

[1]王喜平,高哲远.基于实物期权的燃煤电厂 CCUS 投资决策研究[J/OL].洁净煤技术,1-11[2024-11-19].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20230816.1054.002.html.

基于实物期权的燃煤电厂 CCUS 投资决策研究

王喜平, 高哲远

(华北电力大学 经济管理学系, 河北 保定 071000)

摘要: 碳捕集利用与封存 (CCUS) 作为减缓气候变化的一项关键技术, 得到了国际社会的广泛关注。但由于受到技术、成本、政策以及商业模式和公众接受度等诸多因素制约, CCUS 商业化发展仍面临多重挑战。本文从燃煤电厂视角出发, 考虑集“碳捕获-利用-封存”于一体的商业模式下 CCUS 投资决策问题。基于实物期权理论, 构建考虑碳价格不确定性及 CCUS 投资成本递减情况下 CCUS 投资决策模型, 并通过数值仿真求解得到 CO₂ 不同利用率下燃煤电厂 CCUS 投资的期权价值和投资时机。最后, 分析碳价波动率和额外电力配额、电价补贴、投资补贴等不同激励政策对燃煤电厂 CCUS 投资决策的影响, 结果表明: (1) CO₂ 利用率越高越能促进 CCUS 项目的投资, 当 CO₂ 利用率高于 47.27% 时, 燃煤电厂可立即投资; (2) 稳定的碳价有助于促进 CCUS 投资; (3) 电价补贴是最有效的激励政策。上述结论可为燃煤电厂 CCUS 投资决策以及政策制定提供参考。

关键词: CCS; CCUS; 投资决策; 实物期权; 一体化模式

中图分类号: F426

文献标志码: A

CCUS investment decisions and policy incentives for coal-fired power plants: based on different scenarios under an integrated mode

WANG Xiping, GAO Zheyuan

(Department of Economics and Management, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

Abstract: Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) have emerged as a pivotal technology in combating climate change, garnering significant attention worldwide. However, despite its potential, CCUS commercialization faces numerous challenges, including technological advancements, cost-effectiveness, policy frameworks, business models, and public acceptance. With a focus on coal-fired power plants, this study delves into the investment decisions surrounding CCUS under the integrated “carbon capture-utilization-storage” business mode. Drawing upon the real option theory, we formulate an investment decision model that accounts for the uncertainty of carbon prices and the diminishing cost of CCUS ventures. Additionally, we assess the impact of carbon price volatility and various incentive policies such as extra power quota, electricity price subsidy, and investment subsidy on the investment decisions of coal-fired power plants. Our findings highlight several key points: (1) Higher CO₂ utilization rates favor better CCUS investments; (2) Stable carbon prices positively

收稿日期: 2023-5-9 **责任编辑:**

基金项目: 河北省社会科学基金项目(HB19YJ011)

作者简介: 王喜平 (1969), 女, 河北定州人; 华北电力大学经济管理学系教授, 硕士生导师; 研究方向: 能源经济与可持续发展。hdwpxp@126.com

通讯作者: 高哲远 (1997), 男, 河北邯郸人; 华北电力大学经济管理学系硕士研究生; 研究方向: 能源金融。zygod96@163.com

influence CCUS investment promotion; and (3) Electricity price subsidy proves to be the most effective incentive policy. These conclusions can serve as valuable references for both CCUS investment decision-making and policy formulation for coal-fired power plants.

0 引言

为应对日趋严峻的环境气候挑战,中国于2020年9月明确“双碳”目标,即二氧化碳排放力争于2030年达到峰值,努力争取2060年实现碳中和。2021年10月,中共中央、国务院印发的《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》以及《2030年前碳达峰行动方案》相继出台,共同构建了中国碳达峰、碳中和“1+N”政策体系的顶层设计,为“碳达峰”“碳中和”这项重大工作进行系统谋划、总体部署。火电行业是我国碳排放最多的部门,其碳排放量在我国总碳排放量中所占比例高达40%以上,因而也是碳减排的关键领域。考虑我国能源结构偏煤、电力结构重碳的特点短期难有根本改变,未来一段时间内,火力发电仍将承担保障供电和灵活调节的重要作用,在此背景下CCUS为实现化石能源利用的近零排放和电力工业深度脱碳提供了现实选择。根据IEA^[1]评估报告,本世纪末全球温升控制在2℃以内,CCUS需要贡献累计15%的减排量,2070年减排贡献将达到每年104亿t。因此,CCUS技术是全球气候目标实现不可或缺的减排技术组合,到21世纪中叶有潜力实现累积千亿吨级减排效应。此外,全球几乎1/3的化石燃料电厂运行时间还不满十年,大多数化石燃料电厂都不可能于2050年前退役,因此CCUS为现有和规划中的化石燃料电厂的碳排放提供了一个可行的解决方案。CCUS巨大的减排潜力加之能够有效降低巨额资产搁浅风险,这对像中国这样经济发展高度依赖煤炭等化石能源支撑的经济体更具战略意义。然而,CCUS技术目前仍处于起步阶段,发展尚未成熟,仍面临技术、成本、政策以及商业模式和公众接受度等诸多制约因素,尤其目前我国碳交易市场正处于起步阶段,发展还不成熟。这些问题增加了CCUS项目的投资风险,因此科学制定CCUS项目的投资决策对推进CCUS技术发展具有重要意义。

目前对CCUS投资决策的研究从方法上历经了净现值法到实物期权法的演进。净现值法简单直观。Wu等^[2]就借助该方法分析了电厂CCS投资决策问题,并得到了中国PC电站和IGCC电站CCS投资的临界碳价。考虑到传统净现值法本质上属于静态分析,对投资的不确定性、不可逆性和投资时机选

择等方面没有进行充分的考虑,忽略了投资不确定性隐含的期权价值,不能准确评估CCUS的投资价值,为此,实物期权方法逐渐被引入项目投资决策研究。二叉树模型是实物期权领域中应用较为广泛的离散时间下的定价模型,它假设碳价在 Δt 时间内以一定的概率上升或下降,将碳价在投资期内按二叉树展开,并计算得到各个时间点的净现值,然后根据净现值是否大于0来决定是否投资。Abadie等^[3]考虑了碳排放价格和输电价格两个不确定因素,运用二叉树的方法推算项目价值及最佳投资时机。随着研究的不断深入,二叉树模型又进一步衍生出了三叉树模型和四叉树模型,三叉树模型即在碳价上升和下降的概率中增加了碳价持平的概率,而四叉树模型则是假设除碳价随机波动之外又增加了另外一种随机变量,两种随机变量都有上升下降的概率,通过排列组合得到了每一个时点的四种概率,因此建立四叉树模型。Yang等^[4]采用三叉树的实物期权方法,分析了政府补贴(包括初始投资补贴,电价补贴和EOR补贴)对全链CCUS项目投资决策的影响。王喜平等^[5]基于实物期权理论构建了燃煤电站CCS投资决策的四叉树模型,通过算例分析了模型的求解过程,进一步研究了政策补贴对CCS投资决策的影响,并计算出不同政策补贴系数下碳交易价格的投资临界值。Lin等^[6]则进一步考虑将捕获的CO₂进行驱油以提升油田产量,将石油价格、碳价格和技术学习率等不确定因素纳入模型,为相关投资决策和政策制定提供了分析框架。采用蒙特卡洛模拟油价和碳价的变化路径,然后计算决策点的投资期望,并得出各路径上的最大期望值和投资时间,最优投资时间就是所有模拟路径中频率最高的投资时间,通过对所有仿真路径在该时点的投资价值进行平均,可以得到项目的最优投资价值。上述文献丰富了关于CCUS投资决策的研究,然而对模型求解都或多或少存在问题,二叉树法最大的问题在于它不连续,与碳价连续变动的实际情况不符;而蒙特卡洛模拟的缺陷在于计算量大,要想得到较为准确的数值需要进行大量的模拟且准确性难以得到有效保证。随机动态规划法不仅满足碳价连续,而且可以得到模型的显示解。聂鹏飞等^[7]从燃煤电厂的视角构建了动态连续模型,以简洁的数学表达和精准的推导和求解来确定各个时间点的投资决策,为解决碳价连续状态下的CCUS投资决策提供了参考借鉴。本文关注的另一个重点则在于对CO₂

的利用率方面，早期的文献假设燃煤电厂仅仅负责CO₂的捕获即CCS，梁大鹏等^[8]设计了CCS商业化推广系统，并构建了该系统的总体均衡模型，结果表明模型确定的商业规则运行的CCS推广系统存在均衡状态，而电力企业的采集系数和政府补助则成为保持该均衡状态的稳定性的敏感性因素。朱磊等^[9]通过综合考虑CCS面临的诸多不确定因素，将序贯投资决策的实物期权方法与蒙特卡洛模拟相结合，建立了基于偏均衡分析的CCS投资评价模型，并给出为未来CCS项目发展的一些政策建议。由于近些年来能源企业集团化以及各个能源企业交流合作增多，现在的燃煤电厂开始逐渐建立起CO₂捕集、运输、封存、利用的产业链，即CCUS。张贤等^[10]对我国CCUS技术水平、示范进展、成本效益、潜力需求等进行了全面评估，并建议加快构建CCUS技术体系，推进全链条集成示范，加快管网布局和基础设施建设，完善财税激励政策和法律法规体系。刘牧心等^[11]以广东省某燃煤电厂为例，利用净现值法对百万吨级的碳捕集结合二氧化碳提高采收率项目进行经济效益和风险评估，结果显示，在当前油价和碳价均属于较低水平的情况下，缺乏完善商业模式的高附加值项目仍有可能实现盈利。随着全国碳市场的完善和全球经济的复苏对CCUS项目的经济效益会产生积极影响。现在又建立起省略封存环节，将CO₂直接运输利用的产业链即CCU。Liu等^[12]开发了一种新的基于技术学习效应的实物期权的CCU投资决策模型，提出了双因素技术学习曲线方法来预测每个部分的未来成本，并通过该方法验证两种应用的最优投资决策。

综上，本文基于一体化模式的基础上，根据对CO₂利用率的不同，建立考虑碳价不确定性且投资成本递减的、时间连续的、动态的实物期权求解模型，通过数值仿真来计算一体化模式中CCUS的投资价值、最优投资时机。最后我们选取了在考虑碳价波动率的情况下将额外电力配额、电价补贴、投资补贴等几种政策激励纳入投资决策中，并分析各种激励政策对CCUS的影响程度，为燃煤电厂CCUS投资和政府制定相关政策提供参考。

1 问题描述和理论假设

1.1 问题描述

本文研究基于燃煤电厂CCUS一体化模式，见图1。在一体化模式中，燃煤电厂全资建立从碳捕集、运输、储存和利用的子公司，负责对燃煤电厂CCUS的初始投资改造，并承担其运营成本，建立集捕碳—运输—封存—利用于一体的供应链。其中CO₂的利用目前主要是用于将CO₂运输至油田进行CO₂驱油以提高原油开采率，即CCUS-EOR。对CO₂的封存是将CO₂运输至封存点进行封存。根据使用和封存的比例不同，将一体化模式分为CCUS和CCS两种基础情景，CCS即是对CO₂全部封存，利用率为0的情景；在CCUS中，则假定利用率 $\omega=20\%$ 的情景。因为该全资子公司负责全部环节，因此获得安装CCUS设备所获得的清洁电价补贴，碳排放权交易所获得的收入，将CO₂进行封存的储存补贴，以及将CO₂利用进行驱油的原油收入（根据已有文献可得到EOR的转换率为1）。所需的支出为投资成本、运输成本、储存成本以及驱油成本。

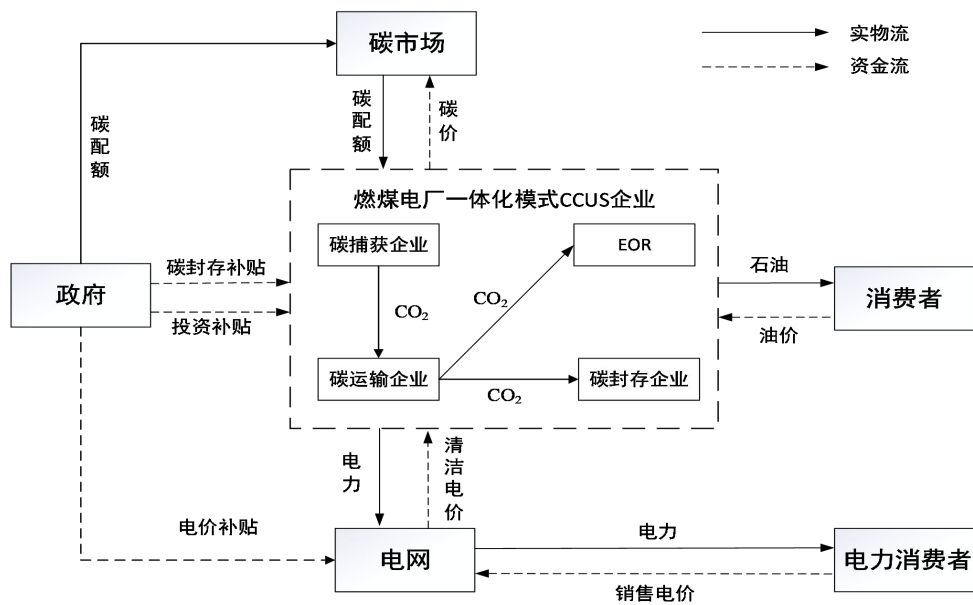


图1 CCUS流程图

Fig.1 Integration mode

1.2 理论假设

1.2.1 碳排放权交易收益

假设碳排放权价格 $p(t)$ 服从几何布朗运动:

$$dp(t) = \mu p(t)dt + \sigma p(t)dz, p(0) = p_0$$

* MERGEFORMAT (1)

式中: μ 为碳交易价格的瞬时期望增长率, 且 $0 \leq \mu < r$ (r 为无风险利率); σ 为波动率; p_0 为初始碳价; dz 为标准维纳过程增量, 服从均值为 0、标准差为 1 的正态分布。

1.2.2 CCUS 改造投资成本

设 I 燃煤电厂加装改造 CCUS 装置的成本, 且为一次性投资。考虑到科学技术的进步, CCUS 装置的投资成本会随着时间的推移递减, 即满足学习曲线效应:

$$I_t = I_0 e^{-it}$$

$$\begin{aligned} V(p(t)) &= E \left(\int_t^\infty (p_e q_e + p(f) q_c + p_s \cdot (1-\omega) q_c + p_o \cdot \omega q_c) e^{-r(f-t)} df \right) \\ &= E \left(\int_t^\infty (p_e q_e + p_s \cdot (1-\omega) q_c + p_o \cdot \omega q_c) e^{-r(f-t)} df + \int_t^\infty p(f) q_c e^{-r(f-t)} df \right) \\ &= \frac{p_e q_e + p_s \cdot (1-\omega) q_c + p_o \cdot \omega q_c}{r} + \frac{p(t) q_c}{r - \mu} \end{aligned}$$

* MERGEFORMAT (3)

式中: r 为贴现率, 设电厂的年发电量为 $q_e = N \cdot \zeta \cdot \phi \cdot (1-\nu)$, 其中 N 为装机容量, ζ 为发电小时数, ϕ 为容量因子, ν 为系统效率损失。 $p_e \cdot q_e$ 为电价补贴, 其中电价补贴价格为 p_e 。

q_c 为每年加装 CCUS 的燃煤电厂捕集到的 CO_2 量, $q_c = q_e \cdot \varepsilon \cdot \eta$, 其中 q_e 为电厂年发电量, ε 为 CO_2 排放强度, η 为 CO_2 的捕集率。则 $p(t) q_c$ 为出售碳排

$$\begin{aligned} \pi(t) &= E \left(V(p(t)) - (1-\theta) I(t) e^{-rt} - \int_t^\infty (u_t q_c + u_s \cdot (1-\omega) q_c + u_o \cdot \omega q_c) e^{-r(f-t)} df \right) \\ &= E \left(V(p(t)) + \int_t^\infty (1-\theta) (I'(t) - rI(t)) e^{-r(f-t)} df - \int_t^\infty (u_t q_c + u_s \cdot (1-\omega) q_c + u_o \cdot \omega q_c) e^{-r(f-t)} df \right) \\ &= \frac{p_e q_e + p_s \cdot (1-\omega) q_c + p_o \cdot \omega q_c}{r} + \frac{q_c p(t)}{r - \mu} - \frac{u_t q_c + u_s \cdot (1-\omega) q_c + u_o \cdot \omega q_c}{r} + \frac{(1-\theta) (I'(t) - rI(t))}{r} \end{aligned}$$

* MERGEFORMAT (4)

其中: u_t 、 u_s 、 u_o 分别为单位 CO_2 的运输、封存和驱油成本, 则 $u_t \cdot q_c$ 、 $u_s \cdot (1-\omega) \cdot q_c$ 、 $u_o \cdot \omega \cdot q_c$ 分别为运输成本、封存成本和驱油成本; θ 为政府对燃煤电厂 CCUS 投资的补贴系数。

2.1.2 最优投资时机分析

燃煤电厂的 CCUS 投资可视为一个时间连续的美式看涨期权, 假设 CCUS 的投资决策可以无限期

* MERGEFORMAT (2)

i 反应技术进步对投资成本的影响。

2 模型构建

2.1 CCUS 投资模型

2.1.1 基本模型

由于 CCUS 项目一体化模式燃煤电厂负责碳捕集、运输、封存和利用所有环节, 故燃煤电厂负责所有环节上的所有收益和成本。收益不仅为一些出售收益, 同时也包括政府的减免补贴: 清洁电价补贴和投资补贴。清洁电价补贴即为政府对发电企业采用清洁技术发电的一种补贴政策; 投资补贴是指政府为激励企业进行 CCUS 项目投资而给予的投资补贴。

将燃煤电厂 CCUS 投资产生的现金流贴现, 得到 t 时刻的投资收益 $V(p(t))$:

放权收益。设 ω 为 CO_2 的利用率, 则 $(1-\omega)$ 为 CO_2 的封存率。 $p_s \cdot (1-\omega) \cdot q_c$ 为封存补贴, 其中 p_s 为单位 CO_2 封存补贴。 $p_o \cdot \omega q_c$ 为驱油所增加的原油收入, 其中 p_o 为原油收入价格。

接着, 得出 CCUS 投资在任意 t 时刻的净现值函数 $\pi(t)$ 为:

的延迟, 在此期间燃煤电厂可以根据实际情况来选择是否延迟投资。 $F(p(t))$ 为 CCUS 投资期权价值, 其应满足 Bellman 方程, 即 $rF(p(t))dt = E(dF(p(t)))$ 。

根据伊藤引理:

$$dF(p) = F'(p)dp + \frac{1}{2} F''(p)(dp)^2$$

* MERGEFORMAT (5)

可得到 $F(p(t))$ 满足以下微分方程：

$$\mu \cdot p(t) \cdot F'(p) + \frac{1}{2} \sigma^2 \cdot p(t)^2 \cdot F''(p) - rF(p) = 0$$

* MERGEFORMAT (6)

此微分方程是一个二阶齐次线性方程，设其通解

$F(p) = Ap^\alpha$ ，则可得到：

$$r = \alpha\mu + \frac{1}{2} \alpha(\alpha-1)\sigma^2$$

* MERGEFORMAT (7)

其中：待定系数 α 满足：

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{1}{2} - \frac{\mu}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{\mu}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} \\ \alpha_2 = \frac{1}{2} - \frac{\mu}{\sigma^2} - \sqrt{\left(\frac{\mu}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} \end{cases}$$

$$p_T = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 - 1} \cdot \frac{r - \mu}{q_c} \cdot \frac{(1 - \theta)(rI(t) - I'(t)) + u_t q_c + u_s \cdot (1 - \omega) q_c + u_o \cdot \omega q_c - p_s \cdot (1 - \omega) q_c - p_o \cdot \omega q_c - p_e q_e}{r}$$

* MERGEFORMAT (11)

CCUS 投资期权价值为：

$$F(p(T_1)) = \frac{p_e q_e + p_s \cdot (1 - \omega) q_c + p_o \cdot \omega q_c}{r} + \frac{p(T_1) q_c}{r - \mu} - \frac{u_t q_c + u_s \cdot (1 - \omega) q_c + u_o \cdot \omega q_c}{r} + \frac{(1 - \theta)(I'(T_1) - rI(T_1))}{r}$$

* MERGEFORMAT (12)

假设在 T 时刻碳排放权价格为初次达到临界碳价 p_T ，最优投资时机为：

$$T_1 = \inf(t \geq 0 | p(t) > p_T)$$

* MERGEFORMAT (13)

即 $p(t)$ 初次达到临界碳价的时刻。

2.2 CCS 投资模型

$$p_T = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 - 1} \cdot \frac{r - \mu}{q_c} \cdot \frac{(1 - \theta)(rI(t) - I'(t)) + u_t q_c + u_s q_c - p_s q_c - p_e q_e}{r}$$

* MERGEFORMAT (14)

$$F(p(T_2)) = \frac{p_e q_e + p_s q_c}{r} + \frac{p(T_2) q_c}{r - \mu} - \frac{u_t q_c + u_s q_c}{r} + \frac{(1 - \theta)(I'(T_2) - rI(T_2))}{r}$$

* MERGEFORMAT (15)

最优投资时机为：

$$T_2 = \inf(t \geq 0 | p(t) > p_T)$$

* MERGEFORMAT (16)

即 $p(t)$ 初次达到最优投资门槛的时刻。

3 算例分析

* MERGEFORMAT (8)

取 $\alpha_1 > 1$ 。

投资机会价值满足以下边界条件：

$$\frac{dF}{dp}(p_T) = \frac{d\pi}{dp}(p_T)$$

* MERGEFORMAT (9)

$$F(p_T) = \pi(p_T)$$

* MERGEFORMAT (10)

解得碳排放权交易的边界价格，即临界碳价为：

CCS 是将 CO₂ 全部封存，即 CO₂ 利用率为 0 的情景，将 $\omega=0$ 带入，故 CCS 不存在原油收入和驱油成本，并将所有捕获的 CO₂ 进行封存。收益为电价补贴、储存补贴、出售碳排放权收益，成本为投资成本、运营成本、储存成本以及运输成本。

故得到最优投资门槛和 CCUS 投资期权价值分别为：

为直观的为 CCUS 项目提供投资决策建议和政策分析。我们运用 Matlab 对 CCUS 投资决策进行求解、分析。首先求出 CCUS 临界碳价和最优投资时机，并引入一些激励政策对最优投资门槛造成的影响进行分析，模型中的各参数的设定如表所示

表 1 相关参数设定

Table 1 Parameter setting of CCUS investment decisions in coal-fired power plants

参数符号	参数 (单位)	参数值
N	装机容量 (MW)	600 ^[13]
ζ	发电小时数 (h)	5400 ^[13]
ν	系统效率损失 (%)	17.9 ^[5]
ϕ	容量因子	0.8 ^[14]
I_0	装置建设成本 (元)	$1.859.55 \times 10^6$ ^[13]
μ	碳价漂移率	0.035 ^[13]
θ	碳价波动率	0.14 ^[15]
ε	CO ₂ 排放率 (t/kWh)	762×10^{-6} ^[15]
η	碳捕获率 (%)	90 ^[13]
ω	碳利用率 (%)	20 ^[14]
p_e	售电补贴价格 (元/kWh)	0.015 ^[14]
i	技术进步对投资成本的影响因子	0.0202 ^[13]
p_i	CO ₂ 销售价格 (元/吨)	300 ^[14]
p_s	CO ₂ 储存补贴价格 (元/吨)	30 ^[14]
p_o	原油价格 (元/桶)	425 ^[14]
u_o	驱油成本 (元/吨)	88.5 ^[14]
r	无风险利率 (%)	6 ^[13]
q_c	核准减排量 (吨)	1459404.3 ^[14]
u_s	CO ₂ 封存成本 (元/吨)	50 ^[14]
u_t	CO ₂ 运输成本 (元/吨)	100 ^[14]
P_0	初始碳价 (元/吨)	26.89

3.1 CCUS 中使用率与临界碳价

图 2 展示了在不同的 CO₂ 使用率下零时刻立即投资所需的碳价和初始碳价的关系，实线代表着在不同的 CO₂ 使用率下零时刻立即投资所需的碳价，虚线代表着初始碳价，两条线在 $\omega=47.27\%$ 时交会，这意味着当 CO₂ 使用率小于 47.27% 时需要延迟投资，当 CO₂ 使用率大于 47.27% 时可以立即投资。图 3，图 4 展示了不同 CO₂ 利用率情况下临界碳价和投资时机的关系，结果表明，随着 CO₂ 利用比率升高，CCUS 所需的临界碳价降低，最优投资时机缩短，即 CO₂ 利用率越高会促进 CCUS 的投资。

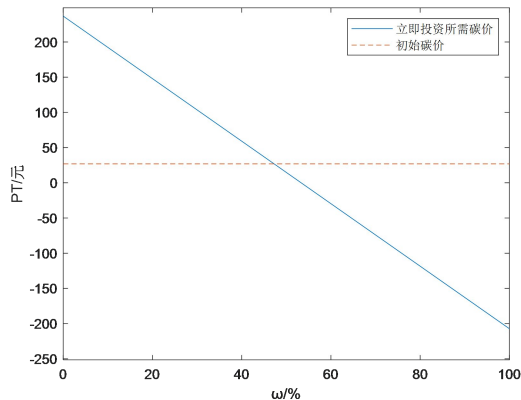


图 2 立即投资所需碳价

Fig.2 Carbon price required for immediate investment

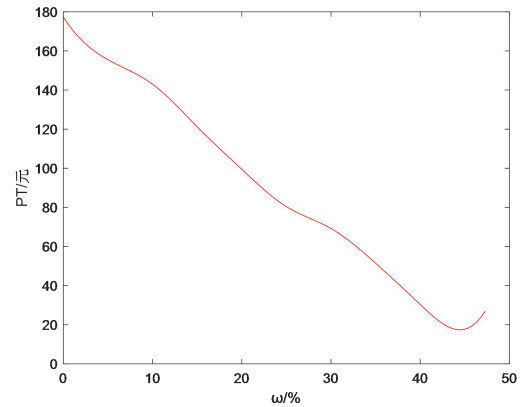


图 3 不同 CO₂ 利用率下的临界碳价

Fig.3 Critical carbon price under different CO₂ utilization rates

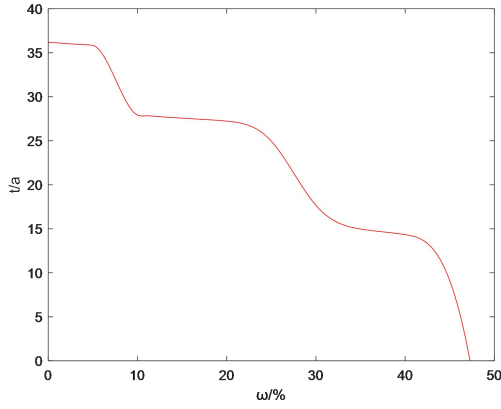


图4 不同 CO₂ 利用率下的投资时机

Fig.4 Investment timing under different CO₂ utilization rates

3.2 CCUS 临界碳价与执行时间

首先，我们模拟一条碳价走势。为了进一步比较 CCUS 对政策效果反应，设 CCUS 中 CO₂ 的使用率为 20%，当临界碳价首次达到 $p(t) > p_T$ 时，燃煤电厂需做出立即投资的决定，具体模拟如图 5 所示。

通过模拟得到 $T_1 = 27.23$ 年， $p_{T_1} = 99.49$ 元/t。若在

2030 年碳达峰之前进行投资，这时需要满足的临界碳价为 129.30 元/t，若在 2060 年碳中和之前进行投资，则需要满足的临界碳价为 85.72 元/t。

3.3 CCS 临界碳价与执行时间

当 CO₂ 的使用率为 0 时，我们模拟出 CCS 的临界碳价和最优投资时机如图 6 所示。通过模拟得到 $T_2 = 36.21$ 年， $p_{T_2} = 177.34$ 元/t。CCS 在碳达峰和碳中和之前投资所需的临界碳价为 218.10 元/t 和 174.52 元/t。

3.4 碳价波动率对临界碳价的影响

在研究碳价波动率对临界碳价的影响时，我们仅对碳价进行变动。通过模拟，得到碳价波动率与临界碳价的关系如图 7 所示。图 7 表明了碳价波动率与临界碳价为正相关关系，即碳价波动率越高，CCS 与 CCUS 的临界碳价越高。通过图像，我们可以看到碳价波动率对临界碳价的影响为凹函数，当碳价波动率越大时，单位碳价波动率的变动导致临界碳价的增长就越快。当碳价波动率增加到 0.25 时，CCUS 与 CCS 的临界碳价增长都为 31.92%，碳价波动率对两者的影响相同。碳价波动率越高，燃煤电厂投资 CCUS 项目收益的不确定性就越大，故其需要更高的临界碳价来保证燃煤电厂的预期收益。可以看出，一个稳定的碳价波动率可以促进 CCUS 的投资。

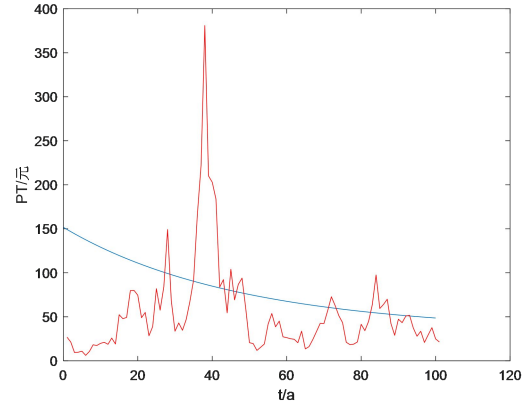


图5 CCUS 投资时机与临界碳价

Fig.5 CCUS investment timing and critical carbon price

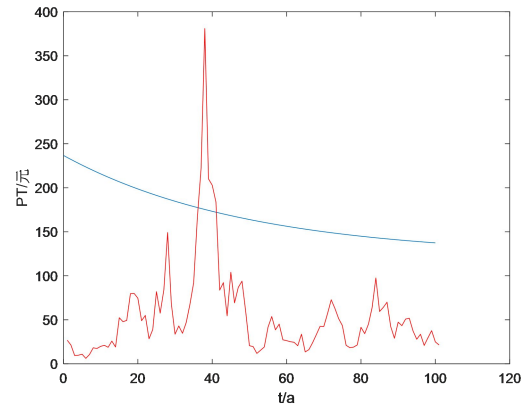


图6 CCS 投资时机与临界碳价

Fig.6 CCS investment timing and critical carbon price

3.5 额外电力配额对临界碳价的影响

额外电力配额的增加意味着发电小时数的增加，我们假设燃煤电厂 CCUS 系统 CO₂ 年碳捕获量 $q_c = N \cdot \zeta \cdot \varepsilon \cdot \eta$ ，其中 N 为燃煤电厂装机容量； ζ 为燃煤电厂年发电小时数。额外电力配额的增加也就意味着 CO₂ 的捕集量的增加。CCUS 情景下变动见式(18)，这意味着当额外电力配额增加时碳排放交易边界价格是下降的；在 CCS 情景下，变动值见式(19)，且也随着额外电力配额增加时碳排放交易边界价格是下降的。

对投资期权价格函数来说，在 CCUS 情景下，随着额外电力配额的增加，期权投资价值也增加，随着额外电力配额的增加，期权投资价值也增加，增加的值见式(19)。在 CCS 情景下，随着额外电力配额的增加，期权投资价值也增加，增加的值见式(20)。两者差值如式(21)所示。

在仅变动额外电力配额的情况下，得到额外电力配额与临界碳价的关系如图 8 所示。图 8 表明额外电力配额与临界存在负相关关系，这意味着额外电力配额越高，CCUS 和 CCS 的临界碳价越低。在

CCUS 和 CCS 中，当电力配额增加 10%时，临界碳价分别降低 6.04%和 2.83%；当额电力配额由 10% 进一步增加到 20%时，两者临界碳价分别降低 5.35%和 2.43%；由于该函数为凹函数，故随着电力

配额的增加，临界碳价降低的速率逐渐放缓。这表明电厂发增加发电，会促进燃煤电厂对 CCUS 项目的投资，且相较于 CCS，增加额外电力配额政策对 CCUS 的促进效果更佳明显。

$$\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_1-1} \cdot \frac{r-\mu}{(1+k)q_c} - \frac{\alpha_1}{\alpha_1-1} \cdot \frac{r-\mu}{q_c}\right) \cdot (1-\theta)(rI(T_1) - I'(T_1)) \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (17)}$$

$$\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_1-1} \cdot \frac{r-\mu}{(1+k)q_c} - \frac{\alpha_1}{\alpha_1-1} \cdot \frac{r-\mu}{q_c}\right) \cdot (1-\theta)(rI(T_2) - I'(T_2)) \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (18)}$$

$$k \cdot \left(\frac{p_e q_e + p_s \cdot (1-\omega)q_c + p_o \cdot \omega q_c}{r} + \frac{p(T_1)q_c}{r-\mu} - \frac{u_t q_c + u_s \cdot (1-\omega)q_c + u_o \cdot \omega q_c}{r}\right) \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (19)}$$

$$k \cdot \left(\frac{p_e q_e + p_s q_c}{r} + \frac{p(T_2)q_c}{r-\mu} - \frac{u_t q_c + u_s q_c}{r}\right) \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (20)}$$

$$k \cdot \left(\frac{p_o \cdot \omega q_c - p_s \cdot \omega q_c}{r} + \frac{p(T_1)}{r-\mu} - \frac{p(T_2)}{r-\mu} - \frac{u_o \cdot \omega q_c - u_s \cdot \omega q_c}{r}\right) \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (21)}$$

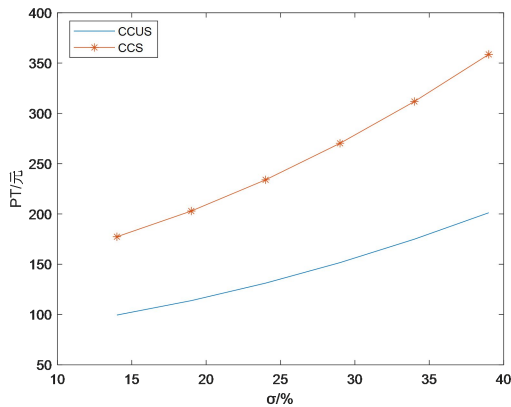


图 7 碳价波动率与临界碳价的关系

Fig.7 The relationship between carbon price volatility and critical carbon price

3.6 电价补贴对临界碳价的影响

决定是否投资和电价补贴政策有着很大的关系。在 CCUS 和 CCS 情景下，电价补贴政策对临界碳价的影响同为 $\frac{\alpha_1}{\alpha_1-1} \frac{r-\mu}{q_c} \frac{(-q_e)}{r}$ 。在其他条件均

不变时，当政府提高对 CCUS 的电价补贴，投资所需的临界碳价将会减小，且 CCUS 与 CCS 减小的值同为 $\frac{\alpha_1}{\alpha_1-1} \frac{r-\mu}{q_c} \frac{-q_e}{r} \Delta p_e$ 。

对投资期权价格函数来说，在 CCSU 情景下和 CCS 情景下相同，电价补贴政策每变动 Δp_e ，期权

投资价值增加 $\Delta p_e \cdot \frac{q_e}{r}$ 。

假定不增加额外电力配额，我们可以得到电价补贴政策与临界碳价的关系如图 9 所示。图 9 表明其他条件相同的情况下，电价补贴与临界碳价存在负相关关系，即电价补贴越高，CCUS 临界碳价越低。当电价补贴分别由 0.015 元/(kW·h)上涨到 0.02 元/(kW·h)时和由 0.02 元/(kW·h)上涨到 0.025 元/(kW·h)时，CCUS 和 CCS 的临界碳价分别降低 9.13%、5.12%和 10.04%、5.40%。且电价补贴对临界碳价的影响为凸函数，即随着电价补贴的增加，单位电价补贴的变动导致的临界碳价的减少就越快，这表明，当碳价较低时，增加电价补贴的政策效果会更有效。结果表明，政府增加对燃煤电厂的清洁电价补贴会有效的促进燃煤电厂进行 CCUS 项目的投资，且该政策对 CCUS 的效果更加显著。

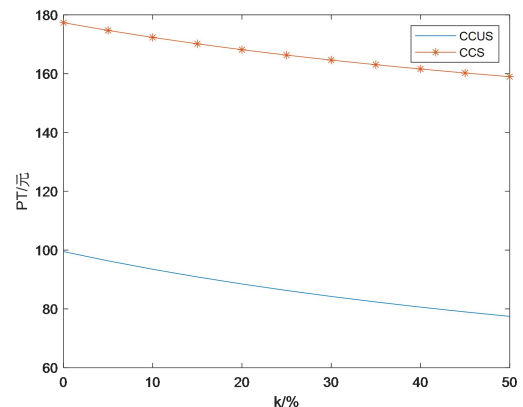


图 8 额外电力配额与临界碳价的关系

Fig.8 The relationship between additional electricity quotas and critical carbon price

3.7 投资补贴对临界碳价的影响

由于一体化模式是由燃煤电厂全资进行的 CCUS 改造项目, 由于 CCUS 项目的设备加装改造的初始投资额巨大, 燃煤电厂难以负担, 政府为了鼓励燃煤电厂 CCUS 项目的投资, 故将会给予燃煤电厂投资补贴。设政府的投资补贴系数为 θ , 则燃煤电厂需支付的初始投资为 $(1-\theta) \cdot I(t)$

在 CCUS 和 CCS 情景下, 投资补贴政策对临界碳价的影响分别为 $\frac{\alpha_1}{\alpha_1-1} \frac{r-\mu}{q_c} \frac{rI(T_1)-I'(T_1)}{r}$ 和

$\frac{\alpha_1}{\alpha_1-1} \frac{r-\mu}{q_c} \frac{rI(T_2)-I'(T_2)}{r}$ 。当政府投资补贴系数每

增加 $\Delta\theta$ 时, 两者的临界碳价减少的值分别为式 (22) 和式 (23) 所示。对投资期权价格函数来说, 在 CCUS 和 CCS 情景下, 投资补贴政策的变动的的影响分别为 $\frac{I'(T_1)-rI(T_1)}{r}$ 和 $\frac{I'(T_2)-rI(T_2)}{r}$, 这表明随着政府加大对燃煤电厂投资补贴的力度, CCUS 和 CCS 的期权投资价值是增加的。

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_1-1} \frac{r-\mu}{q_c} \frac{rI(T_1)-I'(T_1)}{r} (-\Delta\theta)$$

* MERGEFORMAT (22)

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_1-1} \frac{r-\mu}{q_c} \frac{rI(T_2)-I'(T_2)}{r} (-\Delta\theta)$$

* MERGEFORMAT (23)

在其它条件不变的情况下, 投资补贴政策与临界碳价的关系如图 10 所示。图 10 表明了投资补贴与临界碳价呈负相关关系, 即临界碳价随着政府加大对燃煤电厂 CCUS 项目的投资补贴而降低。在 CCUS 和 CCS 情景下, 投资补贴系数从 0.1 涨到 0.2 时, 临界碳价分别降低 7.38% 和 3.46%, 投资补贴从 0.2 涨到 0.3 时, 两者临界碳价分别降低 7.97% 和 3.57%; 这表明政府加大对 CCUS 项目的投资补贴力度会促进燃煤电厂对 CCUS 项目的投资改造, 且政府的投资补贴力度越大, 对 CCUS 投资的促进越明显。该政策变动同样对 CCUS 情景最明显。且两者皆为凸函数, 即投资补贴越大时, 对临界碳价的作用越明显。

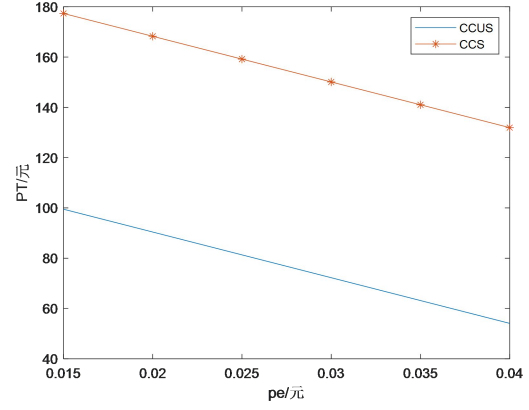


图 9 电价补贴与临界碳价的关系

Fig.9 The relationship between electricity price subsidy and critical carbon price

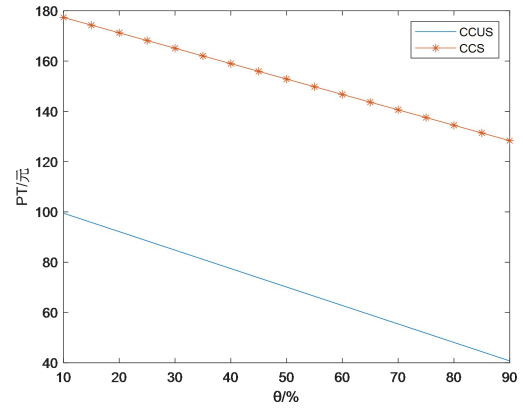


图 10 投资补贴与临界碳价的关系

Fig.10 The relationship between investment subsidy and critical carbon price

3.8 综合分析

从临界碳价和投资时机的角度出发, 随着 CO_2 使用率的提高, 临界碳价降低, 投资时机提前。对于不同的政策变动, 高的 CO_2 使用率会时政策效果更加明显。从不同的激励政策角度出发, 额外电力配额政策与临界碳价之间的关系呈现为凹函数, 即当碳价较高时, 使用增加额外电力配额的政策会引起临界碳价较大幅度的变动, 所以这时增加额外电力配额更加有效。而电价补贴和投资补贴政策与临界碳价间的关系都呈现为凸函数, 当碳价较低时, 单位政策的变动会引起临界碳价较大幅度的变动, 所以这时使用这两种政策会更加有效。但电价补贴政策是三种政策中效果较好的激励政策。同时, 结果表明无论何种情况, 完善碳交易市场, 保持碳排放权交易价格的稳定一定会促进燃煤电厂进行 CCUS 项目的投资。

4. 结论与建议

本文基于实物期权理论，考虑碳价不确定性以及科学技术进步下成本的递减，同时将额外电力配额、电价补贴和投资补贴等三种政策影响因素纳入到燃煤电厂 CCUS 和 CCS 的投资决策中。并通过 Matlab 模拟出不同情景下 CCUS 项目的投资价值和临界价格，并对不同 CO₂ 使用率下的投资价值和临界价格进行了比较分析，然后对不同的政策变动对临界碳价和期权投资价值进行了对比分析，希望能为电厂在 CCUS 商业模式和投资决策过程中提供参考。

(1) 在 CCUS 投资决策中，CO₂ 使用率会影响到企业的投资决策，使用率越高，投资时机越早，当使用率达到 47.27% 时，企业可以立即投资，无需延迟投资。在做投资决策过程中，燃煤电厂应合理考虑 CO₂ 的使用和封存比率，找到 CO₂ 充分利用与投资收益最大化的平衡点。

(2) 碳价波动率与临界碳价呈正相关关系，即碳价波动率越高，两种情景的临界碳价越高，这就意味着维持碳价的稳定有利于促进 CCUS 项目的投资。当前全国碳交易市场的建设还处于起步阶段，碳价格受政策、能源价格、供需关系等因素的影响波动较为剧烈。为充分发挥碳交易市场对 CCUS 的推动作用，维持碳价格的稳定，应加快完善碳交易市场。

(3) 从三种政策变动对 CCUS 投资的影响力来看，电价补贴是相对有效的政策激励，额外电力配额和投资补贴促进效果则相对较弱。且 CO₂ 的利用率越高，对 CCUS 项目投资的影响越明显。由于 CCUS 项目的投资十分巨大，CCUS 项目的发展与政府在政策和资金上提供的大力支持密不可分。政府应制定科学合理的政策来推动 CCUS 的发展，同时为 CCUS 大规模的商业化部署提供良好的环境和基本的保障。

最后，由于已有的 CCUS 项目尚未完善，相关数据较为缺乏，因此本文仍有一定的局限性。此外 CCUS 的商业模式也不仅仅局限于本文讨论的一体化模式，有更多的商业模式有待研究。同时实际情况远比文中假设更加复杂，例如：原油价格也同碳价一样是一个不确定性的因素等，这些问题还有待研究，在接下来的研究中将会做进一步探讨。

参考文献(References) :

[1]International Energy Agency. The role of CCUS in low-carbon power

systems[R].Paris:IEA,2020.

[2]WU N, JOHN E P, KAREN R P. The impact of future carbon prices on CCS investment for power generation in China[J]. Energy Policy, 2013 , 54(3): 160-172.

[3]ABADIE L M, CHAMORRO J M. European CO₂ prices and carbon capture investments[J]. Energy Economics, 2008, 30(6): 2992-3015.

[4]YANG L, XU M, YANG Y, et al. Comparison of subsidy schemes for carbon capture utilization and storage (CCUS) investment based on real option approach: Evidence from China[J]. Applied Energy, 2019, 255: 113828

[5]王喜平, 杜蕾. 基于实物期权的燃煤电站 CCS 投资决策研究[J]. 中国电力, 2015, 48(7): 101-107.

WANG Xiping, DU Lei. Study on CCS investment decision-making based on real options for coal-fired power plant[J]. Electric Power, 2015, 48(7): 101-107.

[6]Boqiang Lin,Zhizhou Tan. How much impact will low oil price and carbon trading mechanism have on the value of carbon capture utilization and storage (CCUS) project? Analysis based on real option method[J].Journal of Cleaner Production,2021,298.

[7]聂鹏飞, 高哲远, 王喜平. 不同商业模式下燃煤电厂 CCUS 投资决策研究[J]. 热力发电, 2023, 52(4): 63-71.

NIE Pengfei, GAO Zheyuan, WANG Xiping. Research on CCUS investment decision of coal-fired power plant under different business modes[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(4): 63-71.

[8]梁大鹏,徐春林,马东海.基于系统动力学 CCS 产业化模型及稳态研究[J]. 管理工程学报,2012,15(7):37-49.

LIANG Dapeng, XU Chunlin, MA Haidong. The research on the model and stability of CCS based on the system dynamics[J]. Journal of Management Sciences in China, 2012,15(7):37-49.

[9]朱磊,范英. 中国燃煤电厂 CCS 改造投资建模和补贴政策评价[J]. 中国人口·资源环境,2014,24(7):99-105.

ZHU Lei, FAN Ying. Modeling the Investment of Coal-fired Power Plant Retrofit with CCS and Subsidy Policy Assessment[J]. China Population, Resources and Environment, 2014,24(7):99-105.

[10]张贤,李阳,马乔,等.我国碳捕集利用与封存技术发展研究[J].中国工程科学,2021,23(6):70-80.

ZHANG Xian, LI Yang, MA Qiao, et al. Development of Carbon Capture, Utilization and Storage Technology in China[J]. Strategic Study of CAE, 021,23(6):70-80.

[11]刘牧心,梁希,林千果. 碳中和背景下中国碳捕集、利用与封存项目经济效益和风险评估研究[J]. 热力发电, 2021, 50(9): 18-26.

LIU Muxin, LIANG Xi, LIN Qianguo. Economic analysis and risk assessment for carbon capture, utilization and storage project under the background of carbon neutrality in China [J]. Thermal Power Generation,

2021, 50(9): 18-26.

[12]Jiangfeng Liu, Qi Zhang,Hailong Li,et al.Investment decision on carbon capture and utilization (CCU) technologies—A real option model based on technology learning effect [J].Applied Energy,322 (2022) :119514.

[13]王喜平,鄢少媛. 碳交易机制下供应链 CCS 投资时机研究[J].管理工程学报,2020,34(2):124-130.

WANG Xiping, XIE Shaoyuan. Research on the timing of CCS investment in supply chain under carbon emission trading[J]. Journal of Industrial Engineering/Engineering Management,2020,34(2):124-130.

[14]曾侯琳. 不同商业模式下的国有燃煤电厂碳捕集、利用与封存 (CCUS)项目投资决策研究[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2020:1

ZENG Yulin. Research on Investment decision of carbon collection, utilization and storage (CCUS) projects in state owned coal-fired power plants[D]. Chongqing: Chongqing Industrial and Commercial University, 2020: 1.

[15]王喜平,张宁宁. 基于实物期权的 CCS 投资激励研究[J].电力科学与工程,2020,36(7):1-8.

WANG Xiping, ZHANG Ningning. Study on Incentives for CCS Investment Based on the Real Options Approach[J]. Electric Power Science and Engineering,2020,36(7):1-8.

[16]张新华,黄天铭,甘冬梅,等. 考虑碳价下限的燃煤发电碳减排投资及其政策分析[J].中国管理科学, 2020,28(11): 167-174.

ZHANG Xinhua, HUANG Tianming, GAN Dongmei, et al. Carbon Emission Reduction Investment for Coal-fired Power Plant and Policy Analysis Considering Carbon Price Floor[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020,28(11): 167-174.

[17]张新华, 叶泽, 李薇. 价格与技术不确定条件下的发电商碳捕获投资模型及分析[J].管理工程学报, 2012, 26(3): 109-113.

ZHANG Xinhua, YE Ze, LI Wei. The Power Producer's Carbon Capture Investment Model and its Analysis under Price and Technology Uncertainties[J]. Journal of Industrial Engineering /Engineering Management, 2012, 26(3): 109-113.

[18]赵昕,白雨,丁黎黎.碳捕集与封存技术(CCS)商业化运营的融资激励机制[J].北京理工大学学报(社会科学版),2022,24(1):24-38.

ZHAO Xin, BAI Yu, DING Lili. Financing Incentive Mechanisms for Carbon Capture and Storage Technology[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition) ,2022,24(1):24-38.