

# 基于模糊实物期权的燃煤电厂 CCS 投资决策研究

王喜平 赵 齐 谭锡崇 李艳梅 张宁宁  
(华北电力大学经济管理学系, 保定 071003)

〔摘要〕 为突破传统实物期权在 CCS 投资决策中未考虑非随机不确定性的不足, 本文将三角模糊数和二叉树期权模型相结合, 构建 CCS 投资决策的模糊实物期权模型框架, 并通过实证分析对模型和判断规则进行可靠性验证。研究表明: (1) 模糊实物期权框架下的 CCS 投资价值受到左展形  $\alpha$ 、右展形  $\beta$  和置信水平  $\gamma$  的影响; (2) 当  $0 \leq \gamma \leq 0.68$  时, 投资决策需要考虑投资者的个人主观因素。该方法更适应于灵活多变的投资环境, 尤其是像 CCS 投资这种政策依赖性强的商业活动。对于无法用随机性刻画的不确定性因素, 投资者可以根据风险偏好、管理经验和内外部消息对未来进行合理预估, 从而提高投资决策的准确性和有效性。

〔关键词〕 模糊实物期权 燃煤电厂 CCS 二叉树定价模型 投资收益 柔性管理

DOI: 10.3969/j.issn.1004-910X.2019.12.018

〔中图分类号〕 F406.7; F426.61 〔文献标识码〕 A

## 引 言

2018 年与能源相关的 CO<sub>2</sub> 排放量增长 1.7%, 达到历史新高。虽然所有化石燃料的排放量都在增加, 但是电力部门占排放增长的近 2/3, 其中又以煤炭在电力中的使用造成的 CO<sub>2</sub> 排放量为首<sup>[1]</sup>。因此, 我国大力发展可持续和可再生技术来改善能源结构。其中发展太阳能发电、风电、核电等低碳能源不失为一种有效的碳减排手段, 但这些发电方式系统成本较高、转换效率较低, 在实际发展中存在一定阻力。碳捕集与封存 (CCS) 技术因其巨大的减排潜力和广泛的适用性, 被公认是实现低碳发展的主要技术手段选项。政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 认为 CCS 技术是目前燃煤电厂减少 CO<sub>2</sub> 排放的关键技术<sup>[1]</sup>。但是, CCS 项目投资受到技术水平、投资成本、运营维护成本、配套工程的实施、化石燃料供求变化、碳排放交易波动以及政策法规等因素影响, 存在较大不确定性。如何在对项目价值进行准确评估的基础上做出科学的投资决策, 成为 CCS 项目管理的

重点。

鉴于 CCS 技术投资的诸多复杂特性, 传统项目投资评价方法面临巨大挑战。净现值法 (NPV) 假定项目的现金流量不变, 采取刚性、静态的决策方式, 忽略了项目不确定性因素发生变化时给投资者带来的管理柔性价值。实物期权方法量化了资产价值变动的随机性, 较好地反映了新建 CCS 项目的未来价值增长潜力。Myers (1977)<sup>[2]</sup> 基于金融期权理论提出了实物期权概念, 充分考虑了项目的不确定性和决策的灵活性。近年来, 大量文献开始利用实物期权理论研究 CCS 投资决策。Zhang 等 (2014)<sup>[3]</sup> 建立了二叉树实物期权模型来评估燃煤电厂改造安装 CCS 的投资价值, 分析了不同补贴系数和电厂寿命情况下碳交易价格的投资临界值。常凯等 (2012)<sup>[4]</sup> 假定煤价格、碳排放权价格、投资成本为随机变量, 将燃煤电厂 CCS 投资项目的示范工程阶段和商业化阶段统一考虑, 建立两阶段复合实物期权框架。Zhu 和 Fan (2013)<sup>[5]</sup> 不仅考虑了外部不确定性 (碳价格、电价), 而且

收稿日期: 2019-07-16

基金项目: 河北省社会科学基金项目“基于共享经济模式的雄安新区综合能源利用体系研究”(项目编号: HB19YJ011)。

作者简介: 王喜平, 华北电力大学经济管理学系教授, 博士。研究方向: 能源经济与可持续发展。赵齐, 华北电力大学经济管理学系硕士研究生。研究方向: 金融学。谭锡崇, 华北电力大学经济管理学系硕士研究生。研究方向: 能源经济。李艳梅, 华北电力大学经济管理学系硕士研究生。研究方向: 能源经济。张宁宁, 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。

考虑了内部不确定性(投资成本、运营费用),用最小二乘蒙特卡洛模拟(LSM)法对 SCPC 电站改造加装 CCS 装置进行了经济评价。张新华等(2012)<sup>[6]</sup>证明了碳交易价格的波动和碳捕获技术的进步都可能推迟 CCS 的投资。但在运用实物期权定价模型过程中,需要对预期收益、市场风险、交易费用等进行严格假设,由于实际情况与假设存在一定差距,模型得出的结论存在误差。现有学者对此进行的改进主要分为:(1)增加随机变量,如市场电价、碳交易价格、单位运营维护成本等;(2)针对随机过程进行修正,如在随机过程中增加跳跃项、损漏项。这些研究主要针对客观随机性进行改进,对于随机性无法刻画的不确定性问题需要引入模糊理论进行处理。

Carlsson 等(2003)<sup>[7]</sup>首次将模糊理论引入实物期权估值,假设企业标的资产和执行价格为梯形模糊数,建立了模糊期权定价模型。Yoshida(2003)<sup>[8]</sup>将模糊理论应用于二叉树,推导出资产价格为三角模糊数的期权定价模型。Wu(2004)<sup>[9]</sup>运用模糊理论对模型的价值区间与置信度进行了研究,认为模糊理论下的期权价值更符合实际,将无风险利率、波动率和资产价格这 3 个变量设为模糊数,构建了考虑红利支付的模糊模型。Ho 和 Liao(2010)<sup>[10]</sup>针对不确定环境下的投资项目构建了模糊二叉树模型。模糊实物期权法考虑了抉择者的风险承受能力、对未来市场的判断等管理柔性因素,更适应灵活多变的市场。在运用模糊实物期权进行决策时,不确定性主要来自主观和客观两个方面,即模糊性和随机性,客观随机性的问题主要通过利用随机过程进行处理,主观模糊性的刻画就需要引入模糊理论。模糊理论为期权定价提供了新理论依据,将主观不确定因素看作是模糊数,有效克服了传统实物期权的弊端。

上述研究为模糊实物期权在投资决策中的应用提供了有价值的参考,但缺乏具体针对评估电厂 CCS 项目的相关研究。本文在已有研究的基础上引入模糊理论对 CCS 项目进行评估分析。现有研究主要采用三角模糊数和梯形模糊数进行分析,

三角模糊数是将模糊参数从变量转化为区间的一种方法,由一个核心值和左右调整值构成;梯形模糊数由两个核心值和左右调整值构成。实物期权定价模型更适宜求得一个确定数,并针对该确定数进行调整,因此选用三角模糊数。具体方法为:通过引入 1 个随机变量和 4 个模糊变量对 CCS 投资项目净现值公式和实物期权定价模型进行界定,给出模糊实物期权方法下的投资决策规则。通过实证分析对模型和判断规则进行可靠性验证,并通过变化置信水平  $\gamma$  对比得出模糊实物期权法的适用范围及优越性。

### 1 随机不确定下燃煤电厂 CCS 项目净现值

燃煤电厂进行 CCS 投资的目的在于最大化其投资收益,投资收益是由投资期内的年度现金流贴现和初始投资成本决定的。考虑随机不确定性的影响,其期望收益可以表示为:

$$V_t = E \left[ \sum_{i=t}^T \pi_i (1+r)^{-(i-t)} - C_{CCS} \right] \quad 0 \leq t \leq t_v \quad (1)$$

其中,  $\pi_t$  代表  $t$  年的现金流量,  $r$  代表贴现率,  $C_{CCS}$  代表初始投资成本。在碳交易机制下,年度现金流入主要包括两部分:(1)核证减排量(CERs),即与不加装 CCS 相比,燃煤电厂加装 CCS 带来的碳减排收益;(2)考虑价格补贴所增加的售电收入。现金流出包括加装 CCS 导致效率损失而造成的售电收入减少和运营维护成本(O&M)。因此,燃煤电厂 CCS 项目的年度现金流量  $\pi_t$  为:

$$\pi_t = P_t^c CER + P_e^c Q_e - P_e^r Q_r - C_{O\&M} \quad (2)$$

假设  $r_0$  代表基准贴现率,如果  $1+r_0 = e^{r_0}$ , 年度净现值  $NPV_t$  用不断复利的利息表示为:

$$NPV_{t_1} = \left[ P_t^c CER + P_e^c Q_e - P_e^r Q_r - C_{O\&M}^0 e^{-\beta t_1} \right] \frac{e^{-r_0} - e^{-r_0(t_1-T)}}{e^{r_0} - 1} - C_{CCS}^0 e^{-(r_0-\alpha)t_1} \quad (3)$$

#### 1.1 CER 收入

CER 收入主要是由碳价格和 CER 数量决定的。本文基于以前的研究(Abadie 和 Chamorro, 2008; Zhou 等, 2010; Zhu 和 Fan, 2011)<sup>[5,11,12]</sup>,合理地假设碳价格由几何布朗运动控制。最广泛使用的描述碳价格运动过程的模型是几何布朗运动,它

是一种连续时间随机过程,通常用于模拟股票价格行为,可以用于模拟能源价格的相似性。

$$dP_t^c = \mu^c P_t^c dt + \sigma^c P_t^c dW_t^c \quad (4)$$

其中,  $P_t^c$  为时间  $t$  的碳价格,  $\mu^c$  和  $\sigma^c$  分别表示碳价格的预期增长率与波动率。  $dW_t^c$  是维纳过程的独立增量,  $dW_t^c = \varepsilon_t \sqrt{dt}$ ,  $\varepsilon_t$  是平均值 0 和标准差 1 的正态分布随机变量。

$$CER = EUH \cdot IC \cdot \varepsilon \cdot \eta$$

其中,  $EUH$  表示发电机组的有效利用小时数,  $IC$  代表发电机组的装机容量 (MW),  $\varepsilon$  表示  $CO_2$  排放强度,  $\eta$  表示 CCS 系统的  $CO_2$  捕获率。

### 1.2 清洁电力收入

尽管电价偶尔具有不确定性,但因其波动率远远低于碳价格波动率,所以被认为是确定性参数。  $P_e'$  代表脱碳补贴电价 (RMB/KWh)。需要指出的是,随着设备自然老化、粉尘堆积, CCS 项目发电效率逐渐下降。  $Q_e$  是  $t$  年内的发电量 (RMB/KWh), 表示为:  $Q_e = EUH \cdot IC \cdot (1 - \varphi)$ 。其中  $\varphi$  是损耗率 (%)。那么脱碳补贴收入可以表示为:  $P_e' Q_e = P_e' \cdot EUH \cdot IC \cdot (1 - \varphi)$ 。

考虑到加装 CCS 系统会造成一定的效率损失,从而导致发电量降低,假设  $Q_r$  表示因效率损失减少的发电量,  $P_e$  代表上网电价 (RMB/KWh)。那么因效率降低而造成的收入损失为:  $P_e Q_r = P_e \cdot EUH \cdot IC \cdot \varphi$ 。

综上所述,清洁电力的净收入为:  $P_e' Q_e - P_e Q_r = EUH \cdot IC \cdot [P_e' \cdot (1 - \varphi) - P_e \cdot \varphi]$ 。

### 1.3 投资和运营维护成本

运行维护成本是确保设备在使用寿命内正常运行所必需的支出。假设 CCS 技术改进遵循学习曲线,这将会导致 CCS 建设投资成本和运营维护成本随着技术改进和装机容量的增加而降低,可以表示为:

$$C_{CCS}^t = C_{CCS}^0 \times e^{-lt}$$

$$C_{O\&M}^t = C_{O\&M}^0 \times e^{-mt}$$

$$C_{CCS}^0 = UC_{CCS}^0 \cdot IC$$

$$C_{O\&M}^0 = UC_{O\&M}^0 \cdot EUH \cdot IC$$

其中,  $C_{CCS}^t$  和  $C_{O\&M}^t$  分别代表  $t$  时间的建设成本和运营维护成本,  $C_{CCS}^0$  和  $C_{O\&M}^0$  分别代表对燃煤电厂进行 CCS 改造的初始投资成本和初始运营维护成本。  $l$  和  $m$  分别代表建设投资成本和运营维护成本的技术水平改进系数。

## 2 引入模糊理论的燃煤电厂 CCS 项目净现值

### 2.1 模糊数的引入

Zadeh 教授于 1965 年提出用带有隶属度的模糊集合理论解决模糊性和不确定性问题。

一个三角模糊数  $\tilde{M} = (c, \alpha, \beta)$ , 为有界、正规、凸和连续隶属函数的实线模糊集<sup>[13]</sup>。假设其隶属函数为  $\mu_{\tilde{M}(x)}$ , 有  $\mu_{\tilde{M}(x)} \in [0, 1]$ : 当  $\mu_{\tilde{M}(x)} = 0$ , 元素  $x$  不是  $M$  的隶属关系; 当  $\mu_{\tilde{M}(x)} = 1$ ,  $x$  在  $M$  中绝对隶属。  $\mu_{\tilde{M}(x)}$  具体形式为:

$$\mu_{\tilde{M}(x)} = \begin{cases} 1 - \frac{c-x}{\alpha}, & c-\alpha \leq x \leq c \\ 1 - \frac{x-c}{\beta}, & c \leq x \leq c+\beta \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其中,  $c$  为核心值,  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为左、右展形,  $c+\beta$ 、 $c-\alpha$  分别为三角模糊数的上、下界限。

假设模糊数  $\tilde{M}$  的  $\gamma$  截集  $(\tilde{M})_\gamma = \{x : x \in X, \tilde{M}(x) \geq \gamma\}$ , 其中  $\gamma$  为置信水平且  $\gamma \in [0, 1]$ , 当  $\tilde{M}(x) \geq \gamma$  时,  $x \in \tilde{M}$ ; 反之,  $x \notin \tilde{M}$ 。在三角模糊数中, 存在:

$$(\tilde{M})_\gamma = [c(1-\gamma)\alpha, c+(1-\gamma)\beta]$$

$$\tilde{M}_\gamma^- = \min\{(\tilde{M})_\gamma\}$$

$$\tilde{M}_\gamma^+ = \max\{(\tilde{M})_\gamma\}$$

其中,  $\tilde{M}_\gamma^-$  和  $\tilde{M}_\gamma^+$  分别为  $\gamma$  截集的左右端点。  $(\tilde{M})_\gamma$  的取值范围为  $[\tilde{M}_\gamma^-, \tilde{M}_\gamma^+]$ 。当  $\gamma$  不断减小时,  $(\tilde{M})_\gamma$  的范围不断扩大, 模糊性增强。

### 2.2 引入模糊数的 CCS 项目净现值

CCS 项目在改造初期缺乏历史运营数据作为估值依据, 只能通过电力市场、碳市场和管理情况带来的未来现金流进行判断, 这种情况所产生的主观误差可以采取模糊数的形式进行修正, 因此假设发电机组的有效利用小时数  $EUH$ 、碳价格

$P_t^c$ 、碳价格波动率  $\sigma^c$  和折现率  $r_0$  为模糊数。

$$(\tilde{X})_\gamma = [(\tilde{X})_\gamma^-, (\tilde{X})_\gamma^+] \quad \tilde{X} = [E\tilde{U}H, \tilde{P}_t^c, \tilde{\sigma}^c, \tilde{r}_0]$$

相应的  $\gamma$  截集为:

$$(\tilde{X})_\gamma = [X - (1-\gamma)\alpha_X, X + (1-\gamma)\beta_X]$$

将  $(E\tilde{U}H)_\gamma$ 、 $(\tilde{P}_t^c)_\gamma$  分别代入  $t_1$  年的现金流公式, 得到:

$$(\tilde{\pi}_{t_1})_\gamma = [(\tilde{\pi}_{t_1})_\gamma^-, (\tilde{\pi}_{t_1})_\gamma^+]$$

$$(\tilde{\pi}_{t_1})_\gamma^- = (E\tilde{U}H)_\gamma^- \cdot IC \cdot \delta [(\tilde{P}_t^c)_\gamma^- \cdot \varepsilon \cdot \eta + P_e' \cdot (1-\varphi) - P_e \cdot \varphi - UC_{O\&M}^0 \cdot e^{-\beta t_1}]$$

$$(\tilde{\pi}_{t_1})_\gamma^+ = (E\tilde{U}H)_\gamma^+ \cdot IC \cdot \delta [(\tilde{P}_t^c)_\gamma^+ \cdot \varepsilon \cdot \eta + P_e' \cdot (1-\varphi) - P_e \cdot \varphi - UC_{O\&M}^0 \cdot e^{-\beta t_1}]$$

将  $(\tilde{\pi}_{t_1})_\gamma$  和  $(\tilde{r}_0)_\gamma$  代入净现值公式, 得到模糊化的 CCS 项目净现值:

$$(NPV_{t_1})_\gamma = [(NPV_{t_1})_\gamma^-, (NPV_{t_1})_\gamma^+] \quad (5)$$

$$(NPV_{t_1})_\gamma^- = (\tilde{\pi}_{t_1})_\gamma^- \frac{e^{-(\tilde{r}_0)_\gamma^+} - e^{(\tilde{r}_0)_\gamma^+(t_1-T)}}{e^{(\tilde{r}_0)_\gamma^+} - 1} - UC_{CCS}^0 \cdot IC \cdot e^{-[(\tilde{r}_0)_\gamma^+ - \alpha]t_1}$$

$$(NPV_{t_1})_\gamma^+ = (\tilde{\pi}_{t_1})_\gamma^+ \frac{e^{-(\tilde{r}_0)_\gamma^-} - e^{(\tilde{r}_0)_\gamma^-(t_1-T)}}{e^{(\tilde{r}_0)_\gamma^-} - 1} - UC_{CCS}^0 \cdot IC \cdot e^{-[(\tilde{r}_0)_\gamma^- - \alpha]t_1}$$

其中,  $(NPV_k)_\gamma^-$  是对项目未来现金流进行保守估计和对折现率进行乐观估计情况下的项目净现值最小值。 $(NPV_k)_\gamma^+$  是对未来现金流进行乐观估计和对折现率进行保守估计情况下的项目净现值最大值。

### 3 模糊实物期权定价模型

#### 3.1 基于二叉树的模糊实物期权定价模型

二叉树模型是实物期权领域运用较为广泛的离散时间下的定价模型。该模型将生命周期  $T$  分为若干个时间段  $\Delta t$ , 假设碳价格在每一个  $\Delta t$  存在两个可能的值: 以概率  $p$  上升或以概率  $1-p$  下降。如果当前的碳价格为  $P_t^c$ , 那么在第一个  $\Delta t$  结束后, 它将变为  $P_t^c u$  和  $P_t^c d$ 。假设 CCS 投资项目预期回报值与运动顺序 (上升和下降运动) 无关, 将碳价格  $P_t^c$  在延迟投资期内按二叉树展开<sup>[14]</sup>。令  $r$  为无风险利率,  $(\tilde{\sigma}^c)_\gamma$  为波动率, 则:

$$(\tilde{p})_\gamma^- = \frac{e^{r\Delta t} - \tilde{d}_{j\gamma}^-}{\tilde{u}_{j\gamma}^+ - \tilde{d}_{j\gamma}^-}, \quad (\tilde{p})_\gamma^+ = \frac{e^{r\Delta t} - \tilde{d}_{j\gamma}^+}{\tilde{u}_{j\gamma}^- - \tilde{d}_{j\gamma}^+};$$

$$\tilde{u}_{j\gamma}^- = e^{(\tilde{\sigma}^c)_\gamma^- \sqrt{\Delta t}}, \quad \tilde{u}_{j\gamma}^+ = e^{(\tilde{\sigma}^c)_\gamma^+ \sqrt{\Delta t}};$$

$$\tilde{d}_{j\gamma}^- = e^{-(\tilde{\sigma}^c)_\gamma^- \sqrt{\Delta t}}, \quad \tilde{d}_{j\gamma}^+ = e^{-(\tilde{\sigma}^c)_\gamma^+ \sqrt{\Delta t}}$$

$[(\tilde{p})_\gamma^-, (\tilde{p})_\gamma^+]$  代表风险中性概率可能的取值范围,  $[\tilde{u}_\gamma^-, \tilde{u}_\gamma^+]$  代表上升因子可能的取值范围,  $[\tilde{d}_\gamma^-, \tilde{d}_\gamma^+]$  代表下降因子可能的取值范围,  $[(\tilde{\sigma}^c)_\gamma^-, (\tilde{\sigma}^c)_\gamma^+]$  代表波动率可能的取值范围。

接下来, 根据展开的碳价格  $S$  求得各节点对应的项目净现值  $(NPV_{i,j})_\gamma$ , 根据式 (6) 的取值规则得到各节点决策后的净现值  $(NPV'_{i,j})_\gamma$ 。

$$(NPV'_{i,j})_\gamma = [(NPV'_{i,j})_\gamma^-, (NPV'_{i,j})_\gamma^+] \quad (6)$$

$$(NPV'_{i,j})_\gamma^- = \max\{ (NPV_{i,j})_\gamma^-, 0 \}$$

$$(NPV'_{i,j})_\gamma^+ = \max\{ (NPV_{i,j})_\gamma^+, 0 \}$$

这一取值规则的含义是: 若决策点 CCS 项目净现值为负, 则投资者放弃投资, 投资价值为 0; 若该点净现值为正, 则可进行投资, 投资价值为该点的项目净现值。采取反向归纳法进行推导。以各节点的项目价值为基础, 从二叉树模型的最后期限向前逆推, 在每一节点按照式 (7) 进行决策, 直到推导至初始点, 得到该 CCS 项目包含期权价值的实际项目价值  $(\tilde{C})_\gamma$ <sup>[15]</sup>。

$$(\tilde{C}_{i,j})_\gamma = [(\tilde{C}_{i,j})_\gamma^-, (\tilde{C}_{i,j})_\gamma^+] \quad (7)$$

$$(\tilde{C}_{i,j})_\gamma^- = \max\{ (NPV'_{i,j})_\gamma^-, [(\tilde{p})_\gamma^- \cdot (\tilde{C}_{i+1,j})_\gamma^- + [1 - (\tilde{p})_\gamma^-] \cdot (\tilde{C}_{i+1,j+1})_\gamma^-] e^{-(\tilde{r}_0)_\gamma^+ \cdot \Delta t} \}$$

$$(\tilde{C}_{i,j})_\gamma^+ = \max\{ (NPV'_{i,j})_\gamma^+, [(\tilde{p})_\gamma^+ \cdot (\tilde{C}_{i+1,j})_\gamma^+ + [1 - (\tilde{p})_\gamma^+] \cdot (\tilde{C}_{i+1,j+1})_\gamma^+] e^{-(\tilde{r}_0)_\gamma^- \cdot \Delta t} \}$$

对于 CCS 项目来说, 从期权角度看投资价值  $(\tilde{C})_\gamma$  应当包括两部分: (1) 不考虑实物期权存在的固有的内在价值, 即进行 CCS 项目投资得到的净现值  $(NPV)_\gamma$ ; (2) CCS 项目所具有的延迟投资期权特性带来的延迟期权价值  $(R\tilde{O}V)_\gamma$ 。那么考虑实物期权特性的 CCS 投资项目的总价值则可以表示为:

$$(\tilde{C})_\gamma = (NPV)_\gamma + (R\tilde{O}V)_\gamma$$

### 3.2 投资决策判断依据

步骤 1: 对  $(\tilde{C}_{i,j})^-_\gamma$  和  $(\tilde{C}_{i,j})^+_\gamma$  的符号进行判断。如果  $(\tilde{C}_{i,j})^-_\gamma = (\tilde{C}_{i,j})^+_\gamma = 0$ , 做出放弃投资决策; 如果  $(\tilde{C}_{i,j})^-_\gamma > 0$  则进入步骤 2; 如果  $(\tilde{C}_{i,j})^-_\gamma = 0$  且  $(\tilde{C}_{i,j})^+_\gamma > 0$  则进入步骤 3。

步骤 2: 对  $(\tilde{C}_{i,j})^-_\gamma - (NPV)^-_\gamma$  的符号进行判断。如果  $(\tilde{C}_{i,j})^-_\gamma - (NPV)^-_\gamma > 0$ , 一定存在  $(\tilde{C}_{i,j})^+_\gamma - (NPV)^+_\gamma > 0$ , 做出执行期权延迟投资决策; 如果  $(\tilde{C}_{i,j})^-_\gamma - (NPV)^-_\gamma = 0$  且  $(\tilde{C}_{i,j})^+_\gamma - (NPV)^+_\gamma = 0$ , 做出放弃期权立即投资决策。

步骤 3:  $(\tilde{C})^-_\gamma = 0$  且  $(\tilde{C})^+_\gamma > 0$ 。这种情形下如果对项目投资价值未来发展进行乐观估计, 则执行期权延迟投资; 反之如果对项目投资价值采取谨慎估计, 则采取放弃投资策略。

通过以上决策过程可见, 实物期权法与传统 NPV 方法最大的区别在于当  $NPV \leq 0$  时, 通过 NPV 方法做出直接放弃投资决策。但若采用实物期权方法则需要进一步对期权价值  $C$  进行判断: 若  $C = 0$  时, 放弃投资; 若  $C > 0$  时, 则执行期权延迟投资。由此可见实物期权方法与传统 NPV 方法相比, 考虑了不确定性风险因素对投资决策影响, 模糊化的思想通过模糊性对不确定性进行刻画, 进一步拓宽了实物期权方法的柔性管理思路。

### 3.3 模糊参数敏感性分析

三角模糊数由  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  这 3 个参数构成, 它们共同决定了参数的取值范围。采用敏感性分析方法, 对这 3 个参数对项目价值和 NPV 的影响进行探究。(其中“+”表示参数与变量间正相关,“-”表示参数与变量间负相关。)

表 1 模糊参数敏感性分析

	$\alpha > 0$	$\beta > 0$	$\gamma \in (0, 1)$
$(\tilde{C})^-_\gamma$	-	-	+
$(\tilde{C})^+_\gamma$	+	+	-
$(\tilde{C})^+_\gamma - (\tilde{C})^-_\gamma$	+	+	-
$(NPV)^-_\gamma$	-	-	+
$(NPV)^+_\gamma$	+	+	-
$(NPV)^+_\gamma - (NPV)^-_\gamma$	+	+	-

#### 3.3.1 $\alpha$ 和 $\beta$ 对 $C$ 和 NPV 的敏感性分析

左宽度  $\alpha$  是衡量参数负向取值范围的参数,  $\alpha \geq 0$ 。当  $\alpha = 0$  时,  $C$  和 NPV 与  $\alpha$  无关; 当  $\alpha > 0$  时, 对  $(\tilde{C})^-_\gamma$  和  $(NPV)^-_\gamma$  求  $\alpha$  的偏导得:

$$\partial(\tilde{C})^-_\gamma / \partial \alpha < 0, \partial(\tilde{C})^+_\gamma / \partial \alpha > 0$$

$$\partial(NPV)^-_\gamma / \partial \alpha < 0, \partial(NPV)^+_\gamma / \partial \alpha > 0$$

可见  $(\tilde{C})^-_\gamma$  和  $(NPV)^-_\gamma$  是关于  $\alpha$  的减函数,  $(\tilde{C})^+_\gamma$  和  $(NPV)^+_\gamma$  是关于  $\alpha$  的增函数。也就是说, 随着  $\alpha$  的增加,  $(\tilde{C})^-_\gamma$  和  $(NPV)^-_\gamma$  变得更小,  $(\tilde{C})^+_\gamma$  和  $(NPV)^+_\gamma$  变得更大,  $(\tilde{C})^+_\gamma - (\tilde{C})^-_\gamma$  和  $(NPV)^+_\gamma - (NPV)^-_\gamma$  也随之增大。

同理可得, 随着  $\beta$  的增加,  $(\tilde{C})^-_\gamma$  和  $(NPV)^-_\gamma$  变得更小,  $(\tilde{C})^+_\gamma$  和  $(NPV)^+_\gamma$  变得更大,  $(\tilde{C})^+_\gamma - (\tilde{C})^-_\gamma$  和  $(NPV)^+_\gamma - (NPV)^-_\gamma$  也随之增大。

#### 3.3.2 $\gamma$ 对 $C$ 和 NPV 的敏感性分析

置信水平  $\gamma$  是衡量参数模糊程度的重要参数,  $\gamma \in (0, 1)$ 。当  $\gamma = 1$  时, 模糊数变为确定数。 $(NPV)^-_\gamma = NPV$ ,  $(\tilde{C})^-_\gamma = C$ , 即模糊净现值变为 NPV, 模糊实物期权变为普通实物期权。可见, NPV 与实物期权是模糊实物期权的一种特殊形式。当  $\gamma = 0$  时,  $(\tilde{C})^-_\gamma$  和  $(NPV)^-_\gamma$  的模糊性最大, 取值范围随之最大。当  $\gamma \in (0, 1)$  时, 对  $(\tilde{C})^-_\gamma$  和  $(NPV)^-_\gamma$  求  $\gamma$  的偏导得:

$$\partial(\tilde{C})^-_\gamma / \partial \gamma > 0, \partial(\tilde{C})^+_\gamma / \partial \gamma < 0$$

$$\partial(NPV)^-_\gamma / \partial \gamma > 0, \partial(NPV)^+_\gamma / \partial \gamma < 0$$

可见  $(\tilde{C})^-_\gamma$  和  $(NPV)^-_\gamma$  是关于  $\gamma$  的增函数,  $(\tilde{C})^+_\gamma$  和  $(NPV)^+_\gamma$  是关于  $\gamma$  的减函数。也就是说, 随着  $\gamma$  的降低,  $(\tilde{C})^-_\gamma$  和  $(NPV)^-_\gamma$  变得更小,  $(\tilde{C})^+_\gamma$  和  $(NPV)^+_\gamma$  变得更大,  $(\tilde{C})^+_\gamma - (\tilde{C})^-_\gamma$  和  $(NPV)^+_\gamma - (NPV)^-_\gamma$  也随之增大。

## 4 案例分析

本文将上述模型运用到某个具有代表性的燃煤电厂 CCS 投资项目的评估中。假设工厂剩余寿命为 25 年, 装机容量为 600MW, 投资者在 2019 年投资改造 CCS 项目, 建设期为 1 年, 投资决策期为 10 年<sup>[16-20]</sup>。详细数据如表 2 和表 3 所示。

表2 两种方法下燃煤电厂 CCS 项目指标汇总

参数	符号	实物期权法	模糊实物期权法( $\gamma=0.8$ )
初始碳价格(元/吨)	$(\bar{P}_0)_\gamma$	35.83	[28.66,43.00]
发电机组有效利用小时数(h/年)	$(E\bar{U}H)_\gamma$	4400	[3520,5280]
折现率(%)	$(\bar{r}_0)_\gamma$	8	[6.4,9.6]
碳价格波动率	$(\bar{\sigma}^c)_\gamma$	0.3418	[0.2734,0.4102]

表3 燃煤电厂 CCS 项目指标汇总

参数	符号	数值
项目周期(年)	$T$	25
装机容量(MW)	$IC$	600
CO <sub>2</sub> 排放强度(吨/MWh)	$\varepsilon$	0.893
CO <sub>2</sub> 捕获率(%)	$\eta$	90
脱碳补贴电价(元/kWh)	$P'_e$	0.015
损耗率(%)	$\varphi$	17.9
上网电价(元/kWh)	$P_e$	0.36034
初始单位投资成本(元/kW)	$UC_{CCS}^0$	5525
初始单位运营维护成本(元/MWh)	$UC_{O\&M}^0$	12.152
建设投资成本技术改进系数	$l$	0.0202
运营维护成本技术改进系数	$m$	0.057
无风险利率(%)	$r$	4.68

[1.3145, 1.5071],  $(\bar{d})_\gamma = [0.6635, 0.7608]$ ,  $(\bar{p})_\gamma = [0.4557, 0.5186]$ 。根据模糊二叉树模型将碳排放权价格在 CCS 项目投资延迟期内展开得到  $(\bar{P}_{i,j}^c)_\gamma$ 。依据项目净现值公式计算延迟期内不同投资时点的投资净现值  $(N\bar{P}V'_{i,j})_\gamma$  [21]; (2) 根据  $(N\bar{P}V'_{i,j})_\gamma^- = \max\{ (N\bar{P}V'_{i,j})_\gamma^-, 0 \}$  和  $(N\bar{P}V'_{i,j})_\gamma^+ = \max\{ (N\bar{P}V'_{i,j})_\gamma^+, 0 \}$  对各时点进行决策, 得到决策后的项目净现值  $(N\bar{P}V'_i)_\gamma$ ; (3) 以无风险利率  $r$  根据式(6)进行逆推, 求得延迟投资实物期权条件下 CCS 项目投资的价值。计算得出: 在模糊实物期权方法下 CCS 项目投资净现值  $(N\bar{P}V)_\gamma = [-338600, -305472]$  万元, 投资价值  $(\bar{C})_\gamma = [478, 23945]$  万元。

#### 4.2 可靠性检验

进一步进行可靠性检验, 分析不同的  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  对项目投资价值和 NPV 的影响情况。

#### 4.1 模糊实物期权下的项目投资价值

(1) 根据 3.1 所述方法计算得出:  $(\bar{u})_\gamma =$

表4 可靠性检验

单位: 万元

	$\gamma=0$	$\gamma=0.2$	$\gamma=0.4$	$\gamma=0.6$	$\gamma=0.68$	$\gamma=0.8$	$\gamma=1$
$(\bar{C})_\gamma^-$	0	0	0	0	0	478	4808
$(\bar{C})_\gamma^+$	191508	134718	86454	52102	46864	23945	4808
$(\bar{C})_\gamma^+ - (\bar{C})_\gamma^-$	191508	134718	86454	52102	46864	23467	0
$(N\bar{P}V)_\gamma^-$	-331500	-340679	-344922	-344229	-341801	-338600	-328035
$(N\bar{P}V)_\gamma^+$	-152647	-201014	-242607	-277426	-284885	-305472	-328035
$(N\bar{P}V)_\gamma^+ - (N\bar{P}V)_\gamma^-$	178853	139665	102315	66802	56916	33128	0

分别对  $\gamma$  取值 [0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.68, 0.8, 1], 得到相应的项目净现值和投资价值。当  $\gamma=1$  时,  $(N\bar{P}V)_\gamma^+ = (N\bar{P}V)_\gamma^-$ ,  $(\bar{C})_\gamma^+ = (\bar{C})_\gamma^-$ , 模糊数变为确定数, 验证了实物期权是模糊实物期权的特

殊形式。随着  $\gamma$  的增大,  $(\bar{C})_\gamma^-$  和  $(N\bar{P}V)_\gamma^-$  变得更大,  $(\bar{C})_\gamma^+$  和  $(N\bar{P}V)_\gamma^+$  变得更小,  $(\bar{C})_\gamma^+ - (\bar{C})_\gamma^-$  和  $(N\bar{P}V)_\gamma^+ - (N\bar{P}V)_\gamma^-$  随之减小, 与理论分析一致, 证明了模型的可靠性。

表 5 3 种方法决策对比

	NPV 方法	实物期权法	模糊实物期权法( $\gamma=0.8$ )
投资价值(万元)	-328035	4808	[478,23945]
投资决策	放弃投资	执行期权延迟投资	执行期权延迟投资

### 5.3 3 种方法对比

根据表 4 和 5 可见,在传统 NPV 方法下,  $NPV < 0$ , 则放弃投资;在实物期权方法下,  $C > 0$ , 执行期权延迟投资;在模糊实物期权方法下,当置信水平  $\gamma=0.8$  时,  $(\tilde{C}_{i,j})_{\gamma}^{-} > 0$  且  $(\tilde{C}_{i,j})_{\gamma}^{-} - (NPV)_{\gamma}^{-} > 0$ , 做出执行期权延迟投资决策。但是,当置信水平发生变动时,投资价值和相应的投资决策出现不同:当  $0.68 < \gamma \leq 1$  时,一直存在  $(\tilde{C}_{i,j})_{\gamma}^{-} > 0$  且  $(\tilde{C}_{i,j})_{\gamma}^{-} - (NPV)_{\gamma}^{-} > 0$ , 执行期权延迟投资;当  $0 \leq \gamma \leq 0.68$  时,  $(\tilde{C}_{i,j})_{\gamma}^{-} = 0$  且  $(\tilde{C}_{i,j})_{\gamma}^{+} > 0$ , 需要考虑投资者的风险偏好、对项目投资价值未来发展的估计等个人主观因素。这种情形下如果对项目投资价值未来发展进行乐观估计,则执行期权延迟投资;而如果对项目投资价值采取谨慎估计,则采取放弃投资策略。可见模糊实物期权是对实物期权的改进和完善,通过设置不同水平的参数,实现了对模糊不确定性的灵活处理,更适应于灵活多变的投资环境,尤其是像投资改造 CCS 项目这种政策依赖性强的商业活动。对于无法用随机性刻画的市场供求关系、政策扶持力度、竞争者竞争力等不确定性因素,投资者可以根据管理经验、个人阅历和内外信息对未来进行合理预估,从而提高投资决策的准确性和有效性。

## 5 结 论

本文运用模糊实物期权理论分析燃煤电厂 CCS 项目投资决策问题。通过引入隶属函数将估值中的模糊变量进行表示,补充了实物期权框架下不确定性影响因素的刻画方法。设定包括碳排放权价格在内的 4 个参数为三角模糊数,推导出模糊实物期权框架下的净现值公式和项目投资价值公式,并给出投资决策规则。

通过敏感性分析可知,模糊实物期权框架下的项目价值估值受到参数  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  的影响。 $\alpha$  和

$\beta$  越大,项目价值的变化范围越大。 $\gamma$  取值越大,参数的模糊性越低,项目价值的不确定性越低,投资者对项目价值的把握程度越高。当  $\gamma=1$  时,模糊参数转变为确定参数,模糊实物期权转化为实物期权,可见实物期权模型是模糊实物期权模型的一种特殊形式。

通过实证分析可知,模糊数的引入改进了传统 NPV 方法对项目价值的低估,与实物期权法(在  $\gamma=0.8$  的情况下)得出的决策规则看起来无异。但是当置信水平  $\gamma$  在取值范围内变动到  $[0, 0.68]$  时,投资决策需要考虑投资者的风险偏好、对项目投资价值未来发展的估计等个人主观因素。不难看出,模糊实物期权是对实物期权的改进和完善,通过设置不同水平的参数,实现了对模糊不确定性的灵活处理,更适应于灵活多变的投资环境,尤其是像投资改造 CCS 项目这种政策依赖性强的商业活动。对于无法用随机性刻画的市场供求关系、政策扶持力度、竞争者竞争力等不确定性因素,投资者可以根据管理经验、风险偏好和内外信息对未来进行合理预估,从而提高投资决策的准确性和有效性。

通过本研究可见,CCS 项目的发展受到政策补贴、市场情况、技术水平等因素的影响,具有高度的不确定性,实物期权法已经不能对其未来发展进行科学评估。模糊实物期权理论通过对模糊性进行量化,站在新的视角对不确定性进行了描述,丰富了实物期权通过随机性对不确定性进行刻画的管理方式,进一步拓宽了实物期权方法的柔性管理思路,在理论和实务中均具有重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] 国际能源署 (IEA). 《2018 年全球能源与二氧化碳现状报告》(Global Energy & CO<sub>2</sub> Status Report 2018) [R]. 2019.
- [2] Myers S C. Determinants of Corporate Borrowing [J]. Journal of Financial Economics, 1977, 5 (2): 147~175.

- [3] 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: 1059~1067.
- [4] 常凯, 王维红, 蒙震. 基于复合实物期权的燃煤电厂碳捕获封存技术投资评价 [J]. 科技管理研究, 2012, 32 (24): 39~42.
- [5] Zhu Lei, Fan Ying. Modelling the Investment in Carbon Capture Retrofits of Pulverized Coal-fired Plants [J]. Energy, 2013, 57: 66~75.
- [6] 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.
- [7] Carlsson C, Fuller R. A Fuzzy Approach to Real Option Valuation [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2003, 139 (2): 297~312.
- [8] Yoshida Y. The Valuation of European Options in Uncertain Environment [J]. European Journal of Operational Research, 2003, 145 (1): 221~229.
- [9] Hsien-Chung Wu. Pricing European Options Based on the Fuzzy Pattern of Black-Scholes Formula [J]. Computers and Operations Research, 2004, 31 (7): 1069~1081.
- [10] Shu-Hsien Liao, Shiu-Hwei Ho. Investment Project Valuation Based on a Fuzzy Binomial Approach [J]. Information Sciences, 2010, 180 (11): 2124~2133.
- [11] Abadie Luis M, Chamorro José M. European CO<sub>2</sub> Prices and Carbon Capture Investments [J]. Energy Economics, 2008, 30 (6): 2992~3015.
- [12] Zhou W, Zhu B, Fuss S, et al. Uncertainty Modeling of CCS Investment Strategy in China's Power Sector [J]. Applied Energy, 2010, 87 (7): 2392~2400.
- [13] 郑征, 朱武祥. 模糊实物期权框架下初创企业估值 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59 (1): 73~84.
- [14] 任芳玲, 蒋登智. 基于交易成本和红利的欧式期权二叉树模型及算法 [J]. 山东科学, 2018, 31 (5): 101~108.
- [15] 张正泽. 基于实物期权的燃煤电站 CCS 投资决策研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [16] 王喜平, 杜蕾, 赵树军, 等. 基于复合实物期权的燃煤电厂碳捕获与储存投资决策研究 [J]. 中国电力, 2016, (7): 179~184.
- [17] 杜蕾. 基于实物期权的燃煤电厂 CCS 投资决策研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [18] 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, 138.
- [19] 邹晓华. CCS 项目投资收益与实施风险综合评价研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [20] 郭健, 谢萌萌, 欧阳伊玲, 等. 低碳经济下碳捕集与封存项目投资激励机制研究 [J]. 软科学, 2018, 32 (2): 55~59.
- [21] 官文秀, 高凌云. 复合期权的三叉树定价模型 [J]. 统计与决策, 2016, (18): 83~86.

## Research on CCS Investment Decision of Coal-fired Power Plant Based on Fuzzy Real Option

Wang Xiping Zhao Qi Tan Xichong Li Yanmei Zhang Ningning

(Department of Economic Management, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**[Abstract]** In order to break through the shortcomings of non-random uncertainty in CCS investment decision-making, the triangular fuzzy number and binary tree option model are combined to construct a fuzzy real option model framework for CCS investment decision, and the model and judgment are judged through empirical analysis. The rules are verified for reliability. The research shows that: (1) the value of CCS investment under the fuzzy real option framework is affected by left-form  $\alpha$ , right-form  $\beta$  and confidence level  $\gamma$ ; (2) when  $0 \leq \gamma \leq 0.68$ , investment decision needs to consider investors personal subjective factors. This approach is more adaptable to a flexible investment environment, especially for policy-dependent business activities like CCS investment. For uncertainties that cannot be characterized by randomness, investors can make reasonable estimates of the future based on risk appetite, management experience and internal and external news, thus improving the accuracy and effectiveness of investment decisions.

**[Key words]** fuzzy real options; coal-fired power plant; CCS; binary tree pricing model; return on investment; flexible management

(责任编辑: 王 平)