



低碳供应链企业 减排合作策略研究

谢鑫鹏^{1,2}, 赵道致¹

1 天津大学 管理与经济学部, 天津 300072

2 军事交通学院 汽车工程系, 天津 300161

摘要:基于清洁发展机制,探讨国有大型制造型企业在面临政府的碳排放规制时如何与供应链中上、下游企业进行生产和减排决策,运用新古典经济学和博弈论的方法分析上、下游企业在3种不同合作情况下的减排效果和利润,对企业在减排过程中的相互作用、碳交易价格对减排效果的影响以及社会福利的比较等问题进行深入讨论。研究结果表明,在减排和定价均合作时各主体的利润和减排效果均最优,制造型企业在低碳化的进程中应首先瞄准碳排放量大的企业,并从其所处供应链的上游企业着手;碳交易价格随企业边际减排成本的高低而对其产生不同的影响,企业在追求利润最大化的同时会产生更多的碳排放,若要减少排放总量,必须减少一定的产量。上述结论为制造型企业做出合理的减排决策提供一定的智力支持。

关键词:减排率;碳交易价格;边际效用;碳配额分配策略;社会福利

中图分类号:F274

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1672-0334.2013.03.011

文章编号:1672-0334(2013)03-0108-12

1 引言

从1997年的京都议定书到2010年的哥本哈根气候大会,国际社会开始更多地关注全球气候变化问题。资源的过度使用迫使人类为扩大再生产付出巨大代价,然而最有效的方式就是将生产造成的外部成本内部化,这样才能限制人类对环境的破坏,并最终实现经济与环境的协调发展。

清洁发展机制,简称CDM,是京都议定书中一种灵活的履约机制,它的核心内容是允许附件1的成员(发展中国家)与非附件1成员(发达国家)之间通过项目交易的合作得到核准的碳排放配额(CERs)。在这种框架下,许多企业逐渐考虑碳规制及交易下的最优运营策略,希望实现低碳经济背景下的竞争优势。

中国是CDM的履约国,已经在多个省市建立碳配额交易所,如上海和天津碳交易所。很多大型制

造型企业已经开展碳减排和交易项目,如安阳钢铁集团已完成碳减排目标,实现了能源消耗对钢铁产量的负增长,并把核准的碳配额卖给国外的减排项目合作者。

在低碳背景下,碳排放权与其他生产资源一样成为企业生产和服务的资源投入并且能够带来利润。因此,对碳排放的限制和交易会改变企业的成本构成和赢利模式,并最终影响企业的赢利行为。在企业所处的供应链系统中,碳排放权对不同企业的边际效用不一样,不同企业的边际减排成本也不同。对上述问题的合理解决将为中国制造业在低碳环境下做出明智的减排决策提供一定的借鉴意义。

2 相关研究评述

2.1 政府对碳配额分配政策的研究

庇古^[1]认为在现实社会中存在未赔偿损失所造

收稿日期:2012-08-22 修返日期:2013-05-06

基金项目:国家自然科学基金(71072155)

作者简介:谢鑫鹏(1982-),男,山东泰安人,天津大学管理与经济学部博士研究生,研究方向:供应链管理和低碳经济等。E-mail:xiexinpeng2010@yeah.net

成的私人与社会净产量之间的偏差,消除偏差最明显的方式就是补贴和征税。而 Ronald^[2]并不认为税收的收益应支付给那些受损害者,解决的方案是要保证烟尘污染的合理数额,这就是配额的最大化^[3]。在此基础上,多数学者认为碳排放权分配方式主要有免费分配、公开拍卖和标价出售等,并以前两种方式最为常见^[4]。Bode^[5]以欧洲电力业为背景,研究多周期、存在排放许可条件下的排放权分配问题;张中祥^[6]认为碳排放权交易在国际间比较活跃的原因是边际减排成本在发达和发展中国家间存在巨大差异。

2.2 碳排放约束条件下企业的行为研究

Benjaafar 等^[7]通过对 Informs 出版的诸多国际顶级学术期刊的扩展检索发现,很少有研究同时关注碳排放与生产运营的问题;杜少甫等^[8]和 Zhang 等^[9]分别研究在确定和随机需求下,考虑企业依赖碳排放权交易机制且有多种排放权获取渠道时的生产优化模型;借助 EOQ 模型, Hua 等^[10]研究在确定性需求且仅考虑碳排放权交易机制时企业的最优订货批量问题; Song 等^[11]借助报童模型,分析随机需求下 3 种碳排放政策(强制减排、征收碳税以及碳总量限制和交易)下的企业单周期最优订货量决策的问题;何大义等^[12]运用存储论方法,建立企业在碳排放约束和交易机制下的生产决策模型,得出企业的最优生产、碳排放交易和减排决策。

2.3 考虑碳排放约束条件下供应链运营管理研究

Hoen 等^[13]首先将碳排放成本和碳排放规制引入到供应链运输方式的选择中,研究排放成本和限制两种碳规制对供应链运输模式选择的影响; Benjaafar 等^[14]将碳足迹参数引入到各种优化模型中,分析如何通过运营决策的调整减少碳排放; Carbon Trust^[15]和 Cachon^[16]研究供应链零售商下游网点布局如何在满足碳排放约束的同时使运营成本最小化;张靖江^[17]研究由排放权供应商和排放依赖型生产商构成的两级供应链,给出双方的最优决策和供应链的整体利润; Du 等^[18]考虑在存在碳排放权交易的情况下提出一种新型供应链,基于报童模型分析排放依赖型供应链双方的博弈过程。

综上所述可以看出,上述研究主要分析不同的环境政策对企业行为产生何种影响、企业如何采取减排策略使其自身利润最大化以及减排的溢出效应如何影响相关企业等,对供应链上、下游企业减排合作策略的研究却很少,关于碳交易价格如何影响企业行为以及不同碳配额分配机制如何影响减排效果的研究也很少。本研究将对以上问题进行探讨。

3 情景假设和参数设定

本研究从制造型企业角度分析在政府碳配额分配政策给定条件下,供应链上、下游企业的减排合作问题。为了实现利润最大化,两企业须以减排为决策变量,在自行减排和合作减排之间做出抉择。然而,在不同合作形式下,两企业的减排效果、利润值

和社会福利都不同,而且一个企业的减排效果必然会对另一个企业产生影响。同时,碳交易价格的高低也会对其减排效果产生影响,不同形式的配额分配政策将会得到不同的减排效果。本研究对上述情况进行分析并给出最终的结论。

对不同的产品来说,它们的减排量是没有可比性的。也就是说,产品的清洁度不能以减少碳排放量的多少为标准,因为排放的基准线不同。但是减排效率的大小可以在不同产品间进行比较,因此本研究将选择减排率作为制造型企业的一个决策变量。

3.1 模型建立的相关假设

(1) 供应链存在两个制造型企业,它们都面对政府碳排放的规制。下游企业相对于上游企业来讲是零售商,但同时具有生产能力,可视为具有一定加工能力的零售企业。

(2) 所生产的产品属于必需品,其市场为不完全竞争市场,产品需求是价格的线性函数。

(3) 两企业之间的产品库存为零。

(4) 在某种技术条件下,单位产品的碳排放量是常数。因此,企业总的碳排放量是产量的线性函数。

(5) 减排成本是减排率的单调递增函数,其边际减排成本随减排率的提高而增加。

(6) 减排投资对产品生产成本无影响。

(7) 政府单周期分配的碳配额是外生变量,不能转移到下一周期。

(8) 碳价格由碳交易市场决定,是外生变量。

3.2 相关符号说明

χ_i 为单位产品的初始碳排放量, i 为企业, $i = U, D, U$ 为上游企业, D 为下游企业;

$\Delta\chi_i$ 为单位产品减少的碳排放量;

τ_i 为减排率,某种程度上视为企业减排的效率, $0 \leq \tau_i = \frac{\Delta\chi_i}{\chi_i} < 1$;

p 为产品的零售价格;

Q 为产品的需求;

$E_i(Q)$ 为企业总的碳排放量, $E_i(Q) = \chi_i Q$;

$C(\tau_i)$ 为总的减排成本,根据前面的假设,满足 $C(0) = 0, C(1) = +\infty, C'(\tau_i) > 0, C''(\tau_i) > 0$,不失一般性,假设其为减排率的二次函数,即 $C(\tau_i) = \frac{1}{2}m\tau_i^2$ ^[19-20], m 为减排努力程度, m 越大表示所需减排投资成本越高,反之越低,并且总减排成本与产量无关,为一次性投资成本;

$E_{trading(i)}$ 为碳配额在碳交易市场的交易总量, $E_{trading(i)} < 0$ 表示购买的碳配额, $E_{trading(i)} > 0$ 表示卖出的碳配额;

Z_i 为政府初始分配的碳配额,按照总量分配;

g_i 为政府初始分配的碳配额,按照单位产量分配;

c_i 为单位产品生产成本;

w 为产品的批发价格;

p_c 为碳交易价格;
 N 为市场容量;
 W 为没有考虑外部性的社会福利;
 NC 为完全不合作;
 HC 为半合作;
 TC 为完全合作。

4 模型的建立

对于一个受政府碳排放规制的减排企业,它的利润函数由销售收入 $(w - c_U)Q$ 、碳减排成本 $\frac{1}{2}m\tau_U^2$ 和碳配额交易成本 $E_{trading(U)}p_c$ 3 部分组成。因此,对于上游企业来说,它的利润函数为

$$\Pi_U = (w - c_U)Q - \frac{1}{2}m\tau_U^2 - E_{trading(U)}p_c \quad (1)$$

考虑到碳配额的初始分配和交易,制造型企业的碳配额来源于政府的初始分配额 Z_U 、碳减排量 $\tau_U\chi_U Q$ 和碳市场的交易量 $E_{trading(U)}$ 3 种渠道。同时,制造型企业的最终碳排放量不会超过总的碳配额。

为了寻求利润的最大化,如果企业实际的碳排放量小于政府初始分配的碳配额,它将卖掉多余配额获取利润;如果生产所需的碳配额不够,企业将去碳市场购买所需的配额。因此,企业将充分利用现有的碳配额资源,即

$$\chi_U Q = Z_U + \tau_U\chi_U Q + E_{trading(U)} \quad (2)$$

(2) 式经变换可得

$$E_{trading(U)} = \chi_U Q - Z_U - \tau_U\chi_U Q \quad (3)$$

将(3)式代入(1)式,可得

$$\Pi_U = [w - c_U - \chi_U p_c (1 - \tau_U)]Q - \frac{1}{2}m\tau_U^2 + Z_U p_c \quad (4)$$

假设低碳产品的市场需求满足(5)式,即

$$Q = N - bp \quad (5)$$

其中, b 为需求价格敏感系数。因此上游企业的利润函数最终为

$$\Pi_U = [w - c_U - \chi_U p_c (1 - \tau_U)](N - bp) - \frac{1}{2}m\tau_U^2 + Z_U p_c \quad (6)$$

同样,下游企业的利润函数为

$$\Pi_D = [p - w - c_D - \chi_D p_c (1 - \tau_D)](N - bp) - \frac{1}{2}m\tau_D^2 + Z_D p_c \quad (7)$$

上、下游企业间的博弈分为两阶段,第一阶段是关于减排水平的,第二阶段是关于产品价格的。

根据两企业间不同的合作形式,两阶段博弈可分成3种形式。第一种是完全不合作,即两个主体在价格和减排上均不合作,两企业均以各自利润最大化为目标决策自己的价格和减排投资额,其中下游企业要根据上游企业的批发价格决定产品价格,但它们各自决定自己的减排率;第二种是半合作,即在定价上不合作,在减排上合作,两企业均以各自利润最大化为目标决策产品的价格,但以整个供应链利润最大化为目标决策减排投资额;第三种是完全合作,即两企业间已建立了一种充分信任的合作关系,批发价格已不存在,它们将以整个供应链利润最大化为目标决策产品的零售价格和减排投资额。

下面将根据逆向归纳法求解这一问题,3种形式的博弈过程如图1所示。

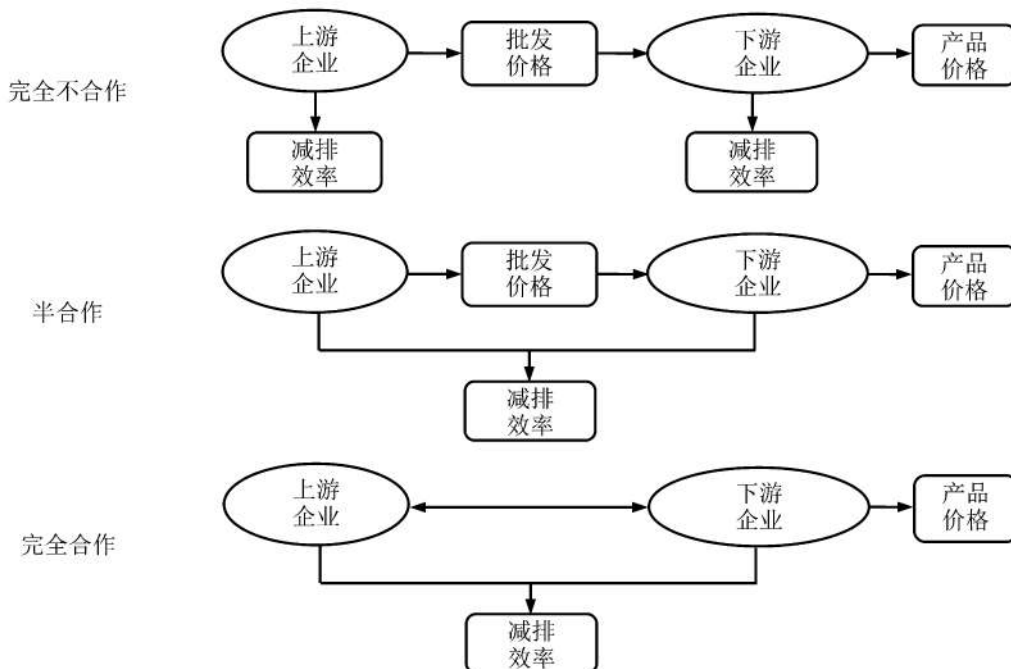


图1 3种形式的博弈过程
 Figure 1 Game Process of Three Forms

4.1 第一种形式:完全不合作

下游企业为了实现利润最大化,将决策产品的销售价格。令 $\frac{\partial \Pi_D}{\partial p} = (N - bp) - b[p - w - c_D - \chi_D p_c(1 - \tau_D)]$

= 0, 可得 p_{NC}^* 和 Q_{NC}^* , 将其代入(6)式, 并令 $\frac{\partial \Pi_U}{\partial w} = 0$, 得

$$w_{NC}^* = \frac{N + b[c_U - c_D + \chi_U p_c(1 - \tau_U) - \chi_D p_c(1 - \tau_D)]}{2b} \quad (8)$$

$$p_{NC}^* = \frac{3N + b[c_U + c_D + \chi_U p_c(1 - \tau_U) + \chi_D p_c(1 - \tau_D)]}{4b} \quad (9)$$

$$Q_{NC}^* = \frac{N - b[c_U + c_D + \chi_U p_c(1 - \tau_U) + \chi_D p_c(1 - \tau_D)]}{4} \quad (10)$$

将(10)式代入两个企业的利润函数中, 并求 Π_i 对 τ_i 的一阶偏导数, 均满足 $\frac{\partial \Pi_i}{\partial \tau_i} < 0$, 因此可令其一阶导数等于零, 得到减排率满足

$$\begin{cases} \tau_U = \frac{\chi_U p_c \{N - b[c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c(1 - \tau_D)]\}}{4m - b\chi_U^2 p_c^2} \\ \tau_D = \frac{\chi_D p_c \{N - b[c_U + c_D + \chi_D p_c + \chi_U p_c(1 - \tau_U)]\}}{8m - b\chi_D^2 p_c^2} \end{cases} \quad (11)$$

解(11)式, 得到上、下游企业的最优减排率为

$$\begin{cases} \tau_{U(NC)}^* = \frac{2\chi_U p_c [N - b(c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c)]}{8m - bp_c^2(\chi_D^2 + 2\chi_U^2)} \\ \tau_{D(NC)}^* = \frac{\chi_D p_c [N - b(c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c)]}{8m - bp_c^2(\chi_D^2 + 2\chi_U^2)} \end{cases} \quad (12)$$

由(12)式可知, 当 χ_U 与 χ_D 相等时, 上游企业的减排率大于下游企业。

4.2 第二种形式:半合作

在半合作形式中, 上、下游企业共同决策减排投资额, 但各自决策产品价格。也就是说, 第二阶段的博弈与完全不合作的情况相同。因此, 所得的产品价格、需求、批发价格与(8)式~(10)式相同。

在第一阶段, 为了实现供应链总体利润的最大化, 上、下游企业共同决策减排投资额。此时, 两企业及供应链的利润函数为

$$\Pi_{U(HC)} = \frac{\{N - b[c_U + c_D + \chi_U p_c(1 - \tau_U) + \chi_D p_c(1 - \tau_D)]\}^2}{8b} - \frac{1}{2}m\tau_U^2 + Z_U p_c$$

$$\Pi_{D(HC)} = \frac{\{N - b[c_U + c_D + \chi_U p_c(1 - \tau_U) + \chi_D p_c(1 - \tau_D)]\}^2}{16b} - \frac{1}{2}m\tau_D^2 + Z_D p_c$$

$$\Pi_{(HC)} = \frac{3\{N - b[c_U + c_D + \chi_U p_c(1 - \tau_U) + \chi_D p_c(1 - \tau_D)]\}^2}{16b} -$$

$$\frac{1}{2}m(\tau_U^2 + \tau_D^2) + (Z_U + Z_D)p_c \quad (13)$$

分别对上、下游企业的减排率求一阶偏导数。由于其海赛矩阵满足

$$\begin{aligned} H_{(HC)} &= \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_{(HC)}}{\partial \tau_U^2} & \frac{\partial^2 \Pi_{(HC)}}{\partial \tau_U \cdot \partial \tau_D} \\ \frac{\partial^2 \Pi_{(HC)}}{\partial \tau_D \cdot \partial \tau_U} & \frac{\partial^2 \Pi_{(HC)}}{\partial \tau_D^2} \end{vmatrix} \\ &= \begin{vmatrix} \frac{3b\chi_U^2 p_c^2}{8} - m & \frac{3b\chi_U \chi_D p_c^2}{8} \\ \frac{3b\chi_U \chi_D p_c^2}{8} & \frac{3b\chi_D^2 p_c^2}{8} - m \end{vmatrix} \\ |H_{(HC)}| &= \frac{\partial^2 \Pi_{(HC)}}{\partial \tau_U^2} \cdot \frac{\partial^2 \Pi_{(HC)}}{\partial \tau_D^2} - \frac{\partial^2 \Pi_{(HC)}}{\partial \tau_U \cdot \partial \tau_D} \cdot \frac{\partial^2 \Pi_{(HC)}}{\partial \tau_D \cdot \partial \tau_U} \\ &= m \left[m - \frac{3bp_c^2(\chi_U^2 + \chi_D^2)}{8} \right] > 0 \end{aligned}$$

因此存在局部最优值。令供应链整体利润对减排率的一阶偏导数等于零并解方程组, 得到在半合作形式下上、下游企业的最优减排率为

$$\begin{cases} \tau_{U(HC)}^* = \frac{3\chi_U p_c [N - b(c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c)]}{8m - 3bp_c^2(\chi_D^2 + \chi_U^2)} \\ \tau_{D(HC)}^* = \frac{3\chi_D p_c [N - b(c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c)]}{8m - 3bp_c^2(\chi_D^2 + \chi_U^2)} \end{cases} \quad (14)$$

4.3 第三种形式:完全合作

在这种形式下, 上、下游企业已经建立了一种充分信任的合作关系, 它们可以联合起来对产品价格和减排率做决策。在第二阶段, 上、下游企业共同决策产品的销售价格, 此时整个供应链的利润函数为

$$\begin{aligned} \Pi_{(TC)} &= \{p - [c_U + c_D + \chi_U p_c(1 - \tau_U) + \chi_D p_c(1 - \tau_D)]\} (N - bp) - \\ &\frac{1}{2}m(\tau_U^2 + \tau_D^2) + (Z_U + Z_D)p_c \end{aligned} \quad (15)$$

令 $\frac{\partial \Pi_{(TC)}}{\partial p} = 0$, 得到

$$p_{(TC)}^* = \frac{N + b[c_U + c_D + \chi_U p_c(1 - \tau_U) + \chi_D p_c(1 - \tau_D)]}{2b} \quad (16)$$

$$Q_{(TC)}^* = \frac{N - b[c_U + c_D + \chi_U p_c(1 - \tau_U) + \chi_D p_c(1 - \tau_D)]}{2} \quad (17)$$

将(16)式和(17)式代入(15)式, 得到供应链整体的最优利润值。分别求其对减排率的一阶偏导数, 由于其海赛矩阵满足

$$H_{(TC)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_{(TC)}}{\partial \tau_U^2} & \frac{\partial^2 \Pi_{(TC)}}{\partial \tau_U \cdot \partial \tau_D} \\ \frac{\partial^2 \Pi_{(TC)}}{\partial \tau_D \cdot \partial \tau_U} & \frac{\partial^2 \Pi_{(TC)}}{\partial \tau_D^2} \end{vmatrix}$$

$$|H_{(TC)}| = \begin{vmatrix} \frac{b\chi_U^2 p_c^2}{2} - m & \frac{b\chi_U \chi_D p_c^2}{2} \\ \frac{b\chi_U \chi_D p_c^2}{2} & \frac{b\chi_D^2 p_c^2}{2} - m \end{vmatrix}$$

$$= \frac{\partial^2 \Pi_{(TC)}}{\partial \tau_U^2} \cdot \frac{\partial^2 \Pi_{(TC)}}{\partial \tau_D^2} - \frac{\partial^2 \Pi_{(TC)}}{\partial \tau_U \cdot \partial \tau_D} \cdot \frac{\partial^2 \Pi_{(TC)}}{\partial \tau_D \cdot \partial \tau_U}$$

$$= m \left[m - \frac{bp_c^2(\chi_U^2 + \chi_D^2)}{2} \right] > 0$$

因此存在局部最优值。令供应链整体利润对减排率的一阶偏导数等于零并解方程组,得到完全合作形式下上、下游企业的最优减排率为

$$\begin{cases} \tau_{U(TC)}^* = \frac{\chi_U p_c [N - b(c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c)]}{2m - bp_c^2(\chi_D^2 + \chi_U^2)} \\ \tau_{D(TC)}^* = \frac{\chi_D p_c [N - b(c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c)]}{2m - bp_c^2(\chi_D^2 + \chi_U^2)} \end{cases} \quad (18)$$

5 分析和讨论

5.1 供应链上、下游企业的相互影响

(1) 减排的努力程度

由于减排率表示减少的碳排放量对初始碳排放量的比率,它应该是一个小于1的量。因此由(11)式可得

$$4m > \chi_U p_c \{N - b[c_U + c_D + \chi_D p_c(1 - \tau_D)]\} \quad (19)$$

$$8m > \chi_D p_c \{N - b[c_U + c_D + \chi_U p_c(1 - \tau_U)]\} \quad (20)$$

在(19)式和(20)式中,可以将 $N - b[\sum_{i=1}^2 c_i + \chi_i p_c(1 - \tau_i)]$ 看做一种产品的需求,它的大小是当上游(下游)企业减排同时另一个企业不赢利时所得的需求再乘以 $\chi_i p_c$,表示这些需求所产生的碳排放额完全通过碳交易市场购买时所需的金额。只有当减排努力程度 m 大于上述碳配额购买成本时,减排率才能够实现。 m 为减排的难易程度,其值越大,所需的减排投资越高,减排难度越大;相反,其值越小,所需的减排投资越低,越容易减排^[21-22]。这表明减排努力程度必须大于某一数值时,减排才有意义。

(2) 其他条件相同时上游企业比下游企业更容易减排

通过比较上、下游企业的减排率可以看出,当其他条件相同时,下游企业减排比上游企业更加困难。这是因为如果减排努力系数相等,上游企业将会取得比下游企业更高的减排率。换句话说,为了获得相同的减排率,上游企业需要投入更多的资金。因此如果要减少碳排放,当单位产品的碳排放相同时,应该从供应链的源头抓起,相同的减排投资额在上游企业会取得较大的减排效果。

(3) 一个企业的减排能够促进另一个企业的减排

由(19)式可知,下游企业减排率的提高会使上游企业取得相同减排率的难度增加。要取得原有的减排率,上游企业必须增加减排投资额,这是因为上

游企业分担了部分下游企业的减排成本。在极端的情况下,如果下游企业不减排也没有碳交易,上游企业的减排率将会大大提高。这一结论可由(21)式说明,即

$$4m > \chi_U p_c [N - b(c_U + c_D)] \quad (21)$$

(4) m 与一个企业的单位产品初始碳排放量成正比,与另一个企业的单位产品初始碳排放量成反比

由(19)式可知, m 正比于 χ_U ,反比于 χ_D ;而从(20)式可知, m 正比于 χ_D ,反比于 χ_U 。本研究假设两经济主体的减排努力程度相同,即有同一个 m 。假若两主体的减排难度系数不同,即同时存在 m_U 和 m_D ,则会得到 m_U 正比于 χ_U 、反比于 χ_D 而 m_D 正比于 χ_D 、反比于 χ_U 的结论。这说明对于一个制造型企业来讲,它的单位产品碳排放量越高,减排越困难。此时企业必须投入更多的资金去减排。也就是说,减排应该首先定位在供应链中碳排放量较高的企业。因此,当政府规定减排政策时,应该首先瞄准碳排放量较高的大型制造型企业。

5.2 3种形式下减排率的比较

通过比较(12)式、(14)式和(18)式,能够得到减排率的差值,即

$$\tau_{U(HC)}^* - \tau_{U(NC)}^* = \frac{(8m + 3b\chi_D^2 p_c^2)\chi_U p_c [N - b(c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c)]}{[8m - bp_c^2(\chi_D^2 + 2\chi_U^2)][8m - 3bp_c^2(\chi_D^2 + \chi_U^2)]} > 0$$

$$\tau_{U(TC)}^* - \tau_{U(HC)}^* = \frac{2m\chi_U p_c [N - b(c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c)]}{[2m - bp_c^2(\chi_D^2 + \chi_U^2)][8m - 3bp_c^2(\chi_D^2 + \chi_U^2)]} > 0$$

所以有

$$\tau_{U(TC)}^* > \tau_{U(HC)}^* > \tau_{U(NC)}^* \quad (22)$$

同样地,可以得到

$$\tau_{D(TC)}^* > \tau_{D(HC)}^* > \tau_{D(NC)}^* \quad (23)$$

在完全合作时,上、下游企业的减排率都是最高的,其次是半合作,最后是完全不合作,可以得出相互合作供应链企业的减排率要高于不合作供应链企业减排率的结论。所以,在企业低碳化进程中,应该加强供应链上、下游企业的减排合作,只有通过这种方式才能取得较好的减排效果。

5.3 碳交易价格对减排率的影响

为了简化不必要的计算过程,假设 $b = 1, c_i = 0, \chi_i = 1$ 。因此(12)式、(14)式和(18)式可以简化为

$$\bar{\tau}_{U(NC)}^* = \frac{2p_c(N - 2p_c)}{8m - 3p_c^2}, \quad \bar{\tau}_{D(NC)}^* = \frac{p_c(N - 2p_c)}{8m - 3p_c^2}$$

$$\bar{\tau}_{(NC)}^* = \frac{3p_c(N - 2p_c)}{8m - 3p_c^2} \quad (24)$$

$$\bar{\tau}_{U(HC)}^* = \frac{3p_c(N - 2p_c)}{8m - 6p_c^2}, \quad \bar{\tau}_{D(HC)}^* = \frac{3p_c(N - 2p_c)}{8m - 6p_c^2}$$

$$\bar{\tau}_{(HC)}^* = \frac{6p_c(N - 2p_c)}{8m - 6p_c^2} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_{U(TC)}^* &= \frac{p_c(N-2p_c)}{2m-2p_c^2}, \quad \bar{\tau}_{D(TC)}^* = \frac{p_c(N-2p_c)}{2m-2p_c^2} \\ \bar{\tau}_{(TC)}^* &= \frac{p_c(N-2p_c)}{m-p_c^2} \end{aligned} \quad (26)$$

本研究假设 $\bar{\tau}_{(jC)}^* = \bar{\tau}_{U(jC)}^* + \bar{\tau}_{D(jC)}^*$, $j = N, H, T$, 因此 jC 分别代表3种合作形式。通常整个供应链的减排率不等于单个独立企业减排率的加和, 准确的描述应该为 $\tau_{jC}^* = \frac{\chi_U \tau_{U(jC)}^* + \chi_D \tau_{D(jC)}^*}{\chi_U + \chi_D}$, 但由于 χ_i 是常量, 对于 χ_i 的线性计算不会改变它的线性特征。因此, 本研究令 $\bar{\tau}_{(jC)}^* = \bar{\tau}_{U(jC)}^* + \bar{\tau}_{D(jC)}^*$, 将不会改变 $\tau_{(jC)}^* = \frac{\chi_U \tau_{U(jC)}^* + \chi_D \tau_{D(jC)}^*}{\chi_U + \chi_D}$ 的特性。本研究只是探讨3种合作形式下碳交易价格如何影响减排率, 如果从减少碳排放数量的角度考虑, 这种加总可以对单个企业的减排率很高因而整个供应链的减排率也很高的现象加以解释。也就是说, 此时供应链整体的减排率可以简单地等于上、下游企业减排率之和。

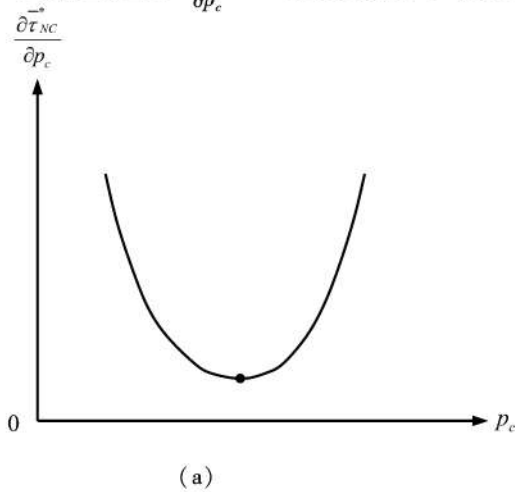
上述一系列公式说明, 3种合作形式下的最优减排率受碳交易价格波动的影响, 不同的碳交易价格会导致不同的减排效率。下面求3种合作形式下供应链的最优减排率对碳交易价格的一阶导数。

(1) 完全不合作

$$\frac{\partial \bar{\tau}_{(NC)}^*}{\partial p_c} = \frac{9Np_c^2 - 96mp_c + 24mN}{(8m - 3p_c^2)^2}$$

当 $9Np_c^2 - 96mp_c + 24mN > 0$ 时, 减排率与碳交易价格正相关; 反之, 负相关。

因此, 如果二次函数的判别式 $\Delta = 32m - 3N^2 < 0$, 说明 m 值比较小, 减排较容易实现, 曲线 $\frac{\partial \bar{\tau}_{(NC)}^*}{\partial p_c}$ 与横轴没有交点, 即 $\frac{\partial \bar{\tau}_{(NC)}^*}{\partial p_c}$ 恒大于零, 如图2(a)所示。从图2(a)可以看出, 由于 $\frac{\partial \bar{\tau}_{(NC)}^*}{\partial p_c} > 0$, 说明减排率与碳交易



价格呈正相关。这主要是由于碳交易价格的提高使企业投资减排的动机提高了, 因此减排率也将提高。相反, 如果碳交易价格降低, 减排率也会降低。由图2(a)可以推导出图2(b)。从图2(b)可以看出, 当碳交易价格相对较低时, 减排率将随碳交易价格的增加而增加, 但其增量会越来越小, 这主要是由边际减排效用不断减少引起的(对应图2(a)的下降段); 而当减排投资增加到一定程度时, 减排率的增量变得很小(对应图2(a)的最低点), 但是碳交易价格在此时却变得很高, 企业由于受到较高碳交易价格的刺激而考虑进一步减排, 因为企业可以将减排后多余的碳配额卖掉以获取利润。因此, 减排率在减排投资和高碳交易价格双重影响下会进一步提高, 并且其增量不断增加(对应图2(a)的上升段)。

如果 $\Delta = 32m - 3N^2 > 0$, 说明 m 值较大, 减排不容易实现。如图3(a)所示, 曲线 $\frac{\partial \bar{\tau}_{(NC)}^*}{\partial p_c}$ 与横轴有两个交点, 分别为 p_c^- 和 p_c^+ , 即

$$\begin{aligned} p_c^- &= \frac{16m - 2\sqrt{64m^2 - 6N^2m}}{3N} \\ p_c^+ &= \frac{16m + 2\sqrt{64m^2 - 6N^2m}}{3N} \end{aligned}$$

当碳交易价格在区间 $(0, p_c^-)$ 时, 减排率与碳交易价格呈正相关, 减排率的变化率是关于碳交易价格的凹函数, 减排率的增量将随着碳交易价格的增加而减少。这主要是因为当碳交易价格比较低时, 它微小的增量会使企业考虑通过自行减排而不是通过碳交易市场来获得碳配额, 但其增量的逐渐减少主要是由于边际减排效用减少所致。当碳交易价格等于 p_c^- 时, 从图3(a)可知 $\frac{\partial \bar{\tau}_{(NC)}^*}{\partial p_c} = 0$, 即减排率的变化量为零, 此时再多的减排投资都不会提高减排率, 即减排率达到极大值(图3(b)中的 $\bar{\tau}_{(NC)(max)}^*$)。当碳交易

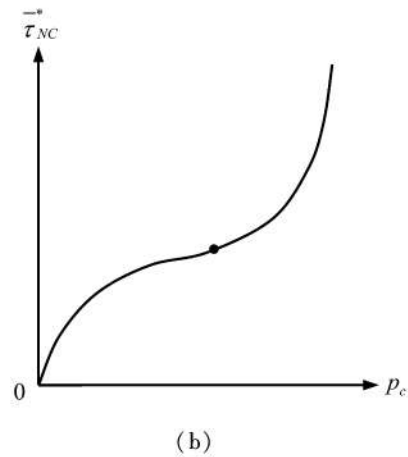


图2 $32m - 3N^2 < 0$ 时 $\frac{\partial \bar{\tau}_{(NC)}^*}{\partial p_c}$ 、 $\bar{\tau}_{(NC)}^*$ 与 p_c 的关系

Figure 2 Relationship between $\frac{\partial \bar{\tau}_{(NC)}^*}{\partial p_c}$, $\bar{\tau}_{(NC)}^*$ and p_c When $32m - 3N^2 < 0$

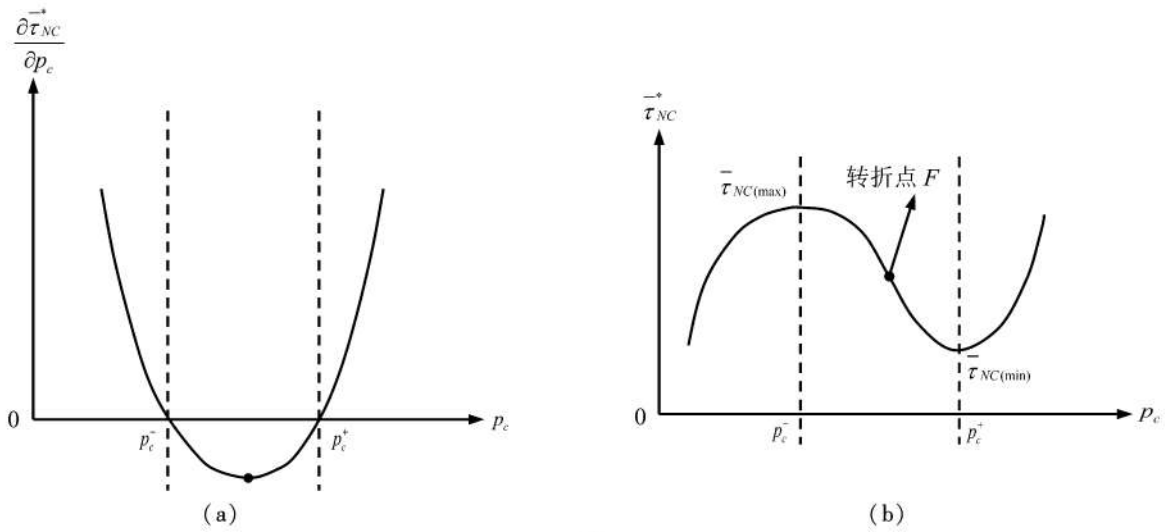


图3 $32m - 3N > 0$ 时 $\frac{\partial \bar{\tau}_{NC}}{\partial p_c}$ 、 $\bar{\tau}_{NC}$ 与 p_c 的关系

Figure 3 Relationship between $\frac{\partial \bar{\tau}_{NC}}{\partial p_c}$, $\bar{\tau}_{NC}$ and p_c When $32m - 3N > 0$,

价格在区间 (p_c^-, p_c^+) 时,从图3(a)可以看出 $\frac{\partial \bar{\tau}_{NC}}{\partial p_c} < 0$, 说明减排投资已经不再起作用,此时企业放弃自行减排转而考虑通过碳交易市场购买碳配额。因此,从对应的图3(b)可以看出,尽管碳交易价格增加,减排率反而有所下降。由于在开始阶段,企业放弃了减排投资,减排率将以较快速度减少。当减排率减少到最低点(转折点 F),企业受碳交易价格增加和减排率减少双重压力的影响会考虑增加减排投资额,而过了转折点 F 之后,减排率的减少量会有所减弱,这是由于减排率的减少也具有惯性,不能随着减排投资额增加而迅速提高,虽然减排率还是会减少,但减少的幅度越来越小。因此,减排率的减少量先增加后减少(图3(b)两条虚线的中间阶段)。从图3(a)可以看出,当碳交易价格等于 p_c^+ 时,减排率的减少量等于零,即 $\frac{\partial \bar{\tau}_{NC}}{\partial p_c} = 0$, 此时减排率达到极小值(图3(b)中的 $\bar{\tau}_{NC(min)}$)。而后随着减排投资额的增加而提高,企业受高碳交易价格可以将减排所获得的剩余配额卖出以换取利润这种动机的影响,会考虑进一步增大减排投资额。因此,减排率受减排投资和碳交易价格双重作用的影响而进一步提高,并且增量越来越大(图3(b)的右侧上升阶段)。

总体上说,减排率与碳交易价格成正相关。而且,当碳交易价格相对较低时,减排率的增量是逐渐减少的;当碳交易价格相对较高时,减排率的增量是逐渐增大的。但是,如果减排比较困难(m 值比较大),企业会在自行减排投资与通过碳交易市场购买碳配额之间权衡。当减排成本很高且减排率非常低时,企业将考虑购买碳配额;相反,企业将会增加减排投资额。因此,会出现图3(b)中两条虚线之间的负相关部分。

(2) 半合作

同理,如果二次函数的判别式 $\Delta = 16m - 3N^2 < 0$, 减排率与碳交易价格正相关;如果 $\Delta = 16m - 3N^2 > 0$, 会出现一部分负相关区域,原因与完全不合作时相同,只是曲线的坡度和与横坐标的交点范围不同而已,当 $16m - 3N^2 > 0$ 时,曲线与横坐标 p_c 的交点为 $\frac{8m \pm 2\sqrt{16m^2 - 3N^2m}}{3N}$ 。为节省篇幅,此处将图形略去。

(3) 完全合作

同理,如果二次函数的判别式 $\Delta = 4m - N^2 < 0$, 减排率与碳交易价格正相关;如果 $\Delta = 4m - N^2 > 0$, 会出现一部分负相关区域,原因与完全不合作时相同,只是曲线的坡度和与横坐标的交点范围不同而已,当 $4m - N^2 > 0$ 时,曲线与横坐标 p_c 的交点为 $\frac{2m \pm \sqrt{4m^2 - N^2m}}{N}$ 。为节省篇幅,此处将图形略去。

将上述3种合作形式的结论总结在图4~图6中。

由图4可知,当减排比较困难时(m 值较大),在完全不合作时,减排率与碳交易价格呈负相关的区域最大;在完全合作时,此区域最小,说明在完全合作时,随碳交易价格增加减排率没有提高的区域是最小的,企业不进行减排投资的区域也是最小的;相反,上述区域在完全不合作时最大。

由图5和图6可知,完全合作得到的减排率最高,其次是半合作,最低的是完全不合作。随着合作程度的加强,负相关区域在不断减小,使在完全合作时达到最优减排率所对应的碳交易价格小于不合作时的。由图5和图6可以推论,完全合作的企业更加倾向于适应较低的碳交易价格。换句话说,当碳交易价格相对较低时,如果企业是完全合作,那么减排率能够取得较高值;而完全不合作的企业更加倾向于较高的碳交易价格,即当碳交易价格相对较

高时,如果企业是完全不合作的,那么减排率能够取得较高值。这很有可能发生在相同的碳交易价格情况下,合作企业减排率在减少而不合作企业减排率在增加,或者合作企业减排率在增加而不合作企业减排率在减少的。

由图5和图6可知,在完全合作形式下微小的碳交易价格的变动将会引起供应链减排率的较大变动,但对于完全不合作形式,碳交易价格较大的变动也不会产生减排率较大的波动。也就是说,在完全合作时,减排率对于价格的敏感系数最高;在完全不合作时,减排率对于价格的敏感系数最低。由此可知,在减排的开始阶段,碳交易价格不很稳定,许多企业都能够适应这种不稳定的碳交易价格,实现一定的减排率,但这些企业都不能取得较好的减排效果。随着碳交易市场的逐渐成熟,碳交易价格也趋

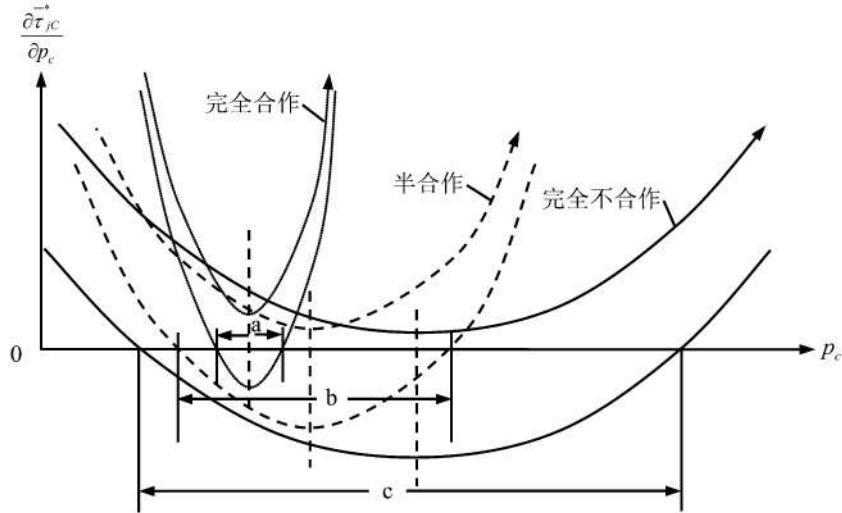
于稳定,那些独立的不能适应当下碳交易价格的企业将不能实现较好的减排效果,而那些适应稳定碳交易价格的合作企业将会实现较好的减排效果。

5.4 3种合作形式下供应链的利润

将上述计算结果代入3种合作形式下上、下游企业的利润函数中,可得

完全不合作

$$\begin{cases} \Pi_{U(NC)}^* = \left(\frac{8m^2}{b} - 2m\chi_U^2 p_c^2\right) \frac{[N - b(c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c)]^2}{[8m - bp_c^2(\chi_D^2 + 2\chi_U^2)]^2} + Z_U p_c \\ \Pi_{D(NC)}^* = \left(\frac{4m^2}{b} - \frac{1}{2}m\chi_D^2 p_c^2\right) \frac{[N - b(c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c)]^2}{[8m - bp_c^2(\chi_D^2 + 2\chi_U^2)]^2} + Z_D p_c \\ \Pi_{(NC)}^* = \left[\frac{12m^2}{b} - \frac{1}{2}mp_c^2(4\chi_U^2 + \chi_D^2)\right] \frac{[N - b(c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c)]^2}{[8m - bp_c^2(\chi_D^2 + 2\chi_U^2)]^2} + (Z_U + Z_D)p_c \end{cases} \quad (27)$$



注:不带箭头的线为 $\Delta > 0$,带箭头的线为 $\Delta < 0$; $a = \frac{2\sqrt{4m^2 - N^2m}}{N}$, $b = \frac{4\sqrt{16m^2 - 3N^2m}}{3N}$, $c = \frac{4\sqrt{64m^2 - 6N^2m}}{3N}$ 。

图4 3种合作形式减排率的变化率与碳交易价格的关系
Figure 4 Relationship between the Emission Reduction Rate of Changes and Carbon Trading Price in the Three Forms of Cooperation

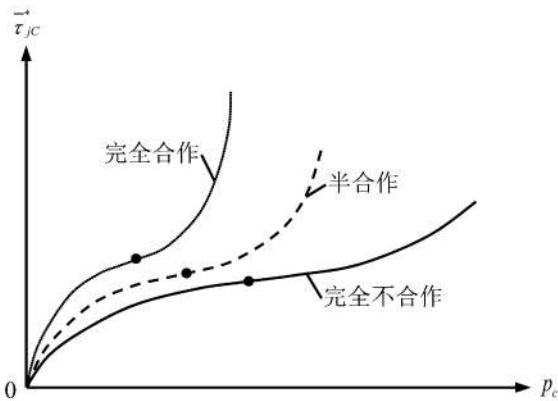


图5 3种合作形式减排率与碳交易价格的关系 ($\Delta < 0$)

Figure 5 Relationship between Emission Reduction Rate and Carbon Trading Price in the Three Forms of Cooperation (when $\Delta < 0$)

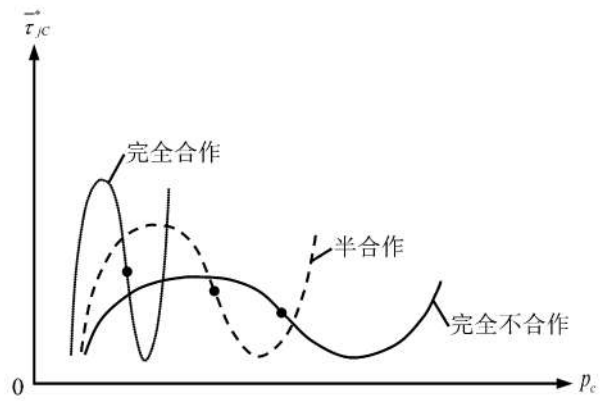


图6 3种合作形式减排率与碳交易价格的关系 ($\Delta > 0$)

Figure 6 Relationship between Emission Reduction Rate and Carbon Trading Price in the Three Forms of Cooperation (when $\Delta > 0$)

半合作

$$\begin{cases} \Pi_{U(HC)}^* = \left(\frac{8m^2}{b} - \frac{9}{2}m\chi_D^2 p_c^2\right) \frac{[N - b(c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c)]^2}{[8m - 3bp_c^2(\chi_U^2 + \chi_D^2)]^2} + Z_U p_c \\ \Pi_{D(HC)}^* = \left(\frac{4m^2}{b} - \frac{9}{2}m\chi_U^2 p_c^2\right) \frac{[N - b(c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c)]^2}{[8m - 3bp_c^2(\chi_U^2 + \chi_D^2)]^2} + Z_D p_c \\ \Pi_{(HC)}^* = \left[\frac{12m^2}{b} - \frac{9}{2}m p_c^2(\chi_U^2 + \chi_D^2)\right] \frac{[N - b(c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c)]^2}{[8m - 3bp_c^2(\chi_U^2 + \chi_D^2)]^2} + (Z_U + Z_D)p_c \end{cases} \quad (28)$$

完全合作

$$\Pi_{(TC)}^* = \left[\frac{m^2}{b} - \frac{1}{2}m p_c^2(\chi_U^2 + \chi_D^2)\right] \frac{[N - b(c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c)]^2}{[2m - bp_c^2(\chi_U^2 + \chi_D^2)]^2} + (Z_U + Z_D)p_c \quad (29)$$

通过对3种合作形式利润函数的比较可知,因为 $4m - 3bp_c^2(\chi_U^2 + \chi_D^2) > 0$, 由于在半合作时下游企业的利润函数大于零, 因此必须满足 $\frac{4m^2}{b} - \frac{9}{2}m\chi_D^2 p_c^2 > 0$, 所以 $\Pi_{(HC)}^* > \Pi_{(NC)}^*$; 因为 $m - bp_c^2(\chi_U^2 + \chi_D^2) > 0$ 且 $4m - 3bp_c^2(\chi_U^2 + \chi_D^2) > 0$, 所以 $\Pi_{(TC)}^* > \Pi_{(HC)}^*$ 。因此可以得到

$$\Pi_{(NC)}^* < \Pi_{(HC)}^* < \Pi_{(TC)}^* \quad (30)$$

对低碳供应链来说, 企业间的完全合作能够取得最大化的利润, 其次是半合作, 最后是不合作。因此, 从整个供应链来讲, 企业间的合作程度越高, 供应链取得的利润值就越高, 因而应该加强供应链企业在减排过程中的合作。

5.5 当不考虑外部性时3种形式下社会福利的比较

不考虑外部性的社会福利是生产者剩余和消费者剩余之和, 可用(31)式表示, 即

$$W = \int_0^{Q^*} \left(\frac{N-x}{b} - c_i\right) dx - \frac{1}{2}m\tau^{*2} \quad (31)$$

经过变换, 可得社会福利的表达式为

$$W = \left(\frac{N}{b} - c_i\right)Q^* - \frac{Q^{*2}}{2b} - \frac{1}{2}m\tau^{*2} \quad (32)$$

将3种形式下简化的需求函数代入(32)式, 可得简化的社会福利表达式为

$$\bar{W}_{(NC)}^* = \frac{2m(N - 2p_c)}{8m - 3p_c^2} \left[N - m \frac{N - 2p_c}{8m - 3p_c^2} - \frac{9}{4}p_c^2 \frac{N - 2p_c}{8m - 3p_c^2} \right] \quad (33)$$

$$\bar{W}_{(HC)}^* = \frac{2m(N - 2p_c)}{8m - 6p_c^2} \left[N - m \frac{N - 2p_c}{8m - 6p_c^2} - 9p_c^2 \frac{N - 2p_c}{8m - 6p_c^2} \right] \quad (34)$$

$$\bar{W}_{(TC)}^* = \frac{m(N - 2p_c)}{2m - 2p_c^2} \left[N - \frac{1}{2}m \frac{N - 2p_c}{2m - 2p_c^2} - 2p_c^2 \frac{N - 2p_c}{2m - 2p_c^2} \right] \quad (35)$$

比较(34)式和(35)式, 可以得出完全合作下的社会福利大于半合作下的社会福利。

比较(33)式和(34)式, 由于 $4\left(\frac{9}{2}p_c^3 - \frac{21}{4}Np_c^2\right) < 18p_c^3$

$- 15Np_c^2$ 且 $8m - 6p_c^2 < 8m - 3p_c^2$, 因此 $\bar{W}_{(HC)}^* > \bar{W}_{(NC)}^*$ 。最终可以得出

$$\bar{W}_{(TC)}^* > \bar{W}_{(HC)}^* > \bar{W}_{(NC)}^* \quad (36)$$

也就是说, 不考虑碳排放造成的外部影响时, 社会福利将随合作程度的提高而增加。因此, 从社会福利最大化的角度看, 企业应该加强减排投资合作, 只有这样才能提升社会福利的总体水平。

5.6 3种形式下碳排放总量的比较

通过上面的分析, 可得3种形式下供应链的总碳排放量, 即

$$\begin{aligned} Q_{(TC)}^* - Q_{(HC)}^* &= \frac{m[N - b(c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c)]}{[2m - bp_c^2(\chi_D^2 + \chi_U^2)][8m - 3bp_c^2(\chi_D^2 + \chi_U^2)]} [4m - bp_c^2(\chi_D^2 + \chi_U^2)] > 0 \\ Q_{(HC)}^* - Q_{(NC)}^* &= \frac{2m[N - b(c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c)]}{[8m - bp_c^2(\chi_D^2 + 2\chi_U^2)][8m - 3bp_c^2(\chi_D^2 + \chi_U^2)]} bp_c^2(2\chi_D^2 + \chi_U^2) > 0 \\ Q_{(TC)}^* > Q_{(HC)}^* > Q_{(NC)}^* \end{aligned} \quad (37)$$

说明在追求总体利润最大化的前提下, 整个供应链的总产出是随着合作程度的提高而增加的。由于总碳排放量是总产出与单位产出碳排放量的乘积, 因此本研究计算得到减排后3种形式下的单位产品碳排放量为

$$\begin{aligned} \chi_{(NC)}^* &= \chi_U(1 - \tau_{U(NC)}^*) + \chi_D(1 - \tau_{D(NC)}^*) \\ &= \frac{8m(\chi_D + \chi_U) - p_c(\chi_D^2 + 2\chi_U^2)[N - b(c_U + c_D)]}{8m - bp_c^2(\chi_D^2 + 2\chi_U^2)} \\ \chi_{(HC)}^* &= \chi_U(1 - \tau_{U(HC)}^*) + \chi_D(1 - \tau_{D(HC)}^*) \\ &= \frac{8m(\chi_D + \chi_U) - 3p_c(\chi_D^2 + \chi_U^2)[N - b(c_U + c_D)]}{8m - 3bp_c^2(\chi_D^2 + \chi_U^2)} \\ \chi_{(TC)}^* &= \chi_U(1 - \tau_{U(TC)}^*) + \chi_D(1 - \tau_{D(TC)}^*) \\ &= \frac{2m(\chi_D + \chi_U) - p_c(\chi_D^2 + \chi_U^2)[N - b(c_U + c_D)]}{2m - bp_c^2(\chi_D^2 + \chi_U^2)} \end{aligned}$$

通过比较, 可得到

$$\chi_{(TC)}^* < \chi_{(HC)}^* < \chi_{(NC)}^* \quad (38)$$

从以上计算结果可以看出, 在整条供应链中, 单位产品的碳排放随着合作程度的提高而减少, 但是供应链的总产出是随着合作程度的提高而增加的。因此, 3种形式下供应链的总碳排放量不能进行简单地比较。

在完全合作时, 单位产品的碳排放量是最小的, 但由于其最大的产量使总碳排放量与其他两种情况没有可比性, 它受不同的市场环境和相关参数的影响。也就是说, 尽管单位产品的减排效果是最好的, 但是需求的扩大无形中增加了总的碳排放量。因

此,在确保减排率不变的前提下减少总的碳排放量,最好的方法就是减少企业的产品产量。然而,由于偏离了最优产量,也会减少供应链的最优利润值。因此可以看出,供应链整体利润与总碳排放量是一对不可调和的矛盾。要使总碳排放量小于政府规定的排放上限值,企业必须牺牲部分利润;如果企业追求利润的最大化,那么将排放出更多的二氧化碳。换句话说,经济产出与环境污染是一对难以调和的矛盾,企业需要在利润与碳排放之间进行权衡。

5.7 考虑根据产量分配碳配额的情况

考虑政府根据企业的产量分配碳配额,即产量较高的企业会得到比产量较低企业更多的碳配额。因此,在企业的利润函数中, $Z_i p_c$ 将被 $g_i p_c(N - bp)$ 替代。本研究只考虑完全不合作下的情况,半合作和完全合作下的情况与之类似。

此时,上、下游企业的利润函数变为

$$\begin{cases} \Pi_U = [w - c_U - \chi_U p_c(1 - \tau_U) + g_U p_c](N - bp) - \frac{1}{2} m \tau_U^2 \\ \Pi_D = [p - w - c_D - \chi_D p_c(1 - \tau_D) + g_D p_c](N - bp) - \frac{1}{2} m \tau_D^2 \end{cases} \quad (39)$$

由上述分析可以得到此时的最优减排率为

$$\begin{cases} \tau_{U(NC)}^{**} = \frac{2\chi_U p_c [N - b(c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c - g_U p_c - g_D p_c)]}{8m - bp_c^2(\chi_D^2 + 2\chi_U^2)} \\ \tau_{D(NC)}^{**} = \frac{\chi_D p_c [N - b(c_U + c_D + \chi_U p_c + \chi_D p_c - g_U p_c - g_D p_c)]}{8m - bp_c^2(\chi_D^2 + 2\chi_U^2)} \end{cases} \quad (40)$$

比较(12)式和(40)式可知,当其他条件不变时,政府按照单位产品分配碳配额所得的减排率大于政府按照总量限制所得的减排率,其差值与政府单位产品分配碳配额的多少和碳交易价格有关。

$$\Delta \tau_{U(NC)}^* = \frac{2b\chi_U p_c^2 (g_U + g_D)}{8m - bp_c^2(\chi_D^2 + 2\chi_U^2)} \quad (41)$$

$$\Delta \tau_{D(NC)}^* = \frac{b\chi_D p_c^2 (g_U + g_D)}{8m - bp_c^2(\chi_D^2 + 2\chi_U^2)}$$

$$\frac{\partial \Delta \tau_{U(NC)}^*}{\partial g_U} = \frac{2b\chi_U p_c^2}{8m - bp_c^2(\chi_D^2 + 2\chi_U^2)} \quad (42)$$

$$\frac{\partial \Delta \tau_{D(NC)}^*}{\partial g_D} = \frac{b\chi_D p_c^2}{8m - bp_c^2(\chi_D^2 + 2\chi_U^2)}$$

由(41)式和(42)式可知,减排率的差值与单位产品分配的碳配额相关,即单位产品分配的碳配额越多,减排率越高。

产生这一结果的原因是,在前面的分析中将初始分配的碳配额看做是与产量无关的量,而在这一部分将碳配额看做是产量的单增函数,即产量越大

得到的碳配额越多,因此得到的减排率也是单位产品碳配额的单调递增函数。这说明,相对于较大的单位产品碳配额,企业的减排率会自然提高;反之,相对于较小的单位产品碳配额,企业的减排率也会自然地降低。然而,如果将政府的总量限制也看做是影响企业减排的内生变量,那么按产量分配碳配额所得到的减排率就不一定大于总量限制条件下的减排率,它们的大小要通过比较 Z_i 与 $g_i Q$ 的值进行确定。如果 $Z_i > g_i Q$,总量限制所得到的减排率将大于按产量分配碳配额所得到的减排率;反之,如果 $Z_i < g_i Q$,则总量限制所得到的减排率将小于按产量分配碳配额所得到的减排率。其关系如图7和图8所示。

由图7可知,当分配给单位产品的碳配额一定时,即 $g_i = \tan \alpha$ 不变时,产量的增加会提高总的碳配额数量,进而提高企业的减排率;由图8可知,当产品的产量一定时,单位产品碳配额的增加自然会提高企业的减排率。

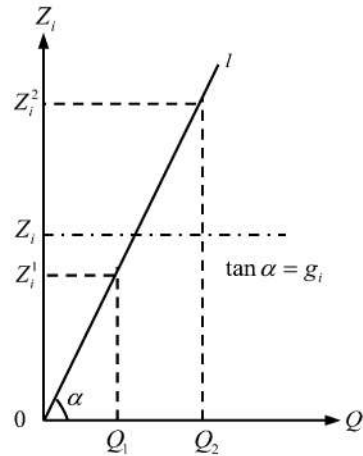


图7 g_i 确定时 Z_i 与 $g_i Q$ 的关系
Figure 7 Relationship between Z_i and $g_i Q$ When g_i Is Decided

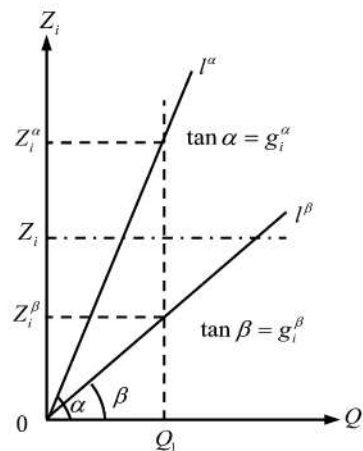


图8 Q 确定时 Z_i 与 $g_i Q$ 的关系
Figure 8 Relationship between Z_i and $g_i Q$ When Q Is Decided

6 结论

本研究对处于供应链上、下游制造型企业间的合作减排问题进行探讨。研究结果表明,在3种不同合作形式下,减排和定价均合作的供应链形式能够在实现高减排效率的同时取得高的利润。碳交易价格与边际减排成本相互作用来影响企业的减排效果,企业追求利润最大化的直接后果是碳排放量的超标,政府不同的碳配额分配政策会导致企业不同的减排效果,碳交易价格对企业减排率的影响至关重要,当减排较容易时减排率与碳交易价格呈正相关,当减排较困难时会出现减排率与碳交易价格呈负相关的区域。

政府在对大型制造型企业进行碳排放规制的过程中,应该首先着眼于单位产品碳排放较多的企业,并且从其所处供应链的源头抓起,全面实行低碳化,从而降低规制下游企业的排放成本;企业应权衡决策最优减排水平和买卖碳配额数量,必要时牺牲一定的短期利益来换取永续发展,只有这样才能实现整个供应链的低碳化和长期的利润最大化;此外,单个企业应该加强彼此之间的合作以共同面对减排任务和不稳定的碳交易价格,密切关注碳交易价格与自身边际减排成本大小的关系,只有通过这种方式,才能够在未来的低碳经济浪潮中实现较高的减排效能。总之,低碳经济是一个逐渐的演化过程,我们应正视机遇和挑战,抓住大好时机,谋求稳定发展。

参考文献:

- [1] 庇古. 福利经济学[M]. 北京: 华夏出版社, 2007:177-179.
Pigou A C. Welfare economics[M]. Beijing: Huaxia Publishing House, 2007:177-179. (in Chinese)
- [2] Ronald Coase. The problem of social cost[J]. Journal of Law and Economics, 1960(3):1-44.
- [3] 平新乔. 微观经济学十八讲[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001:326.
Ping Xinqiao. Microeconomics eighteen lectures[M]. Beijing: Peking University Press, 2001:326. (in Chinese)
- [4] Stern N. The economics of climate change[J]. The American Economic Review, 2008,98(2):1-37.
- [5] Bode S. Multi-period emissions trading in the electricity sector: Winners and losers[J]. Energy Policy, 2006,34(6):680-691.
- [6] 张中祥. 排放权贸易市场的经济影响: 基于12个国家和地区边际减排成本全球模型分析[J]. 数量经济技术经济研究, 2003,22(9):95-99.
Zhang Zhongxiang. The economic impact of emissions trading market: Based on 12 countries and regions marginal abatement cost global model analysis[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2003,22(9):95-99. (in Chinese)
- [7] Benjaafar S, Li Y, Daskin M. Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models[R]. Minneapolis, MN: University of Minnesota, 2010.
- [8] 杜少甫, 董骏峰, 梁樑, 张靖江. 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.
Du Shaofu, Dong Junfeng, Liang liang, Zhang Jingjiang. Optimal production policy with emission permits and trading[J]. Chinese Journal of Management Science, 2009,17(3):81-86. (in Chinese)
- [9] Zhang J J, Nie T F, Du S F. Optimal emission-dependent production policy with stochastic demand[J]. International Journal of Society Systems Science, 2011,3(1/2):21-39.
- [10] Hua G, Cheng T C E, Wang S. Managing carbon footprints in inventory management[J]. International Journal of Production Economics, 2011,132(2):178-185.
- [11] Song J P, Leng M M. Analysis of the single-period problem under carbon emissions policies[M] // Choi T M. Handbook of Newsvendor Problems: Models, Extensions and Applications. New York: Springer, 2012:297-313.
- [12] 何大义, 马洪云. 碳排放约束下企业生产与存储策略研究[J]. 资源与产业, 2011,13(2):63-68.
He Dayi, Ma Hongyun. Strategy of enterprise production and store under constraints of carbon emission[J]. Resources & Industries, 2011,13(2):63-68. (in Chinese)
- [13] Hoen K M R, Tan T, Fransoo J C, Van Houtum G J. Effect of carbon emission regulations on transport mode selection in supply chains[R]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2010.
- [14] Benjaafar S, Li Y, Daskin M, Qi L, Kennedy S. The carbon footprint of UHT milk[R]. Minneapolis: University of Minnesota, 2010:7-22.
- [15] Carbon Trust. Carbon footprint in supply chain: The next step for business[R]. London, UK: The Carbon Trust, 2006. <http://www.carbontrust.co.uk>.
- [16] Cachon G P. Supply chain design and the cost of greenhouse gas emissions[R]. Philadelphia, PA: University of Pennsylvania, 2011.
- [17] 张靖江. 考虑排放许可与交易的排放依赖型生产运作优化[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010:39-46.
Zhang Jingjiang. Emission-dependent production and operation optimization with emission permits and trading[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010:39-46. (in Chinese)

- [18] Du S, Ma F, Fu Z, Zhu L, Zhang J. Game-theoretic analysis for an emission-dependent supply chain in a “cap-and-trade” system [J/OL]. *Annals of Operations Research*, 2011. doi:10.1007/s10479-011-0964-6.
- [19] 孟卫军. 基于减排研发的补贴和合作政策比较 [J]. *系统工程*, 2010, 28(11):123-126.
Meng Weijun. Comparison of subsidy and cooperation policy based on emission reduction R&D [J]. *Systems Engineering*, 2010, 28(11):123-126. (in Chinese)
- [20] Molt M J G, Georgantis N, Orts V. Cooperative R&D with endogenous technology differentiation [J]. *Journal of Economics & Management Strategy*, 2005, 14(2):461-476.
- [21] Poyago-Theotoky J A. The organization of R&D and environmental policy [J]. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 2007, 62(1):63-75.
- [22] Subramanian R, Gupta S, Talbot F B. Compliance strategies under permits for emissions [J]. *Production and Operations Management*, 2007, 16(6):763-779.

Research on Cooperation Strategy of Enterprises' Carbon Emission Reduction in Low Carbon Supply Chain

Xie Xinpeng^{1,2}, Zhao Daozhi¹

1 Management and Economics Department, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2 Department of Automotive Engineering, Military Traffic Institute, Tianjin 300161, China

Abstract: Based on the clean development mechanism, this study investigates how the large state-owned enterprises cooperate with upstream and downstream enterprises in the supply chain to choose reduction strategy while they are facing environmental regulation. With neoclassical economics and game theory methods, the research further analyzes enterprise's profits and reduction efficiencies in three situations and explores the emission reduction's mutual effect between upstream and downstream enterprises, the impact of carbon trading price on emission reduction and the comparison of their social welfare. The results show that in the full-cooperation case, both their profits and reduction efficiencies are optimal. Enterprises should aim at the enterprises with large carbon emissions and their upstream enterprises should be handled first in the process of low carbonization. Carbon trading price accompanied with enterprise's marginal abatement cost exerts different impacts on different enterprises. Enterprises produce more carbon emissions in the process of pursuing profit maximization. In order to reduce total emissions, they must reduce the optimal output. The conclusions provide some intellectual support for enterprises to make rational emission reduction strategies.

Keywords: emission reduction rate; carbon trading price; marginal utility; carbon quota allocation policy; social welfare

Received Date: August 22nd, 2012 **Accepted Date:** May 6th, 2013

Funded Project: Supported by the National Natural Science Foundation of China(71072155)

Biography: Xie Xinpeng, a Shandong Tai'an native(1982 -), is a Ph. D. candidate in the Management and Economics Department at Tianjin University. His research interests include supply chain management and low carbon economy, etc. E-mail: xiexinpeng2010@yeah.net □