

DOI: 10.15918/j.jbitss1009-3370.2015.0502

碳限额与交易政策下供应链低碳技术投资时机研究

丁志刚¹, 徐琪²

(1.绍兴文理学院 经济与管理学院, 浙江 绍兴 312000; 2.东华大学 旭日工商管理学院, 上海 200051)

摘要:在碳排放权限额与交易政策环境下,碳排放权交易价格的不确定性对供应链企业选择低碳技术投资时机具有重要的影响。利用实物期权理论评估碳交易价格不确定情况下供应链低碳技术投资具有的期权价值,建立供应链低碳技术投资时机决策的基本模型,在此基础上,构建考虑供应链内部合作的低碳技术投资博弈模型,重点讨论供应链上下游企业在对投资时机与转移支付比例进行决策的均衡策略。基于上述模型,通过数值算例进一步分析低碳技术投资时机的影响因素。研究表明:碳减排率水平、碳价波动率、企业间转移支付比例等因素会对低碳投资门槛产生影响,供应链企业应综合评价碳价波动下低碳技术投资的期权价值,合理选择投资时机与转移支付比例的最佳平衡点,实现经济效益和低碳减排的双重目标,并保障供应链协调与投资优化。

关键词: 低碳技术; 最优投资门槛; 实物期权; 博弈模型; 碳限额与交易

中图分类号: F273

文献标识码: A

文章编号: 1009-3370(2015)05-0009-06

近代工业革命以来,人类燃烧化石能源产生的以CO₂为主的温室气体被认为是气候变暖和越来越频繁发生的极端气候灾害的罪魁祸首。国际社会一直努力探索有效的气候变化应对机制,碳排放权限额与交易政策就是首先在《京都议定书》中提出的一种通过总量管制和市场交易双重手段促使达到减排目标和保护环境的经济调控手段,该减排机制目前在全球范围得到了广泛应用(Carbon Trust, 2007)^[1]。自2013年以来,中国在上海、北京、天津等7个城市建立了碳排放权交易中心并陆续开展交易,试点中的上千家企业必须计量并公布企业碳排放量,企业每年获得的政府初始碳排放配额总量是固定的,企业当年未使用完的部分可在碳交易市场出售,若企业当年发生的碳排放量超过配额,则需在碳交易市场购买以弥补差额。企业通过低碳减排投资,比如,开发更清洁的能源,安装更节能高效的生产设备与设施,或者研发更节能高效的生产技术与工艺,还可有效降低生产过程的碳排放量,降低产品碳足迹,提升产品形象(Abdallah等, 2012)^[2]。企业为应对市场竞争,生产低碳产品,需要严格控制包括原材料生产、成品制造加工、各类物流活动等供应链各环节的温室气体排放量;由于各节点企业减排效率存在差异,供应链上下游需要合作进行低碳技术投资。在碳限额与交易政策下,供

应链企业低碳技术投资带来的碳减排价值可体现为其在碳交易市场的销售价值,会受到碳交易价格波动的显著影响。因此,有效评估碳限额与交易政策下不确定性因素带来的低碳技术投资风险,科学选择投资时机具有切实的研究意义。

一、相关研究述评

(一)碳限额与交易政策下供应链运营决策的研究

近几年来,随着碳交易政策的日渐完善及其影响的逐步扩散,碳交易政策下供应链企业运营决策问题日益引起研究者的关注,比如,Benjaafar等(2013)^[3]率先考虑通过构建并调整基本决策模型,将碳排放与供应链采购、生产以及库存等运营决策变量一同优化,在保证经济效率的同时降低碳排放量。还有文献(Jin等, 2013; Hoen等, 2010)^[4-5]讨论碳限制与交易政策对供应链设计和物流决策的影响,构建满足碳排放约束下的零售商物流网络设计和运输方式选择的优化模型。Skelton等(2013)^[6]研究在有限碳配额下钢铁供应链联合提高材料利用效率的激励机制。Luo等(2013)^[7]利用博弈分析方法构建生物乙醇供应链生产决策模型,并引入碳交易市场作为推动生物乙醇行业实现低碳发展目标的激励机制,研究结果显示,单独依靠碳交易政策的激

收稿日期: 2015-02-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71172174); 教育部人文社科青年基金资助项目(13YJC630089); 上海市浦江人才计划资助项目(12PJC020); 上海市社会科学规划课题(2013BGL014)

作者简介: 丁志刚(1981—),男,博士,讲师,E-mail:dingzhigang2030@163.com; 徐琪(1963—),女,博士,教授,博士生导师,E-mail:xuqi@dhu.edu.cn

励效果不够,需要增加其他政策激励措施。赵道致与吕金鑫(2012)^[8]考虑到供应链上各企业的边际减排成本具有差异且低碳因素对各企业产品价值的贡献也不同,建立了碳限额与交易政策下的供应链整体减排优化模型,并给出相应的求解方法。Du等(2015)^[9]在考虑排放权交易时,构造了一个由非营利绿色环保组织作为碳排放权供应商和依赖碳排放权的企业组成的新型供应链,基于报童模型研究双方的 Stackelberg 博弈过程。Du等(2013)^[10]进一步在这种供应链中,将政府制定碳排放限额作为可变参数,引入公平偏好和社会总福利,研究碳交易政策对排放权供应商和需求商的影响。

(二)碳交易政策下企业低碳减排投资的研究

关于碳交易政策下企业低碳减排投资问题也引起很多学者的研究兴趣。关于企业低碳减排投资的研究也引起很多学者的兴趣。杜少甫等(2009)^[11]研究在碳排放许可与交易机制下排放依赖性企业生产运营的优化模型,通过比较净化成本与排放权购买成本,分析净化空间的存在性和最优生产策略。范体军等(2012)^[12]认为在碳交易机制下厂商倾向于降低碳排放量,如果增加减排技术的投资商将出售更多的碳排放量,降低库存水平,并进一步降低了总成本。Svensson等(2011)^[13]、Zhou等(2014)^[14]探讨了企业低碳技术投资决策的外部影响因素,发现碳排放权价格水平、波动程度以及政策实施时间等因素对低碳技术投资收益会产生重要影响。Rohlfis等(2014)^[15]研究了电力企业对 CCS(碳捕获和储存)项目的最优投资策略,得出 CO₂ 价格和电力价格等市场条件会对投资 CCS 项目的收益产生关键性影响。Lukas E等(2014)^[16]在碳排放交易背景下,运用实物期权理论建立供应链减排项目投资决策模型,证明在不确定条件下供应链上下游企业通过谈判实现碳减排不具有经济性,并提出供应链改善经济和生态效益的对策建议。

(三)期权博弈在企业投资时机决策中的应用

研究者较早将实物期权思想应用在单个企业技术采纳时机的决策中,比如,Dixit和Pindyck(1994)^[17]将实物期权分析方法用于评估不确定情形下单个企业技术投资的期望价值,进而确定投资的最优时机。在单个企业的技术投资时机研究中,往往假定该企业具有投资于某一项目的垄断权利,但是在实践中,必须考虑其他竞争企业的进入或扩张行为带来的影响。近年来,研究者已将实物期权与博弈理论相结合,发展出研究考虑企业间竞争的投资时机决策期权博弈理论,比如,Reinganum(1985)^[18]建

立的双寡头竞争模型中,两家公司应用一种新技术,产生一次性实施费用并降低单位成本,研究结果解释了新技术推广的“溢出”效应。Weeds(2002)^[19]研究双寡头企业在技术专利实施时机上的竞争,结果表明,企业间的竞争关系推迟了实施时间。雷星晖等(2004)^[20]研究竞争环境下企业研发投资决策的优化问题,利用期权博弈模型分析两家公司分别在协同策略和领先追随策略时的最优投资时机。吴建祖等(2006)^[21]运用期权博弈理论分析在不确定竞争环境和不完全信息条件下企业投资研发的最优时机,指出不完全信息将会延缓企业研发投资,最优投资时机取决于对竞争对手采取策略的判断。

综上所述,越来越多学者围绕碳限额与交易政策下企业低碳减排投资以及供应链运营等决策问题开展研究,追求环境友好和经济效益的双重优化,然而,当前研究尚缺少对碳交易市场不确定性下供应链低碳技术投资风险的研究。期权博弈理论为评价不确定条件下具有竞争关系的企业投资收益提供了一类有力的分析工具,本文从实物期权角度,考察具有上下游竞争合作关系的供应链企业低碳减排投资的期权价值分析和投资时机决策。

二、基本模型构建与讨论

(一)背景描述与模型假设

在碳限额与交易政策下,企业进行低碳技术投资后碳减排量的价值可表现为该减排量在碳市场的交易价值,主要受到碳交易价格的影响。当低碳技术处于某个水平时,一定的投资额可获得稳定的减排量,而碳交易价格受多种因素影响呈随机波动状态,减排投资的收益也将是随机波动的,对进行低碳投资的企业来说,存在投资价值评估和时机选择问题。

假设 1.碳排放权交易市场为完全竞争市场,单位碳排放权的价格为 $p(t)$,由于受众多因素影响,可假设碳排放权价格是随机波动的,且服从几何布朗运动

$$dp(t) = \mu p(t)dt + \sigma p(t)d_{B(t)}, p(0) = p_0 \quad (1)$$

其中, μ 为碳交易价格瞬时期望增长率; σ 为波动率; $d_{B(t)}$ 为标准维纳过程的增量,且 $0 \leq \mu < \alpha$ (α 为无风险利率,可用资本市场平均收益率计量), $0 \leq \sigma$, $d_{B(t)} \sim N(0, dt)$ 。

假设 2.供应链一次性投资 I 实施低碳减排技术,主要用于开发低碳工艺技术和购买高效节能装备等,实施低碳技术投资前单位产品的碳排放量为 e_0 ,投资后可使单位产品碳排放量减少 Δe ,则碳减

排率 $\theta = \Delta e / e_0$ 。丁志刚、徐琪(2014)^[22]认为,碳减排率 θ 与低碳技术投资额 I 具有相关性,且呈二次函数关系: $I = r\theta^2/2$, 其中, r 为碳减排成本系数。

假设 3. Vanclay J、Shortiss J、Aulsebrook S 等(2011)^[23]研究表明,其他条件不变的情况下,减排较多的产品在市场可获得较高的销售价格,因此,可假设实施低碳减排技术后的产品价格比减排前提升 Δp , 且 Δp 是产品生产周期碳减排率 θ 的线性函数: $\Delta p = \delta\theta$, 其中, δ 表示产品低碳化对产品市场价格的提升系数,且 $0 \leq \delta$ 。

假设 4. 假设供应链是风险中性的,不考虑低碳技术实施时间,供应链进行低碳技术投资后将立即获得碳减排额并可长期稳定获得,供应链最早可以在 $t=0$ 时刻进行投资。

假设 5. 假设低碳技术投资后供应链年最大生产能力为 D , 不考虑产品库存积压情形。

(二) 基本模型

在假设供应链仅有一家企业,且无其他供应链竞争情形下,构建以供应链低碳技术投资期望收益为目标函数的基本模型。考虑前述假设条件,供应链在任意时刻 t 进行低碳技术投资的收益净现值(NPV)函数为

$$\Pi(t) = E \left[\int_t^{\infty} (\theta e_0 D p(t) + \delta \theta D) e^{-\alpha(t-t')} d_t - \frac{1}{2} r \theta^2 \right] \quad (2)$$

设定 p_t 为 t 时刻的碳排放权交易价格,根据伊藤积分,式(1)的解为

$$p(t) = p e^{(\mu - \frac{1}{2}\sigma^2)t} + \sigma B(t) \quad (3)$$

进一步求出碳交易价格的期望值为

$$E p(t) = p e^{(\mu - \frac{1}{2}\sigma^2)t} E e^{\sigma B(t)} = p e^{(\mu - \frac{1}{2}\sigma^2)t} e^{\frac{1}{2}\sigma^2 t} = p e^{\mu t} \quad (4)$$

将式(4)带入式(2),可得

$$\Pi(t) = \frac{\theta e_0 D p_t}{\alpha - \mu} + \frac{\delta \theta D}{\alpha} - \frac{1}{2} r \theta^2 \quad (5)$$

其中,第一项是供应链实施低碳技术后获得的碳减排量交易收益的折现净值;第二项是实施低碳技术后产品市场获得的销售利润增长;第三项是实施低碳一次性投入的成本,即减排投资额。

(三) 最优低碳技术投资时机分析

在执行投资之前,供应链持有投资期权,等待期间不产生低碳收益,因此,供应链企业的投资策略就是根据低碳投资的期权价值最大化原则来选择投资时机,即是最优停止时机问题。假设在 T 时刻碳排放权交易价格初次达到最优投资门槛 p_T , 供应链企业就停止等待执行投资行动,可使低碳技术投资的预期收益最大。若令 V 表示供应链低碳投资

期权的价值函数,则

$$V(p(t)) = \max_{t' \geq t} E \left[e^{-\alpha(t'-t)} \left[\frac{\theta e_0 D p_{t'}}{\alpha - \mu} + \frac{\delta \theta D}{\alpha} - \frac{1}{2} r \theta^2 \right] \right] \quad (6)$$

由 Ito 引理,看涨期权的价值函数 V 满足的微分方程为

$$\frac{1}{2} \sigma^2 (p(t))^2 \frac{\partial^2 V}{\partial (p(t))^2} + (\alpha - \mu) p(t) \frac{\partial V}{\partial p(t)} - \alpha V = 0 \quad (7)$$

结合实物期权理论的边界条件,式(7)的通解为

$$V = C_1 (p(t))^{\lambda_1} + C_2 (p(t))^{\lambda_2}, C_1, C_2 \text{ 为常数。} \quad (8)$$

根据 Dixit 和 Pindyck 的相关结论^[17],可以得到 $C_2 = 0$, 且

$$\lambda_1 = \frac{1}{2} - \frac{\mu}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{\mu}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{2\alpha}{\sigma^2}} > 1 \quad (9)$$

为方便表达,用 λ 代替 λ_1 , 则

$$E \left[e^{-\alpha(T-t)} \left(\frac{\theta e_0 D p_{t'}}{\alpha - \mu} + \frac{\delta \theta D}{\alpha} - \frac{1}{2} r \theta^2 \right) \right] = \left(\frac{\theta e_0 D p_T}{\alpha - \mu} + \frac{\delta \theta D}{\alpha} - \frac{1}{2} r \theta^2 \right) \left(\frac{p(t)}{p_T} \right)^{\lambda} \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial p_T} \left(\frac{\theta e_0 D p_T}{\alpha - \mu} + \frac{\delta \theta D}{\alpha} - \frac{1}{2} r \theta^2 \right) \left(\frac{p(t)}{p_T} \right)^{\lambda} = 0 \quad (11)$$

可得到最优投资门槛

$$p_T = \frac{\lambda}{\lambda - 1} \frac{(\alpha - \mu)}{\theta e_0 D} \left(\frac{1}{2} r \theta^2 - \frac{\delta \theta D}{\alpha} \right) \quad (12)$$

低碳减排投资期权价值

$$V(p(t)) = \begin{cases} \left(\frac{\theta e_0 D p_T}{\alpha - \mu} + \frac{\delta \theta D}{\alpha} - \frac{1}{2} r \theta^2 \right) \left(\frac{p_t}{p_T} \right)^{\lambda} & p_t < p_T \\ \frac{\theta e_0 D p_t}{\alpha - \mu} + \frac{\delta \theta D}{\alpha} - \frac{1}{2} r \theta^2 & p_t \geq p_T \end{cases} \quad (13)$$

p_T 对应的供应链最优投资时机为

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

即碳排放权交易价格初次到达最优投资门槛 p_T 的时刻。

三、考虑供应链内部合作的 低碳技术投资时机分析

在基本模型假设的基础上,进一步设定供应链由上游制造商与下游零售商两家企业构成。下游零售商为打造低碳供应链,应对低碳竞争,计划进行低碳减排投资。低碳减排投资由零售商主导实施,需要供应链上游制造商共同参与完成,需要制造商承担的投资额为 ϕI (ϕ 为制造商投资承担比例,且 $0 \leq \phi \leq 1$), 作为回报,制造商将可分享碳排放权交易收益。供应链企业间低碳技术投资合作关系如图 1 所示,双方协议约定:零售商可先确定按比例 ξ (ξ 为

碳排放权收益转移支付比例,且 $0 \leq \xi \leq 1$) 将低碳技术投资产生的碳排放权收益转移支付给制造商;制造商获知承担的投资额和转移支付比例后,选择是否合作,若合作将有权确定对自己最有利的投资时机。因此,可将投资供应链减排技术的收益视作由外生性因素(碳交易价格)和内生性因素(企业间的竞争)共同作用的结果,供应链内两企业的博弈均衡策略是根据对方的策略选择最佳行动方案,以最大化自身低碳投资的期权价值。

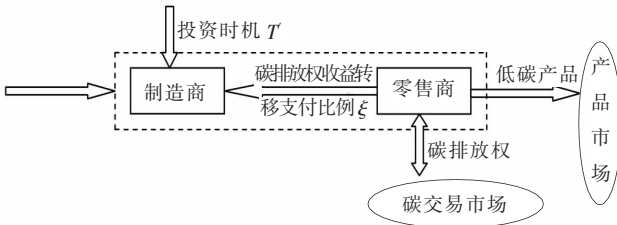


图1 碳限额与交易政策下供应链企业低碳技术投资合作关系

基于前述情景描述,供应链在任意时刻 t 进行低碳技术投资,分别建立两企业的期望收益函数。

零售商的期望收益净现值为

$$\Pi_R(\xi) = E \left[\int_{t'}^{\infty} (\theta e_0 D p(t)(1-\xi) + \delta \theta D) e^{-\alpha(t-t')} d_t - \frac{1}{2} r \theta^2 (1-\phi) \right] = \frac{\theta e_0 D p_t (1-\xi) + \delta \theta D}{\alpha - \mu} - \frac{1}{2} r \theta^2 (1-\phi) \quad (15)$$

制造商的期望收益净现值为

$$\Pi_M(T) = E \left[\int_{t'}^{\infty} (\theta e_0 D p(t) \xi e^{-\alpha(t-t')} d_t - \frac{1}{2} r \theta^2 \phi) \right] = \frac{\theta e_0 D p_t \xi}{\alpha - \mu} - \frac{1}{2} r \theta^2 \phi \quad (16)$$

求解博弈均衡的方法可采用倒推法:先求出制造商的实施碳价门槛 p_ξ ; 然后再求零售商的转移支付比例 ξ 。

制造商低碳投资的期权价值函数

$$V_M(p(t)) = \max_{t' \geq t} E \left\{ e^{-\alpha(t-t')} \left(\frac{\theta e_0 D p_t \xi}{\alpha - \mu} - \frac{1}{2} r \theta^2 \phi \right) \right\} \quad (17)$$

对照式(12),可得制造商的最优投资门槛为

$$p'_\xi = \frac{\lambda}{\lambda - 1} \frac{(\alpha - \mu)}{\theta e_0 D \xi} \left(\frac{1}{2} r \theta^2 \phi \right) = \frac{\lambda}{\lambda - 1} \frac{(\alpha - \mu) r \theta \phi}{2 e_0 D \xi} \quad (18)$$

则制造商的最优投资时机为

$$T' = \inf \{ t \geq 0 | p(t) > p'_\xi \} \quad (19)$$

而且,制造商低碳减排投资的期权价值

$$V_M(p(t)) = \begin{cases} \left(\frac{\theta e_0 D p'_\xi}{\alpha - \mu} - \frac{1}{2} r \theta^2 \phi \right) \left(\frac{p_t}{p'_\xi} \right)^\lambda & p_t < p'_\xi \\ \frac{\theta e_0 D p_t \xi}{\alpha - \mu} - \frac{1}{2} r \theta^2 \phi & p_t \geq p'_\xi \end{cases} \quad (20)$$

零售商在最初确定转移支付比例 ξ 的时候就考虑到制造商的最优策略选择,所以,零售商会在 p'_ξ 的基础上选择使自身收益最大化 ξ' 的值,此时,零售商低碳投资期权的价值函数为

$$V_R(p(t)) = \max_{\alpha \xi < 1} E \left\{ e^{-\alpha t} \left[\frac{\theta e_0 D p_t (1-\xi)}{\alpha - \mu} + \frac{\delta \theta D}{\alpha} - \frac{1}{2} r \theta^2 (1-\phi) \right] \right\} \quad (21)$$

通过求解

$$\frac{\partial}{\partial \xi'} \left[\frac{\theta e_0 D p'_\xi (1-\xi')}{\alpha - \mu} + \frac{\delta \theta D}{\alpha} - \frac{1}{2} r \theta^2 (1-\phi) \right] \left(\frac{p_t}{p'_\xi} \right)^\lambda = 0 \quad (22)$$

$$\text{得到} \quad \xi'_1 = \frac{(\lambda - 1) \alpha r \theta \phi}{(\lambda - 1) (\alpha r \theta - 2 \delta D) + \alpha r \theta \phi}$$

考虑制造商在 $p_t \geq p'_\xi$ 情形下的边界条件

$$\frac{\theta e_0 D p_t \xi}{\alpha - \mu} - \frac{1}{2} r \theta^2 \phi \geq 0 \quad (23)$$

$$\text{得到} \quad \xi'_2 = \frac{r \theta (\alpha - \mu) \phi}{2 e_0 D p_0}$$

则

$$\xi' = \min \{ \xi'_1, \xi'_2 \} \quad (24)$$

并且

$$V_R(p(t)) = \begin{cases} \left[\frac{\theta e_0 D p'_\xi (1-\xi)}{\alpha - \mu} - \frac{1}{2} r \theta^2 (1-\phi) \right] \left(\frac{p_t}{p'_\xi} \right)^\lambda & p_t < p'_\xi \\ \frac{\theta e_0 D p_t (1-\xi)}{\alpha - \mu} - \frac{1}{2} r \theta^2 (1-\phi) & p_t \geq p'_\xi \end{cases} \quad (25)$$

所以,该供应链低碳技术投资项目总的期权价值为 $V_{\text{总}}(p_t) = V_R(p_t) + V_M(p_t)$,且低碳技术投资门槛为

$$p'_\xi = \frac{\lambda}{\lambda - 1} \frac{r \theta (\alpha - \mu)}{2 e_0 D} \left(1 - \frac{2 \delta D}{\alpha r \theta} + \frac{\phi}{\lambda - 1} \right) \quad (26)$$

将式(12)变形,得到 $p_T = \frac{\lambda}{\lambda - 1} \frac{r \theta (\alpha - \mu)}{2 e_0 D} \left(1 - \frac{2 \delta D}{\alpha r \theta} \right)$,式(26)比式(12)多了一个系数 $\frac{\phi}{\lambda - 1}$,因为

$\lambda > 1$,所以有 $\frac{\phi}{\lambda - 1} > 0$,则 $p'_\xi > p_T$ 。

推论1.低碳技术投资项目需要由供应链上下游两家企业共同合作才能完成的情形,比单独由一家企业独自投资完成的情形,其投资门槛将提高。

四、算例分析

例1.对于基本模型中的相关参数赋值如下: $\alpha = 1, \mu = 0.02, r = 1000, e_0 = 2, \delta = 2, D = 1000$ 。可得到不同波动率下最优投资门槛与碳减排率之间的关系,如图2所示。

从图2可以观察到:

1.当波动率不变时,最优投资门槛与碳减排率成正相关关系。

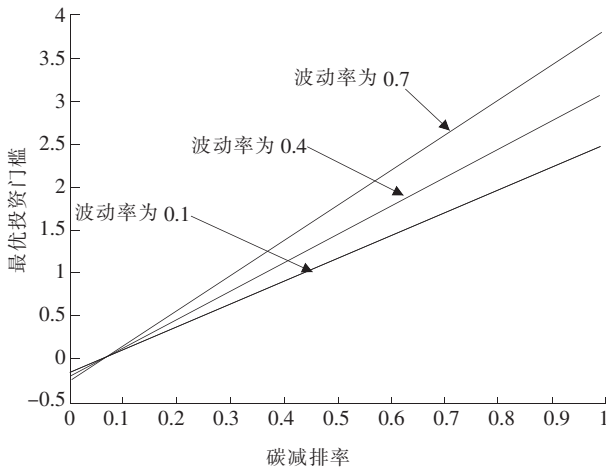


图2 不同波动率下最优投资门槛与碳减排率之间的关系

推论 2.单位产品的碳减排率越低,碳价投资门槛就会越低。选择较低的减排技术水平可降低碳价投资门槛,反之,较高的减排技术水平,将推高供应链低碳技术投资的门槛。

2.当波动率 $\sigma=0.7$ 时,最优投资门槛位于最上方;当波动率 $\sigma=0.1$ 时,最优投资门槛位于最下方;当波动率 $\sigma=0.4$ 时,最优投资门槛位于中间位置。表明,最优投资门槛与碳交易价格波动率成正相关关系。

推论 3.最优投资门槛随着碳交易价格的波动率增大而提高,随着来自碳市场不确定性的增加,低碳技术投资项目的进入门槛值变大,将会提升供

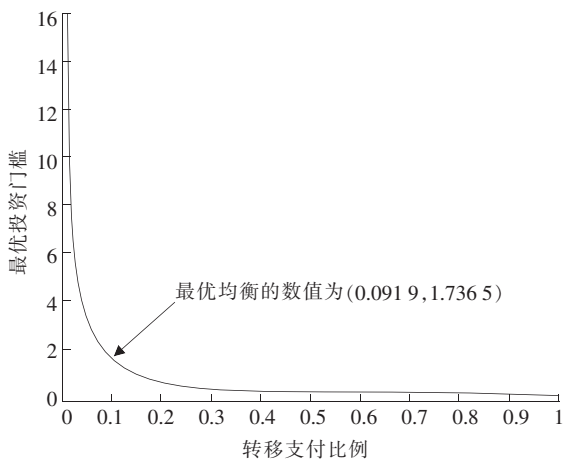


图3 最优投资门槛与转移支付比例之间的关系

应链等待的期权价值,延长供应链低碳技术投资的等待时间。

例 2.对于考虑供应链内部合作低碳技术投资模型中的相关参数赋值如下: $\alpha=0.1, \mu=0.02, \sigma=0.1, D=1\ 000, \theta=0.2, r=10\ 000, e_0=2, \phi=0.3, p_0=1.6$ 。可求出低碳技术投资合作博弈的最优均衡 $(\xi', p'_{\xi'})$ 的数值为 $(0.091\ 9, 1.736\ 5)$ 。

从图 3 可以观察到:当波动率不变时,投资门槛与投资减排率成负相关关系。且转移支付比例接近于 0 时,投资门槛变为无穷大;当转移支付比例处于 0~0.1 之间时,投资门槛迅速降低;当转移支付比例大于 0.1 时,投资门槛降低得很缓慢。

推论 4.转移支付比例越高,跟随企业投资门槛越低,越能促使跟随企业加快进行投资,使得供应链整体项目投资提前实施。但是,转移支付比例过高不符合主导企业的利益,存在一个供主导企业选取的最佳平衡点。

五、结语

通过分析碳限额与交易政策下企业低碳技术投资面临的不确定性风险,运用实物期权相关理论,建立供应链低碳技术投资时机决策的基本模型以及考虑供应链内部企业间合作的博弈模型,并讨论均衡策略的特点。通过研究发现,当供应链企业选择的减排技术水平较低时,可降低碳投资门槛,就意味着实施低碳投资获得提前,相反,选择较高的减排技术水平将推高供应链低碳技术投资的门槛;投资门槛随着碳交易价格的波动率增大而提高,这是因为随着碳市场不确定性的增加,低碳技术投资项目回报面临的不确定性和风险也随之增大,投资门槛值也就升高;由供应链上下游两家企业合作才能完成比单独由一家企业独自投资完成的低碳投资项目,其投资门槛将提高,使得投资推迟;供应链中主导企业转移支付比例越高,越能促使跟随企业加快进行投资,使得供应链整体项目投资提前实施。

参考文献:

- [1] Carbon Trust. Carbon footprint measurement methodology[R]. London, U.K.: Carbon Trust, 2007.
- [2] Abdallah T, Farhat A, Diabat A, et al. Green supply chains with carbon trading and environmental sourcing: formulation and life cycle assessment[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(9): 4271-4285.
- [3] Benjaafar S, Li Y, Daskin M. Carbon footprint and the management of supply chains: insights from simple models[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10(1): 99-116.
- [4] Jin M, Granda-Marulanda N, Down I. The impact of carbon policies on supply chain design and logistics of a major retailer[J]. Journal of Cleaner Production, 2013(9): 1-9.
- [5] Hoen K, Tan T, Fransoo J, et al. Effect of carbon emission regulations on transport mode selection in supply chains[R].

- Netherlands; Eindhoven University of Technology, 2010.
- [6] Skelton A, Allwood J. The incentives for supply chain collaboration to improve material efficiency in the use of steel: an analysis using input output techniques[J]. *Ecological Economics*, 2013(89): 33-42.
- [7] Luo Y, Miller S. A game theory analysis of market incentives for U.S. switchgrass ethanol[J]. *Ecological Economics*, 2013(93): 42-56.
- [8] 赵道致, 吕金鑫. 考虑碳排放权限制与交易的供应链整体低碳化策略[J]. *工业工程与管理*, 2012, 17(5): 65-71.
- [9] Du S, Ma F, Fu Z, et al. Game-theoretic analysis for an emission-dependent supply chain in a 'cap-and-trade' system[J]. *Annals of Operations Research*, 2015, 228(1): 135-149.
- [10] Du S, Zhu L, Liang L, et al. Emission-dependent supply chain and environment policy-making in the 'cap-and-trade' system[J]. *Energy Policy*, 2013, 57: 61-67.
- [11] 杜少甫, 董骏峰, 梁樑, 等. 考虑排放许可与交易的生产优化[J]. *中国管理科学*, 2009, 17(3): 81-86.
- [12] 范体军, 杨莹, 骆瑞玲. 碳排放交易机制下减排技术投资的生产库存[J]. *北京理工大学学报: 社会科学版*, 2012, 14(6): 14-21.
- [13] Svensson E, Berntsson T. Planning future investments in emerging energy technologies for pulp mills considering different scenarios for their investment cost development[J]. *Energy*, 2011, 36: 6508-6519.
- [14] Zhou W, Zhu B, Chen D, et al. How policy choice affects investment in low-carbon technology: the case of CO₂ capture in indirect coal liquefaction in China[J]. *Energy*, 2014, 73: 670-679.
- [15] Rohlfs W, Madlener R. Optimal investment strategies in power generation assets: the role of technological choice and existing portfolios in the deployment of low-carbon technologies[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 28: 114-125.
- [16] Lukas E, Welling A. Timing and eco(nomic) efficiency of climate-friendly investments in supply chains[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 233: 448-457.
- [17] Dixit A, Pindyck R. *Investment under uncertainty*[M]. Princeton NJ: Princeton University Press, 1994.
- [18] Reinagenum J. Innovation and industry evolution quarterly[J]. *Journal of Economics*, 1985(100): 81-99.
- [19] Weeds H. Strategic delay in a real options model of R&D competition[J]. *Review of economic studies*, 2002, 69(3): 729-747.
- [20] 雷星晖, 李来俊. 竞争环境下基于期权博弈的 R&D 投资决策研究[J]. *管理科学*, 2004, 17(2): 85-89.
- [21] 吴建祖, 宣慧玉. 在不完全信息条件下企业 R&D 最优投资时机的期权博弈分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2006(4): 50-54.
- [22] 丁志刚, 徐琪. 供应链实施低碳技术的博弈与激励机制研究[J]. *北京理工大学学报: 社会科学版*, 2014, 16(4): 13-17.
- [23] Vanclay J, Shortiss J, Aulsebrook S, et al. Customer response to carbon labelling of groceries[J]. *Journal of Consumer Policy*, 2011, 34(1): 153-160.

Timing of Low-carbon Technology Investment in Supply Chain under Carbon Cap and Trade Policy

DING Zhigang¹, XU Qi²

(1. School of Economics and Management, Shaoxing University, Shaoxing Zhejiang 312000, China;

2. Glorious Sun School of Business and Management, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: In the environment of carbon emissions cap and trade policy, the uncertainty of carbon emissions price has an important impact on the low carbon technology investment timing choice of the supply chain enterprises. By using the real option theory, the research investigates the option value of low-carbon technology investment in supply chain under uncertainty of carbon price and establishes a basic decisions model of low-carbon technology investment timing in supply chain. Based on the above basis, the paper constructs a low-carbon investment game model taking into consideration cooperation and competition relationship within the supply chain, and then emphatically discusses the equilibrium strategy decisions involving investment timing and proportion of transfer payments made by upstream and downstream enterprises in the supply chain. Based on the above models, the influence factors of low carbon technology investment opportunity are analyzed by numerical examples. The research results show that the factors such as the reduction rate of carbon emissions, the fluctuation rate of carbon price and the transfer payment proportion between firms have impacts on the threshold of low-carbon investment. In order to achieve the twin objectives of higher economic efficiency and more carbon emission reduction, and attain the supply chain coordination and the win-win situation between enterprises, the enterprises of supply chain should comprehensively evaluate the option value of low-carbon technology investments and reasonably select the best equilibrium of investment timing and transfer payments proportion.

Key words: low-carbon technology; optimal investment threshold; real option; game theory model; carbon cap and trade

[责任编辑:孟青]