

考虑收益下限的火力发电商碳减排投资策略^①

张新华¹, 甘冬梅¹, 黄守军², 叶 泽¹

(1. 长沙理工大学经济与管理学院, 长沙 410114; 2. 中山大学岭南(大学)学院, 广州 510275)

摘要: 假定火力发电商的上网电量和二氧化碳排放权价格(碳价)服从几何布朗运动, 针对无营运成本和有营运成本两种情况分别构建收益下限政策下的发电商碳减排投资实物期权模型, 在求解模型的基础上讨论了最优的收益下限及其实施期限. 模型的实证性算例分析结果表明: 1) 收益下限政策可激励发电商进行碳减排投资, 但最优的实施期限可能低于设施的运行年限; 2) 发电商碳减排投资阈值最低点对应的收益下限, 即为最优的收益下限; 3) 在无营运成本情况下收益下限相对于直接补贴政策可节省资金, 但在有营运成本情况下是否节省资金与电力需求等因素有关.

关键词: 收益下限; 实物期权; 碳减排投资; 政策分析; 发电市场

中图分类号: F830.59 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2019)11-0069-13

0 引言

我国《“十三五”控制温室气体排放工作方案》的总体目标为: 到2020年, 单位国内生产总值二氧化碳排放比2015年下降18%, 碳排放总量得到有效控制, 并将其作为约束性指标, 纳入了国民经济和社会发展规划. 国际能源署(International Energy Agency, IEA)的调查报告认为我国的二氧化碳排放主要来源于以煤炭为主的能源行业^[1]. 2017年底我国燃煤发电机组容量约占总发电容量的55.22%, 而当年燃煤发电量约占总发电量的64.67%^[2]. 因此, 在发电市场中实施碳减排政策是实现我国碳排放宏观目标的关键.

目前发电市场的碳减排措施包括两个方面: 在短期主要通过发电商上网电量的“碳调度”机制以实现“低排放发电机组电量优先上网、高排放发电机组电量少上网”, 从而实现碳减排的短期目标; 而中长期减排措施则包含如下内容: 一是大力发展清洁能源(如水电、风电、光伏等), 尽量

减少新建火电发电机组(尤其是高排放); 二是对现有火力发电机组进行改造, 以降低其单位发电量的碳排放, 即碳减排投资. 由于我国目前的发电机组仍以煤电机组为主, 且清洁能源(如风电、光伏等)发电机组的出力往往带有季节性和随机性, 因此激励现有煤电机组进行碳减排投资, 以降低整体的碳排放水平, 可能是目前我国发电市场实现碳减排目标的可行路径之一.

对燃煤发电商而言, 碳减排投资的收益为其减排的碳排放权在碳交易市场上的成交“价值”, 是碳价和上网电量的函数, 而碳价和发电商的上网电量往往是随机的. 因此燃煤发电商在进行碳减排投资时, 同时面临碳交易和电力交易市场的不确定性, 其投资决策问题显然可以用实物期权方法来进行分析. 目前有关碳减排的文献不少, 而发电商的碳减排投资方面的文献主要集中在以下几方面.

一是从发电商的角度, 针对不确定的外部因素, 运用实物期权方法, 分析发电商的最优碳减排

^① 收稿日期: 2017-09-02; 修改日期: 2019-01-31.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71671018; 71271033); 湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2447).

作者简介: 张新华(1973—), 男, 湖南双峰人, 教授, 博士后. Email: xyu7302@163.com

投资策略,这些文献中,文献[3]较为经典,该文在对西班牙电力市场进行实证考察基础上,假定碳价服从几何布朗运动,而电价服从均值回归过程,运用实物期权方法分析了发电商的碳捕获和储存(carbon capture and storage, CCS)投资策略.针对碳价、燃料价格、投资成本、政府补贴的不确定性情况,Wang和Du^[4]运用实物期权对现有火电CCS投资项目进行评估;Zhu和Fan^[5]考察了上网电价、碳价、投资成本、运行维护(O&M)成本不确定性情况下的CCS投资策略,并运用最小二乘蒙特卡洛(LSM)方法对复杂模型求解;和文献[4]与文献[5]类似,Zhang等^[6]提出了碳价、政府激励、CCS设施年运行时间、发电机组生命周期、技术进步等不确定条件下的CCS投资决策模型;王素凤等^[7]分析了碳减排技术进步、电力价格、燃料价格、碳价、补贴政策和投资项目的碳减排率等不确定条件下的发电商碳减排投资决策;与上述文献略有不同,Walsh等^[8]针对碳价确定与碳价随机两种情况,构建实物期权数学模型考察发电商CCS投资最优时点.显然,文献[3]~文献[8]的分析范式是类似的,其主要的差别是考虑的不确定性因素不同,因此模型的具体求解过程及分析结果不同.

二是侧重考虑政策因素对低碳技术投资的影响,并从激励投资的角度提出政策建议.如Zhou等^[9]考察了政策对低碳技术投资的影响;Fan等^[10]讨论了碳规制政策不确定情况下,风险规避型发电商的容量投资策略;针对碳减排不确定条件下的最优投资,Wang等^[11]的研究结果表明,缺乏政策诱导的话单个发电商会扭曲最优的投资水平.近年不少文献关注碳价下限(carbon price floor)对碳市场及低碳投资的影响,如Wood和Jotzo^[12]比较了碳价下限机制的3种情形.Egli和Lecuyer^[13]分析了碳价下限对德国电力市场和可再生能源补贴的影响.Brauneis等^[14]运用蒙特卡洛方法分析了碳价下限对低碳技术投资的影响,结果表明碳价下限能诱导发电商提早进行投资.Mo等^[15]针对中国未来的碳交易市场,考察了上网电价、碳市场风险以及碳价上下限等因素对低碳能源投资的影响,以风电为例的模拟分析结果表明:现有的能源政策不足以支撑风电投资,而由碳价下限等构成的碳价稳定机制可激励低碳能源

投资,但其对应的碳价下限临界值高于目前我国的碳价水平.

显然,碳价下限可以作为产业或环境政策来激励发电商进行低碳技术投资^[14],但Mo等^[15]的研究表明单纯的碳价下限未必能有效激励中国低碳能源投资.因为发电商进行碳减排投资时,不仅碳价是随机的,其上网电量也是随机的.基于此,本文假定碳价和火力发电商的上网电量服从几何布朗运动,针对碳减排投资项目无营运成本和有无营运成本两种情况,分别构建考虑收益下限的碳减排投资实物期权模型^[16,17],并结合实证性案例分析最优收益下限及其实施期限.

本文与文献[14]的分析思路有类似之处,但在以下两方面有实质不同:一是本文构建考虑收益下限的实物期权模型,模型中收益下限以参数嵌入,并通过模型求解推导出收益下限与碳减排投资阈值的关系表达式;而文献[14]则不需要求解相对复杂的实物期权模型,碳价下限直接体现为碳价样本路径数据的处理.二是文献[14]考虑了碳价下限对低碳技术投资的影响,但由于发电商上网电量的随机性,即使存在碳价下限,发电商的碳减排投资净收益也可能非常低,从而延迟发电商的碳减排投资;基于此,本文探讨收益下限对发电商碳减排投资策略的影响,并考察最优的收益下限及其实施期限.

1 发电商碳减排投资模型

在电力市场环境下,由于发电商的上网电量和碳价都是随机变化的,因此发电商的碳减排投资收益也是随机的.

由文献[3,18-20],不妨假设碳价 p_c (元/t)服从以下几何布朗运动

$$dp_c = \mu_1 p_c dt + \sigma_1 p_c dz_1 \quad (1)$$

式中 μ_1 、 σ_1 为漂移项和标准差, $\mu_1, \sigma_1 > 0$; dz_1 为标准维纳过程; dt 为趋于零的时间间隔.类似地,参考文献[21-23],定义发电商的上网电量 Q (10^8 kW·h)服从几何布朗运动

$$dQ = \mu_2 Q dt + \sigma_2 Q dz_2 \quad (2)$$

式中 μ_2 、 σ_2 为漂移项和标准差, $\mu_2, \sigma_2 > 0$; dz_2 为标准维纳过程.因此,发电商的碳减排投资收益 R

(亿元) 即为

$$R = p_c \eta (1 - \delta) Q \times 10^{-3}$$

式中 η (kg/kW·h) 为发电商的碳排放水平; δ 为碳减排投资后碳排放水平下降的比重, $\delta > 0$. 由伊藤引理, 碳减排投资收益 R 也服从几何布朗运动, 即有

$$dR = \mu R dt + \sigma R dz \quad (3)$$

式中 $\mu = \mu_1 + \mu_2 + \rho \sigma_1 \sigma_2$, $E(dz_1 \cdot dz_2) = \rho dt$; $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2\rho \sigma_1 \sigma_2}$; dz 为标准维纳过程.

1.1 不考虑营运成本的碳减排投资模型

发电机组的某些检修或技术改造(如采用煤粉处理新工艺等)可以减少煤耗,从而减少二氧化碳的排放;因此这些检修或技改项目的一次性支出可视为发电商的碳减排投资,而检修或技改导致的发电成本的变化则为该项目的营运成本.当检修或技改使煤耗减少节省的成本与增加的发电成本(如增加厂用电)大体相当时,则项目的营运成本可忽略不计(当营运成本不能忽略的情况,在 2.2 中讨论).此时,发电商的投资价值函数 $V(t)$ 为

$$V(t) = E \left[\int_0^T e^{-rt} R(t) dt \right] \quad (4)$$

式中 $E(\cdot)$ 表示取期望值; T 为投资项目的营运年限, $T > 0$. 求解上式则有

$$V(t) = \frac{R(t)}{r - \mu} [1 - e^{-(r-\mu)T}]$$

由实物期权理论,若发电商不进行碳减排投资,而是选择“等待”最优投资时机的期权价值 $F(t)$ 满足

$$rF(R(t)) = \lim_{dt \rightarrow 0} E[dF(R(t))] \quad (5)$$

用伊藤引理展开上式,则有

$$F(t) = A_1 R^{\beta_1} + A_2 R^{\beta_2}$$

式中 A_1, A_2 为待定系数; $\beta_1 > 1, \beta_2 < 0$, 且满足方程 $0.5\sigma^2\beta(\beta-1) + \mu\beta - r = 0$. 由 $F(0) = 0$, 可得 $A_2 = 0$. 由实物期权理论,在投资阈值点 R_1^* 有

$$\begin{cases} F(R) = V(R) - I \\ \partial F(R) / \partial R = \partial V(R) / \partial R \end{cases}$$

式中 I 为碳减排投资额, $I > 0$. 求解上式,有

$$R_1^* = \frac{\beta_1 I}{\beta_1 - 1} \frac{r - \mu}{1 - e^{-(r-\mu)T}} \quad (6)$$

1.1.1 考虑收益下限的碳减排投资阈值

为有效激励发电商进行碳减排投资,假设规

制机构(政府)对碳减排项目实施收益下限政策(收益是“共同知识”),即当发电商的碳减排收益低于下限时,由规制机构给予政策性补贴,以保障其收益不低于收益下限.若收益下限为 \tilde{R} ,则发电商的碳减排投资利润 $\pi(t)$ 为

$$\pi(t) = \begin{cases} \tilde{R} & \text{若 } R(t) \leq \tilde{R} \\ R(t) & \text{若 } R(t) > \tilde{R} \end{cases}$$

类似式(4),则上式对应的投资价值函数可表示为

$$V(t) = \begin{cases} B_1 R^{\beta_1} + B_2 R^{\beta_2} + \frac{\tilde{R}}{r} (1 - e^{-rT}) & \text{若 } R(t) \leq \tilde{R} \\ B_3 R^{\beta_1} + B_4 R^{\beta_2} + \frac{1 - e^{-(r-\mu)T}}{r - \mu} R(t) & \text{若 } R(t) > \tilde{R} \end{cases} \quad (7)$$

式中 B_1, B_2, B_3, B_4 为待定系数.由 $V(0)$ 与 $V(+\infty)$ 的边界条件,可得 $B_2 = B_3 = 0$.由投资价值函数在 $R(t) = \tilde{R}$ 处连续可导,则有

$$\begin{cases} B_1 \tilde{R}^{\beta_1} + \frac{\tilde{R}}{r} (1 - e^{-rT}) = B_4 \tilde{R}^{\beta_2} + \frac{1 - e^{-(r-\mu)T}}{r - \mu} \tilde{R} \\ \beta_1 B_1 \tilde{R}^{\beta_1} = \beta_2 B_4 \tilde{R}^{\beta_2} + \frac{1 - e^{-(r-\mu)T}}{r - \mu} \tilde{R} \end{cases}$$

因此有

$$B_4 = \frac{\frac{\beta_1}{r} (1 - e^{-rT}) - \frac{\beta_1 - 1}{r - \mu} (1 - e^{-(r-\mu)T})}{(\beta_1 - \beta_2) \tilde{R}^{\beta_2}} \tilde{R}$$

由实物期权理论,在投资阈值点 R_2^* 满足价值匹配与光滑粘贴条件,即

$$\begin{cases} B_4 (R_2^*)^{\beta_2} + \frac{1 - e^{-(r-\mu)T}}{r - \mu} R_2^* - I = A_3 (R_2^*)^{\beta_1} \\ \beta_2 B_4 (R_2^*)^{\beta_2} + \frac{1 - e^{-(r-\mu)T}}{r - \mu} R_2^* = \beta_1 A_3 (R_2^*)^{\beta_1} \end{cases}$$

式中 A_3 为待定系数.求解上式,则投资阈值 R_2^* 满足

$$(\beta_1 - \beta_2) B_4 (R_2^*)^{\beta_2} + (\beta_1 - 1) \frac{1 - e^{-(r-\mu)T}}{r - \mu} R_2^* = \beta_1 I$$

化简上式,则有

$$R_2^* = R_1^* - \tilde{R} K \left(\frac{R_2^*}{\tilde{R}} \right)^{\beta_2} \quad (8)$$

式中 $K = \frac{\beta_1}{\beta_1 - 1} \frac{r - \mu}{r} \frac{1 - e^{-rT}}{1 - e^{-(r-\mu)T}} - 1 > 0$.

由式(8)有

$$\frac{\partial R_2^*}{\partial \tilde{R}} = \frac{(\beta_2 - 1) K (R_2^* / \tilde{R})^{\beta_2}}{1 + \beta_2 K (R_2^* / \tilde{R})^{\beta_2 - 1}} \quad (9)$$

显然 收益下限政策实施的目的是降低发电商的碳减排投资阈值, 即需 $\partial R_2^* / \partial \tilde{R} < 0$. 式(9)中, 右端分子小于零 因此需 $1 + \beta_2 K (R_2^* / \tilde{R})^{\beta_2 - 1} > 0$ 成立, 运用式(8)化简可得

$$R_2^* > R_1^* \frac{\beta_2}{\beta_2 - 1}$$

当 $R_2^* \rightarrow R_1^* \frac{\beta_2}{\beta_2 - 1}$ 时 则可得此时的收益下

限值的上限临界值 \tilde{R}_m 为

$$\tilde{R}_m = \frac{R_1^*}{1 - \beta_2} \left(\frac{1}{K (-\beta_2)^{\beta_2}} \right)^{1/(1-\beta_2)} \quad (10)$$

因此有: 1) 当 $\tilde{R} = 0$ 时, R_2^* 取最大值 R_1^* ; 2) 随收益下限 \tilde{R} 的递增 投资阈值 R_2^* 逐步递减, 当 $\tilde{R} = \tilde{R}_m$ 时, R_2^* 取最小值 $R_1^* \frac{\beta_2}{\beta_2 - 1}$.

1.1.2 有限期内实施收益下限的碳减排投资阈值
 规制机构实施收益下限的年限 T_s 可能会低于碳减排设施营运年限 T , 即在有限期内实施收益下限政策. 简单地 假定当 $t \leq T_s$ 时 实施收益下限规制 而当 $t > T_s$ 则不再实行收益下限规制. 此时 碳减排投资商的投资价值函数 $V(t)$ 为

$$\begin{aligned} V(t) &= V_1 + E \left[\int_{T_s}^T e^{-r\tau} \pi(\tau) d\tau \right] \\ &= V_1 + \frac{e^{-(r-\mu)T_s} - e^{-(r-\mu)T}}{r - \mu} R(t) \end{aligned}$$

式中 $V_1 = E \left[\int_0^{T_s} e^{-r\tau} \pi(\tau) d\tau \right]$.

类似式(7) 有

$$V_1 = \begin{cases} D_1 R^{\beta_1} + \frac{\tilde{R}}{r} (1 - e^{-rT_s}) & \text{若 } R(t) \leq \tilde{R} \\ D_2 R^{\beta_2} + \frac{1 - e^{-(r-\mu)T_s}}{r - \mu} R(t) & \text{若 } R(t) > \tilde{R} \end{cases}$$

式中 D_1, D_2 为待定系数. 由 $R = \tilde{R}$ 时, V_1 连续可导 则有

$$D_2 = \frac{\frac{\beta_1}{r} (1 - e^{-rT_s}) - \frac{\beta_1 - 1}{r - \mu} (1 - e^{-(r-\mu)T_s})}{(\beta_1 - \beta_2) \tilde{R}^{\beta_2 - 1}}$$

类似地 当 $t < T_s$ 且 $R(t) > \tilde{R}$ 时 发电商的碳减排投资阈值 R_3^* 满足

$$\begin{cases} D_2 (R_3^*)^{\beta_2} + \frac{1 - e^{-(r-\mu)T}}{r - \mu} R_3^* - I = E (R_3^*)^{\beta_1} \\ \beta_2 D_2 (R_3^*)^{\beta_2} + \frac{1 - e^{-(r-\mu)T}}{r - \mu} R_3^* = \beta_1 E (R_3^*)^{\beta_1} \end{cases}$$

式中 E 为待定系数. 求解上式 有

$$(\beta_1 - \beta_2) D_2 (R_3^*)^{\beta_2} + (\beta_1 - 1) \frac{1 - e^{-(r-\mu)T}}{r - \mu} R_3^* = \beta_1 I$$

化简上式 则有

$$R_3^* = R_1^* - \tilde{R} K_s \left(\frac{R_3^*}{\tilde{R}} \right)^{\beta_2} \quad (11)$$

式中 $K_s = \frac{\beta_1}{\beta_1 - 1} \frac{r - \mu}{r} \frac{1 - e^{-rT_s}}{1 - e^{-(r-\mu)T}} - \frac{1 - e^{-(r-\mu)T_s}}{1 - e^{-(r-\mu)T}} > 0$.

显然 当 $T_s = T$ 时, $K_s = K$, 式(11) 即退化为式(8).

类似地分析可知: 当 $R_3^* > R_1^* \frac{\beta_2}{\beta_2 - 1}$ 时 有

$\frac{\partial R_3^*}{\partial \tilde{R}} < 0$; 此时 收益下限值的上限临界值 \tilde{R}_m^s 为

$$\tilde{R}_m^s = \frac{R_1^*}{1 - \beta_2} \left(\frac{1}{K_s (-\beta_2)^{\beta_2}} \right)^{1/(1-\beta_2)} \quad (12)$$

即 $\tilde{R} = 0$ 时, R_3^* 取最大值 R_1^* ; 当 $\tilde{R} = \tilde{R}_m^s$ 时, R_3^* 为最小值 $R_1^* \frac{\beta_2}{\beta_2 - 1}$.

由式(11) 可得

$$\frac{\partial R_3^*}{\partial T_s} = \frac{-\tilde{R} (R_3^* / \tilde{R})^{\beta_2}}{1 + \beta_2 K_s (R_3^* / \tilde{R})^{\beta_2 - 1}} \times \frac{\partial K_s}{\partial T_s} \quad (13)$$

$$\frac{\partial K_s}{\partial T_s} = \frac{r - \mu}{1 - e^{-(r-\mu)T}} \left(\frac{\beta_1}{\beta_1 - 1} e^{-rT_s} - e^{-(r-\mu)T_s} \right)$$

由 $\partial R_3^* / \partial \tilde{R} < 0$ 条件可知 式(13) 等号右端分母大于零 因此 当 $\partial K_s / \partial T_s = 0$ 即

$\left(\frac{\beta_1}{\beta_1 - 1} e^{-rT_s} - e^{-(r-\mu)T_s} \right) = 0$ 时 投资阈值 R_3^* 最小 也就是说实施收益下限的最优年限 T_s^* 满足

$$T_s^* = \frac{1}{\mu} \ln \left(\frac{\beta_1}{\beta_1 - 1} \right) \quad (14)$$

综上所述 有: 1) 当 $T_s^* < T$ 时 最优投资阈值为 R_3^* ; 2) 当 $T_s^* > T$ 时 此时 $R_2^* = R_3^*$.

1.2 有营运成本的碳减排投资模型

发电商的一些专门性碳减排投资或某些发电

机组的技术改造项目,存在不可忽略的营运成本,如 CCS 投资等. 此时发电商的投资利润可表示为

$$\pi(t) = R(t) - cQ(t)$$

式中 c 为单位营运成本, $c > 0$. 类似地,若经营期为 T , 则投资价值函数 $V(t)$ 为

$$V(R, Q) = E\left[\int_0^T e^{-rt} \pi(R, Q) dt\right]$$

求解上式,有

$$V(t) = \frac{R(t)}{r - \mu} (1 - e^{-(r-\mu)T}) - \frac{cQ(t)}{r - \mu_2} (1 - e^{-(r-\mu_2)T})$$

类似式(5),发电商若不进行碳减排投资,则其等待期权价值函数满足

$$rF(R, Q) = \lim_{dt \rightarrow 0} E[dF(R, Q)]$$

若记 $\zeta = R/(cQ)$, 由文献[23]有

$$F(R, Q) = cQG\zeta^{\lambda_1}$$

式中 G 为待定系数. $\lambda_1 > 1$, 且满足如下方程

$$0.5(\sigma^2 - 2\rho_0\sigma\sigma_2 + \sigma_2^2)\lambda(\lambda - 1) + (\mu - \mu_2)\lambda = r - \mu_2$$

其中 $E(dz_1 dz_2) = \rho_0 dt$ 并有 $\rho_0 = (\rho\sigma_1 + \sigma_2) / \sigma$.

由实物期权理论,在投资阈值点 ζ^* 满足价值匹配与光滑粘贴条件,即

$$\begin{cases} cQ \left[\frac{\zeta^*}{r - \mu} (1 - e^{-(r-\mu)T}) - \frac{1}{r - \mu_2} \times \right. \\ \left. (1 - e^{-(r-\mu_2)T}) \right] - I_2 = cQG(\zeta^*)^{\lambda_1} \\ \frac{cQ}{r - \mu} (1 - e^{-(r-\mu)T}) = \lambda_1 cQG(\zeta^*)^{\lambda_1 - 1} \end{cases}$$

式中 I_2 为专门性碳减排投资或发电机组技术改造投资额, $I_2 > 0$. 求解上式,得

$$\zeta^* = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - 1} \left(\frac{cQ}{r - \mu_2} (1 - e^{-(r-\mu_2)T}) + I_2 \right) \times \frac{r - \mu}{cQ(1 - e^{-(r-\mu)T})}$$

若记 $\zeta^* = R_4^* / (cQ)$, 代入上式,则有

$$R_4^* = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - 1} \left(\frac{cQ}{r - \mu_2} (1 - e^{-(r-\mu_2)T}) + I_2 \right) \times \frac{r - \mu}{1 - e^{-(r-\mu)T}} \quad (15)$$

显然,上式等号右端的 Q 服从式(2)的随机过程,因此式(15)表示的投资阈值 R_4^* 实际上也是随机变化的. 但当 $\mu_2 = 0, \sigma_2 = 0$ 时,有 $\lambda_1 = \beta_1$, 此时若 $c = 0$ 且 $I_2 = I$, 则式(15)退化为式(6).

1.2.1 考虑收益下限的碳减排投资阈值

若监管机构在减排设施营运期内实施收益下

限政策,则发电商的碳减排投资利润为

$$\pi(t) = \begin{cases} \tilde{R} - cQ & \text{若 } R(t) \leq \tilde{R} \\ R(t) - cQ & \text{若 } R(t) > \tilde{R} \end{cases}$$

类似式(7),此时发电商的碳减排投资价值函数 $V(t)$ 可表示为

$$V = \begin{cases} H_1 \zeta^{\lambda_1} + \frac{\tilde{R}}{r} (1 - e^{-rT}) - V_2 & \text{若 } R(t) \leq \tilde{R} \\ H_2 \zeta^{\lambda_2} + cQ \frac{\zeta}{r - \mu} (1 - e^{-(r-\mu)T}) - V_2 & \text{若 } R(t) > \tilde{R} \end{cases} \quad (16)$$

式中 $V_2 = \frac{cQ}{r - \mu_2} (1 - e^{-(r-\mu_2)T})$. 显然投资价值函数

V 在 $\zeta_0 = \tilde{R}/(cQ)$ 连续可导,则有

$$H_2 = \frac{\lambda_1 \frac{\tilde{R}}{r} (1 - e^{-rT}) - (\lambda_1 - 1) cQ \frac{\zeta_0}{r - \mu} (1 - e^{-(r-\mu)T})}{(\lambda_1 - \lambda_2) \zeta_0^{\lambda_2}}$$

由实物期权理论,在投资阈值点 ζ^* 满足价值匹配与光滑粘贴条件,即

$$\begin{cases} H_2(\zeta^*)^{\lambda_2} + cQ \frac{\zeta^*}{r - \mu} (1 - e^{-(r-\mu)T}) - V_2 - I_2 = \\ cQJ(\zeta^*)^{\lambda_1} \\ \lambda_2 H_2(\zeta^*)^{\lambda_2} + cQ \frac{\zeta^*}{r - \mu} (1 - e^{-(r-\mu)T}) = \lambda_1 cQJ(\zeta^*)^{\lambda_1} \end{cases}$$

式中 J 为待定系数. 求解上式,有

$$(\lambda_1 - \lambda_2) H_2(\zeta^*)^{\lambda_2} + (\lambda_1 - 1) cQ \frac{\zeta^*}{r - \mu} (1 - e^{-(r-\mu)T}) = \lambda_1 \left(\frac{cQ}{r - \mu_2} (1 - e^{-(r-\mu_2)T}) + I_2 \right)$$

若记 $\zeta^* = R_5^* / (cQ)$, 并将 H_2 代入上式,则有

$$R_5^* = R_4^* - \tilde{R} K_\lambda \left(\frac{R_5^*}{\tilde{R}} \right)^{\lambda_2} \quad (17)$$

式中 $K_\lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - 1} \frac{r - \mu}{r} \frac{1 - e^{-rT}}{1 - e^{-(r-\mu)T}} - 1 > 0$.

类似地分析可知,当 $R_5^* > R_4^* \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - 1}$ 时,有

$\frac{\partial R_5^*}{\partial \tilde{R}} < 0$. 此时,收益下限值的临界值 \tilde{R}_m^λ 为

$$\tilde{R}_m^\lambda = \frac{R_4^*}{1 - \lambda_2} \left(\frac{1}{K_\lambda (-\lambda_2)^{\lambda_2}} \right)^{1/(1-\lambda_2)} \quad (18)$$

因此,当 $\tilde{R} = 0$ 时, R_5^* 取最大值 R_4^* ; 当 $\tilde{R} = \tilde{R}_m^{\lambda_s}$ 时, R_5^* 取最小值 $R_4^* \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - 1}$.

1.2.2 有限期内实施收益下限的碳减排投资阈值
由于实施的收益下限的年限 $T_s \leq T$, 此时发电商的投资价值函数可表示为

$$V(t) = E \left[\int_0^{T_s} e^{-r\tau} \pi(\tau) d\tau + \int_{T_s}^T e^{-r\tau} \pi(\tau) d\tau \right]$$

$$= V_1 + cQ \frac{e^{-(r-\mu)T_s} - e^{-(r-\mu)T}}{r - \mu} \zeta - cQ \frac{e^{-(r-\mu_2)T_s} - e^{-(r-\mu_2)T}}{r - \mu_2}$$

式中 $V_1 = E \left[\int_0^{T_s} e^{-r\tau} \pi(\tau) d\tau \right]$, 显然, 用 T_s 替换式 (16) 中的 T , 即得 V_1 表达式.

类似地, 在投资阈值点 ζ^* , 须满足价值匹配与光滑粘贴条件, 即

$$\begin{cases} H_2(\zeta^*)^{\lambda_2} + cQ \frac{1 - e^{-(r-\mu)T}}{r - \mu} \zeta^* - cQ \frac{1 - e^{-(r-\mu_2)T}}{r - \mu_2} - I_2 = cQ S(\zeta^*)^{\lambda_1} \\ \lambda_2 H_2(\zeta^*)^{\lambda_2} + cQ \frac{1 - e^{-(r-\mu)T}}{r - \mu} \zeta^* = \lambda_1 cQ S(\zeta^*)^{\lambda_1} \end{cases}$$

式中 H_2 为 H_1 中用 T_s 替换 T 后的表达式; S 为待定系数. 求解上式, 有

$$(\lambda_1 - \lambda_2) H_2(\zeta^*)^{\lambda_2} + (\lambda_1 - 1) cQ \frac{1 - e^{-(r-\mu)T}}{r - \mu} \zeta^* = \lambda_1 \left(cQ \frac{1 - e^{-(r-\mu_2)T}}{r - \mu_2} + I_2 \right)$$

若记 $\zeta^* = R_6^* / (cQ)$, 并将 H_2 代入上式, 则有

$$R_6^* = R_4^* - \tilde{R} K_{\lambda_s} \left(\frac{R_6^*}{\tilde{R}} \right)^{\lambda_2} \quad (19)$$

式中 $K_{\lambda_s} = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - 1} \frac{r - \mu}{r} \frac{1 - e^{-rT_s}}{1 - e^{-(r-\mu)T}} - \frac{1 - e^{-(r-\mu)T_s}}{1 - e^{-(r-\mu)T}} > 0$.

类似地分析可知, 当 $R_6^* > R_4^* \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - 1}$ 时, 有

$\frac{\partial R_6^*}{\partial \tilde{R}} < 0$. 此时, 收益下限值的临界值 $\tilde{R}_m^{\lambda_s}$ 为

$$\tilde{R}_m^{\lambda_s} = \frac{R_4^*}{1 - \lambda_2} \left(\frac{1}{K_{\lambda_s} (-\lambda_2)^{\lambda_2}} \right)^{1/(1-\lambda_2)} \quad (20)$$

因此, 当 $\tilde{R} = 0$ 时, R_6^* 取最大值 R_4^* ; 当 $\tilde{R} =$

$\tilde{R}_m^{\lambda_s}$ 时, R_6^* 取最小值 $R_4^* \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - 1}$.

分析式 (19) 可知, $\partial R_6^* / \partial T_s$ 的符号由 $\partial K_{\lambda_s} / \partial T_s$ 决定, 且当 $\partial K_{\lambda_s} / \partial T_s = 0$ 时, R_6^* 取值最小. 因此实施收益下限的最优年限 $T_{\lambda_s}^*$ 满足

$$T_{\lambda_s}^* = \frac{1}{\mu} \ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 - 1} \right) \quad (21)$$

因此: 1) 当 $T_{\lambda_s}^* < T$ 时, 最优投资阈值为 R_6^* ; 2) 当 $T_{\lambda_s}^* > T$ 时, 此时有 $R_5^* = R_6^*$.

2 碳减排投资政策分析

上文的分析表明, 只要满足 $R_i^* > R_1^* \frac{\beta_2}{\beta_2 - 1}$

($i = 2, 3$) 或 $R_j^* > R_4^* \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - 1}$ ($j = 5, 6$), 则有

$\partial R_i^* / \partial \tilde{R} < 0$ 或 $\partial R_j^* / \partial \tilde{R} < 0$; 也就是说, 收益下限可降低发电商的碳减排投资阈值, 即激励发电商进行碳减排投资.

2.1 收益下限对碳减排的影响

由文献 [24], 假定二氧化碳存量 $S(t)$ 的变化服从以下动态过程

$$\frac{dS(t)}{dt} = Q^c(t) - \phi S(t)$$

式中 $Q^c(t)$ 为当期排放的二氧化碳量; ϕ 为自然消减比率, $\phi > 0$. 求解上式, 有

$$S(t) = e^{-\phi t} \left(S_0 + \int_0^t e^{\phi \tau} Q^c(\tau) d\tau \right) \quad (22)$$

式中 S_0 为初始二氧化碳存量, $S_0 \geq 0$. 若火电发电企业单位发电量排放的二氧化碳量为 η , 减排投资后单位发电量二氧化碳排放为 $\delta\eta$. 记收益下限实施前发电商碳减排投资阈值 (R_1^* 或 R_4^*) 对应的时点为 T_1 , 收益下限实施后投资阈值 (R_2^* , R_3^* 或 R_5^* , R_6^*) 对应时点为 T_2 , 则没有实施收益下限情况下的二氧化碳存量变化曲线 $S_1(t)$ 为

$$S_1(t) = \begin{cases} e^{-\phi t} \left(S_0 + \eta \int_0^t e^{\phi \tau} Q(\tau) d\tau \right), & t \leq T_1 \\ e^{-\phi t} \left(S_0 + \eta \int_0^{T_1} e^{\phi \tau} Q(\tau) d\tau + \delta\eta \int_{T_1}^t e^{\phi \tau} Q(\tau) d\tau \right), & t > T_1 \end{cases}$$

实施收益下限情况下二氧化碳存量的变化曲线 $S_2(t)$ 为

$$S_2(t) = \begin{cases} e^{-\phi t} \left(S_0 + \eta \int_0^t e^{\phi\tau} Q(\tau) d\tau \right), & t \leq T_2 \\ e^{-\phi t} \left(S_0 + \eta \int_0^{T_2} e^{\phi\tau} Q(\tau) d\tau + \right. \\ \quad \left. \delta\eta \int_{T_2}^t e^{\phi\tau} Q(\tau) d\tau \right), & t > T_2 \end{cases}$$

记 $\Delta S(t) = S_1(t) - S_2(t)$, 为收益下限所减少的二氧化碳的排放量, 则有

$$\Delta S(t) = \begin{cases} 0, & 0 < t \leq T_2 \\ (1-\delta)\eta e^{-\phi t} \int_{T_2}^t e^{\phi\tau} Q(\tau) d\tau, & T_2 < t \leq T_1 \\ (1-\delta)\eta e^{-\phi t} \int_{T_2}^{T_1} e^{\phi\tau} Q(\tau) d\tau, & T_1 < t \end{cases} \quad (23)$$

上式表明: 1) 当 $t > T_2$ 时, 收益下限政策可减少二氧化碳的排放, 其减排数量与 T_2 有关; 2) 当 $t > T_1$ 时, 实施收益下限政策减排的二氧化碳呈衰减过程。

2.2 最优收益下限的选择

若碳减排投资商的实际收益 $R(t)$ 低于收益下限 \tilde{R} 时, 由政府(规制机构) 进行政策性补贴, 则政府承担的补贴额为

$$BT(\tilde{R}) = \int_{\Omega} (\tilde{R} - R(t)) e^{-rt} dt \quad (24)$$

式中 $\Omega = \{t | R(t) < \tilde{R}\}$. 由于 $R(t)$ 是随机变化的, 因此补贴额 BT 也是随机的, 但显然是收益下限 \tilde{R} 的递增函数。

另一方面, 由式(23) 可知: 减少的二氧化碳排放量 ΔS 是收益下限 \tilde{R} 的非递减函数. 因此规制机构需在投资补贴额与碳减排量之间权衡, 以选择最优的收益下限。

简单地, 假定碳减排量减少的损失(带来的社会福利) 是 ΔS 的线性函数^[25], 因此碳减排投资而减少的损失 L_s 可表示为

$$L_s = \varphi \int_{T_2}^{+\infty} e^{-rt} \Delta S(t) dt$$

式中 φ 为单位碳减排投资减少的损失系数, $\varphi > 0$. 若将式(23) 代入上式, 则有

$$L_s = (1-\delta)\eta\varphi \left[H + \frac{e^{-(r+\phi)T_1}}{r+\phi} \int_{T_2}^{T_1} e^{\phi\tau} Q(\tau) d\tau \right] \quad (25)$$

式中 $H = \int_{T_2}^{T_1} e^{-(r+\phi)t} \left(\int_{T_2}^t e^{\phi\tau} Q(\tau) d\tau \right) dt$.

不妨交换 H 的积分次序, 则有

$$H = \frac{\int_{T_2}^{T_1} e^{-r\tau} Q(\tau) d\tau - e^{-(r+\phi)T_1} \int_{T_2}^{T_1} e^{\phi\tau} Q(\tau) d\tau}{r + \phi}$$

将上式代入式(25), 有

$$L_s = \frac{(1-\delta)\eta\varphi}{r+\phi} \int_{T_2}^{T_1} e^{-rt} Q(t) dt \quad (26)$$

显然, 规制机构的最优收益下限 \tilde{R}^* 满足下式

$$\tilde{R}^* = \arg \max_{\tilde{R}} [L_s(T_2(\tilde{R})) - BT(\tilde{R})]$$

由于很难得到 $BT(\tilde{R})$ 的解析表达式, 因此下文不妨从数值分析角度来讨论最优的收益下限。

3 案例分析

针对一台发电容量为 600 MW 的燃煤发电机组, 其碳减排投资有两种情况: 一是对发电机组进行检修或技术改造, 可降低单位发电量煤耗, 从而减少碳排放量; 二是安装专门的碳减排设施, 如 CCS 与第一种情况比, 可能需要更大的投资, 并增加机组日常的运行成本, 但碳减排效果更加明显. 相关参数见表 1.

表 1 相关参数表

Table 1 Relevant parameters

| 参数 | 数值 | 参数说明 |
|--|-------|-----------------------------|
| μ_1 | 0.05 | 碳价的漂移参数, 文献[15] |
| σ_1 | 0.2 | 碳价波动率, 文献[15] |
| μ_2 | 0.02 | 发电量的漂移参数, 文献[22] |
| σ_2 | 0.1 | 发电量波动率, 文献[23] |
| $p_{c0}/\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$ | 30 | 碳价初值, 文献[15] |
| $Q_0/10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ | 18 | 年运行 3000 h |
| ρ | 0.5 | 碳价与发电量的相关系数 |
| $\eta/\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ | 0.95 | 单位发电量的碳排放量 |
| r | 0.1 | 无风险利率 |
| T/a | 30 | 减排设施运营年限, 文献[15] |
| δ_1 | 0.85 | 无营运成本情况下, 碳减排投资后单位发电量的碳排放系数 |
| δ_2 | 0.15 | 有营运成本情况下, 碳减排投资后单位发电量的碳排放系数 |
| $I_1/\text{亿元}$ | 0.8 | 无营运成本情况下的碳减排投资额 |
| $I_2/\text{亿元}$ | 5.0 | 有营运成本情况下的碳减排投资额, 文献[15, 23] |
| $c/\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ | 0.005 | 碳减排设施单位营运成本, 基于文献[15]计算得到 |
| ϕ | 0.1 | 自然消减比率, 文献[24] |
| φ | 0.05 | 单位碳减排损失系数, 文献[25] |

表1中的参数可以分为3个相对独立的方面:一是与发电机组相关的参数(如 $Q_0, \eta, \delta_1, \delta_2$ 以及 I_1, I_2 等),其取值主要基于600 MW火力发电机组的实际情况而设置;二是电力市场与碳交易市场方面的参数(如 $p_c, \mu_1, \mu_2, \sigma_1, \sigma_2$ 等),其取值主要参考文献[15]和文献[23];三是环境管理方面的参数(如 ϕ, φ),其取值根据文献[24]和文献[25].

3.1 无营运成本情况下的最优收益下限

将表1中的相关参数代入式(14),则可求得 $T_3^* = 24.3947 \text{ a} < T$,因此规制机构实施的收益下限政策的年限宜为24.3947 a.此时发电商的碳减排投资阈值为 R_3^* .基于式(11),可得如图1所示的发电商碳减排投资阈值 R_3^* 随收益下限的变化曲线.

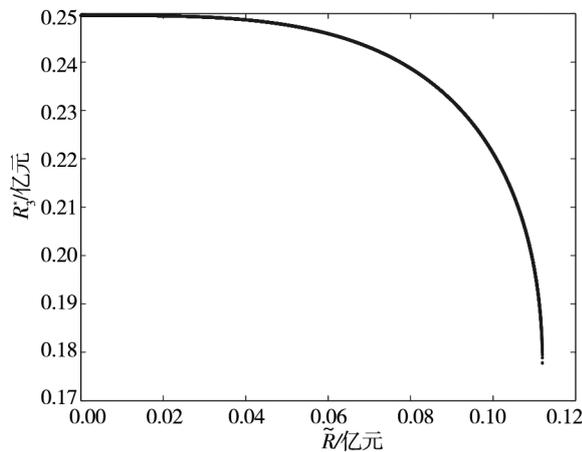


图1 无营运成本情况下收益下限对投资阈值的影响

Fig. 1 Impact of revenue floor on investment threshold in the absence of operating cost

从图1中可看出:1) 随收益下限的递增,投资阈值 R_3^* 逐步递减;收益下限较低时,对发电商的碳减排投资阈值影响不明显.当收益下限较高(如 $\tilde{R} > 0.035$)时,随收益下限的递增,投资阈值显著下降,且下降速度越来越快;2) 当收益下限增加至 $\tilde{R}_m^* = 0.112$ 时,碳减排投资阈值 R_3^* 接近其下限值, $R_1^* \frac{\beta_2}{\beta_2 - 1} = 0.1773$ 并呈垂直下降状态.

不妨运用蒙特卡洛方法,对碳价 p_c 和发电量 Q 随机抽样 N 次($N > 0$)并基于 $R_1 = \eta p_c (1 - \delta_1) \times Q \times 10^{-3}$ 构成发电商碳减排投资的随机收益路径.针对每一条收益路径 R_1 ,找出 R_1^*, R_3^* 对应的第一触点 $T_1^{(i)}, T_3^{(i)}$ 其中 $i = 1, 2, \dots, N$ 为抽样路径数.下文

中 T_1, T_3 值用其期望值 ET_1, ET_3 代替

$$ET_1 = \frac{\sum_{i=1}^n T_1^{(i)}}{n}, ET_3 = \frac{\sum_{i=1}^n T_3^{(i)}}{n}$$

式中 $n \leq N$ 为 $T_3^{(i)} \leq T$ 的路径数,则式(26)所表示的碳减排投资减少的期望损失为

$$ELs = \frac{(1 - \delta_1) \eta \varphi}{r + \phi} \frac{Q_0}{r - u_2} (e^{-(r-u_2)ET_3} - e^{-(r-u_2)ET_1})$$

同时,基于式(24),计算不同收益下限情况下,每条收益路径 R_1 对应的政策性补贴,并将其均值作为期望的补贴额 BT .

图2给出了 $N = 1000$ 情况下,期望的政策性补贴 BT 、碳减排投资减少的期望损失 ELs ,以及 $ELs - BT$ 随收益下限的变化曲线.

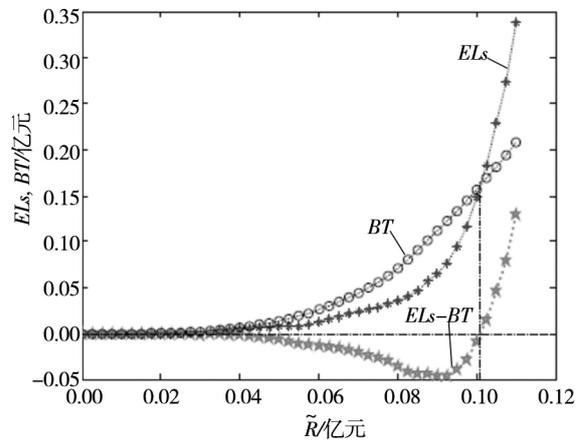


图2 无营运成本情况下收益下限对投资净收益的影响

Fig. 2 Impact of revenue floor on the net investment revenue in the absence of operating costs

图2表明:1) 政策性补贴 BT 和因碳减排投资而减少的损失期望值 ELs 都随收益下限的递增而递增,但碳减排投资带来的净收益($ELs - BT$)则先递减后递增.2) 当收益下限 $\tilde{R} \geq 0.1015$ 亿元时,碳减排投资有正的净收益,即收益下限不宜太低.

由图1和图2可得:1) 当收益下限 $\tilde{R}/\text{亿元} \in [0.1015, 0.112]$ 时,实施收益下限政策能带来正的收益,并随收益下限的递增而递增;2) 若 $\tilde{R} > \tilde{R}_m^* (= 0.112 \text{ 亿元})$, R_3^* 几乎垂直下降,而收益下限带来的净收益会几乎垂直递增.因此, $\tilde{R} = \tilde{R}_m^*$ 是收益下限的临界值,理性的规制者的最优收益下限为 $\tilde{R}^* = \tilde{R}_m^* + \varepsilon$,其中 ε 为趋近于零的正数.

3.2 有运营成本情况下的最优收益下限

不妨将表 1 中的相关参数代入式(21), 则可求得 $T_{\lambda_s}^* = 20.6946$ a; 即在有运营成本的情况下, 规制机构宜对碳减排投资项目实施期限为 20.6946 a 的收益下限, 以激励发电商进行碳减排投资. 此时碳减排投资阈值 $R_6^* = R_6^*(Q, \tilde{R})$ 如图 3 所示.

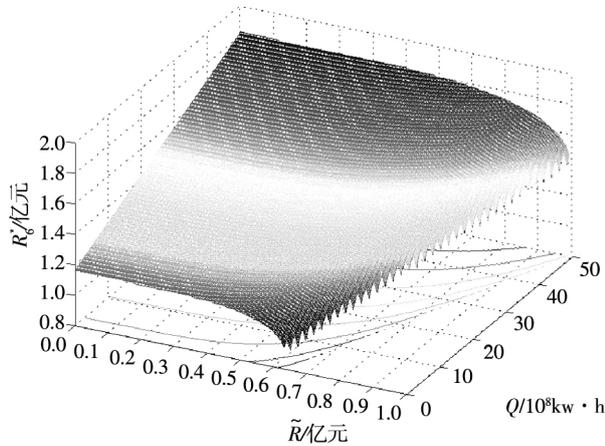


图 3 电力需求和收益下限对碳减排投资阈值的影响

Fig. 3 Influence of power demand and revenue floor on carbon emission reduction investment threshold

从图 3 中可看出: 1) 随收益下限 \tilde{R} 递增, 碳减排投资阈值逐步下降, 当增加到一定程度(可验证此时即为 $\tilde{R} = \tilde{R}_m^{\lambda_s}$) 时, 碳减排投资阈值迅速呈垂直下降; 2) 碳减排投资阈值与电力需求 Q 呈正向变化, 即发电商面临的电力需求越大, 越需要更高的收益来规避投资风险, 即延迟投资; 3) 当电力需求一定时, 图 3 与图 1 类似, 即 $\tilde{R} = \tilde{R}_m^{\lambda_s}$ 为收益下限的临界值.

类似地, 运用蒙特卡洛方法, 对碳价 p_c 和电力需求 Q 随机抽样, 并基于发电商碳减排收益函数 $R_2 = \eta p_c (1 - \delta_2) Q \times 10^{-3}$ 构造发电商碳减排投资的随机收益路径. 针对每一条收益路径 R_2 , 分别考察不同收益下限 \tilde{R} 情况下与 R_4^* , R_6^* 对应的第一触点 $T_4^{(i)}$, $T_6^{(i)}$, 并计算其期望值 ET_4 , ET_6 .

$$ET_4 = \frac{\sum_{i=1}^n T_4^{(i)}}{n}, ET_6 = \frac{\sum_{i=1}^n T_6^{(i)}}{n}$$

式中 $i = 1, 2, \dots, N$ 为抽样路径数, $n \leq N$ 为 $T_6^{(i)} \leq T$ 的路径数, 则式(26)所表示的碳减排投资减少的期望损失为

$$EL_s = \frac{(1 - \delta_1) \eta \varphi}{r + \phi} \frac{Q_0}{r - u_2} (e^{-(r-u_2)ET_6} - e^{-(r-u_2)ET_4}) \quad (27)$$

与图 3 对应, 给定 Q , 基于式(24)和式(27), 可以得到与图 2 类似的曲线. 特别是, 当收益下限 $\tilde{R} = \tilde{R}_m^{\lambda_s}$ 时, 减少的期望损失 $EL_s = 3.4026$ 亿元. 期望的补贴额为 $BT = 1.7467$ 亿元. 显然, 实施收益下限 $\tilde{R} = \tilde{R}_m^{\lambda_s}$ 得到的期望净收益为 1.6559 亿元, 因此实施收益下限 $\tilde{R} = \tilde{R}_m^{\lambda_s}$ 政策不但能激励发电商进行碳减排投资, 而且可获得减排净收益. 因此, 理性规制机构的最优收益下限为 $\tilde{R}^* = \tilde{R}_m^{\lambda_s} + \varepsilon$.

3.3 最优收益下限的敏感性分析

显然, 影响最优收益下限的因素有: 碳价与电力需求随机过程参数 $\mu_1, \sigma_1, \mu_2, \sigma_2, \rho$, 以及 r, I_1, I_2, T 等参数, 此外 $\tilde{R}_m^{\lambda_s}, \tilde{R}_m^{\lambda}$ 还受电力需求 Q 这一随机因素的影响.

考察碳价与电力需求波动率 σ_1, σ_2 对最优收益下限的影响. 图 4 给出了无运营成本情况下, 碳价波动率 σ_1 和电力需求波动率 σ_2 同时变化对最优收益下限 \tilde{R}_m^s 的影响.

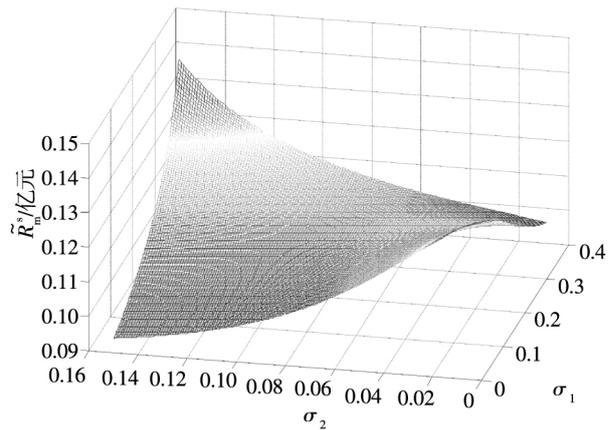


图 4 无运营成本情况下波动率对最优收益下限的影响

Fig. 4 Influence of volatility on the optimal revenue floor in the absence of operating costs

从图 4 中可看出: 1) 当 σ_2 较小(如 $\sigma_2 = 0.05$) 时, 最优收益下限 \tilde{R}_m^s 随 σ_1 的递增而递减; 2) 当 σ_2 适中(如 $\sigma_2 = 0.10$) 时, 随 σ_1 的递增, 最优收益下限 \tilde{R}_m^s 先递减后递增; 3) 当 σ_2 较大时(如 $\sigma_2 = 0.15$) 时, 最优收益下限 \tilde{R}_m^s 随 σ_1 的递增而迅速递增. 上述观测结果与实物期权文献的直

观解释(波动率越大,最优收益下限越高)可能是相悖的,出现这种现象的原因是:相关系数 $\rho > 0$ 情况下, σ_1 的变化会同时导致 μ, σ 的同向变化,而 μ, σ 对 \tilde{R}_m^s 的影响则是相反的,因此在不同情况下(上述3种情况), σ_1 的变化对 \tilde{R}_m^s 的影响,可能表现出不同的情况.此外,从图4中也看出:最优收益下限 \tilde{R}_m^s 随 σ_2 的变化而变化的情况与 σ_1 类似,即根据 σ_1 的相对大小分3种不同的情况.

就图4而言,碳价波动率最低($\sigma_1 = 0$)且电力需求波动率最高($\sigma_2 = 0.15$)时,最优的收益下限最低($\tilde{R}_m^s = 0.0941$);但当 σ_1, σ_2 都最高的情况($\sigma_1 = 0.30, \sigma_2 = 0.15$)时,最优的收益下限也最高($\tilde{R}_m^s = 0.1454$).

图5为 $Q = 25 \text{ kW} \cdot \text{h}$ (不同的 Q 值在同一图中表现为不同的平行曲面)时,有运营成本情况下,碳价和电力需求波动率对最优收益下限 \tilde{R}_m^s 的影响曲面.

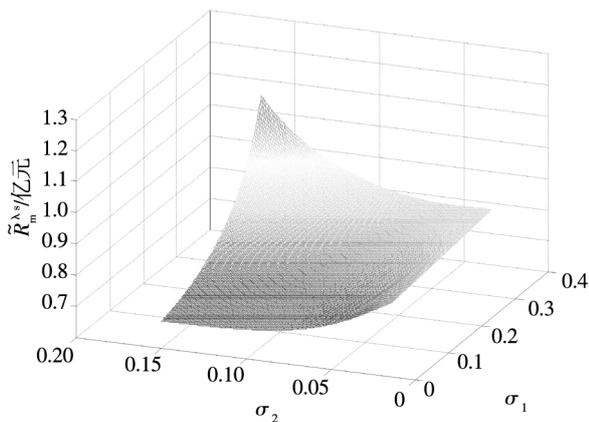


图5 有运营成本情况下波动率对最优收益下限的影响
Fig. 5 Influence of volatility on the optimal revenue floor in the case of operating costs

从图5中可看出:1) 最优收益下限 \tilde{R}_m^s 随碳价波动率 σ_1 的递增而递增;2) 电力需求波动率 σ_2 的变化对最优收益下限 \tilde{R}_m^s 的影响与图4类似,与 σ_1 的相对大小有关.

4 收益下限与直接投资补贴政策比较

由上文分析可知,实施收益下限政策可降低

发电商的碳减排投资阈值,现在比较收益下限政策和直接投资补贴(直接对发电商碳减排投资进行补贴)的效果.

1) 在无运营成本情况下,由式(6)和式(11),若要发电商碳减排投资阈值由 R_1^* 下降至 R_3^* ,则需要补贴的投资额 ΔI 满足

$$\frac{\Delta I}{(I - \Delta I)^{\beta_2}} = \tilde{R}^{1-\beta_2} K_s \left(\frac{\beta_1}{\beta_1 - 1} \frac{r - \mu}{1 - e^{-(r-\mu)T}} \right)^{\beta_2 - 1} \quad (28)$$

显然,由式(28)有:1) 当收益下限 $\tilde{R} = 0$ 时,直接投资补贴 $\Delta I = 0$;2) 当 $R_3^* = R_1^* \frac{\beta_2}{\beta_2 - 1}$, 即 $\tilde{R} = \tilde{R}_m^s$ (收益下限临界值)时,对应的直接投资补贴额为 $\Delta I = I / (1 - \beta_2) = 0.2318$ 亿元.

基于式(24)和式(27),图6给出了收益下限与直接投资补贴情况下,政策性补贴随收益下限的变化曲线.

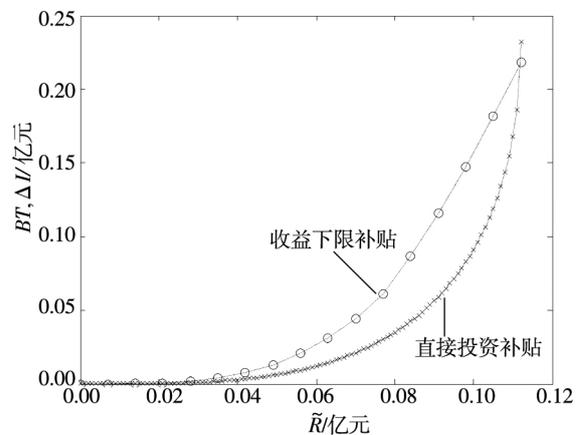


图6 收益下限与直接投资补贴资金比较

Fig. 6 Comparison of revenue floor with the direct investment subsidy funds

从图6不难看出:1) 当收益下限 $\tilde{R} < \tilde{R}_m^s$ 时,直接投资补贴额 ΔI 比收益下限补贴 BT 要少;2) 当 $\tilde{R} = \tilde{R}_m^s$ 时,直接投资补贴(0.2318亿元)高于收益下限补贴(0.2179亿元);因此,最优收益下限 \tilde{R}_m^s 比直接投资补贴要节省资金.

2) 有运营成本的情况下,若使发电商碳减排投资阈值由 R_4^* 下降至 R_6^* ,由式(15)和式(19),则需要补贴投资额 ΔI_2 满足

$$\Delta I_2 = \tilde{R}^{1-\lambda_2} K_{\lambda_s} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 - 1} \frac{r - \mu}{1 - e^{-(r-\mu)T}} \right)^{\lambda_2 - 1} \times \left(\frac{cQ}{r - \mu_2} (1 - e^{-(r-\mu_2)T}) + (I_2 - \Delta I_2) \right)^{\lambda_2} \quad (29)$$

由上式有: 1) 当收益下限 $\tilde{R} = 0$ 时, 直接投资补贴额 $\Delta I = 0$; 2) 当 $R_6^* = R_4^* \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - 1}$, 即 $\tilde{R} = \tilde{R}_m^{\lambda_s}$ (收益下限临界值) 时, 对应的直接投资补贴额满足下式

$$\Delta I = \frac{1}{1 - \lambda_2} \left(\frac{cQ}{r - \mu_2} (1 - e^{-(r - \mu_2)T}) + I_2 \right) \quad (30)$$

显然, 当 $BT \leq \Delta I$ 时, 收益下限补贴相对于直接投资补贴政策节省补贴额。由式(24)可知, 当收益下限 $\tilde{R} = \tilde{R}_m^{\lambda_s}$ 时期望补贴额为 $BT = 1.7467$ 亿元, 代入式(30), 即 $Q > 42.21 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 时, 收益下限政策优于直接投资补贴政策。

综上所述, 在无营运成本情况下, 在最优收益下限临界值 $\tilde{R}_m^{\lambda_s}$ 处, 收益下限政策比直接投资补贴节省补贴资金, 但在有营运成本情况下, 收益下限政策是否节省补贴资金与电力需求的大小有关。

5 结束语

论文假定发电商上网电量和二氧化碳排放权价格(碳价)服从几何布朗运动, 分别针对无营运成本和具有营运成本的情况, 构建考虑收益下限的发电商碳减排投资实物期权模型, 并讨论收益下限的最优实施期; 在此基础上, 运用线性碳减排损

失函数, 考察最优收益下限; 最后通过实证性算例验证了最优收益下限对发电商碳减排投资激励的有效性, 并从节省补贴资金角度, 比较了收益下限政策和直接碳减排投资补贴政策。

上述分析结果表明: 1) 收益下限可激励发电商进行碳减排投资, 但最优的实施期限可能低于设施的运行年限, 也就是说, 碳减排设施生命周期内都实施收益下限政策未必是最优的; 2) 发电商碳减排投资阈值最低点对应的收益下限, 即为最优的收益下限, 但其随电力需求和碳价波动的影响较复杂; 3) 在无营运成本情况下, 收益下限相对于直接投资补贴可节省资金, 但在有营运成本情况下, 是否节省资金与电力需求大小有关。

本文与现有文献(如 Alexander 等^[14]) 的差别在于: 一是在碳价下限的基础上, 考虑到发电商上网电量的随机性, 本文提出了收益下限, 并分析其对发电商碳减排投资的影响; 二是分析了收益下限的实施期限, 并结合火力发电商碳减排投资的实际情况, 分别分析了无营运成本和具有营运成本两种情况; 但本文没有考虑收益下限的随机调整(政策调整的随机性, 对发电商的策略选择肯定有影响)对发电商碳减排投资的影响, 也没考虑发电商同时存在多种碳减排投资、发电商之间的碳减排投资博弈等问题(文献[26-27]), 上述问题的研究有可能将拓展本文的研究结果。

参考文献:

- [1] International Energy Agency. CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2018: Overview [EB/OL]. <https://webstore.iea.org/co2-emissions-from-fuel-combustion-2018-overview>.
- [2] 中国电力企业联合会. 2017 年全国电力工业统计一览表 [EB/OL]. <http://www.cec.org.cn/guihuayutongji/tongjixinxi/niandushuju/>.
China Electricity Council. List of Statistics of China's Electric Power Industry in 2017 [EB/OL]. <http://www.cec.org.cn/guihuayutongji/tongjixinxi/niandushuju/>. (in Chinese)
- [3] Abadie L M, Chamorro J M. European CO₂ prices and carbon capture investments [J]. *Energy Economics*, 2008, 30(6): 2992 - 3015.
- [4] Wang Xiping, Du Lei. Study on carbon capture and storage (CCS) investment decision-making based on real options for China's coal-fired power plants [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(5): 4123 - 4131.
- [5] Zhu Lei, Fan Ying. Modelling the investment in carbon capture retrofits of pulverized coal-fired plants [J]. *Energy*, 2013, 57: 66 - 75.
- [6] Zhang Xian, Wang Xingwei, Chen Jiajun, et al. A novel modeling based real option approach for CCS investment evaluation under multiple uncertainties [J]. *Applied Energy*, 2014, 113(C): 1059 - 1067.
- [7] 王素凤, 杨善林, 彭张林. 面向多重不确定性的发电商碳减排投资研究 [J]. *管理科学学报*, 2016, 19(2): 31 - 41.

- Wang Sufeng, Yang Shanlin, Peng Zhanglin. Research on the power producer's carbon abatement investment in view of multiple uncertainties [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2016, 19(2): 31–41. (in Chinese)
- [8] Walsh D M, O'Sullivan K, Lee W T, et al. When to invest in carbon capture and storage technology: A mathematical model [J]. *Energy Economics*, 2014, 42: 219–225.
- [9] Zhou Wenji, Zhu Bing, Chen Dingjiang, 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.
- [10] Fan Lin, Hobbs B F, Norman C S. Risk aversion and CO₂ regulatory uncertainty in power generation investment: Policy and modeling implications [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2010, 60(3): 193–208.
- [11] Wang Mingxi, Wang Mingrong, Wang Shouyang. Optimal investment and uncertainty on China's carbon emission abatement [J]. *Energy Policy*, 2012, 41(2): 871–877.
- [12] Wood P J, Jotzo F. Price floors for emissions trading [J]. *Energy Policy*, 2011, 39(3): 1746–1753.
- [13] Egli P, Lecuyer O. Quantifying the net cost of a carbon price floor in Germany [J]. *Energy Policy*, 2017, 109: 685–693.
- [14] Brauneis A, Mestel R, Palan S. Inducing low-carbon investment in the electric power industry through a price floor for emissions trading [J]. *Energy Policy*, 2013, 53: 190–204.
- [15] Mo J L, Agnolucci P, Mao R J, et al. The impact of Chinese carbon emission trading scheme (ETS) on low carbon energy (LCE) investment [J]. *Energy Policy*, 2016, 89: 271–283.
- [16] Marzouk M, Ali M. Mitigating risks in wastewater treatment plant PPPs using minimum revenue guarantee and real options [J]. *Utilities Policy*, 2018, 53: 121–133.
- [17] Wang Yinglin, Cui Peng, Liu Jicai. Analysis of the risk-sharing ratio in PPP projects based on government minimum revenue guarantees [J]. *International Journal of Project Management*, 2018, 36(6): 899–909.
- [18] Zhu Lei, Fan Ying. A real options-based CCS investment evaluation model: Case study of China's power generation sector [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(12): 4320–4333.
- [19] Tian Lixin, Pan Jianglai, Du Ruijin, et al. The valuation of photovoltaic power generation under carbon market linkage based on real options [J]. *Applied Energy*, 2017, 201: 354–362.
- [20] Zhang M M, Zhou D Q, Zhou P, et al. Optimal design of subsidy to stimulate renewable energy investments: The case of China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 71: 873–883.
- [21] Cardin M A, Zhang Sizhe, Nuttall W J. Strategic real option and flexibility analysis for nuclear power plants considering uncertainty in electricity demand and public acceptance [J]. *Energy Economics*, 2017, 64: 226–237.
- [22] Pringles R, Olsina F, Garcés F. Real option valuation of power transmission investments by stochastic simulation [J]. *Energy Economics*, 2015, 47: 215–226.
- [23] 张新华, 陈敏, 叶泽. 考虑碳价下限的发电商 CCS 投资策略与政策分析 [J]. *管理工程学报*, 2016, 30(2): 160–165.
- Zhang Xinhua, Chen Min, Ye Ze. Investment strategy of CCS for power producer and policy analysis with carbon price floor [J]. *Journal of Industrial Engineering Management*, 2016, 30(2): 160–165. (in Chinese)
- [24] Benchekroun H, Chaudhuri A R. Environmental policy and stable collusion: The case of a dynamic polluting oligopoly [J]. *Journal of Economic Dynamics & Control*, 2011, 35(4): 479–490.
- [25] Galinato G I, Yoder J K. An integrated tax-subsidy policy for carbon emission reduction [J]. *Resource and Energy Economics*, 2010, 32(3): 310–326.
- [26] 王明喜, 鲍勤, 汤铃, 等. 碳排放约束下的企业最优减排投资行为 [J]. *管理科学学报*, 2015, 18(6): 41–57.
- Wang Mingxi, Bao Qin, Tang Ling, et al. Enterprises' optimal abatement investment behavior with the carbon emission constraint [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2015, 18(6): 41–57. (in Chinese)
- [27] 付秋芳, 忻莉燕, 马士华. 惩罚机制下供应链企业碳减排投入的演化博弈 [J]. *管理科学学报*, 2016, 19(4): 56–70.
- Fu Qiufang, Xin Liyan, Ma Shihua. Evolutionary game of carbon-emission-reduction investment in supply chains under a contract with punishment mechanism [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2016, 19(4): 56–70. (in Chinese)

Investment strategy of carbon emission reduction of coal-fired power firms considering revenue floors

ZHANG Xin-hua¹, GAN Dong-mei¹, HUANG Shou-jun², YE Ze¹

1. School of Economics and Management, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Lingnan (University) College, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Assuming that both the on-grid electricity volume of power generation companies and carbon price follow Geometric Brownian Motion, two real option models for carbon emission reduction investment considering revenue floors are proposed for the two cases of with no operating cost and with operating cost respectively. Then the optimal revenue floor and the implementation duration for emission reduction are discussed. The results of the empirical analysis show that: 1) The revenue floor can incentivize power generation companies to invest in carbon emission reduction, but the optimal implementation duration may be less than the operating life of the equipment; 2) The optimal revenue floor is consistent with the lowest investment threshold of carbon emission reductions of power generation companies; 3) In the absence of operating costs, the revenue floor policy can save subsidy funds compared with the direct subsidies policy. However, whether subsidies funds can be saved depends on factors like on-grid electricity volumes in the case of operating costs.

Key words: revenue floor; real option; carbon emission reduction investment; policy analysis; power market

~~~~~  
(上接第 53 页)

## R&D alliances and Chinese corporate innovation

XU Xin<sup>1</sup>, ZHENG Guo-jian<sup>2\*</sup>, ZHANG Teng-tao<sup>3</sup>

1. School of Accounting and Finance, Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan 430073, China;
2. Sun Yat-sen Business School, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. Financial Management Department, Hangzhou Financial Investment Group Co., Ltd., Hangzhou 310016, China

**Abstract:** Under the guidance of the national strategy of innovation-driven development, there have been a number of R&D alliances among Chinese companies in recent years. Taking as the research object the companies of the ChiNext market that are both active in R&D alliances and innovation activities, the paper analyzes the mechanism of R&D alliances and their impact on innovation. Our results, derived from propensity score matching method and difference-in-differences regressions, show that R&D alliances have a positive effect on technological innovations. Companies that have R&D alliances are better than companies that have not measured in different indicators that reflect innovation capability: The patent, the invention, technological diversification and innovative breakthroughs metrics all show a positive and robust effect of a R&D alliance on innovation capability. Moreover, R&D alliances have a lagging effect on technological innovation which increases first and then decreases with time. In addition, the governance structure of the R&D alliance has a moderating effect. Compared with joint ventures, non-joint ventures have a greater role in promoting innovation. This paper provides theoretical and empirical evidence for the synergies of R&D alliances in Chinese companies, as well as meaningful policy implications for the government and firms to enhance innovation capability.

**Key words:** R&D alliances; patents; technological diversification; innovative breakthroughs