

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2026.01.009

# 考虑政府激励与知识累积的燃煤电厂CCUS运营模式 动态优化研究<sup>①</sup>

陈晓红<sup>1,2,3</sup>, 马睿谦<sup>1,2</sup>, 张乘<sup>1,2</sup>, 汪阳洁<sup>1\*</sup>

(1. 中南大学商学院, 长沙 410083; 2. 湘江实验室, 长沙 410205;  
3. 湖南工商大学前沿交叉学院/管理科学与工程学院, 长沙 410205)

**摘要:** 加速燃煤电厂的碳捕集、利用和封存(CCUS)技术应用对促进全球绿色低碳发展意义重大。然而, 鉴于该技术的高额成本, 如何选择最优运营模式成为亟待解决的核心问题。本文构建了考虑政府激励与知识累积效应的燃煤电厂CCUS运营的微分博弈模型, 对比分析一体化、运营商、合资及外包四种运营模式在成本控制和碳减排效益方面的差异, 并通过案例分析进行验证。研究发现, 政府补贴和碳交易政策是影响商业模式选择的重要外部因素, 知识累积在推动CCUS技术采纳与成本优化方面起着关键作用, 并且四种不同模式的适用性受到特定国家或地区经济、政策及技术环境的影响。本研究为燃煤发电企业投资决策提供了一定的理论和实践参考, 并为政府完善相关产业政策提供决策依据。

**关键词:** CCUS; 运营模式; 微分博弈; 政府激励; 知识累积

**中图分类号:** F273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2026)01-0143-17

## 0 引言

二氧化碳捕集、利用和封存(CCUS)技术是实现减污降碳最安全可靠的绿色技术之一, 对实现全球气候目标具有重要意义<sup>[1]</sup>。CCUS技术是把CO<sub>2</sub>从工业或相关能源的源分离出来, 输送到一个封存地点进行长期封存, 以此达到永久性的碳减排<sup>[2]</sup>。国际能源署(IEA)指出, 要在本世纪末实现升温幅度控制在2℃的气候目标, CCUS技术需要贡献14%的CO<sub>2</sub>减排量<sup>[3]</sup>。为保障国家能源安全与实现双碳战略目标, 中国比世界上任何一个国家都更需要CCUS技术的快速应用<sup>[4]</sup>。一方面, 中国是世界最大的高碳化石能源消费国, 煤炭消费占全球消费总量的50%以上<sup>[5]</sup>。2022年燃煤电厂提供了58.4%的发电量<sup>[6]</sup>, 但贡献了占全部

二氧化碳排放的40%<sup>[3]</sup>。另一方面, 中国80%以上的燃煤电厂运行年限不足15年, 它们不适宜直接废弃转化为可再生能源电厂<sup>[5]</sup>。因此, 在不完全放弃燃煤发电的情况下, 采用CCUS技术成为燃煤发电厂实现碳中和技术不可或缺的组成部分<sup>[2]</sup>。事实上, 考虑到中国目前发电装机容量和能源安全政策的强制约束, CCUS技术是我国火电行业实现碳达峰、碳中和目标的托底性技术, 预计2060年可通过CCUS实现约10<sup>9</sup>t/年的CO<sub>2</sub>减排量<sup>[7]</sup>。

尽管CCUS技术需求大, 但高昂的成本一直是制约其行业大规模应用的障碍<sup>[8]</sup>。CCUS是一项流程复杂的技术, 包括二氧化碳采集、运输、封存和利用等多个环节, 涉及庞大的技术群体和资金投入<sup>[2]</sup>。以中国CO<sub>2</sub>捕集为例, 从煤电、水泥、钢

① 收稿日期: 2024-08-18; 修订日期: 2025-04-22。

基金项目: 国家自然科学基金资助卓越研究群体项目(72088101); 国家自然科学基金资助重大项目(72394405); 湘江实验室重大项目(23XJ01006)。

通讯作者: 汪阳洁(1985—), 男, 湖北天门人, 博士, 教授。Email: yangjie.wang@csu.edu.cn

铁等工业装置排放的中低浓度 CO<sub>2</sub> 捕集成本高达 300 元/t ~ 700 元/t, 而这部分 CO<sub>2</sub> 占到了工业总排放量的 90% 以上<sup>[3]</sup>. 在 IEA 公布的中国 56 个 CCUS 项目中, 投资规模最小的达到 4 000 万元, 最高的大连长兴岛 CCUS 示范项目投资额预计 30 亿元<sup>[9]</sup>. 为促进企业采纳 CCUS 技术, 中国政府出台了一系列支持政策, 例如《“十四五”生态环境领域科技创新专项规划》、《2030 年前碳达峰行动方案》等, 均提出要为企业采用 CCUS 技术提供财税补贴支持. 此外, 中国政府还启动了碳排放权交易市场, 对发电行业专门设立全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案<sup>[10]</sup>. 通过以上两种激励举措, 政府试图推动燃煤电厂积极参与到 CCUS 项目投资中<sup>[11]</sup>. 因此, 在 CCUS 技术成本给定的条件下, 企业采用何种运营模式就成为推广应用 CCUS 的关键. 适宜的商业模式不仅有助于企业规避高成本, 还能帮助实现经营利益最大化和减排最小化目标<sup>[12]</sup>.

目前关于燃煤电厂 CCUS 技术运营模式的研究, 已涵盖从全链条一体化项目到碳捕捉、运输、存储及共享基础设施等价值链细分领域的商业模式<sup>[4]</sup>. 总结来看, 主要可归纳为四类: 一体化模式、运营商模式、合资模式、外包模式. Yang 等<sup>[13]</sup> 分析了一体化模式在燃煤电厂 CCUS 项目中的应用, 并探讨了其成本效益和环境影响. 聂鹏飞等<sup>[14]</sup> 研究对比了一体化模式与合资模式在 CCUS 项目中的实施情况, 重点关注了合资模式下的风险分担和资源共享机制. 王喜平等<sup>[12]</sup> 分析了运营商模式的优劣, 发现该模式下燃煤电厂和运营商均可以专长于各自的核心业务. 通过构建政府激励背景下燃煤电厂与运营商合作的 CCUS 投资博弈模型, 王喜平等<sup>[16]</sup> 进一步分析了燃煤电厂与 CCUS 运营商在收益转移比例与投资时机之间进行决策的均衡条件. 不过, 针对 CCUS 外包模式研究的文献较少. 总体而言, 尽管上述文献为理解 CCUS 项目的运营机制提供了良好基础, 但这些研究大多着眼于一体化模式与合资模式的对比, 缺乏对四种不同运营模式经济与环境效益的系统分析, 更鲜有针对外部政策约束下 CCUS 技术采用决策的动态响应分析.

本文的研究目标是, 揭示政府激励与知识累积对燃煤电厂 CCUS 技术商业模式选择的影响及

成本优化策略, 为企业在碳交易市场背景下的最优运营决策提供理论支持和实践指导. 首先, 构建燃煤电厂 CCUS 运营的微分博弈模型, 对比分析了燃煤发电企业在应用 CCUS 技术时的一体化模式、运营商模式、合资模式和外包模式等四种主要运营模式的成本效益. 其次, 深入探讨了政府补贴和碳交易政策对燃煤发电企业采用 CCUS 技术的影响, 同时考虑了知识累积在促进技术采用和优化中的作用. 最后, 以全球 12 家典型燃煤电厂 CCUS 运营为案例, 探索性检验本文仿真结论的真实性与可靠性.

本文的边际贡献主要包括三个方面: 一是不同于已有研究对 CCUS 运营模式的综合比较与分析, 本研究首次将 CCUS 运营模式区分为一体化模式、运营商模式、合资模式和外包模式四种, 并比较全面地揭示了不同模式的成本收益差异; 二是首次探讨了政府补贴和碳交易政策对燃煤发电企业选择不同 CCUS 运营模式的影响, 丰富了技术商业运营的理论研究, 也为政府低碳政策制定与完善提供理论支撑; 三是引入了微分博弈理论探讨不同运营模式在成本控制和碳减排效益方面的差异, 同时探究了知识累积在促进技术采用和优化中的作用, 为燃煤发电企业采纳 CCUS 技术提供了决策依据.

## 1 问题描述与假设

### 1.1 问题描述

本文构建碳交易市场下考虑 CCUS 的燃煤发电企业价值结构模型, 并将燃煤发电企业 CCUS 应用的商业模式总结为以下四种不同的产业链运营模式: 一体化模式 - 由燃煤电厂统一投资管理运营 CCUS 产业全链路; 运营商模式 - 燃煤电厂只负责碳捕集, 后续产业链由专门的运营商企业负责; 合资模式 - 燃煤电厂通过投资运营企业, 并让其处理燃煤电厂产生的二氧化碳; 外包模式 - 燃煤电厂将二氧化碳全部交由专门的运营商企业, 并对其支付相关费用. 基于此, 采用微分博弈模型对四种不同模式的成本和碳减排效益进行比较分析. 其中, 一体化模式下, 燃煤电厂与运营商目标一致, 构成单一主体的主从博弈关系, 而在运

营商模式、合资模式与外包模式下,燃煤电厂与运营商形成 Stackelberg 博弈关系。

### 1.2 模型构建与参数设置

二氧化碳排放是一个随时间变化的动态过程<sup>[17, 18]</sup>。燃煤电厂或运营商对 CCUS 技术投资会降低碳排放量<sup>[13, 15, 19]</sup>,并且部分二氧化碳能够被自然界吸收,因此碳排放存在自然衰减的现象。参考已有文献对二氧化碳排放量动态过程的描述<sup>[12, 15, 19]</sup>,假定二氧化碳排放量  $X(t)$  随时间  $t \in [0, +\infty)$  的变化服从如下动态方程

$$\dot{X}(t) = E(t) - \varphi k(t) - \delta X(t) \quad (1)$$

其中  $\delta$  是正的常数,为自然界对二氧化碳的吸收率; $E(t)$  表示二氧化碳的初始总排放量; $k(t)$  表示燃煤电厂或运营商对 CCUS 技术的投资大小; $\varphi$  是正的常数,代表 CCUS 技术投资对二氧化碳排放量的影响系数。需要注意的是,碳排放量随着时间的推移而自然衰减,在投资达到一定规模时,二氧化碳排放量可能趋于稳定。同时,不同燃煤发电企业的 CCUS 技术发展及运用存在较大差异,可能对技术投资水平与碳减排效益造成非线性影响。由于本文重点研究 CCUS 投资与运营模式优化问题,故将二氧化碳的瞬时排放量视为外生变量。

进一步,CCUS 的持续投资、新技术引进和整合伴随着知识库以累积的方式发展,因此,技术投资应用过程将产生知识积累<sup>[19]</sup>。CCUS 技术知识积累是指在投资应用技术并提供服务的过程中不断积累应用经验,从而有助于提高碳减排效率和知识总量,其对生产、碳减排和投资具有重要影响<sup>[20, 21]</sup>。并且随着技术应用过程中积累的经验越多,投资成本呈边际下降趋势。根据已有研究对知识累积动态过程的刻画<sup>[17, 18]</sup>,CCUS 技术投资知识累积过程可表示为如下指数平滑的动态过程

$$A(t) = A_0 + \mu \int_0^t k(v) dv \quad (2)$$

由式(2)可得  $\dot{A}(t) = \mu k(t)$ ,其中  $A_0 \geq 0$  表示初始 CCUS 的知识积累量, $\mu > 0$  表示知识积累增长率。如大量关于动态技术投资的文献所述<sup>[12, 19-21]</sup>,技术投资边际成本为凸函数,则  $t$  时刻 CCUS 技术投资成本为  $\frac{\alpha k^2(t)}{2}$ ,满足边际报酬递减规律,其中  $\alpha > 0$  表示投入的成本系数,且为正实数。因此,根据文献[20, 21]对技术投入成本的定义,可得

CCUS 的成本函数为  $C[k(t), A(t)] = \frac{\alpha k^2(t)}{2} - \gamma[A(t) - A_0]$ 。

本文主要考虑碳交易市场条件,假设燃煤电厂或 CCUS 运营商买入和售出碳排放权的价格均为  $P_c(t)$ ,且政府会在碳交易政策实施初期向燃煤电厂或运营商分配碳配额  $E_0$ ,则  $t$  时刻燃煤电厂或运营商在碳交易市场中获得的碳交易收益或支出为<sup>[23, 24]</sup>:  $P_c(t)[E_0 - X(t)]$ 。需要说明的是,碳排放权交易模型与参数设定适用于中国、加拿大、印度等国家,但对于类似美国等采取碳税政策的国家地区并不适用。进一步,考虑政府对 CCUS 技术投资的补贴政策。假定政府根据 CCUS 投资额的补贴比例为  $s$ ,约束条件为  $s \in [0, 1)$ ,则政府补贴为  $sk(t)$ 。

## 2 不同运营模式微分博弈分析

在政府补贴的背景下,本节根据企业在碳交易市场中的定价交易规则与成本结构,进行不同运营模式的动态博弈分析。并为不同商业模式构建了包含利润最大化和成本最小化的两种不同目标函数。假设燃煤电厂与 CCUS 均为风险中性和完全理性者,追求利润最大化或成本最小化目标。

### 2.1 一体化模式(I)

在一体化模式下,燃煤电厂不仅是电力生产主体,还统一投资管理运营 CCUS 产业全链路。图 1 表示一体化模式的运营框架,燃煤电厂参与碳市场交易,集成碳捕获、碳封存和碳利用等过程,并且政府对其进行减排投资补贴。由于燃煤电厂直接控制 CCUS 产业链的各个环节,因而能更有效管理和分散技术风险。同时,燃煤电厂在一体化模式下可以更有效地积累关于 CCUS 技术的专业知识和经验,对技术创新和持续改进至关重要。

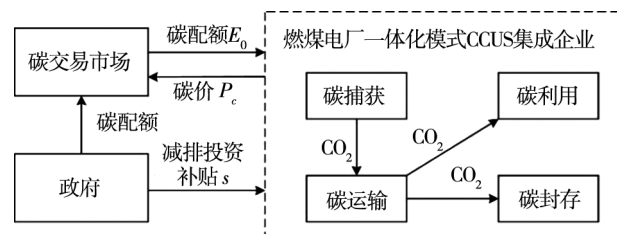


图 1 一体化模式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the integrated modes

在一体化模式下,集成企业的决策目标是求解最优 CCUS 技术投资  $k$ , 从而在连续时间  $t \in [0, +\infty)$  内实现成本最小化或成本负值最大化, 其中  $t \in [0, +\infty)$  表示时间贴现率, 此模型可表示为

$$\begin{aligned} \max_k \int_0^{+\infty} & -e^{-\rho t} \left\{ \frac{\alpha k^2(t)}{2} - \gamma[A(t) - A_0] - \right. \\ & \left. P_c[E_0 - X(t)] - sk(t) \right\} dt \\ \text{s. t.} & \begin{cases} \dot{X}(t) = E(t) - \varphi k(t) - \delta X(t), \\ X(0) = X_0 \geq 0 \\ \dot{A}(t) = \mu k(t), A(0) = A_0 \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

**命题 1** 一体化模式下 CCUS 技术投资、碳排放量、成本/利润等关键变量均衡解如下<sup>②</sup>

$$\begin{aligned} k^* &= \frac{(\rho + \delta)(\gamma\mu + s\rho) + \varphi\rho P_c}{\alpha\rho(\rho + \delta)} \\ X^* &= \frac{E(t) - \varphi k^*}{\delta} \\ C^* &= \frac{\alpha(k^*)^2}{2} - \gamma[A(t) - A_0] - \\ & P_c(E_0 - X^*) - sk^* \end{aligned}$$

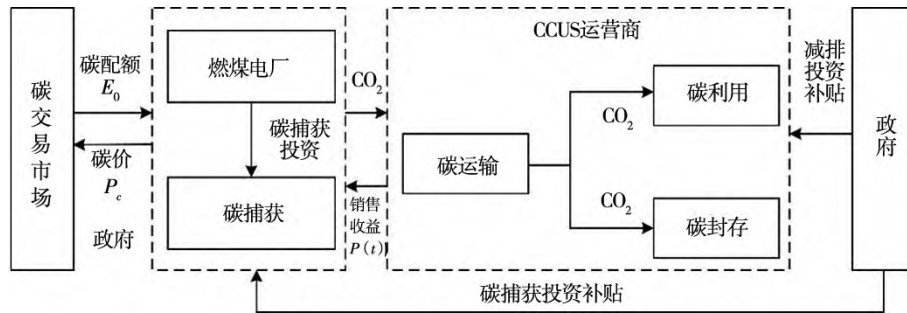


图 2 运营商模式示意图

Fig.2 Schematic diagram of operator modes

1) 类似地, 根据知识累积的函数构建, 运营商模式下技术投资知识累积

燃煤电厂  $A_1(t) = A_{10} + \mu_1 \int_0^t k_1(v) dv$ , 因此有

$$\dot{A}_1(t) = \mu_1 k_1(t);$$

CCUS 运营商  $A_2(t) = A_{20} + \mu_2 \int_0^t k_2(v) dv$ , 因此有

$$\dot{A}_2(t) = \mu_2 k_2(t).$$

2) 将碳捕获投资技术与碳利用封存技术投资比例设置为  $k_1(t) + k_2(t) = k(t)$

**推论 1** 均衡 CCUS 技术投资与知识累积学习率以及政府补贴比例呈正比关系, 而与碳排放量影响关系则相反。

推论 1 表明, 在一体化模式中, 随着投资增加, 其在 CCUS 领域的专业知识和经验同步增长, 随之带来技术进步与成本效率提高. 增加政府补贴比例可减轻燃煤电厂的初始投资压力, 激励更多投资与技术革新. 此外, 政府的补贴和投资促进知识共享与技术协作. 随着 CCUS 投资的扩大和知识积累, 碳排放将降低. 然而, 此模式要求燃煤电厂短期内承担较高的初始投资, 可能限制其减排能力的提升.

**2.2 运营商模式 (M)**

在运营商模式下, 燃煤电厂专注于碳捕集的投资和运营, 而二氧化碳的运输、利用和封存则由 CCUS 运营商企业负责, 图 2 表示运营商模式运作流程. 燃煤电厂在这种模式下只负责碳捕集环节. 通过与运营商合作, 燃煤电厂可以分散与碳捕集、运输、利用和封存相关的风险, 燃煤电厂与运营商确定利润分配的比例.

3) 燃煤电厂成本函数

$$\begin{aligned} C_1(t) &= \frac{\sigma k_1^2(t)}{2} - \gamma_1[A_1(t) - A_{10}] - \\ & P_c[E_0 - X(t)] - \theta E(t)P(t) - sk_1(t) \end{aligned}$$

4) CCUS 运营商利润函数

$$\begin{aligned} C_2(t) &= \theta\pi_2(t) - \theta E(t)P(t) - \frac{\alpha k_2^2(t)}{2} + \\ & \gamma_2[A_2(t) - A_{20}] + sk_2(t) \end{aligned}$$

5) 运营商模式下, 燃煤电厂与 CCUS 运营商

② 命题及推论证明详细公式略, 有需要者, 可向作者索要.

构成 Stackelberg 博弈关系. 其中燃煤电厂是决策领导者, 而 CCUS 运营商为决策跟随者. 燃煤电厂的决策目标是求解最优二氧化碳销售价格  $P$  与碳捕获技术投资  $k_1$ , CCUS 运营商的决策目标

求解最优二氧化碳购买数量比例  $\theta$  与碳封存利用技术投资  $k_2$ , 从而各自在连续时间  $t \in [0, +\infty)$  内实现成本最小化或成本负值最大化, 其中  $t \in [0, +\infty)$  表示时间贴现率, 此动态博弈模型可表示为

$$\begin{aligned} & \max_{P, k_1} \int_0^{+\infty} -e^{-\rho t} \left\{ \frac{\sigma k_1^2(t)}{2} - \gamma_1 [A_1(t) - A_{10}] - P_c [E_0 - X(t)] - \theta E(t) P(t) - s k_1(t) \right\} dt \\ & \text{s. t. } \begin{cases} \max_{k_2, \theta} \int_0^{+\infty} e^{-\rho t} \left\{ \theta \pi_2(t) - \theta E(t) P(t) - \frac{\alpha k_2^2(t)}{2} + \gamma_2 [A_2(t) - A_{20}] + s k_2(t) \right\} dt \\ \dot{X}(t) = E(t) - \varphi_1 k_1(t) - \varphi_2 k_2(t) - \delta X(t), X(0) = X_0 \geq 0 \\ \dot{A}_1(t) = \mu_1 k_1(t), A_1(0) = A_{10} \geq 0 \\ \dot{A}_2(t) = \mu_2 k_2(t), A_2(0) = A_{20} \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

**命题 2** 运营商模式下 CCUS 技术投资、碳排放量、成本/利润等关键变量均衡解如下

$$\begin{aligned} k_1^* &= \frac{\rho s + \mu_1 \gamma_1}{\rho \sigma} \\ k_2^* &= \frac{\rho s + \mu_2 \gamma_2}{\rho \alpha} \\ X^* &= \frac{E(t)}{\delta} - \frac{\alpha \varphi_1 (\rho s + \mu_1 \gamma_1) - \sigma \varphi_2 (\rho s + \mu_2 \gamma_2)}{\rho \sigma \alpha \delta} \end{aligned}$$

燃煤电厂均衡成本为

$$C_1 = \frac{\sigma (k_1^*)^2}{2} - \gamma_1 [A_1(t) - A_{10}] - P_c (E_0 - X^*) - \theta E(t) P(t) - s k_1^*$$

CCUS 运营商均衡利润为

$$C_2 = \theta \pi_2(t) - \theta E(t) P(t) - \frac{\alpha (k_2^*)^2}{2} + \gamma_2 [A_2(t) - A_{20}] + s k_2^*$$

**推论 2** 运营商模式下均衡碳捕捉技术投资以及均衡碳封存利用技术投资与知识累积学习率以及政府补贴比例呈正比关系, 与碳排放量影响

关系则相反.

推论 2 表明, 在运营商模式下, 燃煤电厂专注于碳捕捉技术的投资和运营. 随着投资的增加, 电厂在碳捕捉技术方面的知识和经验也会增长. 这种知识累积有助于提高碳捕捉技术的效率和效果, 降低运营成本. 政府财政支持可以降低燃煤电厂在碳捕捉技术上的初始投资负担, 鼓励更多的投资和技术创新. 同时, 随着碳捕捉和封存技术的改进和知识累积的增加, 预期碳排放量将会降低.

### 2.3 合资模式 (J)

在合资模式下, 燃煤电厂与 CCUS 运营企业建立合作伙伴关系, 共同投资并运营 CCUS 项目. 图 3 为合资模式的运营框架, 燃煤电厂对 CCUS 运营商进行注资并按比例分成, 运营商参与碳市场交易并负责技术研发. CCUS 运营商在这种模式下负责整个流程的管理, 包括碳捕集、运输、封存和利用. 燃煤电厂作为合资企业的股东之一, 可以根据其投资比例获得相应的股权分红.

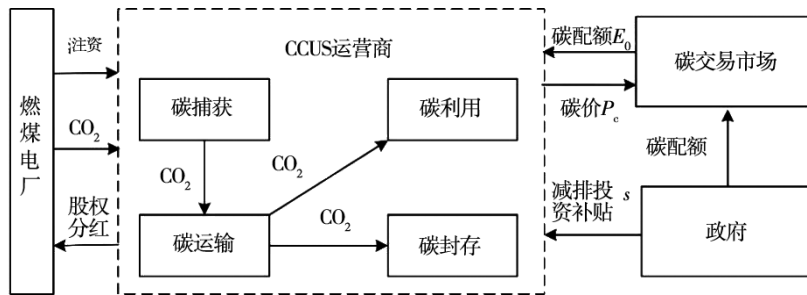


图 3 合资模式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the joint venture modes

1) 燃煤电厂利润函数

$$\Pi_1(t) = \pi_1(t) - \xi \left[ \frac{\alpha k^2(t)}{2} - \pi_2(t) \right]$$

2) CCUS 运营商利润函数

$$\Pi_2(t) = (1 - \xi) \pi_2(t) - (1 - \xi) \frac{\alpha k^2(t)}{2} +$$

$$\gamma[A(t) - A_0] + P_c[E_0 - X(t)] + sk(t)$$

3) 合资模式下, 燃煤电厂与 CCUS 运营商构成 Stackelberg 博弈关系. 其中燃煤电厂是决策领导者, 而 CCUS 运营商为决策跟随者. 燃煤电厂的决策目标是求解最优注资比例  $\xi$ , 运营商的决策

$$\begin{aligned} & \max_{\xi} \int_0^{+\infty} e^{-\rho t} \left\{ \pi_1(t) - \xi \left[ \frac{\alpha k^2(t)}{2} - \pi_2(t) \right] \right\} dt \\ \text{s. t. } & \begin{cases} \max_k \int_0^{+\infty} e^{-\rho t} \left\{ (1 - \xi) \pi_2(t) - (1 - \xi) \frac{\alpha k^2(t)}{2} + \gamma[A(t) - A_0] + P_c[E_0 - X(t)] + sk(t) \right\} dt \\ \dot{X}(t) = E(t) - \varphi k(t) - \delta X(t), X(0) = X_0 \geq 0 \\ \dot{A}(t) = \mu k(t), A(0) = A_0 \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

**命题3** 合资模式下 CCUS 技术投资、碳排放量、成本/利润等关键变量均衡解如下均衡解

$$k^* = \frac{(\rho + \delta)(s\rho + \gamma\mu) - \varphi\rho P_c}{(\rho + \delta)(1 - \xi)\alpha\varphi}$$

$$X^* = \frac{E(t)}{\delta} - \frac{\varphi(\rho + \delta)(s\rho + \gamma\mu) - \varphi^2\rho P_c}{\alpha\varphi\delta(\rho + \delta)(1 - \xi)}$$

燃煤电厂均衡利润为

$$\Pi_1 = \pi_1(t) - \xi \left[ \frac{\alpha(k^*)^2}{2} - \pi_2(t) \right]$$

CCUS 运营商均衡利润为

$$\Pi_2 = (1 - \xi) \pi_2(t) - (1 - \xi) \frac{\alpha(k^*)^2}{2} + \gamma[A(t) - A_0] + P_c(E_0 - X^*) + s(k^*)^2$$

**推论3** 合资模式下, 均衡 CCUS 技术投资与知识累积学习率以及政府补贴比例呈正比关系,

目标求解最优 CCUS 技术投资  $k$ , 从而各自在连续时间  $t \in [0, +\infty)$  内实现利润最大化, 其中  $t \in [0, +\infty)$  表示时间贴现率,  $\pi_1(t)$ ,  $\pi_2(t)$  分别表示燃煤电厂与 CCUS 运营商的运营收益且均为外生变量, 此动态博弈模型可表示为

与碳排放量影响关系则相反.

推论3 表明, 在合资模式下, 燃煤电厂和 CCUS 运营商的共同投资有助于加速知识累积. 政府补贴比例的增加可以降低合资企业在 CCUS 技术上的初始投资负担. 随着技术投资的增加和知识累积的提高, 预期碳排放量将会降低.

### 2.4 外包模式(O)

在外包模式下, 燃煤电厂将 CCUS 技术的应用和管理外包给专业的 CCUS 运营商, 这种模式允许燃煤电厂专注于其核心业务即电力生产. 图4表示外包模式运作流程, 燃煤电厂参与碳市场交易运营商负责全流程技术研发. 燃煤电厂只需支付固定的费用给 CCUS 运营商, 用于处理其产生的二氧化碳.

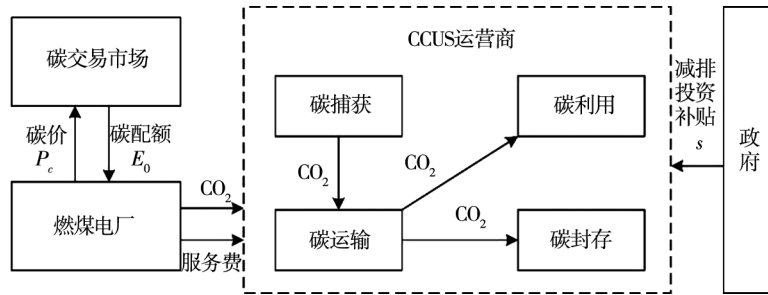


图4 外包模式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of outsourcing modes

1) 假定燃煤电厂的边际收益为, 燃煤电厂利润函数

$$\Pi_1(t) = \omega\varphi - \omega E(t) + P_c[E_0 - X(t)]$$

2) CCUS 运营商成本函数

$$C_2(t) = \frac{\alpha k^2(t)}{2} - \gamma[A(t) - A_0] - sk(t) - \omega E(t)$$

3) 外包模式下, 燃煤电厂与 CCUS 运营商构

成 Stackelberg 博弈关系. 其中燃煤电厂是决策领导者, 而 CCUS 运营商为决策跟随者. 燃煤电厂的决策目标是求解最优二氧化碳处理服务费  $\omega$ , 从而各自在连续时间  $t \in [0, +\infty)$  内实现利润最大化, 而运营商的决策目标求解最优 CCUS 技术投资  $k$ , 从而在连续时间  $t \in [0, +\infty)$  内实现

成本最小化或成本负值最大化目标,其中  $t \in [0, +\infty)$  表示时间贴现率,  $\varphi$  表示该模式下燃煤电厂运营收益且为外生变量,此动态博弈模型可表示为

$$\begin{aligned} & \max_{\omega} \int_0^{+\infty} e^{-\rho t} \left\{ \omega \varphi - \omega E(t) + P_c [E_0 - X(t)] \right\} dt \\ & \text{s. t.} \begin{cases} \max_k \int_0^{+\infty} -e^{-\rho t} \left\{ \frac{\alpha k^2(t)}{2} - \gamma [A(t) - A_0] - sk(t) - \omega E(t) \right\} dt \\ \dot{X}(t) = E(t) - \varphi k(t) - \delta X(t), X(0) = X_0 \geq 0 \\ \dot{A}(t) = \mu k(t), A(0) = A_0 \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

**命题 4** 外包模式下 CCUS 技术投资、碳排放量、成本/利润等关键变量均衡解如下

$$\begin{aligned} k^* &= \frac{s\rho + \mu\gamma}{\alpha\rho} \\ X^* &= \frac{E(t)}{\delta} - \frac{\varphi(s\rho + \mu\gamma)}{\alpha\rho\delta} \end{aligned}$$

燃煤电厂均衡利润为

$$\Pi_1 = \omega\varphi - \omega E(t) + P_c(E_0 - X^*)$$

CCUS 运营商均衡成本为

$$C_2 = \frac{\alpha(k^*)^2}{2} - \gamma[A(t) - A_0] - sk^* - \omega E(t)$$

推论 4 外包模式下,均衡 CCUS 技术投资与知识累积学习率以及政府补贴比例呈正比关系,与碳排放量影响关系则相反。

推论 4 表明,在外包模式下,CCUS 技术投资主要由运营商承担,而燃煤电厂支付的费用与运营商的投资水平和技术效率相关。随着投资增长,其在碳捕集、利用和封存方面的专业知识和经验也会增长。政府补贴比例的增加可以降低运营商在技术上的初始投资负担,从而促进更多的技术创新和知识累积。

### 3 仿真分析与讨论

上述均衡解难以直观反映出四种不同 CCUS 运营模式的利润及碳排放量与关键变量之间的关系,故本节进行数值模拟仿真分析。初始参数设定主要参考实际案例资料、碳交易政策文件、CCUS 报告资料与现有研究文献等,并且根据单位与均值原则调整相应的比例设定,着重对比分析四种不同模式下的利润与碳排放绩效等差异。

首先,设定 CCUS 技术投资成本及运营模式收益相关参数。根据已有文献关于技术投资成本系数的固定成本与运行成本的比例设定<sup>[15, 16, 25]</sup>,例如中国国能锦界燃煤电厂项目的投资成本约为 3 亿元,上海石洞口第一电厂的项目投资成本约为 2 亿元,同时参考中国二氧化碳捕集利用与封存 2023 年度报告示范项目碳捕集、火力发电及运输成本,设置投资成本相关系数  $\alpha = 4, \sigma = 2$ 。根据 Sundance 燃煤电厂、美国 Milton R. Young 燃煤发电厂、上海石洞口第一电厂三种典型运营模式的项目平均收益范围为 300 元/t ~ 350 元/t CO<sub>2</sub>,同时参考已有文献并考虑到单位比例设计与均值原则<sup>[4]</sup>,设置 CCUS 运营模式利润相关系数  $\pi_1 = 300, \pi_2 = 700$ 。

其次,设定碳交易初始配额及碳交易价格系数。中国碳市场交易价格在 40 元/t ~ 60 元/t 范围内,工业 CO<sub>2</sub> 售价在 200 元/t ~ 400 元/t 范围内,现有技术条件下引入 CCUS 技术后每吨 CO<sub>2</sub> 碳捕集成本在 160 元/t ~ 600 元/t 之间,并根据《2019 年—2020 年全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案(发电行业)》,以此设定碳交易政策相关的初始碳配额、碳交易价格系数分别为  $E_0 = 500, P_c = 0.3$ <sup>[23, 26]</sup>。此外,根据碳交易市场实际运行情况与现有文献假设,设定二氧化碳交易价格与投资补贴相关系数  $s = 0.2, P = 3$ <sup>[24, 25, 27, 28]</sup>。

最后,设定碳排放量与知识累积相关参数。根据实际典型案例英国 Net Zero Teesside 项目、荷兰鹿特丹 Uniper 燃煤电厂项目年碳捕集量均值为 2 000 kt CO<sub>2</sub>,并参考现有文献设定二氧化碳排

放量等相关系数  $E(t) = 200, \varphi = 8, \delta = 0.2^{[3, 14, 29]}$ . 与现有文献假设一致, 设置知识累积相关系数  $\gamma = 3, \mu = 4, A_0 = 10$ , 并且设定折现率  $\rho = 0.2^{[20]}$ . 参考 CCUS 技术项目公开数据资料与现有文献参数设定思路, 并根据外包模式典型案例印度 NTPC 发电厂、美国 San Juan 发电厂项目的年运营成本均值为 300 元/t CO<sub>2</sub>, 按比例设定其他参数初始仿真值为  $\varphi = 500, \omega = 2, \xi = 0.7, \theta = 0.8^{[4, 12, 15]}$ .

基于此, 本节利用仿真分析与数值模拟对比了四种不同模式的利润与碳排放量, 重点关注政府补贴比例与知识累积系数等关键变量对 CCUS 技术投资与碳排放量影响的差异.

### 3.1 四种不同模式的利润与碳排放量对比

表 1 与表 2 分别呈现了四种 CCUS 运营模式对燃煤发电企业经济和环境影响的量化结

果. 一体化模式的总利润较高, 表明当运营商与燃煤发电企业作为单一经济实体运作时, 能够实现经济效益最大化. 运营商模式的总利润较一体化模式略低, 但仍显示出经济上的可行性. 燃煤电厂在此模式下的利润为最高, 而运营商则面临亏损; 该模式下碳排放量最高, 表明运营商模式在减少碳排放方面效果有限. 合资模式则呈现出显著的经济亏损, 这是由于合资企业在建立与运营技术时面临的高成本; 而该模式实现了净零碳排放, 展现了其在环境绩效方面的极大潜力. 外包模式下的总利润最高, 经济效益表现最为出色; 此外, 运营商在外包模式下的利润也最高, 表明外包模式对 CCUS 运营商可能是最具经济效益的选择. 该模式下的碳排放量仅低于运营商模式, 表明外包模式同时具有良好的环境效益.

表 1 四种模式利润对比表

Table 1 Comparative table of profits of four modes

模式	一体化模式	运营商模式	合资模式	外包模式
总利润	672.705	446.415	-2 010.014	1 431.205
燃煤电厂利润	-	665.510	-2 066.003	630.600
CCUS 运营商利润	-	-219.095	55.989	800.605

注: 一体化模式只考虑总利润.

表 2 四种模式碳排放量对比表

Table 2 Comparative table of carbon emissions of four modes

模式	一体化模式	运营商模式	合资模式	外包模式
碳排放量	338.000	694.000	0.000	398.000

综上所述, 一体化模式下, 利润与碳排放绩效均较为可观, 与现实生活中的垄断或集成模式的优势比较一致. 运营商模式下, 燃煤电厂存在短视行为, 虽利润较高但存在大量碳排放. 合资模式下, 尽管利润不存在优势, 但是能实现近零排放. 外包模式下, 利润与碳排放绩效均表现优异, 虽然燃煤电厂利润次于运营商模式下的利润, 但该模式实现了相对更好的碳排放绩效. 综合从利润与碳排放绩效来看, 外包模式是相对最优的模式. 这些结果表明, 不同的 CCUS 运营模式在经济效益与环境绩效方面存在较大差异, 燃煤电厂选择合

适的运营模式需要综合考虑经济可行性和环境责任.

### 3.2 关键变量影响下四种模式总利润对比

#### 3.2.1 政府补贴比例对总利润的影响分析

由于四种模式的总利润数值区间差异较大, 为更直观展示关键变量的影响差异和总利润的变动趋势, 接下来用四个图分别表示不同 CCUS 技术运营模式在政府不同投资比例下的总利润变化. 图 5 显示, 政府补贴比例( $s$ )对总利润的影响大小依次为: 外包模式 > 运营商模式 > 一体化模式 > 合资模式. 合资模式的总利润随着政府补贴

比例的增加而显著提升,而其他模式的总利润则相对稳定.政府补贴比例对合资模式总利润的影响最大,且总利润随着政府补贴比例的上升而不

断增加.在合资模式中,由于总利润的提升主要依赖于政府补贴支持,表明该模式下的项目可能在自身商业可行性和市场竞争力方面相对较弱.

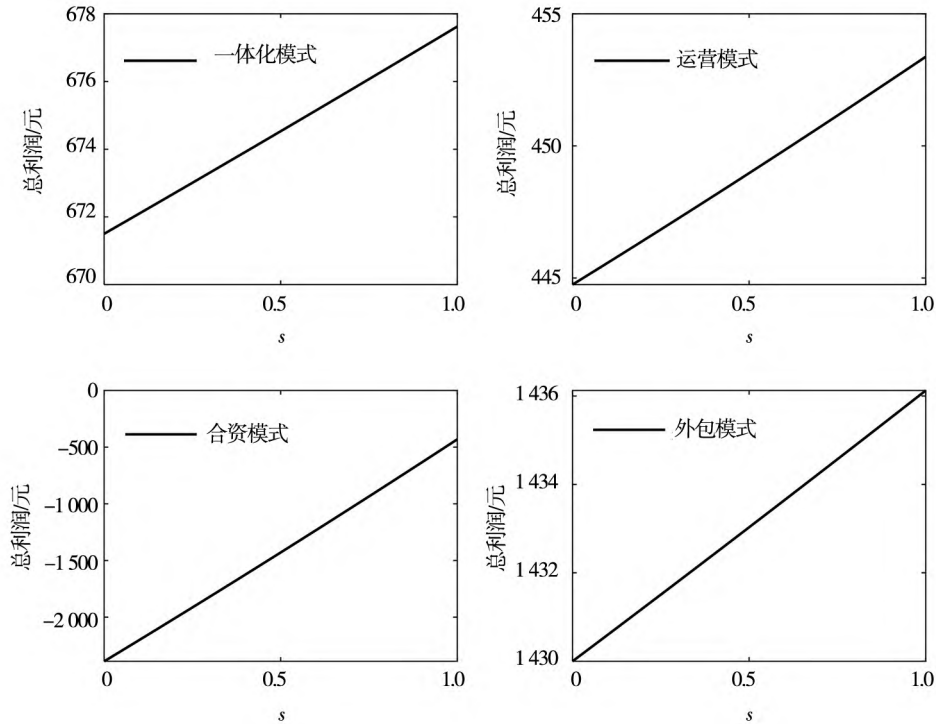


图 5 政府补贴比例对总利润的影响对比

Fig. 5 Comparison of the impact of government subsidy ratios on total profits

### 3.2.2 知识累积学习率对总利润的影响分析

图 6 展示了知识累积学习率( $\gamma$ )对总利润的影响差异.

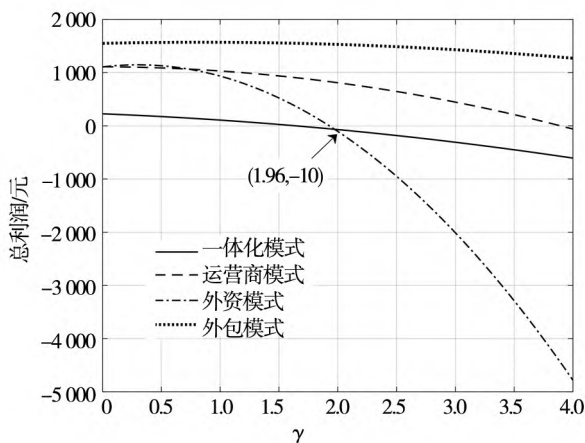


图 6 知识累积学习率对总利润的影响对比

Fig. 6 Comparison of the impact of knowledge accumulation learning rate on total profits

由图 6 可知,可以发现,随着知识累积学习率

的增加,总利润在四种运营模式下均呈现出不同程度的下降.尤其是,合资模式在低知识累积学习率时具有较高的总利润,而随着学习率的逐渐提高,总利润呈大幅下降趋势.此外,图 6 显示,整体上外包模式下的总利润大于其他三类模式下的总利润.

### 3.3 关键变量对 CCUS 技术投资的影响对比

#### 3.3.1 政府补贴比例对 CCUS 技术投资的影响

图 7 展示了政府补贴比例( $s$ )对 CCUS 技术投资水平的影响.在四种模式中,政府补贴比例变动对 CCUS 技术投资的影响大小如下:合资模式 > 运营商模式 > 一体化模式 > 外包模式.随着政府补贴比例的增加,CCUS 技术的投资也呈线性增长.尤其是在合资模式下,政府补贴比例对技术投资的影响最大,表明在风险和收益共享的合作中,政府资金的注入对于吸引资本投入具有显著影响.

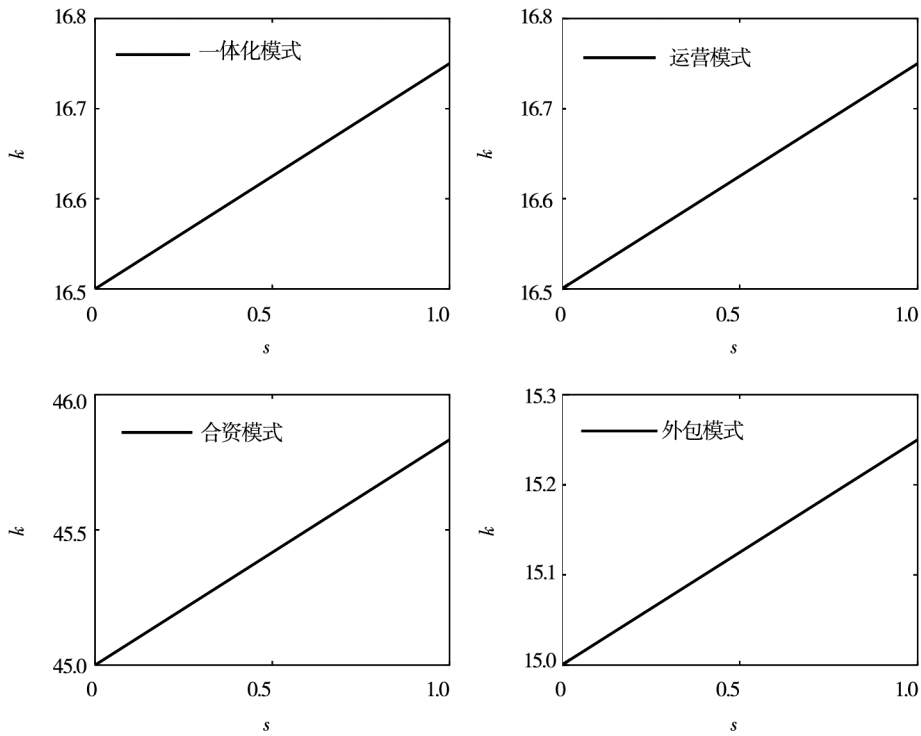


图7 政府补贴比例对CCUS技术投资的影响对比

Fig. 7 Comparison of the impact of government subsidy ratios on CCUS technology investment

3.3.2 知识累积学习率对CCUS技术投资的影响

图8显示了知识累积学习率( $\gamma$ )对CCUS技术投资的影响。

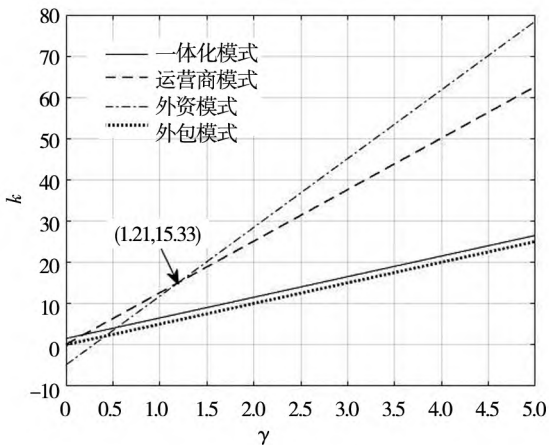


图8 知识累积学习率对CCUS技术投资的影响对比

Fig. 8 Comparison of the impact of knowledge accumulation learning rate on CCUS technology investment

由图8可知,四种模式下的CCUS技术投资均随着知识累积学习率的提升而增加,表明知识累积对技术投资具有正向影响。此外,不同运营模

式表现出不同的投资增长趋势。具体来说,运营商模式和合资模式的投资增长速度快于一体化模式和外包模式,表明运营商模式和合资模式更能从知识累积中获益。当学习率超过一定的阈值时(如图中 $\gamma = 1.21$ ),合资模式下的CCUS技术投资超过了其他三种模式的投资。

3.4 关键变量对碳排放量的影响对比

3.4.1 政府补贴比例对碳排放的影响

图9展示了政府补贴比例( $s$ )对碳排放的影响。可以发现,随着政府补贴比例增加,碳排放量整体呈现下降趋势,其中合资模式下的降量最大。这说明政府的财政支持对于降低碳排放具有正面影响,其通过提供资金支持能促进技术的实施和效率提升。此外,不同模式下碳排放量的下降速率存在差异。特别是在合资模式下,碳排放量随政府补贴比例增加的下跌幅度最为显著。一体化模式和外包模式显示出相对较缓的碳排放下降趋势,表明在这些模式下,额外的政府支持对提高碳减排效率影响不显著。

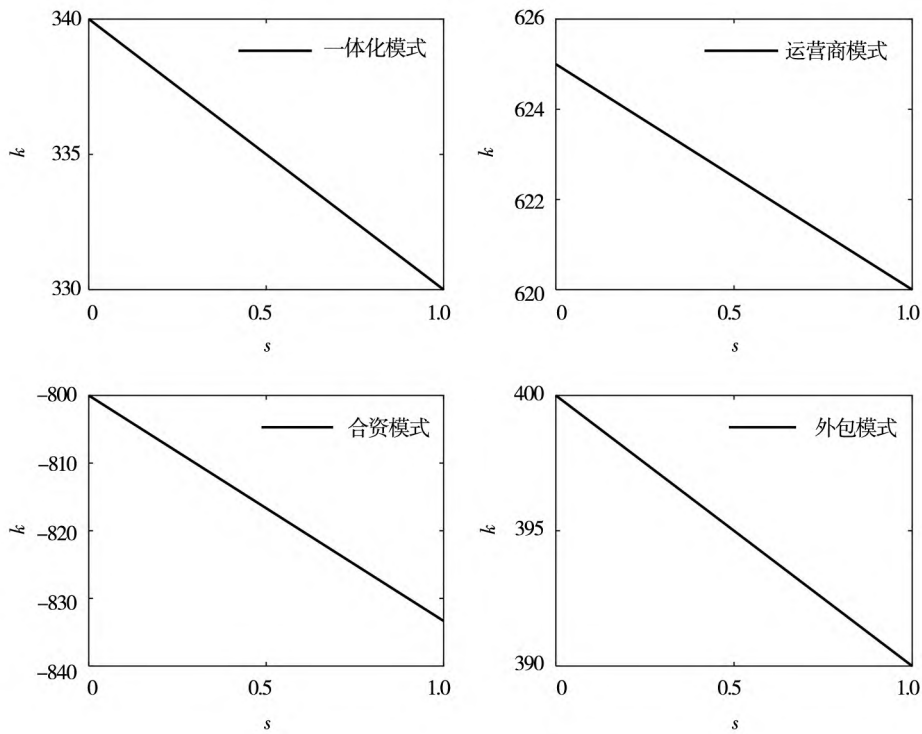


图 9 政府补贴比例对碳排放的影响对比

Fig.9 Comparison of the impact of government subsidy ratios on carbon emissions

### 3.4.2 知识累积学习率对碳排放的影响

图 10 展示了知识累积学习率( $\gamma$ )对碳排放的影响.

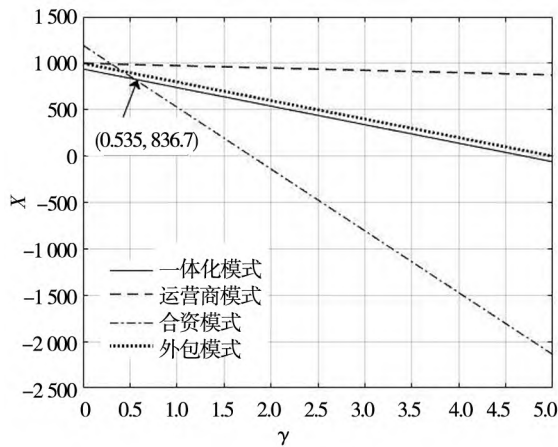


图 10 知识累积学习率对碳排放的影响对比

Fig.10 Comparison of the impact of knowledge accumulation learning rate on carbon emissions

由图 10 可知,在四种模式中,随着知识累积学习率的增加,碳排放量均呈现下降趋势.这表明知识累积的提升有助于减少 CCUS 运营中的碳排放,反映了技术学习和效率提高在环境效益提升

中的作用.其中,合资模式的碳减排效果随学习率的提升而加快最为明显,表明合资模式在实现技术进步和效率方面更为有效.此外,图中的特定点  $(0.535, 836.7)$  表明在一定学习率阈值后,合资模式下企业碳排放量的减少开始加速,成为四种运营模式中碳减排效率最高的模式.

## 4 案例研究

本节结合案例对前文理论分析与数值模拟结果进行进一步验证.具体而言,选取全球 12 个典型燃煤电厂加装 CCUS 的实际案例,对四个不同模式各自对应的企业案例进行对比分析.案例的实际数据与前文模型及仿真分析的关键变量指标紧密相关,其中,项目总投资额及年运营成本与技术投资与运营成本相对应,项目年碳捕集量与碳排放绩效相关,项目收益则代表 CCUS 技术应用的系统利润.通过案例对比探索性检验本文仿真结论的可靠性<sup>[30]</sup>.

表3 呈现了四种 CCUS 运营模式在实际项目中的应用情况与关键经济指标。

表3 四种模式实际案例对比表

Table 3 Comparative table of actual cases of four modes

运营模式	项目名称	项目总投资额/(亿元)	年碳捕集量/(kt CO <sub>2</sub> )	年运营成本/(元/t CO <sub>2</sub> )	项目收益/(元/t CO <sub>2</sub> )
一体化模式 <sup>[30]</sup>	中国国能锦界燃煤电厂项目	3	150	450 ~ 480	350
	加拿大 Boundary Dam 燃煤发电厂	约 75	1 000	540	200
	江苏泰州电厂项目 <sup>③</sup>	约 10	500	350 ~ 430	400
运营商模式	Sundance 燃煤电厂 <sup>④</sup>	约 125	1 000	280	300
	上海石洞口第一电厂 <sup>⑤</sup>	2	100	400 ~ 600	350
	美国 Milton R. Young 燃煤发电厂 <sup>⑥</sup>	约 140	3 000	350 ~ 450	300 ~ 400
合资模式	美国 Parish 发电厂 <sup>⑦</sup>	约 72	1 400	430 ~ 510	100 ~ 180
	加拿大 Shand 燃煤电厂 <sup>⑧</sup>	约 75	2 000	450 ~ 540	100 ~ 200
	英国 Net Zero Teesside 项目 <sup>⑨</sup>	约 90	2 000	450 ~ 600	200 ~ 300
外包模式	印度 NTPC 发电厂 <sup>⑩</sup>	约 72	8 000	300 ~ 400	350
	美国 San Juan 发电厂 <sup>⑪</sup>	约 94	6 000	350 ~ 400	300 ~ 350
	荷兰鹿特丹 Uniper 燃煤电厂 <sup>⑫</sup>	约 35	2 000	300 ~ 400	300

由表3可知,一体化模式的项目年运营成本居中,但项目收益较高,特别是江苏泰州电厂CCUS项目的收益达到400元/t CO<sub>2</sub>,表明当运营与燃煤发电高度整合时,可以实现良好的经济效益.运营商模式的项目收益较高,但碳捕集量受技术影响较大,除新建的Milton R. Young燃煤电厂外,碳捕集量与其他模式下的同规模项目相比并不理想.合资模式下的项目显示出较高的碳捕集能力,如加拿大Shand燃煤电厂和英国Net Zero Teesside项目均达到2 000 kt/年.然而,这些项目

的年运营成本(430元/t ~ 600元/t CO<sub>2</sub>)普遍较高,项目收益则(100元/t ~ 300元/t CO<sub>2</sub>)相对较低.这反映了合资模式在环境效益和经济效益之间的权衡.外包模式的项目年运营成本相对较低,项目收益在四种模式中最高,尤其是美国San Juan发电厂的收益区间高达350元/t ~ 470元/t CO<sub>2</sub>.这两个项目的设计年碳捕集量也是所有案例中最高的,分别为8 000 kt和6 000 kt,凸显了它们作为行业领先的CCUS示范工程的地位.从收益与碳捕集量来看,外包模式表现较为优异,尽管项目

③ 江苏泰州电厂项目. [https://www.nea.gov.cn/2023-06/11/c\\_1310726491.htm](https://www.nea.gov.cn/2023-06/11/c_1310726491.htm).

④ Transalta 官网. <https://transalta.com/about-us/our-operations/facilities/sundance/>.

⑤ 华能国际电力股份有限公司官网. <https://www.hpi.com.cn/Pages/Subsidiarydetail.aspx?SubID=67d329bf-951f-4ff1-bdbb-53611f172e9d>.

⑥ 美国 Milton R. Young 燃煤发电厂项目官网. <https://www.projecttundrand.com/about>.

⑦ Petra Nova 项目介绍. <https://www.energy.gov/fecm/petra-nova-wa-parish-project>.

⑧ Sakspower 官网. <https://www.saskpower.com/>.

⑨ 英国 Net Zero Teesside 项目官网. <https://www.netzeroteesside.co.uk>.

⑩ Powermag 官网. <https://www.powermag.com/carbon-capture-begins-at-indias-largest-coal-power-plant/>.

⑪ Enchantenergy 官网. <https://www.enchantenergy.com/san-juan-generating-station>.

⑫ 荷兰鹿特丹 Uniper 燃煤电厂项目官网. <https://www.uniper.energy>.

收益低于运营商模式平均水平,但实现了良好的碳减排.综合考虑利润与碳排放绩效时,外包模式是更优选择,与仿真分析结论一致.

下面以中国、美国、加拿大、印度四国作为主要研究对象,进一步探究不同国家或地区特定经

济、政策和技术环境下 CCUS 技术运营模式的适用性.麦肯锡曾根据各个国家已做出的对 CCUS 技术的投资承诺进行测算<sup>⑬</sup>,发现到 2050 年全球累计投资的 55% 以上将集中在中国、北美和印度.具体分析结果如表 4 所示.

表 4 不同国家或地区外部环境对比表

Table 4 Comparative table of external environments in different countries or regions

国家	经济环境	政策环境	技术环境
中国	1) 快速增长的能源需求; 2) 煤炭在能源结构中占主导地位; 3) 政府主导的经济发展模式	1)《国家发展改革委等部门关于加强煤炭清洁高效利用的意见》(2024);明确提出推进煤电项目实施 CCUS 改 <sup>⑭</sup> ; 2)《“十四五”现代能源体系规划》(2022);首次将 CCUS 列为重点发展的低碳前沿技术 <sup>⑮</sup> ; 3)《国务院关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》(2021);提出推动 CCUS 等负碳技术开展工程化示范 <sup>⑯</sup> ; 4)《碳排放权交易管理办法(试行)》(2021);为 CCUS 项目参与全国碳市场奠定基础 <sup>⑰</sup>	1) 快速发展的自主 CCUS 技术; 2) 大规模示范项目的推广; 3) 产学研合作模式普遍
加拿大	1) 资源丰富,尤其是油砂资源; 2) 环境保护意识较高; 3) 市场化程度高	1)《泛加拿大清洁增长和气候变化框架》(2016);将 CCUS 列为关键减排技术 <sup>⑱</sup> ; 2) 碳捕集投资税收抵免(2022);为 CCUS 项目提供最高 50% 的资本成本抵免 <sup>⑲</sup> ;	1) 世界领先的 CCUS 技术; 2) EOR 技术成熟; 3) 地质封存条件优越
美国	1) 多元化能源结构; 2) 私营部门强大; 3) 发达的资本市场	1) 45Q 税收抵免(修订于 2018);为每吨封存的 CO <sub>2</sub> 提供最高 50 美元的税收抵免 <sup>⑳</sup> ; 2) 基础设施投资和就业法案(2021);为 CCUS 项目提供直接资金支持 <sup>㉑</sup>	1) 技术创新能力强; 2) 丰富的 CCUS 示范经验; 3) 广泛的产业链支持
印度	1) 快速增长的经济和能源需求; 2) 煤炭依赖度高; 3) 资金和技术限制较大	1)《国家清洁能源基金》(2010);为 CCUS 等清洁能源技术提供资金支持 <sup>㉒</sup> ; 2)《国家电力政策》(2021 草案);首次明确提出发展 CCUS 技术 <sup>㉓</sup> ; 3) 执行—获得—交易(PAT)机制;为能效提升和减排项目创造市场激励 <sup>㉔</sup>	1) CCUS 技术水平相对落后; 2) 示范项目较少; 3) 正在加强研发投入

由表 4 可知,CCUS 运营模式的适用性随不同国家经济、政策和技术环境的变化而变化.其

中,中国更适用一体化模式,符合其国有企业主导的经济政策环境.同时,随着技术进步和市场化程

⑬ 麦肯锡全球能源测算. <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023-ccus-outlook>.  
 ⑭ 国务院政策文件库. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202410/content\\_6978315.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202410/content_6978315.htm).  
 ⑮ 国家发展和改革委员会. <https://www.ndrc.gov.cn>  
 ⑯ 国务院公报. [https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content\\_5591405.htm](https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5591405.htm).  
 ⑰ 国务院政策文件库. <https://www.gov.cn/>.  
 ⑱ 加拿大环境与气候变化部官网. <https://www.canada.ca/>.  
 ⑲ 加拿大税务局官网. <https://www.canada.ca/en/revenue-agency/>.  
 ⑳ 美国税务部门官网. <https://www.irs.gov/forms-pubs/about-form-8933>.  
 ㉑ 21 白宫官网. <https://www.whitehouse.gov/bipartisan-infrastructure-law/>.  
 ㉒ 印度国家清洁能源基金官网. <https://www.dea.gov.in/national-clean-energy-fund>.  
 ㉓ 印度国家电力政策官网. <https://powermin.gov.in/en/content/national-electricity-policy>.  
 ㉔ 印度能源局官网. <https://beeindia.gov.in/content/pat-read-more>.

度提高,运营商模式在技术专业化程度高的项目中也具有较大潜力;加拿大更适合采用合资模式,因其提供投资税收抵免且具有技术优势,从而有利于风险分担和技术共享.同时,运营商模式在油气公司主导的CCUS项目中也具有较高适用性;美国采用运营商模式更为适用,反映了其专业化分工的特点.这与案例分析中运营商模式显示的较好经济效益相吻合;印度由于技术和资金的限制,更倾向于采用合资模式,以引进国际技术和资金.

以上案例分析结果表明,外包模式在经济效益和环境效益方面表现最为优异,这与理论模型的预测基本一致.然而,各国CCUS运营模式的实际适用性呈现出明显的差异化特征,这主要受到各国经济环境、政策框架和技术水平的影响,反映了CCUS技术在全球推广过程中需因地制宜.

## 5 结束语

### 5.1 结论

燃煤电厂CCUS技术的大规模推广应用对实现“双碳”目标具有重要意义.但在技术高额成本下,采取何种运营模式成为决定CCUS技术应用的关键.本文通过构建CCUS运营模式的动态微分博弈模型,考虑了二氧化碳排放量与技术投资的动态特性,对比分析一体化、运营商、合资及外包四种模式的经济与环境效益.研究发现,一体化模式在利润和碳排放绩效方面均较为优异,适合追求统一管理并具备强大资源整合能力的燃煤电厂.运营商模式尽管能带来较高的利润,但碳排放量较大,存在短视行为.适用于短期内追求利润最大化的燃煤电厂,但需警惕长期的环境和政策风险.合资模式虽然在利润上不具优势,但能够实现近零排放,更适用于环保要求高且愿意接受政府补贴的燃煤电厂.这种模式在政府补贴比例较高或环保政策严厉的情况下适用.外包模式则在利润和碳排放绩效上均表现优异,尽管燃煤电厂利润次于运营商模式,但实现了良好的碳减排.适合计划将非核心业务外包以降低成本和提高环保绩效的燃煤电厂.然而,在外包模式下,运营商的利润较低并且需要承担较高的投资成本,需权衡各方主体利益.

从政府补贴角度,其比例对合资模式总利润的影响最大.在高比例下,合资模式的总利润显著提升,且碳排放量大幅度下降,适用于可获得较多政府支持且追求更低碳排放的燃煤电厂.从知识累积角度,当知识累积学习率处于较低区间时,企业应选择外包模式,此时总利润最为可观.即企业缺乏技术积累及复合型人才时,设备亟待更新换代,可选择外包模式转移技术风险.随着学习率的增加,各模式下总利润普遍下降,合资模式的下降速率最大.因此,燃煤电厂应根据自身的经济目标、环保要求、政府支持和技术发展情况,选择合适的运营模式,以实现经济和环境效益的平衡.

### 5.2 政策建议与启示

首先,对燃煤发电企业而言,要考虑自身可投资金额、技术能力和知识积累水平,选择能够最大化经济和环境效益的运营模式.目前国内CCUS项目主要采用垂直一体化的商业运行模式,即主要由单一企业投资运营,以国企为主,私企投资相对较少.未来CCUS项目的商业合作模式需要进一步多元化,例如由负责碳捕集、运输和封存的企业建立合资公司,共同运营完整项目.对政府而言,应继续实施和优化补贴政策,促进CCUS项目在燃煤电厂的广泛应用.当从示范阶段走向大规模工业化推广和商业化运行阶段,强制性减排与碳交易市场可能成为其主要驱动因素.

其次,本研究通过对比分析四种运营模式的经济与环境效益,发现不同模式存在显著的权衡关系与潜在冲突.一体化模式在利润和碳排放绩效方面均较为优异,但需要燃煤电厂承担较高的初始投资成本,尽管长期环境效益显著,可能导致短期内经济效益受到影响;运营商模式能带来较高的利润,然而,此模式下碳排放量最高,反映了经济效益与环境效益之间的冲突;合资模式虽然在利润方面不具优势,但能够实现近零排放,这种模式体现了环境效益优先,但可能面临经济可持续性的挑战;外包模式在利润和碳排放绩效上均表现优异,但运营商在此模式下的利润较低,可能影响其长期参与的积极性.为协调这些潜在冲突,提出以下解决策略:1)从政府政策角度,政府应继续实施和优化补贴政策,特别是针对前期投资成本高的一体化模式和合资模式.例如,可以提供税收优惠或直接补贴,以缓解环保投资带来的企业

经济压力;2)从燃煤电厂角度,鼓励燃煤电厂采取长期战略计划,虽然一体化模式和合资模式可能在短期内影响经济效益,但从长远发展来看,这些模式可以帮助企业在日益严格的环保政策下保持竞争力;3)从CCUS运营商角度,加大对技术的研发投入,这对于平衡运营商模式下的经济效益和环境效益尤为重要;4)从利益相关者角度,在合资模式和外包模式中,应建立更公平的利益分配机制.例如,可考虑根据碳减排量设计浮动的收益分成比例,以激励运营商持续提高环境效益.

最后,不同国家或特定经济区域的CCUS运营模式适用性存在显著差异,这主要受经济环境、政策框架和技术水平的影响,因此政策支持应因地制宜.具体而言,中国在继续支持一体化模式的基础上,应逐步引入外包模式的激励机制.例如,为采用外包模式的项目提供额外的税收优惠或补贴,同时完善相关法规,为外包模式实施提供法律保障;对美国而言,应强化对运营商模式的支持,

鼓励向外包模式过渡,比如可考虑在现有45Q税收抵免基础上,为外包模式项目提供额外信贷额度;加拿大在支持合资模式的同时,应积极培育外包模式的发展环境,例如设立技术服务公司孵化基金;印度在推广合资模式的基础上,可以为未来过渡到外包模式做准备,通过设立技术引进和本地化专项资金支持本土技术服务能力培养.

尽管本文利用微分博弈模型探究了CCUS投资运营模式的选择,并考虑了政府激励与知识累积的影响,但碳排放量动态方程仅采用了一次线性函数.现实情境中可能存在技术跃迁和边际递减效应,因此未来研究可利用非线性函数更精准刻画其动态变化过程.此外,不同燃煤发电企业的CCUS应用存在较大差异,未来可根据技术规模应用与数据收集,对不同燃煤机组CCUS应用情况进行对比与实证分析,尤其是聚焦于模型的动态优化设计和实证检验,以进一步提高研究结果的可靠性.

## 参考文献:

- [1]陈晓红,唐润成,胡东滨,等.电力企业数字化减污降碳的路径与策略研究[J].中国科学院院刊,2024,39(2):298-310.  
Chen Xiaohong, Tang Runcheng, Hu Dongbin, et al. Study on the paths and strategies for digital pollution and carbon reduction in power enterprises[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(2): 298-310. (in Chinese)
- [2]Wei Y, Han R, Wang C, et al. Self-preservation strategy for approaching global warming targets in the post-Paris Agreement era[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1624-1630.
- [3]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.
- [4]阳平坚,彭栓,王静,等.碳捕集、利用和封存(CCUS)技术发展现状及应用展望[J].中国环境科学,2024,44(1):404-416.  
Yang Pingjian, Peng Shuan, Wang Jing, et al. The current development status and application prospect of carbon capture, utilization and storage (CCUS) technology[J]. China Environmental Science, 2024, 44(1): 404-416. (in Chinese)
- [5]Fan J, Fu J, Zhang X, et al. Co-firing plants with retrofitted carbon capture and storage for power-sector emissions mitigation[J]. Nature Climate Change, 2023, 13(8): 807-815.
- [6]《中国电力行业年度发展报告2023》[EB/OL]. <http://www.chinapower.com.cn/zx/zxbg/20230710/207895.html>, 2023.  
Annual development report of China's power industry [EB/OL]. <http://www.chinapower.com.cn/zx/zxbg/20230710/207895.html>, 2023. (in Chinese)
- [7]窦立荣,孙龙德,吕伟峰,等.全球二氧化碳捕集、利用与封存产业发展趋势及中国面临的挑战与对策[J].石油勘探与开发,2023,50(5):1083-1096.  
Dou Lirong, Sun Longde, Lü Weifeng, et al. Global development trends of carbon dioxide capture, utilization and storage industry and challenges and countermeasures faced by China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(5): 1083-1096. (in Chinese)
- [8]张贤,杨晓亮,鲁玺,等.中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2023)[R].中国21世纪议程管理中心,全球碳捕集与封存研究院,北京:清华大学,2023.

- Zhang Xian, Yang Xiaoliang, Lu Xi, et al. Annual Report on Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) in China (2023)[R]. The Administrative Centre for China's Agenda 21, Global CCS Institute, Tsinghua University, 2023. <https://www.acca21.org.cn>.
- [9] International Energy Agency. CCUS Projects Database[EB/OL]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/ccus-projects-database>, 2024-05-24.
- [10] Chen X, Mao Y, Cheng J, et al. Green financial policy, technological advancement reversal, assessment of emission reduction effects[J]. *Energy Economics*, 2024, (136): 107678.
- [11] 陈诗一, 王畅, 郭越. 面向碳中和目标的中国工业部门减排路径与战略选择[J]. *管理科学学报*, 2024, 27(4): 1-20.  
Chen Shiyi, Wang Chang, Guo Yue. Emission reduction paths and strategic choices for China's industrial sector oriented towards carbon neutrality goals[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2024, 27(4): 1-20. (in Chinese)
- [12] 王道平, 常敬雅, 郝玫. 碳交易政策下基于技术投资的供应链纵向合作动态减排研究[J]. *控制与决策*, 2023, 39(5): 1-9.  
Wang Daoping, Chang Jingya, Hao Mei. Research on dynamic emission reduction of supply chain vertical cooperation based on technology investment under carbon trading policy[J]. *Control and Decision-Making*, 2023, 39(5): 1-9. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] 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-making of coal-fired power plants under different business models[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(4): 63-71. (in Chinese)
- [15] 王喜平, 郗少媛. 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 investment timing of supply chain CCS under the carbon trading mechanism[J]. *Journal of Management Engineering*, 2020, 34(2): 124-130. (in Chinese)
- [16] 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]. *洁净煤技术*, 2023, 36(1): 1-11.  
Wang Xiping, Gao Zheyuan. Research on CCUS investment decision-making of coal-fired power plants based on real options[J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 36(1): 1-11. (in Chinese)
- [17] Liu G, Yang H, Dai R. Which contract is more effective in improving product greenness under different power structures: Revenue sharing or cost sharing? [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, (148): 106701.
- [18] Benckroun H, Martín-Herrón G. The impact of foresight in a transboundary pollution game[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 251(1): 300-309.
- [19] 程粟粟, 易永锡, 李寿德. 碳捕获与碳封存机制下跨界污染控制微分博弈[J]. *系统管理学报*, 2019, 28(5): 864-872.  
Cheng Susu, Yi Yongxi, Li Shoude. Differential game of cross-border pollution control under carbon capture and carbon storage mechanism[J]. *Journal of Systems Management*, 2019, 28(5): 864-872. (in Chinese)
- [20] Pan X, Li S. Dynamic optimal control of process-product innovation with learning by doing[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 248(1): 136-145.
- [21] Bertinelli L, Camacho C, Zou B. Carbon capture and storage and transboundary pollution: A differential game approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 237(2): 721-728.
- [22] Fan X, Chen K, Chen Y. Is price commitment a better solution to control carbon emissions and promote technology investment? [J]. *Management Science*, 2023, 69(1): 325-341.
- [23] 陈静, 赵灿红, 高歌, 等. 碳限额及交易背景下双渠道供应链纵向合作动态减排研究[J]. *中国管理科学*, 2022, 33(2): 1-15.  
Chen Jing, Zhao Canhong, Gao Ge, et al. Research on dynamic emission reduction of vertical cooperation in dual-channel supply chains under the background of carbon quotas and trading[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 33(2): 1-15. (in Chinese)
- [24] 孙琰婷. 电碳双市场背景下考虑CCUS的火电企业商业模式研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.  
Sun Yanting. Research on the Business Model of Thermal Power Enterprises Considering CCUS under the Background of Dual Electricity and Carbon Markets[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023. (in Chinese)
- [25] 曾俣琳. 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.
- Zeng Yulin. Research on Investment Decision-making of Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) Projects in State-owned Coal-fired Power Plants under Different Business Models[D]. Chongqing: Chongqing Technology and Business University, 2020. (in Chinese)
- [26] 向小东, 李 翀. 三级低碳供应链联合减排及宣传促销微分博弈研究[J]. 控制与决策, 2019, 34(8): 1776–1788.
- Xiang Xiaodong, Li Chong. Research on differential game of joint emission reduction and publicity promotion in three-level low-carbon supply chain[J]. Control and Decision, 2019, 34(8): 1776–1788. (in Chinese)
- [27] Jun D, Chang S, Zi-ming Z, et al. Evolutionary game analysis of chemical enterprises' emergency management investment decision under dynamic reward and punishment mechanism[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2024, (87): 105230.
- [28] 石 平, 韩 坤, 后 锐. 碳交易机制下基于互惠的供应链广告合作与减排成本分担契约[J]. 管理科学学报, 2024, 27(12): 57–81.
- Shi Ping, Han Kun, Hou Rui. Supply chain advertising cooperation and emission reduction cost-sharing contract based on reciprocity under the carbon trading mechanism[J]. Journal of Management Sciences in China, 2024, 27(12): 57–81. (in Chinese)
- [29] 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 Xi, Chen Lifei. Analysis of the selection and policy incentives of carbon capture and storage technologies[J]. Soft Science, 2016, 30(5): 91–95. (in Chinese)
- [30] Cui Q, Zhao R, Wang T, et al. A 150 000 t · a<sup>-1</sup> post-combustion carbon capture and storage demonstration project for coal-fired power plants[J]. Engineering, 2022, (14): 22–26.

## Dynamic optimization of CCUS operation modes for coal-fired power plants considering government incentives and knowledge accumulation

CHEN Xiao-hong<sup>1, 2, 3</sup>, MA Rui-qian<sup>1, 2</sup>, ZHANG Cheng<sup>1, 2</sup>, WANG Yang-jie<sup>1\*</sup>

1. Business School, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Xiangjiang Laboratory, Changsha 410205, China;

3. Frontiers Interdisciplinary College/School of Management Science and Engineering, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

**Abstract:** Accelerating the application of carbon capture, utilization and storage (CCUS) technology in coal-fired power plants is of great significance for promoting global green and low-carbon development. However, given the high cost of the technology, it is urgent to explore the optimal choice of CCUS operation modes. This paper constructs a differential game model for CCUS operation of coal-fired power plants. Considering the influence of government incentives and knowledge accumulation, this paper compares and analyzes the differences in cost control and carbon emission reduction benefits among four operation modes, integration, operator, joint venture and outsourcing and further verifies the findings with case studies. The study finds that the choice of business model is affected by government subsidies and carbon trading policies. Knowledge accumulation plays a key role in CCUS technology adoption and cost optimization, and the choice among four different modes is affected by the economy, policy and technical environment of the country or region. This study offers both theoretical and practical guidance for the investment decision-making of coal-fired power generation enterprises and serves as a basis for the government to improve industrial policy.

**Key words:** CCUS; operation modes; differential game; government incentives; knowledge accumulation