# 基于混合能源的企业碳减排决策研究

徐 静[1], 郭松睿[2], 任庆忠[1]
(1. 重庆大学经济与工商管理学院, 重庆 400030;
2. 中国进出口银行重庆分行, 重庆 401121)

**摘要**: 研究企业的最优减排决策问题. 在企业的减排决策中, 企业以减排成本为效用函数, 以累计排放量为状态变量, 以减排速率为控制变量. 利用最优控制原理, 得到了各个决策时间的最优策略及最优成本. 研究表明, 在企业的实际减排过程中, 企业的最优减排策略与能源溢价成本与单位罚金等因素相关, 进而得到的边际减排成本与罚金贴现相关. 最后为政府调控碳排放权市场提出建议.

**关键词**: 减排决策; 清洁能源; 最优控制
**中图分类号**: F272.3 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000−5781(2017)06−0732−06
doi: 10.13383/j.cnki.jse.2017.06.002

# Enterprises carbon emission reduction strategy based on mixed energy

**Xu Jing[1], Guo Songrui[2], Ren Qingzhong[1]**
(1. School of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
2. The Export-Import Bank of China, Chongqing Branch, Chongqing 401121, China)

**Abstract:** This paper is focused on the optimal carbon emission reduction strategy. In the real decision procedure, reduction cost is the utility function, and the accumulative emission is the state variable, meanwhile reduction speed is the control variable. According to optimal control principle, the optimal strategy and the optimal reduction cost are the main concern. It turns out that, in the real reduction procedure, the optimal reduction strategies of the enterprise are related to lots of factors such as energy spread, the unit cost of penalty and so on, meanwhile the marginal cost is the guiding price for the carbon emission allowance (CEA) is related to the discount of the penalty cost. At last, some suggestions are put forward to regulate the market for the government.

**Key words:** reduction decision; clean energy; optimal control

## 1 引 言

2010 年中国成为世界第一大碳排放国, 在哥本哈根会议前夕, 中国做出承诺, 到 2020 年单位国内生产总值碳排放比 2005 年下降 40 % ∼ 50 %. 为达此目标, 高耗能行业(如电力行业)应在兼顾经济与环境的基础上走可持续发展之路[1]. 要解决这一问题, 一可以采用合理的碳减排技术, 二可以利用碳排放权交易工具.

目前, 国内外对企业碳减排技术的研究主要集中在三个方面: 1) CCS($CO_2$捕集与封存)技术, 即捕集化石燃料产生的$CO_2$, 再通过碳储存手段, 将其输送并封存到海底或地下等与大气隔绝的地方. 关于CCS技术

收稿日期: 2015−01−28; 修订日期: 2016−02−29.
基金项目: 重庆市基础与前沿研究计划资助项目(cstc2014jcyjA00031); 中央高校基本科研资助项目(CDJSK11060);教育部人文社科资助项目(14YJAZH091).

已有多年的研究, 技术上面临的主要问题仍然不容忽视: 首先是高昂的成本; 其次是对热能的损耗较大. 2) IGCC(整体煤气化联合循环系统) 是指将煤炭, 生物质, 石油焦, 重渣油等多种含碳燃料进行气化, 将得到的合成气净化后用于燃气－蒸汽联合循环的技术. IGCC 对 $CO_2$ 减排的效果却并不理想. 3) NGCC(天然气联合循环)技术是指利用天然气在燃气轮机做功后的高温排气在余热锅炉中产生蒸汽, 再送到汽轮机中做功, 把燃气循环和蒸汽循环联合在一起循环的技术. NGCC 技术利用了天然气的洁净与联合循环的高效, 具有很高的热效率和很少的碳排放等优点. 然而天然气在我国是稀缺能源, 这对发展 NGCC 技术是一大障碍.

以上三种关于企业碳减排技术的研究, 都是在以单一能源进行的背景下展开的, 并未考虑过在混合能源情况下的碳减排问题. 综合以上三种减排技术发展所面临的问题, 以及高耗能企业将更多地采用混合能源进行生产的背景, 本文研究基于混合能源的企业最优减排问题. 如混合能源发电企业可以综合利用多种能源进行生产. 相比单一能源而言混合能源生产在成本控制上更有弹性. 在众能源中, 天然气燃烧热值大, 环保, 运输成本低. 相比之下煤炭燃烧排放的各种环境污染物量大. 后京都议定书时代, 高耗能企业被迫减排, 使用混合能源的企业可以根据煤炭和天然气的市场价格, 确定两种能源最优使用比例使减排成本最小化.

实现企业减排的另一个有效途径是企业采用碳排放权交易工具, 目前在欧洲已经建立起完善的碳排放权交易市场. 我国虽然已经开展碳排放权交易试点工作, 但至今尚未建立统一的碳排放权市场. 对我国企业而言, 缺乏碳排放权交易工具实现减排目标[2,3]. 建立国内统一的碳排放权交易市场已经是大势所趋. 而在建立统一碳排放权交易市场的过程中, 如何给出碳排放权的指导价格是面临的重要问题之一. 其方法为根据主要减排行业的边际减排成本确定碳排放权的指导价格. 如 Chao 等[4]和 Jan 等[5]基于动态优化方法研究企业减排边际成本, 并基于此对碳排放权定价. Chesney [6]假定二氧化碳排放量服从几何布朗运动, 以参与企业成本最小化为目标, 用倒向方法分别给出了两公司和多公司模型中各个交易时刻的边际减排成本从而给出了碳排放权的理论价格. 屠新曙等[7]以分析企业碳排放成本为基础, 基于减排边际减排成本等于碳排放权价格均衡理论对碳排放权价格进行分析. 王晟等[8]基于资源影子价格模型, 对国际市场碳排放权交易价格机制进行了初步探索, 得到碳排放权市场价格. 关丽娟等[9]基于影子价格模型对我国碳排放权交易初始分配及其定价问题进行了分析, 建立了碳排放权交易的影子价格模型. 王玲[10]在分析我国碳交易定价机制的现状及存在问题的基础上, 提出了完善我国碳交易定价机制的建议, 包括建立 CER 期货和其它的碳金融衍生品交易市场等. 张云等[11]分析了总量控制和交易、基准排放和信用两种碳排放权交易体系中的价格决定原理, 并分析《京都议定书》框架下国际碳排放权交易规模和利益分配不公等情况.

我国已经在建立全国统一市场的努力之中, 在此关键时期, 作为参与碳减排的主要企业该如何制定减排策略. 作为将来碳排放权市场交易的主要参与者, 该如何定价成为企业备受困扰的问题. 纵观碳排放权的前期研究, 在企业层面大多以实证研究居多, 国外对于此研究大多局限于国家及政府层面. 本文在我国尚未建立统一碳排放权交易市场的前提下, 基于企业减排成本的动态优化模型研究当产能和能源价格外生变化时, 企业如何确定清洁能源和非清洁能源的使用比例最小化减排成本问题. 此结果不仅为参与碳排放权市场交易提供指导, 同时, 得到的企业边际成本也为政府调控碳排放权市场, 控制碳排放权价格提供理论依据.

## 2　企业减排模型

设 $g(t) = h_{\rm g}P_{\rm g}(t) - h_{\rm c}P_{\rm c}(t), k = e_{\rm c} - e_{\rm g}$, 其中 $g(t)$ 表示使用清洁能源和非清洁能源产生单位能量的溢价成本, $k$ 表示使用清洁能源和非清洁能源产生单位能量的排放量之差, 企业的减排速率可表示为 $u(t) = \varepsilon_{\rm g}(t)/h_{\rm g}k$, 令

$$A(t) = P_0(I(T) - e_0)^+ {\rm e}^{-r(T-t)}, \tag{1}$$

$$B(t) = u(t)g(t)/k, \tag{2}$$

$$C(t) = c_0 u(t)^2/2, \tag{3}$$

其中 $A(t)$ 是企业最终时刻的罚金贴现. $B(t)$是企业因使用清洁能源产生的溢价成本. $C(t)$ 是代表企业设备折旧等因素产生的成本. $P_0$ 是对超额单位排放的罚金, $P_{\mathrm{g}}(t)$是单位天然气的市场价格, $P_{\mathrm{c}}(t)$ 是单位煤炭的市场价格, $h_{\mathrm{g}}$ 是产生单位能量需要的天然气的量, $h_{\mathrm{c}}$ 产生单位能量需要的煤炭的量, $e_0$ 是企业初始分配的二氧化碳排放量配额, $e_{\mathrm{c}}$ 是燃烧煤炭产生单位能量的二氧化碳排放量, $e_{\mathrm{g}}$ 是燃烧天然气产生单位能量的二氧化碳排放量, $\varepsilon_{\mathrm{g}}(t)$是企业对天然气的使用量, $c_0$ 是减排成本中可变成本系数, $r$ 是企业在资本市场中合理的贴现率.

因此, 企业面临的减排成本最优化问题为

$$\begin{cases}\underset{u(\cdot)}{\mathrm{Min}} \quad J=A(T)+\int_0^T \mathrm{e}^{-r(s-t)}\Big(B(s)+C(s)\Big)\mathrm{d}s \\ \text{s.t.} \quad \dot{I}(t)=e_{\mathrm{c}}E(t)-u(t), I(0)=I_0,\end{cases} \tag{4}$$

其中 $u(t)$ 是 $t$ 时刻企业减排量(速率)且满足 $0\leqslant u(t)\leqslant kE(t)$, $I(t)$为到 $t$ 时刻企业累积的碳排放量, $I(0)$为初始企业累积的碳排放量, $E(t)$是 $t$ 时刻企业在生产需要的总能量.

**假设 1** 企业仅以能源转换, 即清洁能源与非清洁能源转换为减排手段[1].

**假设 2** 企业 $E(t), P_{\mathrm{g}}(t), P_{\mathrm{c}}(t)$ 不受其减排策略及减排任务的影响[2].

设 $V(t,I(t))=\mathrm{Min}\left\{A(T)+\int_t^T \mathrm{e}^{-r(s-t)}(B(s)+C(s))\mathrm{d}s\right\}$ 为最优值函数, 有下列结论.

**引理 1** $V(t,I(t))$ 连续可微.

**证明** 为证明 $V(t,I(t))$可微, 只需证明 $V(t,I(t))$关于 $I(t)$可微. 令 $u^*(s)\geqslant 0, s\in[t,T]$为最优策略, 即

$$\begin{aligned}V(t,I(t))=&\int_t^T\left(\frac{c_0}{2}u^*(s)^2+\frac{g(s)}{k}u^*(s)\right)\mathrm{e}^{-r(s-t)}\mathrm{d}s+\\&P_0\left[I(t)+\int_t^T(E(s)e_{\mathrm{c}}-u^*(s))\mathrm{d}s-e_0\right]^+\mathrm{e}^{-r(T-t)}.\end{aligned} \tag{5}$$

若 $I(t)+\int_t^T(E(s)e_{\mathrm{c}}-u^*(s))\mathrm{d}s<e_0$, 由于 $I(t)+\int_t^T E(s)e_{\mathrm{c}}\mathrm{d}s\geqslant e_0$, 则存在 $u^\tau(s)<u^*(s), s\in[t,T]$, 使得

$$I(t)+\int_t^T(E(s)e_{\mathrm{c}}-u^\tau(s))\mathrm{d}s=e_0, \tag{6}$$

且

$$\int_t^T\left(\frac{c_0}{2}u^\tau(s)^2+\frac{g(s)}{k}u^\tau(s)\right)\mathrm{e}^{-r(s-t)}\mathrm{d}s<\int_t^T(\frac{c_0}{2}u^*(s)^2+\frac{g(s)}{k}u^*(s))\mathrm{e}^{-r(s-t)}\mathrm{d}s, \tag{7}$$

即

$$\begin{aligned}V(t,I(t))>P_0(I(t)+&\int_t^T\left(\frac{c_0}{2}u^*(s)^2+\frac{g(s)}{k}u^*(s)\right)\mathrm{e}^{-r(s-t)}\mathrm{d}s+\\&\int_t^T(E(s)e_{\mathrm{c}}-u^*(s))\mathrm{d}s-e_0)^+\mathrm{e}^{-r(T-t)},\end{aligned} \tag{8}$$

这与 $u^*(s)$为最优策略矛盾, 则 $I(t)+\int_t^T(E(s)e_{\mathrm{c}}-u^*(s)k)\mathrm{d}s\geqslant e_0$, 即 $V(t,I(t))$为关于 $I(t)$的线性函数且关于 $I(t)$可微. 证毕.

[1]企业以能源转化为减排手段. 在没有碳减排市场时, 企业主要采用的技术有 CCS, IGCC 及 NGCC 等. 而高昂的成本使得这些减排技术在实施中遇到很大阻力. 如 Ram 等[12]及张斌等[13] 表明 IGCC 高位热值损失效率过高. 朱成章[2]研究表明在我国建立纯天然气电厂是不可能的. 因此, 使用混合能源减排使得企业在成本控制中更有弹性, 也成为减排的主要手段.

[2]企业的产能为外生变量, 因为一方面, 企业产能的需求受企业产品市场需求的影响, 企业产品市场需求往往有外生性. 另一方面某些高耗能企业的产品需求, 以电力市场为例, 电力市场用电需求取决于气候, 温度及经济发展水平等外部因素. 能源价格外生是因为, 一方面单一企业的决策无法影响市场能源价格. 另一方面能源价格对能源消费本身具有一定的外生性, 具体可见张志柏[14], 陈锡坤[15]的研究结果.

下面将求解此优化问题, 首先将优化问题的解转换为偏微分方程的解, 然后给出偏微分方程的解析解.

**定理 1**　企业的成本函数 $V(t,I(t))$ 满足如下 H-J-B 方程为

$$\begin{cases} rV(t,I(t)) = \underset{u(t)}{\mathrm{Min}}\left(B(t)+C(t)+\dfrac{\partial V}{\partial t}+\dfrac{\partial V}{\partial I}(E(t)e_{\mathrm{c}}-u(t))\right) \\ V(T,I(T)) = P_0(I(T)-e_0)^+. \end{cases} \tag{9}$$

**证明**　对任意 $h\in(0,t)$，由动态优化原理可得

$$\begin{aligned} V(t-h,I(t-h)) &= \underset{u(t)}{\mathrm{Min}}\left(\int_{t-h}^{T}(B(s)+C(s))\mathrm{e}^{-r(s-t+h)}\mathrm{d}s+A(T)\right) \\ &= \underset{u(t)}{\mathrm{Min}}\left(\int_{t-h}^{t}(B(s)+C(s))\mathrm{e}^{-r(s-t+h)}\mathrm{d}s+\mathrm{e}^{-rh}V(t,I(t))\right). \end{aligned} \tag{10}$$

将上式两边减去 $V(t-h,I(t-h))$除以 $h$, 并令 $h\to 0$ , 由 $B(t),C(t),V(t,I(t))$ 的光滑性可得式(9).

证毕.

**定理 2**　满足 H-J-B 方程(9)的解为

1) 当 $\dfrac{g(t)}{k}>P_0\mathrm{e}^{-r(T-t)}$, 且 $I(t)+\int_t^T E(s)e_{\mathrm{c}}\mathrm{d}s\geqslant e_0$ 时, 企业最优策略为 $u^*(t)=0$ , 最小成本为

$$V(t,I(t)) = P_0\mathrm{e}^{-r(T-t)}(I(t)+\int_t^T E(s)e_{\mathrm{c}}\mathrm{d}s-e_0); \tag{11}$$

2) 当 $\dfrac{g(t)}{k}<P_0\mathrm{e}^{-r(T-t)}-c_0E(t)k$, 且 $I(t)+\int_t^T E(s)e_{\mathrm{c}}\mathrm{d}s\geqslant e_0$ 时, 企业最优策略为 $u^*(t)=E(t)k$ , 最小成本为

$$V(t,I(t)) = \int_t^T\left(\frac{c_0}{2}E(s)^2k^2+\frac{g(s)}{k}E(s)k\right)\mathrm{e}^{-r(s-t)}\mathrm{d}s+P_0\mathrm{e}^{-r(T-t)}\left(I(t)+\int_t^T E(s)e_{\mathrm{g}}\mathrm{d}s-e_0\right); \tag{12}$$

3) 当 $P_0\mathrm{e}^{-r(T-t)}-c_0E(t)k\leqslant\dfrac{g(t)}{k}\leqslant P_0\mathrm{e}^{-r(T-t)}$, 且 $I(t)+\int_t^T E(s)e_{\mathrm{c}}\mathrm{d}s\geqslant e_0$ 时, 企业最优策略为 $u^*(t)=\dfrac{1}{c_0}\left(P_0\mathrm{e}^{-r(T-t)}-\dfrac{g(t)}{k}\right)$, 最小成本为

$$\begin{aligned} V(t,I(t)) = {} & P_0\mathrm{e}^{-r(T-t)}\left(I(t)-e_0+\frac{P_0(\mathrm{e}^{-r(T-t)}-1)}{2c_0r}\right)+ \\ & \int_t^T P_0\mathrm{e}^{-r(T-t)}\left(\frac{g(s)}{c_0k}+\frac{E(s)e_{\mathrm{c}}}{h_{\mathrm{c}}}\right)\frac{g(s)^2}{2c_0k^2}\mathrm{e}^{r(t+s)}\mathrm{d}s; \end{aligned} \tag{13}$$

4) 当 $I(t)+\int_t^T E(s)e_{\mathrm{c}}\mathrm{d}s<e_0$ 时, 最优策略为 $u^*(t)=0$，最小成本为 $V(t,I(t))=0$.

**证明**　情形 4)是显然成立的. 由于情形 1), 2)的证明方法等同于情形 3)的证明, 因此这里只给出情形 3)的证明. 当 $I(t)+\displaystyle\int_t^T E(s)e_{\mathrm{c}}\mathrm{d}s\geqslant e_0$ 时, 由

$$rV(t,I(t)) = \underset{u(t)}{\mathrm{Min}}\left(\left(\frac{c_0}{2}u(t)^2+\frac{g(t)}{k}u(t)\right)+\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{\partial V}{\partial I}(E(t)e_{\mathrm{c}}-u(t))\right), \tag{14}$$

由一阶条件可得最优策略为

$$u^*(t) = \frac{1}{c_0}\left(\frac{\partial V}{\partial I}-\frac{g(t)}{k}\right). \tag{15}$$

当 $P_0\mathrm{e}^{-r(T-t)}-c_0E(t)k\leqslant\dfrac{g(t)}{k}\leqslant P_0\mathrm{e}^{-r(T-t)}$ 时, 将最优策略代入式(9)得

$$\begin{cases} rV(t,I(t)) = -\dfrac{1}{2c_0}\left(\dfrac{\partial V}{\partial I}\right)^2+\left(\dfrac{g(t)}{c_0k}+E(t)e_{\mathrm{c}}\right)\dfrac{\partial V}{\partial I}-\dfrac{g(t)^2}{2c_0k^2}+\dfrac{\partial V}{\partial t} \\ V(T,I(T)) = P_0(I(T)-e_0)^+. \end{cases} \tag{16}$$

鉴于最优值函数 $V(t,I(t))$是关于 $I(t)$的线性函数, 可用待定系数法解方程(16).

设 $V(t,I(t)) = M(t)I(t)+N(t)$, 由边界条件知 $M(T)=P_0, N(T)=-P_0e_0$. 将 $\dfrac{\partial V}{\partial t}, \dfrac{\partial V}{\partial I}$ 代入式(16)得

$$rM(t)I(t)+rN(t)=M'(t)I(t)-\frac{M^2(t)}{2c_0}+\left(\frac{g(t)}{c_0k}+E(t)e_{\mathrm{c}}\right)M(t)-\frac{g(t)^2}{2c_0k^2}+N'(t), \tag{17}$$

整理可得 $M(t), N(t)$满足的微分方程组为

$$\begin{cases} rM(t)=M'(t), M(T)=P_0 \\ rN(t)=-\dfrac{M^2(t)}{2c_0}+(\dfrac{g(t)}{c_0k}+E(t)e_{\mathrm{c}})M(t)-\dfrac{g(t)^2}{2c_0k^2}+N'(t),\ \ N(T)=-P_0e_0. \end{cases} \tag{18}$$

易得

$$M(t)=P_0\mathrm{e}^{-r(T-t)}, \tag{19}$$

$$N(t)=C\mathrm{e}^{rt}+\frac{P_0^2}{2c_0r}\mathrm{e}^{-2r(T-t)}-P_0\mathrm{e}^{-r(T-t)}\int\left(\frac{g(t)}{c_0k}+E(t)e_{\mathrm{c}}\right)\mathrm{d}t+\mathrm{e}^{rt}\int\frac{g(t)^2}{2c_0k^2}\mathrm{e}^{-rt}\mathrm{d}t, \tag{20}$$

其中 $C$ 为待定系数.

设 $\varPhi(t)=\int\left(\dfrac{g(t)}{c_0k}+E(t)e_{\mathrm{c}}\right)\mathrm{d}t$, $\varPsi(t)=\int\dfrac{g(t)^2}{2c_0k^2}\mathrm{e}^{-rt}\mathrm{d}t$, 根据相应的边界条件得

$$C=P_0\varPhi(T)\mathrm{e}^{-rT}-\varPsi(T)-\frac{P_0^2}{2c_0r}\mathrm{e}^{-rT}-P_0e_0\mathrm{e}^{-rT}.$$

因此, 将式(19)与式(20)代入值函数可得企业最小成本. 证毕.

由上述证明可以得到, 企业的最优策略和最小减排成本会随着初始排放配额 $e_0$, 超额排放的罚金 $P_0$, 企业累积的碳排放量 $I(t)$, 溢价成本 $B(t)$相关, 但由边际成本定价原理得到的碳排放权的价格相同, 为 $P_0\mathrm{e}^{-r(T-t)}$. 此时企业只需关注单位能源溢价成本 $g(t)/k$的大小, 而采取不同的减排策略(分别对应情形 1)～4).

## 3 结束语

当前的生态环境和气候条件正影响着我国经济社会的可持续发展, 应对气候变化问题成为政府和企业共同关注的焦点. 为了提高在国际碳市场的参与程度和地位, 我国已处在建立统一的碳排放权的道路上. 企业面临在减排压力下如何制定合理策略的问题, 排放权市场建立过程中遇到如何给出排放权指导价格问题, 成为建立统一减排市场中的两个核心问题. 而这两个问题在有效市场中是统一的, 即可以通过计算企业的最优减排成本, 进而得到边际成本作为碳排放权市场的指导价格. 本文针对我国还未建立统一碳排放权市场的现状, 假定企业将能源替换作为主要的减排手段, 研究企业的减排成本问题, 得到企业的最优策略和最小减排成本会随着初始排放配额 $e_0$、超额排放的罚金 $P_0$、企业累积的碳排放量 $I(t)$、溢价成本 $B(t)$ 的大小而不同, 但由边际成本定价原理得到的碳排放权的价格是相同的, 均等于 $P_0\mathrm{e}^{-r(T-t)}$. 此时企业只需关注单位能源溢价成本的大小, 而采取不同的减排策略.

根据得到的结论, 针对政府在建立排放权市场鼓励企业合理减排的问题, 政府在初始碳排放配额分配时, 可以适当加大碳配额紧缩的力度以加快减排目标的实现.碳排放权交易市场建立过程中, 政府有关部门应该合理设定初始排放配额和罚金水平. 考虑到我国正处于碳排放权市场建立的初级阶段, 政府在制定碳排放配额初试分配政策时必然要考虑对能源市场的冲击以及随之而来的对制造业信心的影响. 原因是基于碳配额紧缩时对能源股市产生冲击, 进而影响对制造业及减排企业的信心, 政府在制定碳配额政策时将趋于保守, 碳配额紧缩不足. 这样, 严重的后果可能导致我国 2020 年的减排目标无法按时完成.

## 参考文献:


[1] 汤　玲, 武佳倩, 戴　伟, 等. 碳交易机制对中国经济与环境的影响. 系统工程学报, 2014, 29(5): 701–702.
Tang L, Wu J Q, Dai W, et al. Impacts of carbon emission trading on China's economy and environment. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(5): 701–702. (in Chinese)

[2] 朱成章. 天然气的利用与中国的节能减排. 国际石油经济, 2007(6): 31–36.
Zhu C Z. Energy saving and emission reduction and the use of gas in China. International Petroleum Economics, 2007(6): 31–36. (in Chinese)

[3] 申成然, 熊中楷. 碳排放约束下制造商再制造决策研究. 系统工程学报, 2014(04): 537–549.
Shen C R, Xiong Z K. Production decisions of the manufacturer remanufacturing under carbon emission constraint. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(4): 537–549. (in Chinese)

[4] Chao H P, Wilson R. Option value of emission allowances. Journal of Regulatory Economics, 1993(5): 233–249. (in Chinese)

[5] Jan S, Marliese U H, Michael W. Dynamic behavior of $CO_2$ spot prices. Journal of Environmental Economics and Management, 2008(56): 180–194.

[6] Chesney M, Taschini L. The Endogenous Price Dynamics of Emission Allowances and an Application to $CO_2$ Pricing. Swiss Finance Institute Research Paper Series, 2011, No. 08–02.

[7] Tu X S, Guo L L, Liu J X. The pricing of the carbon emission trading based on emission cos. Commercial Modernization, 2012(3): 45–46. (in Chinese)

[8] 王　晟, 刘青青, 霍恺欣. 基于影子价格的碳排放权交易价格机制探析. 现代商贸工业, 2011(10): 165.
Wang S, Liu Q Q, Huo K X. The research on mechanism of caron emission allowance trading based on shadow price. Modern Business Trade Industry, 2011(10): 165. (in Chinese)

[9] 关丽娟, 乔　晗, 赵　鸣, 等. 我国碳排放权交易及其定价研究. 价格理论与实践, 2012(06): 83–84.
Guan L J, Qiao H, Zhao M, et al. Research on carbon emission trading and its pricing. Price: Theorey and Practice, 2012(06): 83–84. (in Chinese)

[10] 王　玲. 完善我国碳交易定价机制的研究. 价格理论与实践, 2012(5): 76–77.
Wang L. Research on improving the pricing mechanism of carbon trading in China. Price: Theorey and Practice, 2012(05): 76–77. (in Chinese)

[11] 张　云, 杨来科. 国际碳排放权交易价格决定与最优出口规模研究. 财贸经济, 2011(7): 70–76.
Zhang Y, Yang L K. Study on the optimal export scale and price of international carbon emissions trading. Finance and Economy, 2012(5): 76–77. (in Chinese)

[12] Ram G N, Harvey W, Kenneth H. Incremental cost of $CO_2$ reduction in power plants. ASME Turbo Expo, 2002(6): 31–67.

[13] 张　斌, 倪维斗, 李　政. 火电厂和IGCC及煤气化SOFC混合循环减排$CO_2$的分析. 煤炭转化, 2005(1): 1–7.
Zhang B, Ni W D, Li Z. Analysis of thermal power plant and coal gasification combined cycle IGCC and SOFC reduction of $CO_2$. Coal Conversion, 2005(1): 1–7. (in Chinese)

[14] 张志柏. 中国能源消费因果关系分析. 财贸研究, 2008(3): 15–21.
Zhang Z B. Casual analysis of Chinese consumption. Finance and Trade Research, 2008(3): 15–21. (in Chinese)

[15] 陈锡坤. 我国能源企业提供价格风险管理能力研究—利用金融衍生工具规避能源价格风险的几点思考. 价格理论与实践, 2009(7): 70-71.
Chen X K. The research on the ability of price risk management of energy enterprises in China: Some reflections on the use of financial derivatives to avoid the risk of energy price. Price: Theorey and Practice, 2009(7): 70–71. (in Chinese)


## 作者简介:


徐　静(1980—), 女, 河北沧州人, 博士, 副教授, 研究方向: 金融工程, 碳金融, Email: xujing8023@cqu.edu.cn;

郭松睿(1988—), 男, 山东烟台人, 硕士, 中国进出口银行重庆分行客户经理, 研究方向: 碳金融, Email: winniegsr@qq.com;

任庆忠(1988—), 男, 山东泰安人, 博士生, 研究方向: 金融数学, 数量经济学, Email: 523190570@qq.com.