

DOI: 10.19666/j.rlfed.202211274

不同商业模式下燃煤电厂 CCUS 投资决策研究

聂鹏飞^{1,2}, 高哲远³, 王喜平³

(1.河北大唐国际王滩发电有限责任公司, 河北 唐山 063611;
2.大唐国际发电股份有限公司, 北京 100033; 3.华北电力大学经济管理学系, 河北 保定 071000)

[摘要] 准确测算碳捕集、利用与封存 (CCUS) 的投资价值和投资时机是燃煤电厂 CCUS 投资决策的关键。针对以往研究仅仅关注一体化模式下 CCUS 投资决策这一不足, 基于实物期权理论, 考虑碳价格不确定性及 CCUS 投资成本递减情况下 CCUS 投资的期权价值, 从燃煤电厂视角建立了一体化模式和合资模式下 CCUS 的投资决策模型, 并通过模型求解得到不同模式下燃煤电厂 CCUS 投资的期权价值和投资时机。基于此模型, 进一步通过算例分析了额外电力配额、电价补贴、投资补贴等不同政策激励及碳价波动对 CCUS 投资决策的影响, 并在此基础上提出了相关政策建议。

[关键词] 投资决策; 一体化模式; 合资模式; 实物期权; CCUS

[引用本文格式] 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.

Research on CCUS investment decision of coal-fired power plant under different business modes

NIE Pengfei^{1,2}, GAO Zheyuan³, WANG Xiping³

(1. Hebei Datang International Wangan Power Generation Co., Ltd., Tangshan 063611, China;
2. Datang International Power Generation Co., Ltd., Beijing 100033, China;
3. Department of Economics and Management, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

Abstract: Measuring the investment value and investment timing accurately is crucial for coal-fired power plants' carbon capture utilization and storage (CCUS) investment. Different from the existing studies on the CCUS decision making only considering the integration mode, this study establishes the decision-making model of the CCUS investment of coal-fired power plants under the integration mode and joint venture mode from the perspective of coal-fired power plants. The decision-making model is established based on the theory of real options, considering the uncertainties of carbon price and the decreasing CCUS investment cost, and the displayed solutions of the option value and investment timing of CCUS investment in coal-fired power plants under different modes are obtained by solving the model. Based on this model, the impact of different policy incentives such as additional power quota, electricity price subsidy, investment subsidy, and carbon price volatility on CCUS investment decisions are further analyzed through numerical examples. On this basis, some policy suggestions are provided finally.

Key words: investment decision; integration mode; joint venture mode; real option; CCUS

中国作为全球第一大碳排放国, 长期以煤电为主力电源。中国电力企业联合会预测, 中国仍在努力争取于 2030 年达到煤电装机容量峰值, 约为 1 300 GW。煤电如何在其生命周期内变“绿”是实

现低碳转型的关键^[1]。碳捕集、利用与封存 (carbon capture utilization and storage, CCUS) 作为目前唯一能够实现化石能源利用净零排放的新兴技术, 其大规模部署不仅可以避免已经投产的机组提前

收稿日期: 2022-11-10 网络首发日期: 2023-01-03

基金项目: 河北省社会科学基金项目 (HB19YJ011)

Supported by: Social Science Fund Project of Hebei Province (HB19YJ011)

第一作者简介: 聂鹏飞 (1983), 男, 正高级工程师, 主要研究方向为燃煤电厂环保管理, 496454@qq.com。

退役,还能减少因建设低碳电力基础设施造成的额外投资,降低实现碳中和目标的经济成本,在我国火电行业达成“双碳”目标的进程中将扮演重要角色^[2]。然而,鉴于目前 CCUS 仍存在技术不成熟、投资成本高、回收周期长、面临的不确定性大等诸多障碍,燃煤电厂 CCUS 投资仍踌躇不前,故对 CCUS 投资决策进行科学分析并在此基础上提出政策激励对促进 CCUS 技术推广具有重要意义。

国内外学者对 CCUS 的投资决策进行了大量研究,从研究内容上早期主要关注碳捕集与封存(carbon capture and storage, CCS),近来更多考虑了碳捕集之后的利用,将研究扩展为 CCUS,从方法上历经了净现值法^[3]到实物期权法^[4-11]的演进。考虑到 CCUS 投资成本巨大、涉及环节众多,一些学者开始考虑引入 CCUS 不同的商业模式以助推其商业化。Yao 等人^[12]基于不同利益相关者视角提出了 4 种 CCUS 投资商业模式,并利用蒙特卡罗法模拟得到了不同模式下各利益主体的收益分布。曾侯琳^[13]则从燃煤电厂视角提出了 3 种 CCUS 投资商业模式。王喜平等^[14]以燃煤电厂为重点,构建系统动力学模型从经济、技术可行性以及减排效益等层面对比分析了一体化模式和运营商模式的发展潜力。

鉴于 CCUS 投资可能有多种商业模式,而现有 CCUS 投资决策研究大多聚焦于一体化模式研究。本文拟对此进行拓展,从燃煤电厂视角考虑 CCUS 一体化模式和合资模式 2 种不同商业模式下的投资决策并进行对比分析。首先详细分析了每种商业模式下的现金流,测算了项目投资收益。其次建立考虑碳价不确定性的、连续的、动态的实物期权模型并进行求解,通过数值仿真来计算 CCUS 各个不同商业模式的投资价值、最优投资时机。最后选取了额外电力配额、电价补贴、投资补贴等几种政策激励和碳价波动率对不同模式下燃煤电厂 CCUS 投资决策的影响,并从中分析 CCUS 的最优投资方案和政策激励。

1 问题描述和理论假设

1.1 问题描述

参考已有研究,从燃煤电厂视角假设 CCUS 投资有以下 2 种模式:

1) 一体化模式 即燃煤电厂全资进行 CCUS 投资,负责从碳捕集、运输、封存和利用的所有环节,建立集成碳捕集—运输—封存—利用各环节于一体的产业链,假定 CO₂ 的运用主要用于驱油(CCUS-EOR)。一体化模式下资金流情况具体如图 1 所示。

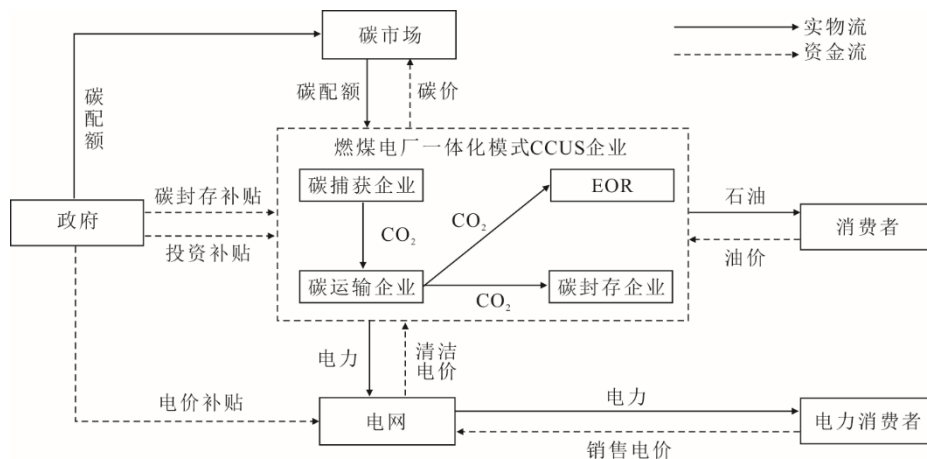


图 1 一体化模式
Fig.1 Integration mode

2) 合资模式 该模式下,整个 CCUS 由电厂、运输商和碳应用商 3 家企业合资经营。该合资企业负责除发电、碳应用之外的所有环节,包括碳捕集、运输、封存并销售 CO₂ 给应用商。CO₂ 应用商为获得稳定的 CO₂ 来源而选择向该企业注资。同样地,运输商为了获得稳定的运输业务而选择向该合资企业注资。假设电厂对该合资企业的持股比例为 λ ,图 2 给出了合资模式下燃煤电厂的资金流情况。

1.2 理论假设

1.2.1 碳价

假定碳价格为 $p(t)$ 。 $p(t)$ 受到碳交易市场的诸多不确定因素影响。假设碳排放权价格服从几何布朗运动:

$$dp(t) = \mu p(t)dt + \sigma p(t)dz, \quad p(0) = p_1 \quad (1)$$

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_1 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。

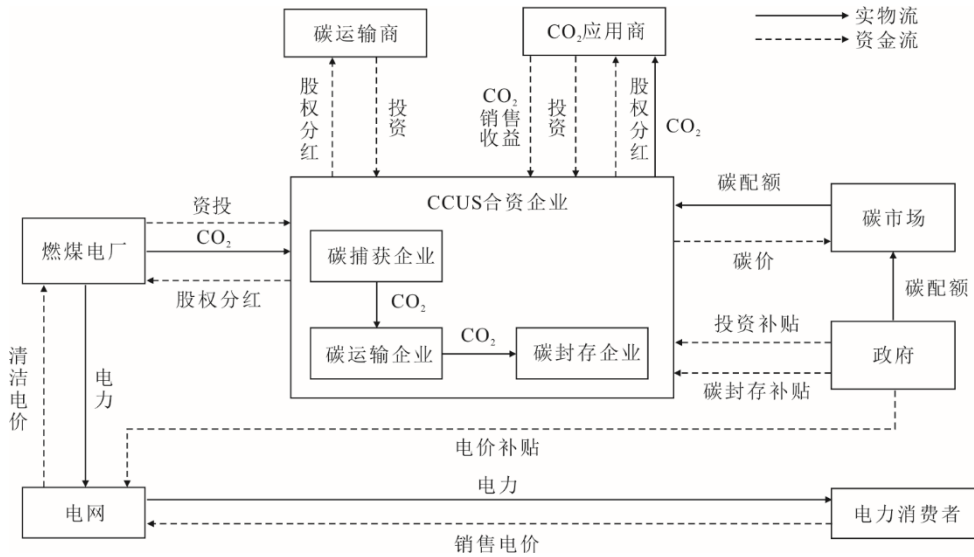


图 2 合资模式
Fig.2 Joint venture mode

1.2.2 CCUS 投资成本

假设 CCUS 是一次性投资技术, 投资成本 I 为现有的电厂改造并加装 CCUS 进行碳捕集、利用、封存成本。考虑到技术进步和创新, CCUS 技术成本满足学习曲线效应, 初始投资成本 I_0 会随着时间的推移而减小, 具体为:

$$I_t = I_0 e^{-it} \quad (2)$$

式中: i 反映技术进步对投资成本的影响。

由于成本函数 $I(t)$ 随着时间的变化而变化, 无法得到 Bellman 方程, 可以在积分中进行计算:

$$-I(t)e^{-rt} = \int_t^{\infty} (I'(t) - rI(t))e^{-r(f-t)} df \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 V(p(t)) &= E \left(\int_t^{\infty} (p_e q_e + p(f) q_c + p_s \cdot (1-\omega) q_c + p_o \cdot \omega q_c) e^{-r(f-t)} df \right) = \\
 &E \left(\int_t^{\infty} (p_e q_e + p_s \cdot (1-\omega) q_c + p_o \cdot \omega q_c) e^{-r(f-t)} df + \int_t^{\infty} p(f) q_c e^{-r(f-t)} df \right) = \\
 &\frac{p_e q_e + p_s \cdot (1-\omega) q_c + p_o \cdot \omega q_c}{r} + \frac{p(t) q_c}{r - \mu}
 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $p_e \cdot q_e$ 为电价补贴, 清洁电价是国家对发电企业采用清洁技术发电的一种补贴政策, 本文设电价补贴价格为 p_e , 电厂年发电量 $q_e = N \cdot \zeta \cdot \phi \cdot (1-\mu)$, 其中 N 为装机容量, ζ 为发电小时数, ϕ 为容量因子, μ 为系统效率损失。

假设每年电厂捕捉的 CO₂ 量为 $q_c = q_e \cdot \varepsilon \cdot \eta$, 其中 q_e 为电厂年发电量, ε 为 CO₂ 排放强度, η 为 CO₂ 的捕集率, 则 $p(t) q_c$ 为出售碳排放权收益。

假设 ω 为 CO₂ 的利用率, 则 $(1-\omega)$ 为 CO₂ 的封存

2 模型构建

2.1 一体化模式

2.1.1 基本模型

由于一体化模式包含了碳捕集、运输、封存、利用诸环节, 故存在运输封存成本; 又由于捕集的 CO₂ 由自己利用, 存在原油收入和驱油成本: 综上, 一体化模式下 CCUS 投资的收益主要包括电价补贴、封存补贴、出售碳排放权以及增加的原油收入。假定电厂对 CCUS 投资产生的现金流以贴现率 r 进行贴现, 得到 t 时刻 CCUS 技术投资的收益 $V(p(t))$ 为:

率, 设单位 CO₂ 的封存补贴为 p_s , 则总的封存补贴为 $p_s \cdot (1-\omega) \cdot q_c$ 。在 CCUS-EOR 项目中, CO₂ 主要用于驱油, 而驱油将获得新增原油销售收入。根据已有文献可得 EOR 的转换率为 1, 为简化原油收入核算, 假定原油收入价格为 p_o , 则原油收入为 $p_o \cdot \omega q_c$ 。

考虑项目投资成本为投资支出、驱油成本、封存成本以及运输成本, 得到该模式下 t 时刻进行 CCUS 投资的净现值函数 $\pi(t)$ 为:

$$\begin{aligned} \pi(t) = E & \left(V(p(t)) - (1-\theta)I(t)e^{-rt} - \int_t^\infty (u_t q_c + u_s \cdot (1-\omega)q_c + u_o \cdot \omega q_c) e^{-r(f-t)} df \right) = \\ & E \left(V(p(t)) + \int_t^\infty (1-\theta)(I'(t) - rI(t)) e^{-r(f-t)} df - \int_t^\infty (u_t q_c + u_s \cdot (1-\omega)q_c + u_o \cdot \omega q_c) e^{-r(f-t)} df \right) = \quad (5) \\ & \frac{p_e q_e + p_s \cdot (1-\omega)q_c + p_o \cdot \omega q_c}{r} + \frac{p(t)q_c}{r-\mu} - \frac{u_t q_c + u_s \cdot (1-\omega)q_c + u_o \cdot \omega q_c}{r} + \frac{(1-\theta)(I'(t) - rI(t))}{r} \end{aligned}$$

式中： u_t 、 u_s 、 u_o 为单位 CO₂ 的运输、封存和驱油成本； θ 为政府对燃煤电厂 CCUS 投资的补贴系数；第 1 项为电价补贴、封存补贴和原油收入，第 2 项为碳排放权交易收益，后 2 项分别为运输封存、驱油和投资成本。

2.1.2 最优投资时机分析

CCUS 投资可视为 1 个美式看涨期权，投资者有权决定立即投资或推迟投资。以 $F(p(t))$ 代表投资 CCUS 项目期权的价值，在项目投资建设之前不会产生任何现金流。假设在 T 时刻碳排放权价格为初次达到最优投资门槛 p_T 。投资项目的期权价值 $F(p(t))$ 应满足 Bellman 方程，即在 dt 时间内，CCUS 项目投资机会等同于资金的期望增加值，即 $rF(p(t))dt = E(dF(p(t)))$ 。由伊藤引理：

$$dF(p) = F'(p)dp + \frac{1}{2}F''(p)(dp)^2 \quad (6)$$

可得到 $F(p(t))$ 满足以下微分方程：

$$p_T = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 - 1} \cdot \frac{r - \mu}{q_c} \cdot \frac{(1-\theta)(rI(t) - I'(t)) + u_t q_c + u_s \cdot (1-\omega)q_c + u_o \cdot \omega q_c - p_s \cdot (1-\omega)q_c - p_o \cdot \omega q_c - p_e q_e}{r} \quad (12)$$

$$F(p(t)) = \frac{p_e q_e + p_s \cdot (1-\omega)q_c + p_o \cdot \omega q_c}{r} + \frac{p(T_1)q_c}{r-\mu} - \frac{u_t q_c + u_s \cdot (1-\omega)q_c + u_o \cdot \omega q_c}{r} + \frac{(1-\theta)(I'(T_1) - rI(T_1))}{r} \quad (13)$$

最优投资时机为：

$$T_1 = \inf(t \geq 0 | p(t) > p_T) \quad (14)$$

T_1 即 $p(t)$ 初次达到最优投资门槛的时刻。

2.2 合资模式

2.2.1 基本模型

由于该模式下合资公司负责除利用外的碳捕集、运输、封存环节，故该模式不包含原油收益和驱油成本。该模式是将 CO₂ 出售给碳利用商，故包含 CO₂ 销售收益。因此，合资模式的收益为电价补

$$\begin{aligned} \pi(t) = E & \left(V(p(t)) - \lambda(1-\theta)I(t)e^{-rt} - \int_t^\infty \lambda(u_t q_c + u_s \cdot (1-\omega)q_c) e^{-r(f-t)} df \right) = \\ & E \left(V(p(t)) + \int_t^\infty \lambda(1-\theta)(I'(t) - rI(t)) e^{-r(f-t)} df - \int_t^\infty \lambda(u_t q_c + u_s \cdot (1-\omega)q_c) e^{-r(f-t)} df \right) = \quad (15) \\ & \frac{p_e q_e + \lambda p_i \cdot \omega q_c + \lambda p_s \cdot (1-\omega)q_c}{r} + \frac{\lambda p(t)q_c}{r-\mu} - \frac{\lambda(u_t q_c + u_s \cdot (1-\omega)q_c)}{r} + \frac{\lambda(1-\theta)(I'(t) - rI(t))}{r} \end{aligned}$$

2.2.2 最优投资时机分析

合资模式的计算方法与一体化模式相同，直接

$$\mu \cdot p(p) \cdot F'(p) + \frac{1}{2}\sigma^2 \cdot p(t) \cdot F''(p) - rF(p) = 0 \quad (7)$$

此微分方程是 1 个二阶齐次线性方程式，设其通解 $F(p) = Ap^a$ ，则可得到：

$$r = \alpha\mu + \frac{1}{2}\alpha(\alpha-1)\sigma^2 \quad (8)$$

待定系数 a 满足：

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{1}{2} - \frac{\mu}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{\mu}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} \\ \alpha_2 = \frac{1}{2} - \frac{\mu}{\sigma^2} - \sqrt{\left(\frac{\mu}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} \end{cases} \quad (9)$$

取 $\alpha_1 > 1$ 。

投资机会价值 $F(p(t))$ 满足以下边界条件：

$$\frac{dF}{dp}(p_T) = \frac{d\pi}{dp}(p_T) \quad (10)$$

$$F(p_T) = \pi(p_T) \quad (11)$$

解得碳排放权交易的边界价格，即最优投资门槛见式(12)，CCUS 投资期权价值见式(13)。

贴、封存补贴、出售碳排放权、CO₂ 销售收益；投资成本包括投资支出、封存成本以及运输成本。其中除了电价补贴外，其余部分皆按照持股比例计入成本和收益。CO₂ 销售收益是指捕捉、纯化后的 CO₂ 售卖给相关的 CO₂ 利用企业所获得的收益，CO₂ 的利用率为 ζ ，CO₂ 的利用量为 ζq_c ，每年的 CO₂ 销售均价为 p_i ，则每年 CO₂ 的销售收入为 $p_i q_u$ 。假设电厂的持股比例为 λ ，则该模式下在任意 t 时刻的净现值函数为：

可以得出碳排放权的边界交易价格、CCUS 投资期权价值分别为：

$$p_T = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 - 1} \cdot \frac{r - \mu}{\lambda q_c} \cdot \frac{\lambda(1 - \theta)(rI(t) - I'(t)) + \lambda u_1 q_c + \lambda u_s \cdot (1 - \omega) q_c - p_e q_e - \lambda p_i \cdot \omega q_c - \lambda p_s \cdot (1 - \omega) q_c}{r} \quad (16)$$

$$F(p(t)) = \frac{p_e q_e + \lambda p_i \cdot \omega q_c + \lambda p_s \cdot (1 - \omega) q_c}{r} + \frac{\lambda p(T_2) q_c}{r - \mu} - \frac{\lambda(u_1 q_c + u_s \cdot (1 - \omega) q_c)}{r} + \frac{\lambda(1 - \theta)(I'(T_2) - rI(T_2))}{r} \quad (17)$$

最优投资时机为:

$$T_2 = \inf(t \geq 0 | p(t) > p_T) \quad (18)$$

T_2 即 $p(t)$ 初次达到最优投资门槛的时刻。

3 算例分析

假设某燃煤电厂面临 CCUS 投资决策, 假定其可选择 2 种模式进行投资。用 MATLAB 作为计算工具对模型进行求解、分析。对临界碳价、最优执行时机进行求解, 并参考已有研究[15-17]对额外电力配额、电价补贴、投资补贴等不同政策激励及碳价波动对 CCUS 投资决策的影响进行分析, 模型中的各参数设定见表 1。

表 1 燃煤电厂 CCUS 投资决策相关参数设定
Tab.1 Parameter setting of CCUS investment decisions in coal-fired power plants

项目	数值
装机容量 N/MW	600
发电小时数 ζ/h	5 400
系统效率损失 $v/\%$	17.9
容量因子 ϕ	0.8
装置建设成本 $I_0/\text{元}$	$1\ 859.55 \times 10^6$
碳价漂移率 μ	0.035
碳价波动率 σ	0.14
CO_2 排放率 $\varepsilon/(\text{t} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	762×10^{-6}
碳捕集率 $\eta/\%$	90
碳利用率 $\xi/\%$	20
售电补贴价格 $p_e/(\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	0.015
技术进步对投资成本的影响因子 i	0.020 2
CO_2 销售价格 $p_s/(\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$	300
CO_2 储存补贴价格 $p_i/(\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$	30
原油价格 $p_o/(\text{元} \cdot \text{桶}^{-1})$	425
驱油成本 $u_o/(\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$	88.5
无风险利率 $r/\%$	6
核准减排量 q_c/t	1 459 404.3
CO_2 封存成本 $u_s/(\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$	50
CO_2 运输成本 $u_t/(\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$	100
初始碳价 $p_1/(\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$	26.89

3.1 不同商业模式 CCUS 投资临界碳价与执行时间

3.1.1 一体化模式

临界碳价为 $p(t) > p_T$ 的时刻, 通过随机模拟碳价来找到其与临界碳价的交点以确定临界碳价与执行时间, 通过模拟得到 $T_1=27.23$ 年, $p_{T1}=99.49$ 元/t。这意味着若在 2030 年碳达峰之前进行投资, 即从

现在开始 8.8 年后进行投资, 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, 这意味着在 38.8 年后进行投资, 则需要满足的临界碳价为 85.72 元/t。具体如图 3 所示。

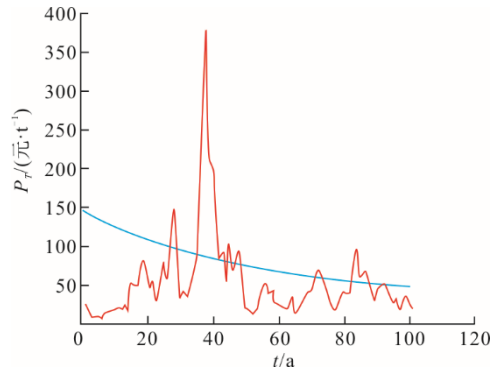


图 3 一体化模式临界碳价和投资时机
Fig.3 Critical carbon pricing and investment timing of the integrated mode

3.1.2 合资模式

图 4 模拟了电厂持股比例为 42% 的合资企业投资情况。通过模拟得到 $T_2=24.82$ 年, $p_{T2}=74.26$ 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 100.78 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 57.20 元/t。相比一体化模式下的投资时机大为提前, 投资临界碳价也有所下降。

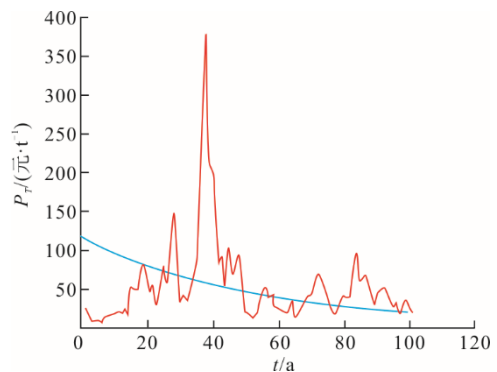


图 4 合资模式下投资时机与临界碳价
Fig.4 Critical carbon pricing and investment timing of the joint venture mode

3.2 不同政策激励对 CCUS 投资决策的影响

3.2.1 额外电力配额对临界碳价的影响

假设碳捕集系统的 CO_2 年碳捕集量为发电装机

容量、发电商的年发电小时数、CO₂ 的排放强度、CO₂ 的捕集率四者相乘，故增加额外电力配额就意味着 CO₂ 捕集量的增加。一体化模式和合资模式下临界碳价都会出现不同程度的下降。

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

$$k \cdot \left(\frac{q_e p_e + \lambda p_i \cdot \omega q_c + \lambda p_s \cdot (1 - \omega) q_c}{r} + \frac{\lambda q_c p(T_2)}{r - \mu} - \frac{\lambda (u_s \cdot (1 - \omega) q_c + u_t q_c)}{r} \right) \quad (20)$$

通过之前设定的参数能得到最优投资门槛和额外电力配额的关系，结果如图 5 所示。图 5 表明，在其他条件相同的情况下，额外电力配额越高，CCUS 投资门槛越低，这意味着额外电力配额与最优投资门槛存在负相关关系。这是因为额外电力配额增加了项目投资价值，因而投资门槛相应下降。进一步分析发现，随着电力配额的增加，最优投资门槛降低的速率逐渐放缓。比如当电力配额增加 10% 时，一体化模式和合资模式最优投资门槛分别降低 6.04% 和 8.48%；当电力配额由 10% 进一步增加到 20% 时，两者的最优投资门槛分别降低 5.35%、7.74%。这表明额外电力配额的增加，对 CCUS 投资有一定的促进作用；且在合资模式下，增加额外电力配额的作用效果更明显。图 5 刻画了额外电力配额与临界碳价关系函数为凹函数，即在碳价较高时，使用该种政策效果较为明显。

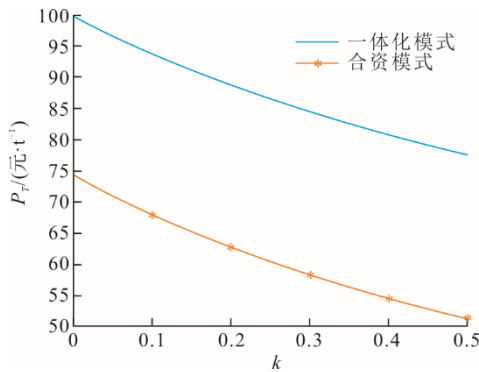


图 5 2 种模式下额外电力配额与临界碳价的关系
Fig.5 Relationships between critical carbon pricing and additional electricity quotas in two modes

3.2.2 电价补贴对临界碳价的影响

一体化模式下，电价补贴政策对碳临界价格的影响见式(21)，意味着在其他条件不变时，当电价补贴增长时临界碳价会减小，且减小的值见式(22)。在合资模式下，变动值见式(23)。因为合资模式比一体化模式多 1 个 $1/\lambda > 1$ 的系数，故合资模式下对电价补贴变动的反应更加强烈。

对投资期权函数来说，随着额外电力配额的增加，一体化模式和合资模式下，期权投资价值都会增加，增加值分别见式(19)、式(20)。

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_1 - 1} \frac{r - \mu}{q_c} \frac{(-q_e)}{r} \quad (21)$$

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_1 - 1} \frac{r - \mu}{q_c} \frac{(-q_e)}{r} \Delta p_e \quad (22)$$

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_1 - 1} \frac{r - \mu}{\lambda q_c} \frac{(-q_e)}{r} \Delta q_e \quad (23)$$

对投资期权函数来说，在 2 种模式变动相同的情况下，电价补贴政策每变动 Δp_e ，期权投资价值增加 $\Delta p_e \cdot q_e / r$ 。

图 6 刻画了电价补贴政策与最优投资门槛的关系。图 6 表明，在其他条件相同的情况下，电价补贴越高，CCUS 投资门槛越低，这意味着电价补贴与最优投资门槛存在负相关关系。当电价补贴越高时，最优投资门槛越低。电价补贴的增加提升了其收益，其面临的风险减小，故无需高碳价来保证其收益，所以临界碳价降低。当电价补贴上涨到 0.02 元/(kW·h) 时，一体化模式和合资模式的最优投资门槛分别降低 9.13% 和 29.11%。当电价补贴由 0.02 元/(kW·h) 上涨到 0.025 元/(kW·h) 时，2 种模式下的投资门槛分别降低 10.04%、41.05%。这表明增加电价补贴对 CCUS 的投资具有一定的促进作用，且对合资模式的作用效果更显著。图 6 所刻画了电价补贴与临界碳价关系函数为凸函数，即当碳价较低时，使用该政策更有效。

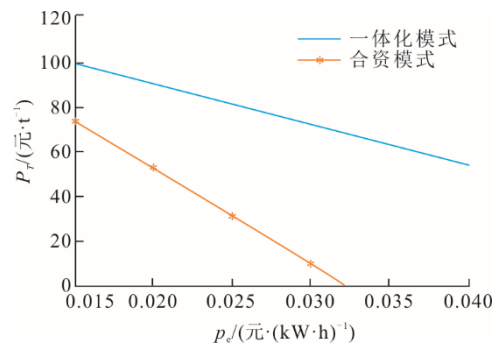


图 6 2 种模式下电价补贴与临界碳价的关系
Fig.6 Relationships between critical carbon pricing and electricity price subsidy in two modes

3.2.3 投资补贴对临界碳价的影响

由于CCUS项目的初始投资额巨大,故考虑政府对项目进行投资补贴。假设政府的投资补贴为 θ ,则投资者的投资份额为 $1-\theta$ 。若政府的投资补贴增加,则意味着投资者的投资额减小。在一体化模式下,投资补贴政策对碳排放权交易的临界价格的影响见式(24),即意味着当政府的投资补贴 θ 增加时,碳排放权交易的临界价格减少见式(25)。合资模式的碳排放权交易的临界价格减少见式(26)。

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_1-1} \frac{r-\mu}{q_c} \frac{(rI(T_1)-I'(T_1))}{r} \quad (24)$$

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_1-1} \frac{r-\mu}{q_c} \frac{(rI(T_1)-I'(T_1))}{r} (-\Delta\theta) \quad (25)$$

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_1-1} \frac{r-\mu}{\lambda q_c} \frac{\lambda(rI(T_2)-I'(T_2))}{r} (-\Delta\theta) \quad (26)$$

对投资期权函数来说,在一体化模式下,投资补贴政策的影响为式(27);在合资模式下,投资补贴政策的影响为式(28),且两者都是随着投资补贴的增加期权的投资价值增加。

$$\frac{I'(T_1)-rI(T_1)}{r} \quad (27)$$

$$\frac{\lambda(I'(T_2)-rI(T_2))}{r} \quad (28)$$

假定在不增加额外电力配额,电价补贴为0.015元/(kW·h),且其他条件相同的情况下,投资补贴政策对临界碳价的影响如图7所示。

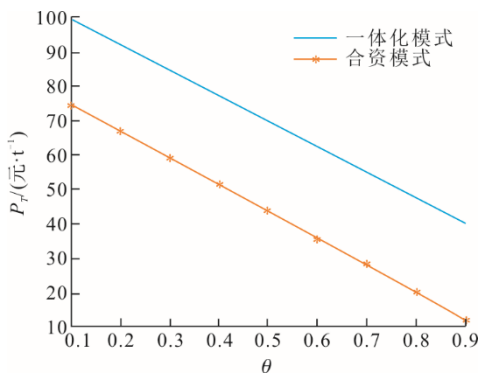


图7 2种模式下投资补贴与临界碳价的关系
Fig.7 Relationships between critical carbon pricing and investment subsidies in two modes

图7表明,投资补贴越高,CCUS投资门槛越低,这意味着投资补贴与最优投资门槛存在负相关关系。与电价补贴增加收益不同,投资补贴的增加降低了其成本,同样也降低了投资风险,无需维持高碳价来保证其收益,故临界碳价降低。当投资补贴越高时,最优投资门槛越低。当投资补贴从0.1增

加到0.2时,一体化模式和合资模式下的最优投资门槛值分别降低7.38%、10.37%;当投资补贴进一步从0.2增加到0.3时,2种模式下的最优投资门槛值则分别降低7.97%、11.58%。这表明增加投资补贴对CCUS的投资具有一定的促进作用,且投资补贴越大,对CCUS投资的促进越明显,即图7所刻画的投资补贴与临界碳价关系函数为凸函数,当临界碳价较低时,使用该政策较有效。而且数据表明该政策同样对合资模式更有效。

3.3 碳价波动率对临界碳价的影响

假定其他条件不变,仅考虑碳价波动率变动的情况下,得到临界碳价和碳价波动率的关系如图8所示。图8表明,碳价波动率越高,2种模式的临界碳价越高,即临界碳价与碳价波动率呈正相关关系。碳价波动率越高,投资者的收益不确定性越大,期权价值越大,故为保证投资者收益需要更高的临界碳价。对2种模式来说,碳价波动率与临界碳价关系函数都为凹函数,即碳价波动率越大,临界碳价的增长就越快。当碳价波动率增加到0.24时,一体化模式的临界碳价增长31.92%,合资模式的临界碳价增长31.93%,碳价波动率对两者的影响相同,这是由于碳价波动率仅对两者的 α_1 产生影响。可以看出,稳定的碳价波动率可以促进CCUS投资,这与已有研究^[9,11]的结论一致。

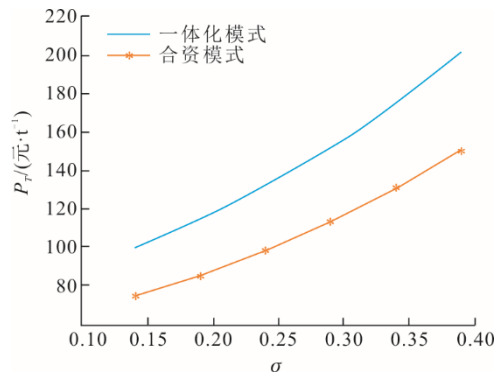


图8 2种模式下碳价波动率与临界碳价的关系
Fig.8 Relationships between critical carbon pricing and carbon price volatility in two modes

3.4 对比分析

算例分析假定燃煤电厂在合资模式下持股一定比例,结果表明合资模式相比一体化模式所需临界碳价较低,更早具备投资时机。比较二者的期权价值可知,其他条件相同的情况下,一体化模式下CCUS的期权价值为 3.8647×10^9 元,合资模式下的期权价值为 3.7259×10^9 元。可以看到,一体化

模式具有较高的投资价值。比较投资时机和投资门槛发现, 合资模式下的投资时机相比一体化模式有所提前, 临界碳价有所降低。这可能与合资模式下燃煤电厂持股部分比例能够缓冲其成本和风险有关。进一步分析合资模式占股比例对临界碳价、期权价值的影响, 结果如图 9、图 10 所示。

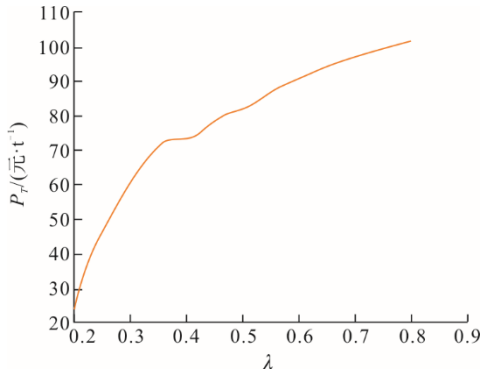


图 9 合资模式占股比例对临界碳价的影响

Fig.9 Impact of the shareholding ratio of the joint venture mode on the critical carbon price

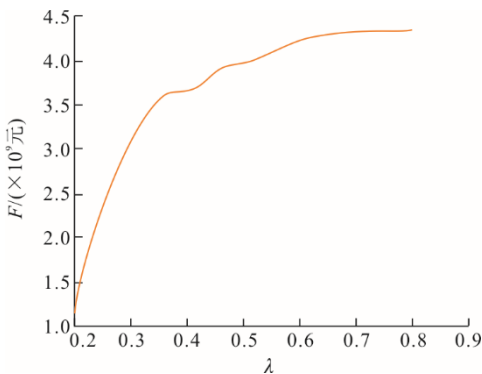


图 10 合资模式占股比例对期权价值的影响

Fig.10 Effect of shareholding ratio of the joint venture mode on the option value

由图 9、图 10 发现, 当燃煤电厂调整持股比例, 投资门槛也会随着持股比例发生变化。现有市场条件下, 当合资模式的持股比例超过 46% 时, 合资模式的期权价值将超过一体化模式的期权价值。从政策激励的角度而言, 不同的政策激励会对 2 种模式产生不同的效果。比较而言, 合资模式对政策的变动更为敏感。对于不同的政策激励来说, 额外电力配额的函数是凹的, 即在碳价较高的情况下, 增加电力配额的政策效果更优; 电价补贴和投资补贴的函数是凸的, 即在碳价较低时, 使用电价补贴和投资补贴政策效果更优。但电价补贴政策是 3 种政策中效果比较好的激励政策, 尤其对合资模式的作用效果更优。维持稳定的碳价会促进 CCUS 投资, 这一点对 2 种模式的影响相同。

4 结论与建议

本文基于实物期权理论, 考虑碳价格不确定性及 CCUS 投资成本递减情况下 CCUS 投资的期权价值, 从燃煤电厂视角建立了一体化模式和合资模式下 CCUS 的投资决策模型, 并通过模型求解得到不同模式下燃煤电厂 CCUS 投资的期权价值和投资时机, 在此基础上进一步通过算例分析了额外电力配额等不同政策激励及碳价波动对 CCUS 投资决策的影响, 研究发现:

1) 一体化模式具有较高的投资价值, 但其等待投资时机较长, 临界碳价较高。这是因为一体化模式中燃煤电厂负责所有环节, 其面临的风险较高。合资模式的投资时机相对有所提前, 由于燃煤电厂只负责部分环节, 合作者分担了部分风险, 期权价值有所降低。在合资模式中, 燃煤电厂可根据自身需求来调节持股比例。

2) 从 3 种政策变动对 CCUS 投资的影响力来看, 无论是哪种政策激励都会促进 CCUS 的投资, 尤其电价补贴对合资模式的激励效果更为明显, 增加额外电力配额促进效果则相对较弱。

3) 临界碳价与碳价波动率呈正相关关系。碳价波动率越高, 投资者的收益不确定性越大, 为保证投资者收益就需要更高的临界碳价, 故保持碳价稳定有利于促进 CCUS 项目的投资。

基于上述结论, 综合考虑 CCUS 的良好社会环境效益, 可有效降低巨额资产搁浅风险等因素, 本文提出以下政策建议:

1) 电厂应根据碳市场环境合理选择 CCUS 商业模式。理论上, 合资模式是燃煤电厂的最优选择, 因为它所要求的碳临界价格相对较低, 使得电厂可以先行达到 CCUS 的投资条件, 尤其当碳交易价格较低时, 电厂可选择合资模式分担 CCUS 投资成本, 但具体的持股比例则可以根据市场环境进行调整。而且合资模式由于其参与主体的多元化, 涉及到多方利益, 故应该制定合理的规则来对三方进行约束和保障。

2) 进一步完善碳交易市场, 充分发挥其对 CCUS 的助推作用。自 2013 年起我国率先在深圳、上海、北京等地开展了碳交易试点, 并于 2021 年 7 月正式开启全国碳交易。但由于受气候、政策、能源价格以及供需机制等多种因素的影响, 碳价格波动剧烈, 价格水平也远达不到触发 CCUS 投资的水平。因此, 应进一步完善碳排放交易市场建设, 维持碳

价稳定,充分发挥碳交易市场在推动CCUS技术上的关键作用。

3) CCUS的发展离不开政府的支持,建议政府加大政策激励力度来促进燃煤电厂发展CCUS,同时也可以为CCUS的商业化提供良好的环境和最基础的保障。

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。为了简化运算,本文假设原油价格是一定的,但实际情况中原油价格是不确定的,这些问题还有待进一步探讨。

【参考文献】

- [1] 杨晴,孙云琪,周荷雯,等.我国典型行业碳捕集利用与封存技术研究综述[J].华中科技大学学报(自然科学版),2023,51(1):101-110.
YANG Qing, SUN Yunqi, ZHOU Hewen, et al. Research review of carbon capture, utilization and storage technology in China's typical industries[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(1): 101-110.
- [2] Global Status of CCS 2020[R]. Melbourne: Global CCS Institute, 2020: 1.
- [3] 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.
- [4] ABADIE L M, CHAMORRO J M. European CO₂ prices and carbon capture investments[J]. Energy Economics, 2008, 30(6): 2992-3015.
- [5] 王喜平,赵齐,谭锡崇,等.基于模糊实物期权的燃煤电厂CCS投资决策研究[J].工业技术经济,2019,38(12):148-155.
WANG Xiping, ZHAO Qi, TAN Xichong, et al. Research on CCS investment decision of coal-fired power plant based on fuzzy real option[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2019, 38(12): 148-155.
- [6] ZHANG X, WANG X, CHEN J, et al. A novel modeling based real option approach for CCS investment evaluation under multiple uncertainties[J]. Applied Energy, 2014, 113(1): 1059-1067.
- [7] 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.
- [8] LIN B Q, TAN Z Z. 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: 126768.
- [9] 王喜平,鄒少媛.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, QIE 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.
- [10] NARITA D, KLEPPER G. Economic incentives for carbon dioxide storage under uncertainty: a real options analysis[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2016, 53: 18-27.
- [11] WANG X P, ZHANG H D. Optimal design of carbon tax to stimulate CCS investment in China's coal-fired power plants: a real options analysis[J]. Greenhouse Gases: Science and Technology, 2018, 8(5): 863-875.
- [12] YAO X, ZHONG P, ZHANG X, et al. Business model design for the carbon capture utilization and storage (CCUS) project in China[J]. Energy Policy, 2018, 121: 519-533.
- [13] 曾保琳.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.
- [14] 王喜平,唐荣.燃煤电厂碳捕集-利用与封存商业模式与政策激励研究[J].热力发电,2022,51(8):29-41.
WANG Xiping, TANG Rong. Research on CCUS business model and policy incentives for coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(8): 29-41.
- [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] 黄超,杨茜,陈理飞.碳捕捉和储存技术的选择与政策激励分析[J].软科学,2016,30(5):91-95.
HUANG Chao, YANG Qian, CHEN Lifei. Analysis of selecting and policy incentives of carbon capture and storage technologies[J]. Soft Science, 2016, 30(5): 91-95.
- [17] YANG L, XU M, FAN J, et al. Financing coal-fired power plant to demonstrate CCS (carbon capture and storage) through an innovative policy incentive in China[J]. Energy Policy, 2021, 158: 112562.

(责任编辑 刘永强)