

基于演化博弈分析的水泥企业碳减排决策选择研究

张彩平, 潘洁¹, 谭德明²

(南华大学 经济管理与法学学院, 湖南 衡阳 421001)

[摘要] 面对日益严格的碳排放管制,企业应该加大减排投资还是直接到碳交易市场购买配额,以实现碳成本最低,碳减排收益最大化?这是每一个高能耗高排放企业都必须面对的决策问题。文章拟建立AB两家水泥企业的碳减排策略的博弈模型,通过对此模型进行演化博弈分析,以发现影响企业低碳减排决策的关键因素。研究表明,水泥企业是否选择在生产过程中加大减排投入取决于其单位碳减排成本与消费者对低碳产品的偏好程度和碳价之和的大小比较。因此,要实现低成本减排的目标,水泥企业应积极开展低碳生产技术和减排技术的研发,追踪整个产品生命周期的碳元素流,针对碳排放量较高的重点生产工艺进行碳减排改造。政府则需要加快推进碳交易市场建设,为企业参与碳交易提供稳定的市场环境。同时加大对低碳产品的宣传,强化消费者对低碳产品和水泥企业碳减排行动的认可。

[关键词] 演化博弈分析; 碳减排; 碳交易市场; 水泥企业

[中图分类号] F206 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-0755(2020)01-0054-08

一 问题的提出

我国碳排放总量已居世界首位,面临着巨大的国际减排压力。在2009年哥本哈根会议上,我国承诺“到2020年单位GDP的二氧化碳排放比2005年下降40%~45%”。为了实现这一承诺,我国积极实施一系列有助于节能减排的机制和政策,碳排放权交易制度就是典型的市场机制之一。碳排放权交易制度(ETS)是指政府在年初按照一定的规则分配一定数量的碳配额给控排企业,到了年末控排企业必须交付与其实际碳排放量对应的碳配额量以履行减排义务。当超排时,企业须在碳交易市场上购买与超排量相当的碳配额量,若减排则可将剩余配额出售以获利。碳排放权交易机制通过“配额+交易”的方式赋予碳排放权商品属性,使碳配额在供需过程中形成碳排放交易价格^[1]。碳交易市场让碳排放权拥有市场价值,并以其特有的市场机制来激励企业提高效率、改进减排技术以降低二氧化碳排放量,因此,作为一种通过优化碳配额资源使用效率,实现减排目标的政策机制,碳交易市场被世界各国广泛使用。

从2013年起,我国陆续在7个省市开展了碳排放权交易试点工作,并于2017年12月建立了全国统一的碳排放权交易市场。经过五年试点工作及一年的全国性交易,截至2018年12月,我国碳排放交易量累计接近8亿吨,碳排放交易额累计超过110亿元^[2]。但不容忽视的是,尽管成效显著,但碳交易市场在运行过程中也暴露出许多问题,如控排企业低碳减排生产的主动性不足;企业间碳配额交易的活跃度不高,二级市场碳配额交易量不到政府分配配额总量的2%且交易目的多为履约^[3];碳价长期稳定以至于其信号作用失真^[4]。

水泥行业是典型的高能耗高排放行业,其碳排放量约占我国工业生产二氧化碳排放总量的1/5。因此,降低水泥行业的碳排放量对实现我国整体碳减排目标具有重要的现实意义。面对日益严格的碳排放管制,为在完成履约的同时实现碳成本最低,碳减排收益最大化,水泥企业应该加大减排投资还是直接到碳交易市场购买配额?为回答这一问题,本文拟对AB两家水泥企业的碳减排生产决策进行演化博弈分析,以发现影响水泥企业减排决策选择的

[收稿日期] 2019-11-17

[基金项目] 国家社会科学基金一般项目“生态文明建设背景下高排放企业碳成本控制及其运行机制研究”资助(编号:18BGL074);湖南省社会科学成果评审委员会课题“可持续发展视域下我国能源生态经济效益评价机制研究”资助(编号:XSP19YBC363);湖南省教育厅重点课题“城市能源生态经济效益的时空变化及驱动力研究”资助(编号:19A437)

[作者简介] 张彩平(1977-),女,湖南浏阳人,南华大学经济管理与法学学院教授,博士。

1 南华大学经济管理与法学学院硕士研究生。2 南华大学经济管理与法学学院副研究员,博士。

关键因素,为企业减排活动的开展和政府减排政策的制定提供理论指导。

二 文献综述

近年来,有许多学者借助博弈论的方法模型来研究碳交易市场机制建立过程中出现的问题^[5-7],但他们建立的博弈模型基本都是以博弈方完全理性这一假设为前提的,且假设在博弈过程中博弈方处于完全信息环境中,这是不符合实际的。博弈方所面临的外界环境在大多数情况下都是信息不完全的,且博弈方只能达到有限理性,这就意味着各方通常无法在一次博弈中就做出最优的决策。此时,演化博弈理论是一种比经典博弈论更为准确的分析思路和方法。

演化博弈理论是把博弈理论分析和动态演化过程分析结合起来的一种理论^[8],该理论认为博弈方在博弈过程中由于自身条件限制、外界环境复杂及信息获取局限等因素,其对策略的选择是有限理性的,博弈过程不可能一次就完成最优决策,需要参与决策的各方根据多种影响因素和所获信息不断调整,使该博弈系统达到均衡状态。

演化博弈理论模型更接近实际情况,因此受到许多经济学家的青睐。吴士健^[9]构建了中央、地方双重管制下的环保部门与碳排放企业之间的三方演化博弈模型,探讨了实施阶梯式碳税政策对三方行为的影响。焦建玲^[10]基于静态和动态碳减排奖惩机制,对地方政府和企业的行为进行演化博弈分析,重点分析了碳配额、碳价、政府监督成本和企业减排投资等对演化稳定策略的影响。张凯泽等^[11]针对碳排放的监管问题,从第三方监督视角出发,建立了政府与企业在碳排放监管中的演化博弈模型。汪明月和刘宇等^[12]通过构建政府与政府之间的减排演化博弈模型,模拟了区域内地方政府间独立减排、合

作减排这两个情形的策略选择演化过程。

综上所述,目前关于演化博弈理论应用到碳减排方面的研究主要集中在政企之间,而企业间的研究比较少。本文将在现有研究的基础上,将碳交易市场机制下的两个水泥企业设定为博弈双方并假设其为有限理性,运用演化博弈的方法对两个企业是否选择自行减排的动态过程进行分析,从中发现企业选择减排策略的影响因素,为更好地促进水泥企业低碳减排生产提供相关对策。

三 演化博弈理论在水泥企业中的应用分析

在碳交易市场机制下,政府与控排企业组成一级市场上的碳减排供应链,政府按照一定的方法(历史核算法或基准核算法)向控排企业分配初始碳配额,并首先确立一个碳配额交易的指导价(简称碳价),以指导和规范碳交易市场上的配额交易;水泥企业分配到碳配额之后,在碳配额和碳价的约束下进行水泥的生产和销售,根据碳配额量及自身情况作出是否减排的生产决策,并以期末碳排放量为基准在碳交易市场上进行碳配额的购买或出售。

(一)水泥企业生产决策过程描述

在水泥企业生产周期(即碳配额分配、交易和结算周期)到来之前,政府根据当前消费者的低碳偏好情况,以达到社会福利最优的目的,与企业签订碳排放合同,该合同规定:在水泥企业的生产周期(碳排放周期)结束时,政府以一定的碳配额量来核准水泥企业的碳排放量;而在水泥企业生产周期内,水泥企业可按照合同规定的碳配额量、市场碳价和行业内其他控排企业的情况来确定产品产量和碳交易量,并按市场价格将产品销售出去,至此完成一个产品生产、销售(碳配额分配、交易及核准)的周期,具体见图1。

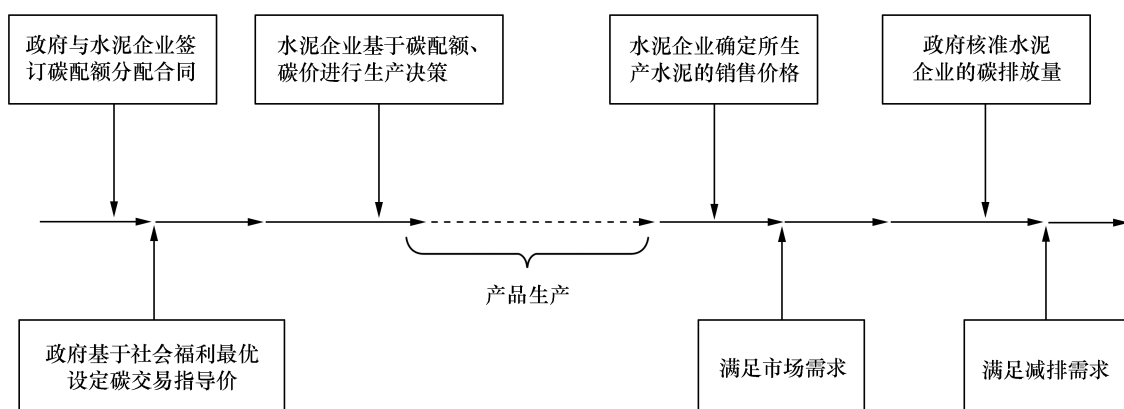


图1 水泥企业生产决策过程描述

(二)演化博弈模型假设及符号说明

本文中演化博弈模型涉及的博弈双方为碳交易市场上相互独立且产品无差异的水泥企业 A 和水泥企业 B,两个水泥企业均为有限理性的经济个体,并形成双寡头竞争。

控排企业之所以会参与碳排放权交易活动,是由于自身的实际碳排放量与初始碳配额之间存在差异,一般来说,控排企业所获得的初始碳配额都会小于企业的预期碳排放量,如若控排企业通过有效的减排措施能够将实际碳排放量降低至初始碳配额以下,该企业就可以将剩余的碳配额出售以获得碳交易收益;反之,若控排企业不实施减排而导致实际碳排放量高于碳配额,控排企业则必须在碳交易市场上购买碳配额,以避免因无法履约所应承担的行政罚款等一系列社会责任。

因此,水泥企业 A 和水泥企业 B 在原有的水泥生产销售决策之外,还应考虑是否选择碳减排投入的决策,由于初始分配的碳配额一定,两个企业的减排生产策略有两种:不减排,购买碳配额;积极减排,无需购买甚至可出售剩余碳配额。这两种决策可简单地标识为 P(Purchase 购买)、R(Reduce 减排)。

在此基础上,我们对博弈模型做出以下假设:

1. 考虑在某一碳交易市场上政府和企业组成的碳配额供应链中的水泥企业仅有两家,只生产单一且单位生产成本相等的水泥,所以企业主要考虑的是碳减排投入成本、碳配额剩余在碳交易市场上的交易收益以及产品市场上的销售收入。

2. 两企业所生产的水泥本身无差异,其替代性来自于消费者的低碳偏好程度。假设消费者对低碳水泥的偏好系数为 μ ,则可以得到两企业产品的市场需求函数为:

$$Q_i = S - P_i - \mu e_j, (i = 1, 2; j = 0, 1) \quad (1)$$

其中: S 表示市场的初始规模; P_i 表示两企业所出售产品的单位定价; e_j 表示两企业的单位产品碳排放量(当 $j=0$ 时表示碳减排前的单位产品碳排放量;当 $j=1$ 时表示碳减排后的单位产品碳排放量)。

3. 在同一个生产周期中,两企业进行产量 Q_i 决策,追求自身利润 M_i 最大化,根据双寡头竞争的特点,两企业的反需求函数可以表示为:

$$P = S - Q_i - Q_j, (i = 1, 2; j = 3 - i) \quad (2)$$

4. 考虑碳配额的分配、交易和结算周期与水泥企业生产水泥、销售产品周期同步。

5. 政府在设定初始碳配额及碳交易的指导碳价时是基于社会福利最优的原则,即碳减排边际成本较低的水泥企业能够享受因主动减排带来的碳交易

收益,碳减排边际成本较高的水泥企业则要为超出初始碳配额部分的碳排放量支付相应的费用,由此通过企业对碳交易收益的期望来推动水泥企业的主动减排,最终实现“双向激励”。

6. 碳配额的初始分配免费。水泥熟料生产企业的二氧化碳排放配额分配方法采用行业基准法^[13]。分配公式为:

$$Q = \xi \times q \quad (3)$$

其中, Q 表示水泥企业可免费获得的碳配额总量(tCO_2); ξ 表示熟料生产工业过程中二氧化碳排放基准值,根据《广东省 2018 年度碳排放配额分配实施方案》,我们采用的二氧化碳排放基准值为 $0.884\text{tCO}_2/\text{t}$ 熟料; q 表示水泥企业所有熟料生产工段所产出的熟料总和(t)。

7. 根据国内水泥生产的平均水平核算,水泥企业每生产 1 吨水泥熟料,大约排放的二氧化碳量为 0.94 吨^[14],结合所采用的水泥企业二氧化碳排放基准值,我们可以假设水泥企业可免费获得的碳配额总量总是小于企业正常生产中排放的二氧化碳总量。

8. 其他有关变量符号及其含义如表 1 所示。

表 1 变量符号定义

变量	含义
e_0	企业不选择减排时单位产品的碳排放量
e_1	企业选择减排时单位产品的碳排放量
c_0	企业不选择减排时单位产品的生产成本
c_1	企业选择减排时单位产品的生产成本
Q_C	水泥企业从政府免费获得的初始碳配额
P_c	碳交易价格
$P_i^{(\alpha, \beta)}$	策略组合为 (α, β) 时企业 i 的产品定价
$Q_i^{(\alpha, \beta)}$	策略组合为 (α, β) 时企业 i 的产量
$M_i^{(\alpha, \beta)}$	策略组合为 (α, β) 时企业 i 的产品利润
$PC_i^{(\alpha, \beta)}$	碳交易市场机制下策略组合为 (α, β) 时企业 i 的产品定价
$QC_i^{(\alpha, \beta)}$	碳交易市场机制下策略组合 (α, β) 时企业 i 的产量
$MC_i^{(\alpha, \beta)}$	碳交易市场机制下策略组合 (α, β) 时企业 i 的产品利润

表 1 中, $i = 1, 2; \alpha, \beta = R, P$

(三)演化博弈模型的构建

本文设定配额实施免费分配,因此,在未实施碳排放权交易市场机制时的双寡头竞争状态为基准状态,相应的竞争模型为基准模型。在基准模型下,双

寡头企业以产量决策的方式实现自身利益的最大化,此时企业收益函数 M_i 可描述为:

$$M_i(Q_i) = (S - Q_i - Q_j)Q_i - c_0Q_i, \quad (i = 1, 2; j = 3 - i) \quad (4)$$

在碳交易市场上,水泥企业 A 与水泥企业 B 的策略选择将面临 4 种组合:

I 组合为 (P, P), 即水泥企业 A 与水泥企业 B 都不进行碳减排, 而选择在碳市场上购买碳配额。那么可以得到两个企业的利润最大化决策函数为:

$$\text{Max} M_i^{(P,P)} = (P_i^{(P,P)} - c_0) \times Q_i^{(P,P)} - P_c \times (Q_i^{(P,P)} \times e_0 - Q_c), i = 1, 2 \quad (5)$$

将两企业水泥市场需求函数 (1) 代入此函数 (5) 可以求解得到:

$$P_i^{(P,P)*} = \frac{S + c_0 + (P_c - \mu)e_0}{2} \quad (6)$$

$$Q_i^{(P,P)*} = \frac{S - c_0 - (\mu + P_c)e_0}{2} \quad (7)$$

$$M_i^{(P,P)*} = \left[\frac{S - c_0 - (\mu + P_c)e_0}{2} \right]^2 + P_c Q_c \quad (8)$$

其中: $i = 1, 2$ 。

II 组合为 (P, R), 即水泥企业 A 选择不进行减排投入而在碳市场上购买配额, 水泥企业 B 选择进行减排并将剩余碳配额出售获取碳排放权交易收益。那么, 水泥企业 A 的决策函数为:

$$\text{Max} M_1^{(P,R)} = (P_1^{(P,R)} - c_0) \times Q_1^{(P,R)} - P_c \times (Q_1^{(P,R)} \times e_0 - Q_c) \quad (9)$$

进行碳减排的水泥企业 B 的决策函数为:

$$\text{Max} M_2^{(P,R)} = (P_2^{(P,R)} - c_1) \times Q_2^{(P,R)} + P_c \times (Q_c - Q_2^{(P,R)} \times e_1) \quad (10)$$

通过对模型求解可以得到:

$$P_1^{(P,R)*} = \frac{S + c_0 + (P_c - \mu)e_0}{2} \quad (11)$$

$$Q_1^{(P,R)*} = \frac{S - c_0 - (\mu + P_c)e_0}{2} \quad (12)$$

$$M_1^{(P,R)*} = \left[\frac{S - c_0 - (\mu + P_c)e_0}{2} \right]^2 + P_c Q_c \quad (13)$$

$$P_2^{(P,R)*} = \frac{S + c_1 + (P_c - \mu)e_1}{2} \quad (14)$$

$$Q_2^{(P,R)*} = \frac{S - c_1 - (\mu + P_c)e_1}{2} \quad (15)$$

$$M_2^{(P,R)*} = \left[\frac{S - c_1 - (\mu + P_c)e_1}{2} \right]^2 + P_c Q_c \quad (16)$$

III 组合为 (R, P), 与 II 组合恰好相反, 水泥企业 A 选择减排生产并将剩余的碳配额在碳交易市场上

出售获得收益, 水泥企业 B 则选择不减排而在碳交易市场上购买碳配额。此时只需将 II 组合的决策交换结果即可得到此种组合下两企业最优决策为:

$$P_1^{(R,P)*} = \frac{S + c_1 + (P_c - \mu)e_1}{2} \quad (17)$$

$$Q_1^{(R,P)*} = \frac{S - c_1 - (\mu + P_c)e_1}{2} \quad (18)$$

$$M_1^{(R,P)*} = \left[\frac{S - c_1 - (\mu + P_c)e_1}{2} \right]^2 + P_c Q_c \quad (19)$$

$$P_2^{(R,P)*} = \frac{S + c_0 + (P_c - \mu)e_0}{2} \quad (20)$$

$$Q_2^{(R,P)*} = \frac{S - c_0 - (\mu + P_c)e_0}{2} \quad (21)$$

$$M_2^{(R,P)*} = \left[\frac{S - c_0 - (\mu + P_c)e_0}{2} \right]^2 + P_c Q_c \quad (22)$$

IV 组合为 (R, R), 表示水泥企业 A 与水泥企业 B 均选择进行碳减排, 由于两个企业无差异, 可认为两者的碳减排量相等^[15]。此时两企业的决策函数为:

$$\text{Max} M_i^{(R,R)} = (P_i^{(R,R)} - c_i) \times Q_i^{(R,R)} + P_c \times (Q_c - Q_i^{(R,R)} \times e_i), i = 1, 2 \quad (23)$$

对模型求解可以得到:

$$P_i^{(R,R)*} = \frac{S + c_i + (P_c - \mu)e_i}{2} \quad (24)$$

$$Q_i^{(R,R)*} = \frac{S - c_i - (\mu + P_c)e_i}{2} \quad (25)$$

$$M_i^{(R,R)*} = \left[\frac{S - c_i - (\mu + P_c)e_i}{2} \right]^2 + P_c Q_c \quad (26)$$

其中, $i = 1, 2$ 。

两个水泥企业碳减排决策的博弈支付矩阵, 如表 2 所示。

表 2 水泥企业 A、B 博弈支付矩阵

		水泥企业 B	
		购买 (P)	减排 (R)
水泥企业 A	购买 (P)	$(M_1^{(P,P)*}, M_2^{(P,P)*})$	$(M_1^{(P,R)*}, M_2^{(P,R)*})$
	减排 (R)	$(M_1^{(R,P)*}, M_2^{(R,P)*})$	$(M_1^{(R,R)*}, M_2^{(R,R)*})$

(四) 演化博弈结果分析

演化博弈分析假定博弈主体具有有限理性的特征, 无法确定博弈过程中自身策略是否达到最优状态, 因而只能通过动态模仿的方式不断调整自身策略, 以最终达到最优的稳定状态。

1. 模型演化过程中的均衡点

在博弈模型中,假设水泥企业 A 选择碳减排(R)的比率为 λ ($0 \leq \lambda \leq 1$),则其选择不减排而是直接购买碳配额(P)的比率为 $1-\lambda$;水泥企业 B 选择碳减排(R)的比率为 θ ($0 \leq \theta \leq 1$),则其选择不减排而是购买碳配额(P)的比率为 $1-\theta$ 。

那么,对于水泥企业 A 和水泥企业 B,选择进行碳减排并出售碳配额的期望收益分别为:

$$E_{1R} = \theta M_1^{(R,R)*} + (1-\theta) M_1^{(P,R)*} \quad (27)$$

$$E_{2R} = \lambda M_2^{(R,R)*} + (1-\lambda) M_2^{(P,R)*} \quad (28)$$

选择不进行碳减排而需购买碳配额这一策略的期望收益分别为:

$$E_{1P} = \theta M_1^{(P,R)*} + (1-\theta) M_1^{(P,P)*} \quad (29)$$

$$E_{2P} = \lambda M_2^{(P,R)*} + (1-\lambda) M_2^{(P,P)*} \quad (30)$$

则有,水泥企业 A 和水泥企业 B 的平均期望收益分别为:

$$\bar{E}_1 = \lambda E_{1R} + (1-\lambda) E_{1P} \quad (31)$$

$$\bar{E}_2 = \theta E_{2R} + (1-\theta) E_{2P} \quad (32)$$

由(31)(32)可以得到水泥企业 A 和水泥企业 B 策略选择的动态复制方程分别为:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \lambda(E_{1R} - \bar{E}_1) = \lambda(1-\lambda)[\theta(M_1^{(R,R)*} - M_1^{(P,R)*}) + (1-\theta)(M_1^{(R,P)*} - M_1^{(P,P)*})] \quad (33)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \theta(E_{2R} - \bar{E}_2) = \theta(1-\theta)[\lambda(M_2^{(R,R)*} - M_2^{(P,R)*}) + (1-\lambda)(M_2^{(P,R)*} - M_2^{(P,P)*})] \quad (34)$$

将(33)(34)联立成微分方程式,可以构成两个博弈主体的二维动态系统如下所示:

$$\begin{cases} F(\lambda) = \frac{d\lambda}{dt} = \lambda(E_{1R} - \bar{E}_1) = \\ \lambda(1-\lambda)[\theta(M_1^{(R,R)*} - M_1^{(P,R)*}) + \\ (1-\theta)(M_1^{(R,P)*} - M_1^{(P,P)*})] \\ F(\theta) = \frac{d\theta}{dt} = \theta(E_{2R} - \bar{E}_2) = \\ \theta(1-\theta)[\lambda(M_2^{(R,R)*} - M_2^{(P,R)*}) + \\ (1-\lambda)(M_2^{(P,R)*} - M_2^{(P,P)*})] \end{cases} \quad (35)$$

对于二维动态系统方程式(35),若要使博弈参与双方获得演化稳定策略,必须同时满足:

$$F(\lambda) = \frac{d\lambda}{dt} = 0; F(\theta) = \frac{d\theta}{dt} = 0 \quad (36)$$

显然我们可以得到 $\lambda=0$ 或 $1, \theta=0$ 或 1 。则 $(0,0)(0,1)(1,0)(1,1)$ 为该系统的均衡点。

当 $\lambda \neq 0$ 且 $\lambda \neq 1$ 时,要是使 $\frac{d\lambda}{dt} = 0$, 则有 θ

$$(M_1^{(R,R)*} - M_1^{(P,R)*}) + (1-\theta)(M_1^{(R,P)*} - M_1^{(P,P)*}) = 0,$$

$$\text{此时, } \theta_0 = \frac{M_1^{(P,P)*} - M_1^{(R,P)*}}{M_1^{(R,R)*} + M_1^{(P,P)*} - M_1^{(R,P)*} - M_1^{(P,R)*}}$$

$$\text{当 } \theta \neq 0 \text{ 且 } \theta \neq 1 \text{ 时,要使 } \frac{d\theta}{dt} = 0, \text{ 则有 } \lambda(M_2^{(R,R)*} - M_2^{(P,R)*}) + (1-\lambda)(M_2^{(P,R)*} - M_2^{(P,P)*}) = 0,$$

$$\text{此时, } \lambda_0 = \frac{M_2^{(P,P)*} - M_2^{(R,P)*}}{M_2^{(R,R)*} + M_2^{(P,P)*} - M_2^{(R,P)*} - M_2^{(P,R)*}};$$

即 (λ_0, θ_0) 也是该二维动力系统的均衡点。

2. 模型均衡点的稳定性分析

演化博弈的方法主要就是分析博弈主体的均衡点及其稳定性^[16]。根据 Friedman 提出的平衡点稳定性验证方法,我们可以通过计算动力系统的雅可比(Jacobi)矩阵来分析系统均衡点的稳定性:若某一均衡点的 Jacobi 行列式大于零,且 Jacobi 矩阵的迹小于零,那么此均衡点就是演化稳定策略(ESS)^[17]。

该系统的 Jacobi 矩阵 J 为:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial F(\lambda)}{\partial \lambda} & \frac{\partial F(\lambda)}{\partial \theta} \\ \frac{\partial F(\theta)}{\partial \lambda} & \frac{\partial F(\theta)}{\partial \theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \quad (37)$$

其中:

$$a_{11} = (1-2\lambda)[\theta(M_1^{(R,R)*} - M_1^{(P,R)*}) + (1-\theta)(M_1^{(R,P)*} - M_1^{(P,P)*})]$$

$$a_{12} = \lambda(1-\lambda)(M_1^{(R,R)*} - M_1^{(P,R)*} - M_1^{(R,P)*} + M_1^{(P,P)*})$$

$$a_{21} = \theta(1-\theta)(M_2^{(R,R)*} - M_2^{(P,R)*} - M_2^{(P,R)*} + M_2^{(P,P)*})$$

$$a_{22} = (1-2\theta)[\lambda(M_2^{(R,R)*} - M_2^{(P,R)*}) + (1-\lambda)(M_2^{(P,R)*} - M_2^{(P,P)*})]$$

将均衡点 $(0,0)$ 、 $(0,1)$ 、 $(1,0)$ 、 $(1,1)$ 以及 (λ_0, θ_0) 代入 Jacobi 矩阵 J 求得所对应的 Jacobi 矩阵,并求出矩阵的迹 $\text{tr}(J)$ 和行列式的值 $\det(J)$,同时满足以下两个条件的均衡点就是系统演化的稳定策略(ESS):

$$\textcircled{1} \text{tr}(J) = a_{11} + a_{22} < 0$$

$$\textcircled{2} \det(J) = a_{11} \times a_{22} - a_{12} \times a_{21} > 0$$

则上述 5 个平衡点所对应的 $\text{tr}(J)$ 和 $\det(J)$ 结果,如表 3 所示。

在表 3 中,均衡点 (λ_0, θ_0) 处出现了 $\text{tr}(J) = 0$ 的情况,这显然不符合条件 $\textcircled{1}$,因此 (λ_0, θ_0) 肯定不是该系统演化的稳定点,因此,接下来只需对其他四个均衡点的稳定性进行分析。

表 3 均衡点 Jacobi 矩阵的行列式值和迹

平衡点	$\det(J)$	$\text{tr}(J)$
$(0,0)$	$(M_1^{(R,P)*} - M_1^{(P,P)*})(M_2^{(P,P)*} - M_2^{(R,P)*})$	$M_1^{(R,P)*} - M_1^{(P,P)*} + M_2^{(P,P)*} - M_2^{(R,P)*}$
$(0,1)$	$(M_1^{(R,R)*} - M_1^{(P,R)*})(M_2^{(P,P)*} - M_2^{(R,R)*})$	$M_1^{(R,R)*} - M_1^{(P,R)*} + M_2^{(P,P)*} - M_2^{(R,R)*}$
$(1,0)$	$(M_1^{(P,P)*} - M_1^{(R,P)*})(M_2^{(R,R)*} - M_2^{(P,R)*})$	$M_1^{(P,P)*} - M_1^{(R,P)*} + M_2^{(R,R)*} - M_2^{(P,R)*}$
$(1,1)$	$(M_1^{(P,R)*} - M_1^{(R,R)*})(M_2^{(R,P)*} - M_2^{(R,R)*})$	$M_1^{(P,R)*} - M_1^{(R,R)*} + M_2^{(R,P)*} - M_2^{(R,R)*}$
(λ_0, θ_0)	Φ	0

$$\text{其中, } \Phi = \frac{-(M_2^{(P,P)*} - M_2^{(R,R)*})(M_2^{(R,R)*} - M_2^{(R,P)*})(M_1^{(P,P)*} - M_1^{(R,P)*})(M_1^{(R,R)*} - M_1^{(P,R)*})}{(M_2^{(P,P)*} - M_2^{(R,R)*} + M_2^{(R,R)*} - M_2^{(R,P)*})(M_1^{(P,P)*} - M_1^{(R,P)*} + M_1^{(R,R)*} - M_1^{(P,R)*})}$$

另外,我们将前面求解得到的四种策略组合下的收益值代入各均衡点可以得到:

$$\begin{aligned} M_1^{(P,P)*} - M_1^{(R,P)*} &= M_1^{(R,R)*} - M_1^{(P,R)*} = \\ M_2^{(P,P)*} - M_2^{(R,R)*} &= M_2^{(R,R)*} - M_2^{(R,P)*} = \\ &= \left[\frac{c_0 - c_1 + (\mu + P_c)(e_0 - e_1)}{2} \right] \times \\ &\quad \left\{ \frac{2S - [c_0 + c_1 + (\mu + P_c)(e_0 + e_1)]}{2} \right\} \end{aligned} \quad (38)$$

各均衡点 Jacobi 矩阵的行列式值和迹由式 (38) 决定。由模型假设我们可以得到,水泥企业选择进行碳减排后,由于技术研发、购买减排设备等碳减排措施,必然会导致单位产品的生产成本增加,即 $c_1 > c_0$; 同样地,企业进行碳减排后单位产品的碳排放量必然会小于企业不进行碳减排时的单位产品碳减排量,即 $e_0 > e_1$ 。

又有 $Q_1^{(P,P)*} + Q_1^{(R,P)*} = Q_1^{(R,R)*} + Q_1^{(P,R)*} = 2S - \frac{[c_0 + c_1 + (\mu + P_c)(e_0 + e_1)]}{2} > 0$, 则表 3 中行列式值

和迹的符号由 $c_1 - c_0 < (\mu + P_c)(e_0 - e_1)$ 决定,我们假设 $c_0 - c_1 + (\mu + P_c)(e_0 - e_1) > 0$, 可得: $c_1 - c_0 < (\mu + P_c)(e_0 - e_1)$ 。因此在分析演化稳定点时出现了两种情况:第一种情况为 $\frac{c_1 - c_0}{e_0 - e_1} < \mu + P_c$; 第二种情况为 $\frac{c_1 - c_0}{e_0 - e_1} >$

$\mu + P_c$ 。两种情况的分析结果,如表 4 所示。

表 4 水泥企业 A、B 博弈系统局部稳定性分析结果

点	第一种情况			第二种情况		
	$\det(J)$	$\text{tr}(J)$	均衡结果	$\det(J)$	$\text{tr}(J)$	均衡结果
$(0,0)$	+	+	不稳定	+	-	稳定
$(0,1)$	-	-	不稳定	-	-	不稳定
$(1,0)$	-	-	不稳定	-	-	不稳定
$(1,1)$	+	-	稳定	+	+	不稳定
(λ_0, θ_0)	非平衡非稳定点			非平衡非稳定点		

3. 稳定性结果分析

根据表 4 中平衡点的稳定性情况分析,可以发现,存在以下两种稳定的均衡情况:

第一种情况下, $\frac{c_1 - c_0}{e_0 - e_1} < \mu + P_c$, 系统中存在着

唯一的演化稳定点 $(1,1)$ 。这说明两个水泥企业之间的博弈动力系统最终将演化成 $(1,1)$ 这种状态,即水泥企业 A 与水泥企业 B 均选择碳减排行动,从而做出低碳生产的决策,并将因碳减排而剩余的部分

碳配额出售以获得碳交易收益。其中, $\frac{c_1 - c_0}{e_0 - e_1}$ 表示单位碳减排成本(即减少一单位碳排放量所要承担的碳减排成本),当单位碳减排成本小于消费者低碳偏好与市场碳交易价格之和时,市场中的企业都将选择碳减排策略,进行低碳生产,获取碳交易收益。此种情况下的演化相位图,如图 2 所示。

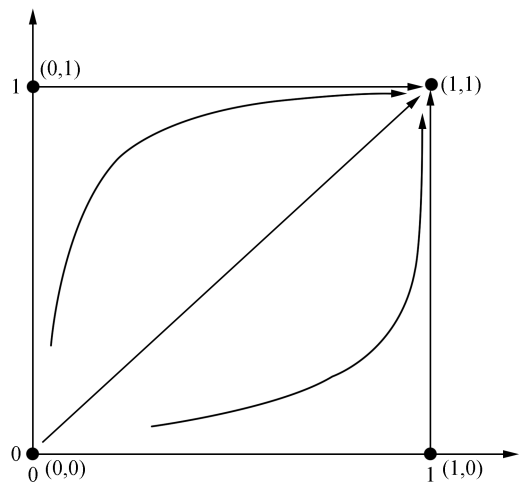


图 2 第一种情况下的演化相位图

当单位碳减排成本小于消费者碳排放敏感系数与市场碳交易价格之和时, $(1,1)$ 是稳定点,两企业经过反复博弈后,最终状态将指向稳定平衡点 $(1,1)$ 达到演化稳定策略,即两企业都选择自行减排。

第二种情况下, $\frac{c_1 - c_0}{e_0 - e_1} > \mu + P_c$, 此时单位碳减排成本大于消费者低碳偏好与市场碳交易价格之和, 系统存在的唯一演化稳定点为(0,0), 这说明在这种情况下两个水泥企业最终都不选择碳减排, 这是不利于环境保护的, 我们应该做出技术上的改进或是政策上的引导。此种情况下的演化相位图, 如图3所示。

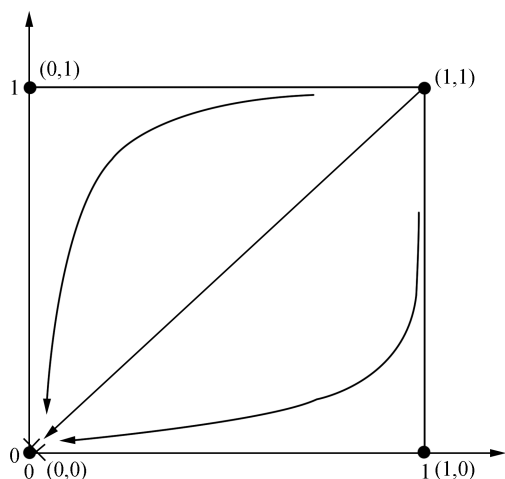


图3 第二种情况下的演化相位图

当单位碳减排成本小于消费者碳排放敏感系数与市场碳交易价格之和时, (0,0)是稳定点, (1,1) (1,0) (0,1)均为不稳定点, 两企业经过反复博弈后, 最终状态将指向稳定平衡点(0,0)达到演化稳定策略, 即两企业都选择不安排减排生产而是在市场上购买配额。

四 结论与建议

(一) 主要结论

本文通过建立两个水泥企业之间的演化博弈模型, 对水泥企业在碳排放权交易机制下的减排生产策略选择进行分析。分析结果表明: 水泥企业是否选择在生产过程中加大减排投入的策略主要依赖于其单位碳减排成本与消费者对低碳产品(主要是低碳水泥)的偏好系数和碳交易市场上的碳价之和之间的大小比较。若水泥企业的单位碳减排成本大于消费者对低碳产品的偏好系数和碳价之和, 企业倾向于选择在生产过程中不进行碳减排的投入而是直接在碳交易市场上购买碳配额; 若水泥企业的单位碳减排成本小于消费者对低碳产品的偏好和碳价之和, 企业则会倾向于安排加大投入进行自行碳减排的生产决策, 并将剩余的碳配额在碳交易市场上售卖以获得碳排放权交易收益。当消费者对低碳产品

的偏好确定且碳价稳定时, 则随着单位碳减排成本的增加, 两水泥企业会依次出现(减排, 减排)、(减排, 购买)、(购买, 减排)、(购买, 购买)等策略共存的均衡演化稳定的过程; 由于水泥企业减排技术的局限性, 当单位碳减排成本固定且碳交易市场上的碳价一定时, 随着消费者对低碳产品的偏好程度的增加, 两水泥企业则会依次出现(购买, 购买)、(购买, 减排)、(减排, 购买)、(减排, 减排)等策略共存的均衡演化稳定的过程; 同样地, 当单位碳减排成本固定且消费者对低碳产品的偏好程度确定时, 随着碳价的增加, 两水泥企业则会依次出现(购买, 购买)、(购买, 减排)、(减排, 购买)、(减排, 减排)等策略共存的均衡演化稳定的过程。

(二) 对水泥企业减排投资的建议

对于水泥企业来讲, 应从降低单位碳减排成本的角度出发, 在生产过程中积极采取碳减排措施, 减少企业二氧化碳的排放总量, 从而获得碳配额交易收益。

1. 积极开展对低碳生产技术和减排技术的研究。如碳捕集和碳封存(CCS)技术的应用, 该技术在二氧化碳排放时即将其捕捉, 然后压缩成液体二氧化碳, 通过管道运输至地下永久储存。CCS技术目前单位碳减排成本较高, 但若是能将这项技术在水泥企业的生产工艺中大力推广, 形成规模效应, 将大幅度降低其单位碳减排成本。

2. 从水泥生产工艺出发, 追踪整个产品生命周期的碳元素流, 针对碳排放量较高的重点生产工艺对其进行碳减排改造。同时, 水泥行业应大力推动各企业提高能源效率, 尽量使用清洁能源并开发新能源, 运用最先进最节能的水泥生产线生产技术, 提升水泥窑余热发电的效率, 从“开源节流”的思路出发实施减排行动。

3. 调整水泥产品结构, 提高水泥强度等级, 节省水泥原料用量。淘汰落后的产能, 大力发展低碳水泥的生产, 以迎合消费者对低碳产品日益增加的偏好, 同时也可以研发可替代水泥的新型建材和水泥制品, 从根源上降低二氧化碳的排放。

(三) 对政府制定减排政策的建议

对于政府来说, 应从消费者低碳偏好和碳交易价格上做出正确的引导和规范。

1. 建立健全完善的碳交易市场机制, 保证碳交易价格处于一个合理的稳定范围, 从而积极引导企业进行碳减排活动; 同时充分考虑水泥行业特征, 对初始碳配额的分配量和分配方法进行研究, 保证碳交易市场机制能够有效激励水泥企业选择碳减排决策。

2. 鼓励企业发展低碳技术,确保水泥行业实现碳减排目标。促进水泥企业间的减排技术交流合作,形成整个水泥行业间的低碳生产氛围,并对选择碳减排决策的企业提供适当的政府补贴,以降低企业减排成本。

3. 联合水泥企业开展不同形式的低碳宣传行动,强调环保意识,不断强化消费者对低碳产品 and 水泥企业碳减排行动的认可和偏好。

[参考文献]

- [1] 石敏俊,袁永娜,周晟吕,等. 碳减排政策:碳税、碳交易还是两者兼之? [J]. 管理科学学报,2013(9): 9-19.
- [2] 董战峰,郝春旭,葛察忠,等. 环境经济政策年度报告2018[J]. 环境经济,2019(7): 12-39.
- [3] 李奇伟. 中国碳排放权交易试点履约期的市场特征与政策启示[J]. 中国科技论坛,2015(5): 128-134.
- [4] 李志学,张肖杰,董英宇. 中国碳排放权交易市场运行状况、问题和对策研究[J]. 生态环境学报,2014(11): 1876-1882.
- [5] BERNARD A, HAURIE A, VIELLE M, et al. A two-level dynamic game of carbon emission trading between Russia, China, and Annex B countries[J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 2008, 32(6): 1830-1856.
- [6] HE D, GAO J. Carbon Abatement Game between Regulator and Firms[J]. Energy Procedia,2011(5): 1859-1863.
- [7] 肖潇. 碳排放交易的国际经济博弈模型初探[J]. 河北经贸大学学报, 2010, 31(4): 80-83.
- [8] 郭微微,孙泽厚. 政府与企业生态责任的演化博弈分析[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2018(6): 610-614.
- [9] 吴士健,孙向彦,杨萍. 双重治理体制下政府碳排放监管博弈分析[J]. 中国人口·资源与环境,2017,27(12):21-30.
- [10] 焦建玲,陈洁,李兰兰,等. 碳减排奖惩机制下地方政府和企业行为演化博弈分析[J]. 中国管理科学, 2017, 25(10): 140-150.
- [11] 张凯泽,沈菊琴,徐沙沙,孙付华. 碳排放监管中政府与企业演化博弈及策略研究:基于第三方监督视角[J]. 重庆大学学报(社会科学版),2019(4): 1-13.
- [12] 汪明月,刘宇,等. 区域合作减排策略选择及提升对策研究[J]. 运筹与管理,2019(5): 35-45.
- [13] 赵金兰,赵峙杰. 水泥企业的碳资产管理研究[J]. 水泥,2018(5): 5-10.
- [14] 闫力. 水泥行业碳排放管理体系亟待建立健全[J]. 中国水泥,2017(9): 53-55.
- [15] 郭军华,孙林洋,张诚,等. 碳限额交易政策下双寡头企业碳减排决策的演化博弈分析[J]. 软科学,2019(3):54-60.
- [16] 邓万江,马士华,关旭. 碳交易背景下存在顾客环保偏好的双企业竞争策略研究[J]. 中国管理科学, 2017(12):17-26.
- [17] FRIEDMAN D. Evolutionary game in economics[J]. Econometrica,1991, 59(3): 637-666.

Selection of Carbon Emission Reduction Decisions in Cement Enterprises Based on Evolutionary Game Analysis

ZHANG Cai-ping, PAN Jie, TAN De-ming

(University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: Faced with increasingly stringent carbon emission control, should enterprises increase investment in emission reduction or directly buy quotas in the carbon trading market, so as to achieve the lowest carbon cost and maximize the benefits of carbon emission reduction? This paper intends to establish a game model for the carbon emission reduction strategies of AB cement enterprises. Through the evolutionary game analysis of this model, it finds out the key factors influencing the low-carbon emission reduction decisions of enterprises. The results show that whether cement enterprises choose to increase emission reduction investment in the production process depends on the comparison between their unit carbon emission reduction cost and consumers' preference for low-carbon products and the sum of carbon price. Therefore, to achieve the goal of low cost emission reduction, cement enterprises should actively carry out the research and development of low carbon production technology and emission reduction technology, track the carbon element flow of the whole product life cycle, and carry out carbon emission reduction transformation for the key production process with high carbon emission. The government needs to accelerate the construction of carbon trading market to provide a stable market environment for enterprises to participate in carbon trading. At the same time, the promotion of low-carbon products should be enhanced to strengthen consumers' recognition of low-carbon products and carbon emission reduction actions of cement enterprises.

Key words: evolutionary game analysis; carbon market; carbon reduction; cement enterprises