]. Journal of Ecological Engineering, 2016, 17(2): 24-32.
- [14] LUCQUIAUD M, CHALMERS H, GIBBINS J. Potential for flexible operation of pulverised coal power plants with CO<sub>2</sub> capture[J]. Energy Materials: Materials Science and Engineering for Energy Systems, 2007, 2(3): 175-180.
- [15] CHALMERS H. Flexible operation of coal-fired power plants with post-combustion capture of carbon dioxide [D]. Guildford UK: University of Surrey, 2010.
- [16] CHEN Q X, KANG C Q, XIA Q, et al. Optimal flexible operation of a CO<sub>2</sub> capture power plant in a combined energy and carbon emission market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1602-1609.
- [17] 康重庆, 季震, 陈启鑫. 碳捕集电厂灵活运行方法评述与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 1-10.  
KANG Chongqing, JI Zhen, CHEN Qixin. Review and prospects of flexible operation of carbon capture power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 1-10(in Chinese).
- [18] CHALMERS H, LUCQUIAUD M, GIBBINS J, et al. Flexible operation of coal fired power plants with post-combustion capture of carbon dioxide[J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 135(6): 449-458.
- [19] COHEN S M, ROCHELLE G T, WEBBER M E. Optimal operation of flexible post-combustion on CO<sub>2</sub> capture in response to volatile prices[J]. Energy Procedia, 2011, 4: 2604-2611.
- [20] CHEN Q X, KANG C Q, XIA Q. Modeling flexible operation mechanism of CO<sub>2</sub> capture power plant and its effects on power-system operation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(3): 853-861.
- [21] CHALMERS H, GIBBINS J. Potential for system between renewables and carbon capture storage[C]// The 29th IAEE International Conference, Berlin, Germany, 2010.
- [22] KNUDSEN J, VILHELMSEN P, BIEDE O. CASTOR 1 t/h CO<sub>2</sub> absorption pilot plant at the elsam kraft a/s Esbjerg power plant: first year operation experience[C]// Proceedings of the Greenhouse Gas Control Operation Experience, Trondheim, Norway, 2006.
- [23] FERON P, ABU-ZAHRA M, ALIX P. Development of post-combustion capture of CO<sub>2</sub> within the CASTOR Integrated Project: results from the pilot plant operation using MEA[C]// The 3th International Conference on Clean Coal Technologies for Our Future, Sardinia, Italy, 2007.
- [24] 陈启鑫, 季震, 康重庆, 等. 碳捕集电厂不同运行方式的电碳特性分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 109-115.  
CHEN Qixin, JI Zhen, KANG Chongqing, et al. Analysis on relation between power generation and carbon emission of carbon capture power plant in different operation modes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 109-115(in Chinese).
- [25] 周任军, 刘阳升, 成天乐, 等. 考虑碳排放权价格敏感区间的碳捕集水平优化建模[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 46-50.  
ZHOU Renjun, LIU Yangsheng, CHENG Tianle, et al. Carbon capture level optimization modeling considering sensitive internals of carbon emission allowance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 46-50(in Chinese).
- [26] SABOORI H, HEMMATI R. Considering carbon capture and

- storage in electricity generation expansion planning[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1371-1378.
- [27] 张晓辉, 杨磊, 李学平, 等. 基于相对捕集度的碳捕集电厂灵活运行多目标优化决策分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 143-149.  
ZHANG Xiaohui, YANG Lei, LI Xueping, et al. Analysis on relative capture degree based multi-objective optimization decision of flexible operation of carbon capture plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 143-149(in Chinese).
- [28] MARTENS P, DELARUE E, D'HAESELEER W. A mixed integer linear programming model for a pulverized coal plant with post-combustion carbon capture[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 741-751.
- [29] 陈启鑫, 康重庆, 夏清. 碳捕集电厂的运行机制研究与调峰效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 22-28.  
CHEN Qixin, KANG Chongqing, XIA Qing. Operation mechanism and peak-load shaving effects of carbon-capture power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 22-28(in Chinese).
- [30] LOU S H, LU S Y, WU Y W, et al. Optimizing spinning reserve requirement of power system with carbon capture plants[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 1056-1063.
- [31] 马瑞, 曾婷, 陈元新, 等. 考虑碳捕集电厂的电力系统多目标最优潮流及其碳流分析[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(1): 14-21.  
MA Rui, ZENG Ting, CHEN Yuanxin, et al. Analysis of carbon capture power plants-considered multi-objective optimal power flow and carbon flow for power systems[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(1): 14-21(in Chinese).
- [32] 杨磊. 碳捕集电厂灵活运行及其对风电消纳能力研究分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
- [33] 李学平, 卢志刚, 王浩锐, 等. 考虑碳减排日指标约束的碳捕集调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 159-165.  
LI Xueping, LU Zhigang, WANG Haorui, et al. Dispatch strategy for carbon capture considering day index constraints in carbon emission reduction[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 159-165(in Chinese).
- [34] LI J W, ZHAO J Q. Low carbon unit commitment for power system with wind farms and carbon capture devices based on DE-BBO algorithm[C]//International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015), Beijing, China. Institution of Engineering and Technology, 2015.
- [35] 高亚静, 李瑞环, 梁海峰, 等. 碳市场环境下计及碳捕集电厂和换电站的电力系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 150-156.  
GAO Yajing, LI Ruihuan, LIANG Haifeng, et al. Power system optimal dispatch incorporating carbon capture power plant and battery swap station under carbon market environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 150-156(in Chinese).
- [36] LU S Y, LOU S H, YIN X G, et al. Power system economic dispatch under low-carbon economy with carbon capture plants considered[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 7(9): 991-1001.
- [37] JI Z, KANG C Q, CHEN Q X, et al. Low-carbon power system dispatch incorporating carbon capture power plants[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4615-4623.
- [38] 周任军, 肖钧文, 唐夏菲, 等. 电转气消纳新能源与碳捕集电厂碳利用的协调优化[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 61-67.  
ZHOU Renjun, XIAO Junwen, TANG Xiafei, et al. Coordinated optimization of carbon utilization between power-to-gas renewable energy accommodation and carbon capture power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 61-67(in Chinese).
- [39] YANG J W, ZHANG N, CHENG Y H, et al. Modeling the operation mechanism of combined P2G and gas-fired plant with CO<sub>2</sub> recycling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 1111-1121.
- [40] HE L C, LU Z G, ZHANG J F, et al. Low-carbon economic dispatch for electricity and natural gas systems considering carbon capture systems and power-to-gas[J]. Applied Energy, 2018, 224: 357-370.
- [41] 李晖, 马瑞, 曾婷, 等. 含风电与碳捕集电厂的电力系统多目标动态最优潮流[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 30-37.  
LI Xuan, MA Rui, ZENG Ting, et al. Multi-objective dynamic optimal power flow for power system considering wind farm and carbon capture power plant[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 30-37(in Chinese).
- [42] 周任军, 孙洪, 唐夏菲, 等. 双碳量约束下风电-碳捕集虚拟电厂低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1675-1683.  
ZHOU Renjun, SUN Hong, TANG Xiafei, et al. Low-carbon economic dispatch based on virtual power plant made up of carbon capture unit and wind power under double carbon constraint[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1675-1683(in Chinese).
- [43] 孙惠娟, 蒙锦辉, 彭春华. 风-光-水-碳捕集多区域虚拟电厂协调优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 4040-4051.  
SUN Huijuan, MENG Jinhui, PENG Chunhua. Coordinated optimization scheduling of multi-region virtual power plant with wind-power/photovoltaic/hydropower/carbon-capture units[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 4040-4051(in Chinese).
- [44] 胥蕊娜, 陈文颖, 吴宗鑫. 电厂中CO<sub>2</sub>捕集技术的成本及效率[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(9): 1542-1545.

- XU Ruina, CHEN Wenying, WU Zongxin. Cost and performance of power plants with CO<sub>2</sub> capture[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2009, 49(9): 1542-1545(in Chinese).
- [45] LI J, GIBBINS J, COCKERILL T, et al. An assessment of the potential for retrofitting existing coal-fired power plants in China[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 1805-1811.
- [46] ABADIE L M, CHAMORRO J M. European CO<sub>2</sub> prices and carbon capture investments[J]. *Energy Economics*, 2008, 30(6): 2992-3015.
- [47] 卢志刚, 祁艳君, 杨俊强, 等. 碳捕集系统在火电厂中的优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(7): 34-37.  
LU Zhigang, QI Yanjun, YANG Junqiang, et al. Optimal allocation of carbon capture systems in power plants[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(7): 34-37(in Chinese).
- [48] 祁艳君. 碳捕集系统在火电厂中的最优配置研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.
- [49] 卢志刚, 夏明昭, 张晓辉. 基于多阶段减排规划的发电厂碳捕集系统优化配置[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(35): 65-71.  
LU Zhigang, XIA Mingzhao, ZHANG Xiaohui. Carbon capture systems optimal allocation scheme for multi-stage emission reduction planning in power plants[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(35): 65-71(in Chinese).
- [50] 罗金山, 路畅, 孟繁骏. 碳排放及燃煤约束下的电源规划及其效益评价[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(11): 47-52.  
LUO Jinshan, LU Chang, MENG Fanjun. Generation expansion planning and its benefit evaluation considering carbon emission and coal supply constraints[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(11): 47-52(in Chinese).
- [51] ZHANG D J, LIU P, MA L W, et al. A multi-period optimization model for optimal planning of China's power sector with consideration of carbon mitigation: the optimal pathway under uncertain parametric conditions[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2013, 50: 196-206.
- [52] LUDIG S, HALLER M, BAUER N. Tackling long-term climate change together: the case of flexible CCS and fluctuating renewable energy[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 2580-2587.
- [53] 陈启鑫, 康重庆, 夏清, 等. 电力行业低碳化的关键要素分析及其对电源规划的影响[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(15): 18-23.  
CHEN Qixin, KANG Chongqing, XIA Qing, et al. Key low-carbon factors in the evolution of power decarbonisation and their impacts on generation expansion planning[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(15): 18-23(in Chinese).
- [54] CHEN Q X, KANG C Q, XIA Q, et al. Power generation expansion planning model towards low-carbon economy and its application in China[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, 25(2): 1117-1125.
- [55] JIN S W, LI Y P, NIE S, et al. The potential role of carbon capture and storage technology in sustainable electric-power systems under multiple uncertainties[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 467-480.
- [56] 季震, 陈启鑫, 张宁, 等. 含碳捕集电厂的低碳电源规划模型[J]. *电网技术*, 2013, 37(10): 2689-2696.  
JI Zhen, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Low-carbon generation expansion planning model incorporating carbon capture power plant[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(10): 2689-2696(in Chinese).
- [57] 周文戟, 赵方鲜, 朱兵, 等. 考虑技术学习效应的碳捕集系统成本比较[J]. *中国科技论文*, 2012, 7(6): 423-427.  
ZHOU Wenji, ZHAO Fangxian, ZHU Bing, et al. Comparison of cost of CO<sub>2</sub> capture (CC) systems with consideration of technological learning effect[J]. *China Sciencepaper*, 2012, 7(6): 423-427(in Chinese).
- [58] RUBIN E S, YEH S, ANTES M, et al. Use of experience curves to estimate the future cost of power plants with CO<sub>2</sub> capture[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2007, 1(2): 188-197.
- [59] VAN DEN BROEK M, HOEFNAGELS R, RUBIN E, et al. Effects of technological learning on future cost and performance of power plants with CO<sub>2</sub> capture[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, 35(6): 457-480.
- [60] VIEBAHN P, DANIEL V, SAMUEL H. Integrated assessment of carbon capture and storage (CCS) in the German power sector and comparison with the deployment of renewable energies[J]. *Applied Energy*, 2012, 97: 238-248.
- [61] 宣亚雷. 二氧化碳捕获与封存技术应用项目风险评价研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [62] VIEBAHN P, NITSCH J, FISCHEDICK M, et al. Comparison of carbon capture and storage with renewable energy technologies regarding structural, economic, and ecological aspects in Germany[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2007, 1(1): 121-133.
- [63] 李雪静, 乔明. 二氧化碳捕获与封存技术进展及存在的问题分析[J]. *中外能源*, 2008, 13(5): 104-107.  
LI Xuejing, QIAO Ming. Advances and challenges in CO<sub>2</sub> capture & sequestration[J]. *Sino-Global Energy*, 2008, 13(5): 104-107(in Chinese).
- [64] 卢聪颖. 电厂碳捕集系统的投资规划与低碳效益分析研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
- [65] CHEN Q X, KANG C Q, XIA Q, et al. Real option analysis on carbon capture power plants under flexible operation mechanism[C]//IEEE PES General Meeting, Minneapolis, MN. IEEE, July 25-29, 2010.
- [66] 王宗耀, 苏浩益. 基于实物期权理论的碳捕集系统最佳投资时机决策模型[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(17): 137-142.  
WANG Zongyao, SU Haoyi. A decision model for carbon-capture systems best investment opportunity based on real

- option theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 137-142(in Chinese).
- [67] 中国碳交易网. 欧盟碳价回升—全球六大碳市场周报[EB/OL]. (2020-02-17) [2020-02-21]. <http://www.tanjiaoyi.com/article-30450-1.html>.
- [68] 中华人民共和国科技部. 《中国碳捕集利用与封存技术发展路线图(2019版)》在京发布[EB/OL]. (2019-06-19)[2020-02-21]. [http://www.most.gov.cn/kjbgz/201906/t20190619\\_147159.htm](http://www.most.gov.cn/kjbgz/201906/t20190619_147159.htm).
- [69] LU Xi, CAO Liang, WANG Haikun, et al. Gasification of coal and biomass: a net carbon-negative power source for environment-friendly electricity generation in China[J]. Proceedings of National Academy of Science, 2019, 116 (17): 8206-8213.
- [70] 常世彦, 郑丁乾, 付萌. 2 °C/1.5 °C温控目标下生物质能结合碳捕集与封存技术(BECCS)[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 277-287.
- CHANG Shiyan, ZHENG Dingqian, FU Meng. Bioenergy with carbon capture and storage(BECCS) in the pursuit of the 2 °C/1.5 °C target[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 277-287(in Chinese).

收稿日期: 2020-01-24; 修回日期: 2020-02-24。



程耀华

作者简介:

程耀华(1995), 男, 博士研究生, 研究方向为低碳电力技术、多能源系统, E-mail: [chengyh15@mails.tsinghua.edu.cn](mailto:chengyh15@mails.tsinghua.edu.cn)。

杜尔顺(1992), 男, 博士, 研究方向为电力系统规划、光热发电技术、可再生能源等, E-mail: [duershun@tsinghua.edu.cn](mailto:duershun@tsinghua.edu.cn)。

张宁(1985), 男, 副教授, 研究方向为电力系统不确定性分析、多能源系统等。通信作者, E-mail: [ningzhang@tsinghua.edu.cn](mailto:ningzhang@tsinghua.edu.cn)。

康重庆(1969), 男, 教授, 博士生导师, IEEE Fellow, 研究方向为电力系统规划、低碳电力技术、负荷预测、电力经济等, E-mail: [cqkang@tsinghu.edu.cn](mailto:cqkang@tsinghu.edu.cn)。

(责任编辑 李锡)