

# 惩罚机制下供应链企业碳减排投入的演化博弈<sup>①</sup>

付秋芳<sup>1</sup>, 忻莉燕<sup>2</sup>, 马士华<sup>3</sup>

(1. 广东外语外贸大学商学院, 广州 510420; 2. 广东寰球广业工程有限公司, 广州 510655;  
3. 华中科技大学管理学院, 武汉 430074)

摘要: 针对气候变暖下消费者愿意对低碳产品支付更高价格的情境, 以及供应链碳减排投入的外部正效应问题, 考虑由上游企业的供应商与下游企业的制造商组成的二级供应链, 论文研究了供应商与制造商的碳减排投入行为与策略. 依据供应商与制造商采用不同的行为策略的支付矩阵, 建立了供应商与制造商碳减排投入的演化博弈模型, 并分析得到供应商与制造商减排投入行为的演化稳定策略. 结果表明: 供应商与制造商的碳减排投入策略与双方碳减排投入收益比密切相关, 当双方碳减排投入收益比不断变化时, 出现多种演化稳定均衡. 针对在碳减排投入中供应商或制造商的“搭便车”行为问题, 分析了契约与惩罚机制下的演化博弈结果. 最后, 给出了数值模拟, 验证了模型的有效性.

关键词: 供应链; 碳减排投入; 契约与惩罚机制; 演化博弈

中图分类号: F272 文献标识码: A 文章编号: 1007-9807(2016)04-0056-15

## 0 引言

近年来, 全球气候变暖趋势进一步加剧, 已逐渐成为国际社会高度关注的热点之一. 发展低碳经济、节能减排已成为促进全球经济可持续发展的重大战略举措之一. 在低碳背景下, 各国政府都在讨论减少温室气体排放的解决方案. 我国作为世界上最大的二氧化碳排放国, 承诺到2020年单位国内生产总值(GDP)二氧化碳排放比2005年下降40%~45%. 目前, 企业的碳减排是由政府等相关部门监督管理, 但是监管是需要成本的, 成本在一定条件下可能很高昂. 此外, 这种治理模式本质上来说还是属于外部治理, 碳减排的根本解决方法是供应链上的节点企业进行一定的碳减排投入, 尤其是供应链上游的供应商和处于核心位置的制造商. 供应商的碳减排投入是保证制造商能否获得低碳原材料和降低原材料成本的基础

而制造商的碳减排投入影响最终产品的碳足迹、成本和市场的需求<sup>[1]</sup>, 它反过来也影响到供应商的收益. 因此, 从企业内部治理因素的角度探寻供应链中企业的碳减排投入行为的决策方法尤为必要.

目前, 关于“碳排放”的研究层出不穷, 有很多文献从经济学角度设计市场减少和允许碳交易、在环境经济学考察不同环境政策对经济的影响和企业层面的碳排放内涵、计量、核算以及国家政府层面的碳排放权交易与分配等方面<sup>[2-5]</sup>. 但是, 这些文献只注重直接碳排放忽略出现在供应链中不同企业之间相互作用的重要因素. 于是, 国内外已有学者开始从整条供应链上来关注碳排放问题, 这些研究集中在5个方面: 1) 关于供应链上碳排放测量和管理, 如 Braithwaite 和 Knivett<sup>[6]</sup> 以 Time-to-Serve 供应链绘图技术提出了一种新的供应链碳足迹的计算方法, Cholette 和 Venkat<sup>[7]</sup> 计算了

① 收稿日期: 2013-12-19; 修订日期: 2015-07-14.

基金项目: 国家社科基金资助项目(13BTY030); 广东省哲学社会科学规划资助项目(GD10CGL19).

作者简介: 付秋芳(1977), 男, 江西抚州人, 博士, 教授. Email: fqfclust@163.com

食品和饮料供应链中运输和仓储活动的能源耗费和碳排放, Benjaafar 等<sup>[8]</sup> 等针对需求已知、具有多补货期的特定计划周期和考虑厂商如何决定补货以及补货多少的问题建立了严格排放限额模型、碳税模型、限额与交易模型以及碳抵消模型, Sundarakani 等<sup>[9]</sup> 分别从静态供应链和动态供应链方面应用拉格朗日和排队论建立了一个碳排放衡量模型, 姜庆国<sup>[10]</sup> 分析了电煤供应链碳排放过程并提出了测度方法及指标; 2) 关于因素对供应链碳排放的影响, 如许舒婷<sup>[11]</sup> 分析了区域生态供应链中的信息共享对供应链碳排放的影响, 杨珺等<sup>[12]</sup> 基于系统动力学分析了强制排放和碳税两种碳排放政策对供应链碳排放的影响, McKinnon<sup>[13]</sup> 通过实证分析了承运人对海运供应链碳排放的影响; 3) 关于供应链碳排放评价问题, 如杨文佳<sup>[14]</sup> 采用生命周期评价方法与投入产出分析方法相结合分析了供应链碳排放评价问题, Acquaye 等<sup>[15]</sup> 建立了不同行业的供应链碳排放基准; 4) 关于碳减排对供应链网络与运营的影响, 如 Elhedhli 和 Merrick<sup>[16]</sup> 分析了考虑减少碳排放下绿色供应链网络设计问题, 李昊和赵道致<sup>[17]</sup> 分析了不同碳排放权交易的指标对供应链企业运营决策的影响, 高举红等<sup>[18]</sup> 分析了在考虑碳排放因子和成本因子下闭环供应链系统收益波动规律, 郭成恒和丁雪峰<sup>[19]</sup> 分析了考虑碳排放差异的闭环供应链奖惩机制与减排策略, Tseng 和 Hung<sup>[20]</sup> 考虑碳排放引起的运作成本和社会成本建立可持续供应链管理战略决策模型; 5) 低碳供应链上不同利益主体间运作协调与优化等, 如赵道致等<sup>[21-22]</sup> 研究了由单个制造商和单个零售商组成的供应链的协调机制设计问题以及制造商向具有公平偏好的零售商提供不同契约的供应链协调问题, 鲁力和陈旭<sup>[23]</sup> 研究了不同碳排放政策下基于回购合同的供应链协调问题。

近些年来, 随着博弈论的发展, 已有一些学者运用博弈论方法对供应链碳排放问题展开研究, 取得了一些重要研究成果<sup>[16-30]</sup>。但是, 现有研究仍然存在不足, 比如, 现有研究都没有考虑供应链碳减排投入具有外部正效应, 而这恰恰就为供应链上各节点企业提供了一个“搭便车”的动机。正

因为供应链碳减排投入外部正效应的存在, 将会极大地影响到供应链中各节点企业的决策, 进而使得各节点企业的行为演化出现新的特点和规律。不过, 目前鲜有文献以供应链中的供应商和制造商为主体, 运用演化博弈论来分析其碳减排投入行为问题。本文将在演化博弈的基础上, 研究现实中供应商与制造商的碳减排投入问题, 通过引入碳减排投入收益比, 分析现实中供应商和制造商行为的策略选择。

## 1 模型的建立

本文考虑一个由上游多个供应商和下游多个制造商构成的两层供应链结构, 每次随机从供应商群体中和制造商群体中各选出一名配对, 进行减排博弈。供应商和制造商是有限理性的, 很难在一次决策中做出最优选择, 他们考虑长期合作, 通过不断调整和不断改进策略直到达到演化稳定为止。在原有生产销售体系的基础上, 供应商(S)和制造商(M)的行为策略空间为(进行碳减排投入, 不进行碳减排投入, 简记为D, N)。供应商的碳减排投入包括低碳技术研发、原材料生产工艺低碳化、原材料运输和流通高效低碳环保等; 制造商的碳减排投入包括低碳技术研发、产品生产加工工艺改进、产品运输和流通高效低碳环保等。假设如下:

1) 消费者是理性的, 并愿意为低碳产品支付更高价格<sup>[1]</sup>;

2) 若供应商和制造商都不进行碳减排投入, 则供应链提供的产品为普通产品, 单位产品碳足迹不变, 产品碳排放量没有降低, 此时消费者愿意支付的产品价格不变。当需求确定时, 他们获得正常收益, 分别为  $V_S$  和  $V_M$ , 其中  $V_S > 0$  和  $V_M > 0$ ;

3) 当只有供应商进行碳减排投入时, 二氧化碳的碳排放仅在供应商处减少, 供应链的最终产品为低碳产品, 此时消费者愿意支付高于普通产品的价格。当需求确定时, 供应商的收益为  $(1 + \alpha_0) V_S - C_S$ , 其中  $\alpha_0$  ( $\alpha_0 > 0$ ) 为供应商进行碳减排的投入加大能够给其带来的收益增加比率,  $C_S$  为供应商的碳减排投入成本,  $C_S > 0$ 。当仅有供

应商进行碳减排,而制造商不进行碳减排投入却分享了供应商碳减排所带来的收益,这就构成其“搭便车”行为。此时的制造商获得了比原来不投入时更多的收益,制造商的收益为  $\pi_M$ ,且  $\pi_M > V_M$ ;

4) 当供应链中只有制造商进行碳减排投入时,二氧化碳的排放仅在制造商处减少,供应链的最终产品也为低碳产品,此时消费者愿意支付高于普通产品的价格。当需求确定时,制造商的收益为  $(1 + \beta_0) V_M - C_M$ ,其中  $\beta_0$  ( $\beta_0 > 0$ ) 为制造商进行碳减排的投入加大能够给其带来的收益增加比率,  $C_M$  为制造商的碳减排投入成本,且  $C_M > 0$ 。当仅有制造商进行碳减排,而供应商不进行碳减排投入却分享了制造商碳减排所带来的收益,这也构成了“搭便车”行为。此时的供应商获得了比原来不投入时更多的收益,供应商的收益为  $\pi_S$ ,且  $\pi_S > V_S$ ;

5) 当供应商与制造商都同时进行碳减排投

入,二氧化碳的排放在供应商处和制造商处都减少,供应链的最终产品为更低碳的产品,此时消费者愿意支付更高价格。当需求确定时,他们的收益分别为  $(1 + \alpha_1) V_S - C_S$  和  $(1 + \beta_1) V_M - C_M$ ,其中  $\alpha_1$  为供应商和制造商都进行减排投入时供应商碳减排投入的加大能给其带来收益的增加比率,且  $\alpha_1 > \alpha_0 > 0$ ;  $\beta_1$  为供应商和制造商都进行减排投入时制造商碳减排投入的加大能给其带来收益的增加比率,且  $\beta_1 > \beta_0 > 0$ ;

6) 惩罚机制已被证明可以激励企业进行长期合作<sup>[31]</sup>。当供应商或制造商存在“搭便车”的动机而不进行碳减排投入时,可以通过建立供应链契约与惩罚机制来促使供应商和制造商共同进行碳减排投入,降低供应链最终产品的碳足迹。

根据上面的假设,建立博弈的支付矩阵,如表 1 所示。

表 1 单个供应商与单个制造商的支付矩阵  
Table 1 Payoff matrix of a supplier and a manufacturer

供应商	制造商	
	进行碳减排投入(D)	不进行碳减排投入(N)
进行碳减排投入(D)	$(1 + \alpha_1) V_S - C_S, (1 + \beta_1) V_M - C_M$	$(1 + \alpha_0) V_S - C_S, \pi_M$
不进行碳减排投入(N)	$\pi_S, (1 + \beta_0) V_M - C_M$	$V_S, V_M$

## 2 演化博弈模型的求解

### 2.1 演化过程的平衡点

假设在供应商群体中,采取进行碳减排投入策略的比例为  $x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) 则采取“不进行碳减排投入”策略的比例为  $1 - x$ ;同时,假设在制造商群体中,采取“进行碳减排投入”策略的比例为  $y$ ,则采取“不进行碳减排投入”策略的比例为  $1 - y$ 。

对于供应商来说,选择“进行碳减排投入”策略的期望收益为

$$U_{1d} = y [(1 + \alpha_1) V_S - C_S] + (1 - y) \times [(1 + \alpha_0) V_S - C_S] \quad (1)$$

$$U_{1n} = y \pi_S + (1 - y) V_S \quad (2)$$

平均期望收益为

$$\bar{U}_1 = x U_{1d} + (1 - x) U_{1n} \quad (3)$$

对于制造商来说,选择“进行碳减排投入”和

“不进行碳减排投入”策略的期望收益  $U_{2d}$ 、 $U_{2n}$  和平均得益  $\bar{U}_2$  分别为

$$U_{2d} = x [(1 + \beta_1) V_M - C_M] + (1 - x) \times [(1 + \beta_0) V_M - C_M] \quad (4)$$

$$U_{2n} = x \pi_M + (1 - x) V_M \quad (5)$$

$$\bar{U}_2 = y U_{2d} + (1 - y) U_{2n} \quad (6)$$

根据演化博弈的复制动态公式<sup>[32-33]</sup>,可以得到供应商 A 的复制动态方程

$$X = \frac{dx}{dt} = x(U_{1d} - \bar{U}_1) = x(1 - x) \times \{ \alpha_0 V_S - C_S - [\pi_S - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1) V_S] y \} \quad (7)$$

同理,制造商 B 的复制动态方程

$$Y = \frac{dy}{dt} = y(U_{2d} - \bar{U}_2) = y(1 - y) \times \{ \beta_0 V_M - C_M - [\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1) V_M] x \} \quad (8)$$

由微分方程(7)和(8)可得一个二维动力系

统( I )

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = x(1-x) \{ \alpha_0 V_S - C_S - [\pi_S - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1) V_S ]y \} \\ \frac{dy}{dt} = y(1-y) \{ \beta_0 V_M - C_M - [\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1) V_M ]x \} \end{cases} \quad (9)$$

为了下面便于分析问题，令  $x_D = \frac{\beta_0 V_M - C_M}{\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1) V_M}$ ， $y_D = \frac{\alpha_0 V_S - C_S}{\pi_S - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1) V_S}$ ，很容易得到如下性质。

**命题 1** 该系统( I )的平衡点为( 0, 0 )、( 0, 1 )、( 1, 0 )、( 1, 1 )。当  $\frac{C_S}{V_S} < \alpha_0 < \alpha_1 < \frac{\pi_S + C_S - V_S}{V_S}$ ， $\frac{C_M}{V_M} < \beta_0 < \beta_1 < \frac{\pi_M + C_M - V_M}{V_M}$  时，点(  $x_D, y_D$  )也是系统( I )的平衡点。

**证明** 对于该系统( I )，分别令  $\frac{dx}{dt} = 0, \frac{dy}{dt} = 0$ ，显然有( 0, 0 )、( 0, 1 )、( 1, 0 )、( 1, 1 ) 是该系统( I )的平衡点。当  $\frac{C_S}{V_S} < \alpha_0 < \alpha_1 < \frac{\pi_S + C_S - V_S}{V_S}$ ， $\frac{C_M}{V_M} < \beta_0 < \beta_1 < \frac{\pi_M + C_M - V_M}{V_M}$  时  $\rho < \frac{\beta_0 V_M - C_M}{\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1) V_M} < 1$ ， $\rho < \frac{\alpha_0 V_S - C_S}{\pi_S - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1) V_S} < 1$ ，故(  $x_D, y_D$  )也是系统( I )的平衡点。

### 2.2 平衡点的稳定性分析

根据 Friedman<sup>[34]</sup> 提出的计算微分方程组构成动态系统的群体动态，其平衡点的稳定性分析可以通过分析该系统的 Jacobian 矩阵的局部稳定性得到<sup>[33, 35]</sup>。对微分方程组( 9 )依次求关于  $x$  和  $y$  的偏导数，可得出 Jacobian 矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial x} & \frac{\partial X}{\partial y} \\ \frac{\partial Y}{\partial x} & \frac{\partial Y}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} a_{11} &= (1-2x) \{ \alpha_0 V_S - C_S - [\pi_S - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1) V_S ]y \} \\ a_{12} &= -x(1-x) [\pi_S - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1) V_S ] \\ a_{21} &= -y(1-y) [\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1) V_M ] \\ a_{22} &= (1-2y) \{ \beta_0 V_M - C_M - [\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1) V_M ]x \} \end{aligned}$$

如果下列条件得到满足

- 1)  $a_{11} + a_{22} < 0$  (迹条件 其值记为  $trJ$ ) ;
- 2)  $\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} > 0$  ( Jacobian

行列式条件 其值记为  $det J$  ) .

复制动态方程的平衡点就是( 渐近 )局稳定的，该平衡点就是演化稳定策略为( ESS ) .

**命题 2** 当  $\alpha_0, \alpha_1, \beta_0$  和  $\beta_1$  所在区间发生变化时，演化稳定策略也将发生改变。

1) 当  $0 < \alpha_0 < \frac{C_S}{V_S}, \alpha_0 < \alpha_1 < \frac{\pi_S + C_S - V_S}{V_S}, 0 < \beta_0 < \frac{C_M}{V_M}$  和  $\beta_0 < \beta_1 < \frac{\pi_M + C_M - V_M}{V_M}$  时，系统( I )的演化稳定策略( ESS )为( N, N ) .

2) 当  $0 < \alpha_0 < \frac{C_S}{V_S}, \alpha_0 < \alpha_1 < \frac{\pi_S + C_S - V_S}{V_S}$  和  $\frac{C_M}{V_M} < \beta_0 < \beta_1 < \frac{\pi_M + C_M - V_M}{V_M}$  时，系统( I )的演化稳定策略( ESS )为( N, D ) .

3) 当  $\frac{C_S}{V_S} < \alpha_0 < \alpha_1 < \frac{\pi_S + C_S - V_S}{V_S}, 0 < \beta_0 < \frac{C_M}{V_M}$  和  $\beta_0 < \beta_1 < \frac{\pi_M + C_M - V_M}{V_M}$  时，系统( I )的演化稳定策略( ESS )为( D, N ) .

4) 当  $\frac{C_S}{V_S} < \alpha_0 < \alpha_1 < \frac{\pi_S + C_S - V_S}{V_S}$  和  $\frac{C_M}{V_M} < \beta_0 < \beta_1 < \frac{\pi_M + C_M - V_M}{V_M}$  时，系统( I )的演化稳定策略( ESS )为( N, D )和( D, N ) .

5) 当  $\frac{\pi_S + C_S - V_S}{V_S} < \alpha_0 < \alpha_1$  且  $\frac{\pi_M + C_M - V_M}{V_M} < \beta_0 < \beta_1$  时，系统( I )的演化稳定策略( ESS )为( D, D ) .

**证明** 根据上述判断方法，可得出 Jacobian 矩阵  $J$  在各个平衡点的迹的值和行列式的值，并判断其局部稳定性，证毕。

### 2.3 演化结果分析

由命题 2 可以得到供应商 A 和制造商 B 在五种情况下演化博弈过程，它们的演化相位图如图 1 所示。

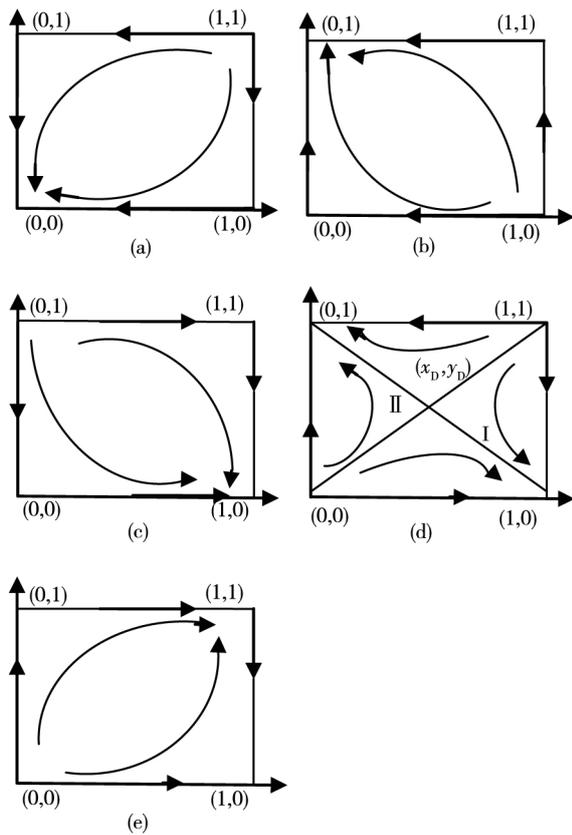


图1 五种情况下系统(I)演化动态相位图

Fig. 1 Dynamic phase diagram of system I evolution under five kinds of situations

由以上系统动态演化相位图,可以得到如下的分析结果:

1) 当供应商和制造商的碳减排投入收益比  $\alpha_0, \alpha_1, \beta_0$  和  $\beta_1$  都较小, 即  $0 < \alpha_0 < \frac{C_S}{V_S}, \alpha_0 < \alpha_1 < \frac{\pi_S + C_S - V_S}{V_S}$  且  $0 < \beta_0 < \frac{C_M}{V_M}, \beta_0 < \beta_1 < \frac{\pi_M + C_M - V_M}{V_M}$  时. 那么, 不论是单独减排还是共同减排, 碳减排投入给他们带来的收益增额都较小, 而他们却为此付出了投入成本, 如图 1(a) 所示. 此时 (0, 0) 是系统演化稳定点, (0, 1) 和 (1, 0) 是鞍点, (1, 1) 是不稳定点, 即供应商和制造商都不进行碳减排投入是演化稳定策略.

2) 当供应链中处于核心位置的制造商进行碳减排投入的投入收益比  $\beta_0$  和  $\beta_1$  满足  $\frac{C_M}{V_M} < \beta_0 < \beta_1 < \frac{\pi_M + C_M - V_M}{V_M}$  时, 即制造商进行碳减排投入

获得的收益大于他为此而付出的碳减排投入成本, 但却小于此时他采取“搭便车”行为能获得的收益  $\pi_M$ . 此时供应商的投入收益比  $\alpha_0$  和  $\alpha_1$  保持不变, 满足  $0 < \alpha_0 < \frac{C_S}{V_S}, \alpha_0 < \alpha_1 < \frac{\pi_S + C_S - V_S}{V_S}$ , 供应商进行碳减排投入能给他带来的收益小于其为此付出的投入成本, 供应商不会进行碳减排投入, 制造商的“搭便车”行为就无法实施, 如图 1(b) 所示. 此时 (0, 1) 是系统演化稳定点, (0, 0) 和 (1, 0) 是鞍点, (1, 1) 是不稳定点, 即供应商不进行碳减排投入, 制造商进行碳减排投入是演化稳定策略.

3) 当供应商进行碳减排投入的投入收益比  $\alpha_0$  和  $\alpha_1$  增大而满足  $\frac{C_S}{V_S} < \alpha_0 < \alpha_1 < \frac{\pi_S + C_S - V_S}{V_S}$  时, 供应商进行碳减排投入能获得的收益大于其付出的投入成本, 但却小于他采取“搭便车”行为获得的收益  $\pi_S$ . 制造商的投入收益比  $\beta_0$  和  $\beta_1$  保持不变满足  $0 < \beta_0 < \frac{C_M}{V_M}$  和  $\beta_0 < \beta_1 < \frac{\pi_M + C_M - V_M}{V_M}$  时, 制造商进行碳减排投入给他带来的收益小于其为此付出的投入成本, 制造商不会进行碳减排投入, 供应商的“搭便车”行为无法实施, 如图 1(c) 所示. 此时 (1, 0) 是系统演化稳定点, (0, 0) 和 (1, 1) 是鞍点, (1, 1) 是不稳定点, 即供应商进行碳减排投入, 制造商不进行碳减排投入是演化稳定策略.

4) 当供应商与制造商进行碳减排投入的收益比满足  $\frac{C_S}{V_S} < \alpha_0 < \alpha_1 < \frac{\pi_S + C_S - V_S}{V_S}$  和  $\frac{C_M}{V_M} < \beta_0 < \beta_1 < \frac{\pi_M + C_M - V_M}{V_M}$  时, 供应商和制造商进行碳减排投入所能带来的收益大于他们为此付出的成本, 但小于他们“搭便车”而获得的收益  $\pi_S$  和  $\pi_M$ , 如图 1(d) 所示. 此时 (0, 1) 和 (1, 0) 是系统稳定点, (0, 0) 和 (1, 1) 是不稳定点,  $(x_D, y_D)$  是鞍点. 供应商进行碳减排投入, 制造商不进行碳减排投入或供应商不进行碳减排投入, 制造商进行碳减排投入是系统的演化稳定策略, 但具体会沿着哪条路径发展到达哪种均衡状态, 与支付矩阵和系统的初始状态都有关, 如图 1(d) 所示, 由两个不稳定点和一个鞍点连成的折线为系统收敛到两个状态的临界线. 在折线的左上方(区域 II),

系统收敛于(0, 1), 即供应商不进行碳减排投入, 制造商进行碳减排投入为系统的演化稳定策略; 在折线的右下方(区域 I), 系统收敛于(1, 0), 即供应商进行碳减排投入, 制造商不进行碳减排投入为系统的演化稳定策略。

5) 当供应链中供应商和制造商进行碳减排的投入收益比都较大, 满足  $\frac{\pi_s + C_s - V_s}{V_s} < \alpha_0 < \alpha_1$  和  $\frac{\pi_m + C_m - V_m}{V_m} < \beta_0 < \beta_1$  时, 此时双方进行碳减排投入所获得的收益分别大于此时他们从对方进行碳减排投入而自己采取“搭便车”行为所获得的收益  $\pi_s$  和  $\pi_m$ , 如图 1(e) 所示。此时(1, 1) 是系统演化的稳定点, (0, 1) 和 (1, 0) 是鞍点, (0, 0) 是不稳定点, 即供应商和制造商都进行碳减排投入为系统的演化稳定策略。

### 3 参数变化对第四种情况下系统演化稳定均衡结果的影响

如上所述, 当供应商与制造商的碳减排投入收益比满足  $\frac{C_s}{V_s} < \alpha_0 < \alpha_1 < \frac{\pi_s + C_s - V_s}{V_s}$  和  $\frac{C_m}{V_m} < \beta_0 < \beta_1 < \frac{\pi_m + C_m - V_m}{V_m}$  时, 博弈双方的演化稳定策略为( 不进行碳减排投入, 进行碳减排投入) 或( 进行碳减排投入, 不进行碳减排投入)。系统最终收敛于哪个状态, 由区域 I 和区域 II 的面积大小决定, 用  $S_1$  和  $S_2$  表示。当  $S_1 > S_2$  时, 系统收敛到均衡点(1, 0) 的概率大于收敛于均衡点(0, 1) 的概率; 反之, 当  $S_1 < S_2$  时, 系统收敛到均衡点(1, 0) 的概率小于收敛于均衡点(0, 1) 的概率; 当  $S_1 = S_2$  时, 系统收敛到均衡点(1, 0) 和(0, 1) 的概率相等。

通过分析影响区域 I 或区域 II 的面积的因素即可转化为分析影响第四种情况下系统演化稳定策略的因素。

以分析区域 II 的面积为例, 经计算可知系统收敛于均衡点(0, 1) 的概率

$$S_2 = \frac{1}{2} \left[ \frac{\beta_0 V_m - C_m}{\pi_m - (\beta_1 - \beta_0 + 1) V_m} + \frac{\pi_s - (1 + \alpha_1) V_s + C_s}{\pi_s - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1) V_s} \right] \quad (11)$$

由式(11) 可知, 影响区域 II 的面积参数共有 10 项, 包括  $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$ 、 $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $C_s$ 、 $C_m$ 、 $V_s$ 、 $V_m$ 、 $\pi_s$  和  $\pi_m$ 。经分析可得到如下命题。

**命题 3** 当供应商的碳减排投入收益比  $\alpha_0$  和  $\alpha_1$  越小, 而制造商投入收益比  $\beta_0$  和  $\beta_1$  越大, 则供应商不进行碳减排投入而制造商进行碳减排投入的概率越大, 反之供应商进行碳减排投入而制造商不进行碳减排投入的概率越大。

**证明** 当其他因素一定时, 将  $S_2$  分别对  $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$ 、 $\beta_0$ 、 $\beta_1$  求导, 得到

$$\begin{aligned} \frac{dS_2}{d\alpha_0} &= -\frac{[\pi_s - (1 + \alpha_1) V_s + C_s] V_s}{2 [\pi_s - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1) V_s]^2} < 0, \\ \frac{dS_2}{d\alpha_1} &= -\frac{[\alpha_0 V_s - C_s] V_s}{2 [\pi_s - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1) V_s]^2} < 0, \\ \frac{dS_2}{d\beta_0} &= \frac{[\pi_m - (1 + \beta_1) V_m + C_m] V_m}{2 [\pi_m - (\beta_1 - \beta_0 + 1) V_m]^2} > 0, \\ \frac{dS_2}{d\beta_1} &= \frac{[\beta_0 V_m - C_m] V_m}{2 [\pi_m - (\beta_1 - \beta_0 + 1) V_m]^2} > 0. \end{aligned}$$

分析可知: 当其他因素一定时, 供应商的碳减排投入收益比  $\alpha_0$  和  $\alpha_1$  越小而制造商投入收益比  $\beta_0$  和  $\beta_1$  越大, 系统收敛于均衡点(0, 1) 的概率就越大, 即供应商不进行碳减排投入, 制造商进行碳减排投入的概率越大; 反之, 当其他因素一定时, 供应商的投入收益比  $\alpha_0$  和  $\alpha_1$  越大, 制造商投入收益比  $\beta_0$  和  $\beta_1$  越小, 系统收敛于均衡点(0, 1) 的概率就越小, 即供应商不进行碳减排投入, 制造商进行碳减排投入的概率就越小。证毕。

**命题 4** 当供应商碳减排投入成本越大, 制造商碳减排投入成本越小, 则供应商不进行碳减排投入而制造商进行碳减排投入的概率越大; 反之, 则供应商进行碳减排投入而制造商不进行碳减排投入的概率越大。

**证明** 当其他因素一定时,  $S_2$  分别对  $C_m$  和  $C_s$  求导, 得到  $\frac{dS_2}{dC_s} = \frac{1}{2 [\pi_s - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1) V_s]} > 0$ ;

$\frac{dS_2}{dC_m} = -\frac{1}{2 [\pi_m - (\beta_1 - \beta_0 + 1) V_m]} < 0$ 。分析可知: 当其他因素一定时, 供应商碳减排投入成本越大, 制造商碳减排投入成本越小, 则系统收敛于均衡点(0, 1) 的概率就越大, 供应商不进行碳减排投入而制造商进行碳减排投入的概率越大; 反之, 当其他因素一定时, 供应商碳减排投入成本越小, 制造商碳减排投入成本越大, 则系统收敛于均衡

点(0, 1)的概率就越小. 证毕.

命题5 供应商选择不进行碳减排投入的收益  $V_S$  越小, 制造商选择不进行碳减排投入的收益  $V_M$  越大, 供应商不进行碳减排投入而制造商进行碳减排投入的概率越大; 反之, 供应商进行碳减排投入而制造商不进行碳减排投入的概率越大.

证明 当其他因素一定时,  $S_2$  分别对  $V_S$  和  $V_M$  求导

$$\frac{dS_2}{dV_S} = \frac{-\alpha_0\pi_s + (\alpha_1 - \alpha_0 + 1)C_S}{2[\pi_s - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1)V_S]^2},$$

$$\frac{dS_2}{dV_M} = \frac{\beta_0\pi_M - C_M(\beta_1 - \beta_0 + 1)}{2[\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1)V_M]^2}$$

因为  $\frac{C_S}{V_S} < \alpha_0 < \alpha_1 < \frac{\pi_s + C_S - V_S}{V_S}$

所以  $\frac{\pi_s}{V_S} > 1 + \alpha_1 - \frac{C_S}{V_S} > 1 + \alpha_1 - \alpha_0$

$$\frac{dS_2}{dV_S} = \frac{-\alpha_0\pi_s + (\alpha_1 - \alpha_0 + 1)C_S}{2[\pi_s - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1)V_S]^2} <$$

$$\frac{-\alpha_0\pi_s + \frac{\pi_s C_S}{V_S}}{2[\pi_s - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1)V_S]^2} <$$

$$-\frac{\pi_s(\alpha_0 - \frac{C_S}{V_S})}{2[\pi_s - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1)V_S]^2} < 0$$

因为  $\frac{C_M}{V_M} < \beta_0 < \beta_1 < \frac{\pi_M + C_M - V_M}{V_M}$

所以  $\frac{\pi_M}{V_M} > 1 + \beta_1 - \frac{C_M}{V_M} > 1 + \beta_1 - \beta_0$

$$\frac{dS_2}{dV_M} = \frac{\beta_0\pi_M - C_M(\beta_1 - \beta_0 + 1)}{2[\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1)V_M]^2} >$$

$$\frac{\beta_0\pi_M - \frac{\pi_M C_M}{V_M}}{2[\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1)V_M]^2} >$$

$$\frac{\pi_M(\beta_0 - \frac{C_M}{V_M})}{2[\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1)V_M]^2} > 0$$

故  $\frac{dS_2}{dV_S} < 0, \frac{dS_2}{dV_M} > 0$  这表明  $S_2$  是  $V_S$  的减函数,

是  $V_M$  的增函数. 分析可知: 当其他因素一定时, 供应商选择不进行碳减排投入的收益  $V_S$  越小, 制造商选择不进行碳减排投入的收益  $V_M$  越大, 系统收敛于均衡点(0, 1)的概率就越大, 即供应商不进行碳减排投入而制造商进行碳减排投入的概率

越大; 反之, 当其他因素一定时,  $V_S$  越大,  $V_M$  越小, 则供应商进行碳减排投入而制造商不进行碳减排投入的概率就越大. 证毕.

命题6 供应商采取“搭便车”行为获得的收益  $\pi_s$  越大, 制造商采取“搭便车”行为所获得的收益  $\pi_M$  越小, 则供应商不进行碳减排投入而制造商进行碳减排投入的概率越大; 反之, 则供应商进行碳减排投入而制造商不进行碳减排投入的概率越大.

证明 当其他因素一定时,  $S_2$  分别对  $\pi_s$  和  $\pi_M$  求导

$$\frac{dS_2}{d\pi_s} = \frac{\alpha_0 V_S - C_S}{2[\pi_s - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1)V_S]^2},$$

$$\frac{dS_2}{d\pi_M} = -\frac{\beta_0 V_M - C_M}{2[\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1)V_M]^2}$$

因为  $\frac{C_S}{V_S} < \alpha_0$

所以  $\alpha_0 V_S - C_S > 0$

$$\frac{dS_2}{d\pi_s} = \frac{\alpha_0 V_S - C_S}{2[\pi_s - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1)V_S]^2} > 0$$

又因为  $\frac{C_M}{V_M} < \beta_0$

所以  $\beta_0 V_M - C_M > 0$

$$\frac{dS_2}{d\pi_M} = -\frac{\beta_0 V_M - C_M}{2[\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1)V_M]^2} < 0$$

故  $\frac{dS_2}{d\pi_s} > 0, \frac{dS_2}{d\pi_M} < 0$  这表明  $S_2$  是  $\pi_s$  的增函数, 是  $\pi_M$  的减函数. 分析可知: 当其他因素一定时, 供应商采取“搭便车”行为获得的收益  $\pi_s$  越大, 制造商采取“搭便车”行为所获得的收益  $\pi_M$  越小, 则系统收敛于均衡点(0, 1)的概率就越大, 供应商不进行碳减排投入而制造商进行碳减排投入的概率越大; 反之, 当其他因素一定时,  $\pi_s$  越小,  $\pi_M$  越大, 则供应商进行碳减排投入而制造商不进行碳减排投入的概率越大. 证毕.

### 4 惩罚机制下的演化分析

由上文分析可知, 当供应链中供应商与制造商进行碳减排投入收益比满足  $\frac{C_S}{V_S} < \alpha_0 < \alpha_1 <$

$$\frac{\pi_s + C_S - V_S}{V_S} \text{ 且 } \frac{C_M}{V_M} < \beta_0 < \beta_1 < \frac{\pi_M + C_M - V_M}{V_M}$$

时, 供应商和制造商进行碳减排投入所能带来的收益大于他们为此付出的成本, 但小于他们“搭便车”而获得的收益  $\pi_S$  和  $\pi_M$ . 此时供应商和制造商存在“搭便车”的动机, 不进行碳减排投入.

假定供应商与制造商签订碳减排契约: 如果在实际生产运营活动中, 其中一方进行碳减排投入, 而

另一方未进行碳减排投入, 则未进行碳减排投入的一方将受到惩罚, 且罚金交给进行碳减排投入的一方; 若双方均未进行碳减排投入, 则都不受到惩罚.

在该碳减排契约的调节下, 供应商和制造商的碳减排博弈的支付矩阵将发生变化. 假设该罚金为  $K$  ( $K > 0$ ), 此时供应链的支付矩阵如表 2 所示.

表 2 碳减排契约下单个供应商与单个制造商的支付矩阵

Table 2 Payoff matrix of a supplier and a manufacturer under punishment mechanism

供应商	制造商	
	进行碳减排投入 (D)	不进行碳减排投入 (N)
进行碳减排投入 (D)	$(1 + \alpha_1) V_S - C_S, (1 + \beta_1) V_M - C_M$	$(1 + \alpha_0) V_S - C_S + K, \pi_M - K$
不进行碳减排投入 (N)	$\pi_S - K, (1 + \beta_0) V_M - C_M + K$	$V_S, V_M$

根据演化博弈的复制动态公式<sup>[33, 36]</sup>, 可以得到供应商 A 的复制动态方程为

$$X^1 = x(1-x) \{ \alpha_0 V_S - C_S - [\pi_S - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1) V_S] y + K \} \quad (12)$$

同理, 制造商 B 的复制动态方程为

$$Y^1 = y(1-y) \{ \beta_0 V_M - C_M - [\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1) V_M] x + K \} \quad (13)$$

由微分方程(12)和(13)可得一个二维动力系统 ( $I_1$ )

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = x(1-x) \{ \alpha_0 V_S - C_S - [\pi_S - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1) V_S] y + K \} \\ \frac{dy}{dt} = y(1-y) \{ \beta_0 V_M - C_M - [\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1) V_M] x + K \} \end{cases} \quad (14)$$

为了便于分析, 令  $x_{D1} = \frac{\beta_0 V_M - C_M + K}{\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1) V_M}$ ,  $y_{D1} = \frac{\alpha_0 V_S - C_S + K}{\pi_S - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1) V_S}$  能够得到以下命题.

命题 7 该系统  $I_1$  的平衡点为  $(0, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(1, 0)$  和  $(1, 1)$ . 当且仅当罚金  $K$  满足  $0 < K < \max(\pi_S - (\alpha_1 + 1) V_S + C_S, \pi_M - (\beta_1 + 1) V_M + C_M)$  时,  $(x_{D1}, y_{D1})$  也为系统的平衡点.

证明 对于该系统, 分别令  $X^1 = 0, Y^1 = 0$  显然有  $(0, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(1, 0)$ 、 $(1, 1)$  是该系统的平衡点.

因为  $\frac{C_M}{V_M} < \beta_0 < \beta_1 < \frac{\pi_M + C_M - V_M}{V_M}$

所以  $\pi_M > (1 + \beta_1 - \beta_0) V_M, C_M - \beta_0 V_M < 0$

所以  $0 < x_{D1} < 1 \Leftrightarrow 0 < \frac{\beta_0 V_M - C_M + K}{\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1) V_M} < 1$

$1 \Leftrightarrow C_M - \beta_0 V_M < K < \pi_M - (\beta_1 + 1) V_M + C_M$

又因为  $\frac{C_S}{V_S} < \alpha_0 < \alpha_1 < \frac{\pi_S + C_S - V_S}{V_S}$

所以  $\pi_S > (1 + \alpha_1 - \alpha_0) V_S, C_S - \alpha_0 V_S < 0$

$0 < y_{D1} < 1 \Leftrightarrow 0 < \frac{\alpha_0 V_S - C_S + K}{\pi_S - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1) V_S} < 1 \Leftrightarrow 0 < \frac{\alpha_0 V_S - C_S + K}{\pi_S - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1) V_S} < 1 \Leftrightarrow C_S - \alpha_0 V_S < K < \pi_S - (1 + \alpha_1) V_S + C_S$

可得  $0 < x_{D1} < 1, 0 < y_{D1} < 1$ , 可得

$\max(C_S - \alpha_0 V_S, C_M - \beta_0 V_M) < K < \min(\pi_S - (\alpha_1 + 1) V_S + C_S, \pi_M - (\beta_1 + 1) V_M + C_M)$

又因为  $K > 0$ , 可得

$0 < K < \min(\pi_S - (\alpha_1 + 1) V_S + C_S, \pi_M - (\beta_1 + 1) V_M + C_M)$ . 证毕.

表 3 系统  $I_1$  的平衡点的分析

Table 3 Analysis on equilibrium point of system  $I_1$

平衡点	$TrJ$	$DetJ$
$(0, 0)$	$(\alpha_0 V_S - C_S + K) + (\beta_0 V_M - C_M + K)$	$(\alpha_0 V_S - C_S + K) \times (\beta_0 V_M - C_M + K)$
$(0, 1)$	$\{ \alpha_0 V_S - C_S + K - [\pi_S - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1) V_S] \} - (\beta_0 V_M - C_M + K)$	$-\{ \alpha_0 V_S - C_S + K - [\pi_S - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1) V_S] \} \times (\beta_0 V_M - C_M + K)$
$(1, 0)$	$-(\alpha_0 V_S - C_S + K) + \{ \beta_0 V_M - C_M + K - [\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1) V_M] \}$	$-(\alpha_0 V_S - C_S + K) \times \{ \beta_0 V_M - C_M + K - [\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1) V_M] \}$
$(1, 1)$	$-\{ \alpha_0 V_S - C_S + K - [\pi_S - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1) V_S] \} - \{ \beta_0 V_M - C_M + K - [\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1) V_M] \}$	$\{ \alpha_0 V_S - C_S + K - [\pi_S - (\alpha_1 - \alpha_0 + 1) V_S] \} \times \{ \beta_0 V_M - C_M + K - [\pi_M - (\beta_1 - \beta_0 + 1) V_M] \}$

命题8 (1,1)是上述系统 I<sub>1</sub> 唯一的 ESS 的充要条件是

$$K > \max(\pi_s - (\alpha_1 + 1)V_s + C_s, \pi_m - (\beta_1 + 1)V_m + C_m) \quad (15)$$

证明 由表3分析可知,平衡点(1,1)是系统 I<sub>1</sub> 唯一的 ESS 的充要条件为 detJ > 0, trJ < 0, 即 {α<sub>0</sub>V<sub>s</sub> - C<sub>s</sub> + K - [π<sub>s</sub> - (α<sub>1</sub> - α<sub>0</sub> + 1)V<sub>s}] × {β<sub>0</sub>V<sub>m</sub> - C<sub>m</sub> + K - [π<sub>m</sub> - (β<sub>1</sub> - β<sub>0</sub> + 1)V<sub>m}] > 0, 且 -{α<sub>0</sub>V<sub>s</sub> - C<sub>s</sub> + K - [π<sub>s</sub> - (α<sub>1</sub> - α<sub>0</sub> + 1)V<sub>s}] - {β<sub>0</sub>V<sub>m</sub> - C<sub>m</sub> + K - [π<sub>m</sub> - (β<sub>1</sub> - β<sub>0</sub> + 1)V<sub>m}] < 0. 故 {α<sub>0</sub>V<sub>s</sub> - C<sub>s</sub> + K - [π<sub>s</sub> - (α<sub>1</sub> - α<sub>0</sub> + 1)V<sub>s}] > 0, 且 {β<sub>0</sub>V<sub>m</sub> - C<sub>m</sub> + K - [π<sub>m</sub> - (β<sub>1</sub> - β<sub>0</sub> + 1)V<sub>m}] > 0. 由此可得 K > max(π<sub>s</sub> - (α<sub>1</sub> + 1)V<sub>s</sub> + C<sub>s}, π<sub>m</sub> - (β<sub>1</sub> + 1)V<sub>m</sub> + C<sub>m}). 当式(12)成立时,(0,0)是不稳定点,(0,1)和(1,0)是系统 I<sub>1</sub> 的鞍点,(1,1)是系统 I<sub>1</sub> 唯一的 ESS, 证毕.</sub></sub></sub></sub></sub></sub></sub></sub>

此时 (x<sub>D1</sub>, y<sub>D1</sub>) 不是系统 I<sub>1</sub> 的平衡点,系统 I<sub>1</sub> 的演化相位图同图 1(e) 的形状类似. 这表明, 当  $\frac{C_s}{V_s} < \alpha_0 < \alpha_1 < \frac{\pi_s + C_s - V_s}{V_s}$  且  $\frac{C_m}{V_m} < \beta_0 < \beta_1 < \frac{\pi_m + C_m - V_m}{V_m}$  时, 供应商和制造商都存在不进行碳减排投入而采取“搭便车”行为的动机, 但只要供应链契约约定的惩罚金比供应商和制造商采取“搭便车”行为获得的收益与共同进行减排投入带来的收益之差大时, 即  $K > \max(\pi_s - (\alpha_1 + 1)V_s + C_s, \pi_m - (\beta_1 + 1)V_m + C_m)$ , 则供应商和制造商都会趋向于进行碳减排投入. 因此, 供应商和制造商通过建立供应链契约与惩罚机制, 可以调整供应链各方的收益矩阵, 使“搭便车”行为无利可图, 减少“搭便车”的概率, 从而提高供应链各节点企业进行碳减排投入的概率.

### 5 数值模拟

F 公司为珠三角一家有一定影响的牛仔服饰制造企业, 具有 20 多年牛仔服饰生产经验. F 公司作为供应链上的核心企业, 与其上游面料辅料供应商和下游服饰分销商组成了一个牛仔服饰供应链. 根据 F 公司所在供应链产品碳减排投入的

调研<sup>②</sup> 获得以下信息:

其供应商单独进行碳减排投入时的投入收益比 α<sub>0</sub> ∈ [0.228, 0.243], 双方都进行碳减排投入时的投入收益比 α<sub>1</sub> ∈ [0.452, 0.464], 满足 α<sub>0</sub> < α<sub>1</sub>; F 公司单独进行碳减排投入时的投入收益比 β<sub>0</sub> ∈ [0.235, 0.263], 双方都进行碳减排投入时的投入收益比 β<sub>1</sub> ∈ [0.361, 0.385], 满足 β<sub>0</sub> < β<sub>1</sub>; 其供应商进行碳减排投入成本 C<sub>s</sub> ∈ [800, 900] 万元, F 公司进行碳减排投入成本 C<sub>m</sub> ∈ [1 350, 1 450] 万元; F 公司及其供应商都不进行碳减排投入时其供应商的收益 V<sub>s</sub> ∈ [3 500, 4 000] 万元, 供应商采取“搭便车”行为时获得的收益 π<sub>s</sub> ∈ [5 154, 5 292] 万元; F 公司及其供应商都不进行碳减排投入时 F 公司的收益 V<sub>m</sub> ∈ [5 700, 6 200] 万元, F 公司采取“搭便车”行为时获得的收益 π<sub>m</sub> ∈ [7 114, 7 190] 万元. F 公司所在供应链年产量约 500 万, 不进行碳减排投入时, 碳排放量 e<sub>s0</sub> = 2.82 万 t, e<sub>m0</sub> = 3.38 万 t; F 公司和制造商进行碳减排投入时, 碳减排量 e<sub>s1</sub> ∈ [0.624, 0.676 8] 万 t, e<sub>m1</sub> ∈ [0.811 2, 0.980 2] 万 t.

#### 5.1 供应商和制造商存在“搭便车”动机

由上文可知, 当供应商与制造商的碳减排投入收益比满足  $\frac{C_s}{V_s} < \alpha_0 < \alpha_1 < \frac{\pi_s + C_s - V_s}{V_s}$  且  $\frac{C_m}{V_m} < \beta_0 < \beta_1 < \frac{\pi_m + C_m - V_m}{V_m}$  时, 供应商和制造商存在碳减排投入“搭便车”动机. 博弈双方的演化稳定策略为 (N, D) 或 (D, N). 系统最终收敛于哪个状态受供应商和制造商碳减排投入收益比、碳减排投入成本、不进行碳减排投入时的收益、采取“搭便车”行为获得的收益和供应链惩罚机制的影响.

结合 F 公司所在供应链实际运营情况, 当给定参数值时, 相关参数的取值如下:

F 公司的供应商进行碳减排投入成本的取值 C<sub>s</sub> = 900, F 公司进行碳减排投入成本的取值 C<sub>m</sub> = 1 400 万元; F 公司及其供应商都不进行碳减排投入时其供应商的收益取值 V<sub>s</sub> = 4 000 万元, 供应商采取“搭便车”行为时获得的收益取值 π<sub>s</sub> = 5 224 万元; F 公司及其供应商都不进行碳

② 数据来源: 广东省哲学社会科学一般项目“基于供应链的减少多阶碳足迹的管理模式研究(GD10CGL19)”调研报告, 2012 年.

减排投入时制造商的收益取值  $V_M = 6\,000$  万元,  $F$  公司采取“搭便车”行为时获得的收益取值  $\pi_M = 7\,152$  万元. 当给定参数值时,  $F$  公司的供应商单独进行碳减排投入时的投入收益比  $\alpha_0 = 0.24$ , 双方都进行碳减排投入时的投入收益比  $\alpha_1 = 0.46$ ;  $F$  公司单独进行碳减排投入时的投入收益比取值  $\beta_0 = 0.25$ , 双方都进行减排投入时的投入收益比的  $\beta_1 = 0.37$ . 此时,  $F$  公司及其供应商和制造商的碳减排投入收益比满足  $0.228 < \alpha_0 < \alpha_1 < 0.464$  且  $0.235 < \beta_0 < \beta_1 < 0.385$ .

根据上述参数值进行数值模拟, 分析不同因素对供应链碳减排投入博弈均衡的影响.

1) 碳减排投入收益比对博弈均衡的影响

当  $F$  公司的供应商单独减排时碳减排投入收益比  $\alpha_0$  在区间  $(0.228, 0.243)$  变化, 双方都减排时供应商的碳减排投入收益比分别取值  $\alpha_1 = 0.455, 0.461, 0.48$  和  $0.462$  时, 其他参数取值如上文所述. 根据式(11)可得到, 当供应商单独减排时不同碳减排投入收益比对均衡状态  $(N, D)$  的概率的影响情况, 如图 2 所示. 由图 2 可知,  $S_2$  随着供应商单独减排时的碳减排投入收益比  $\alpha_0$  的减小而增大; 当  $\alpha_0$  一定时,  $\alpha_1$  越小,  $S_2$  越大. 这表明,  $S_2$  随着双方都减排时, 供应商碳减排投入收益比  $\alpha_1$  的减小而增大.

当  $F$  公司单独减排时碳减排投入收益比  $\beta_0$  在区间  $(0.235, 0.263)$  变化, 双方都减排时  $F$  公司的碳减排投入收益比  $\beta_1$  分别取值  $\beta_1 = 0.367, 0.373, 0.379$  和  $0.385$  时, 其他参数取值如上文所述. 根据式(11)可得到, 当  $F$  公司单独减排时不同碳减排投入收益比对均衡状态  $(N, D)$  的概率的影响情况, 如图 3 所示. 由图 3 可知,  $S_2$  随着  $F$  公司单独减排时的碳减排收益投入比  $\beta_0$  的增大而增大; 当  $\beta_0$  一定时,  $\beta_1$  越大,  $S_2$  越大; 这表明  $S_2$  随着双方都减排时,  $F$  公司碳减排投入收益比  $\beta_1$  的增大而增大.

由图 2 和图 3 可知:  $F$  公司的供应商进行碳减排投入的收益比越小, 供应商进行碳减排投入的动机越小,  $F$  公司进行碳减排投入的收益比越大, 其进行碳减排投入的动机越大, 博弈的均衡状态为  $(N, D)$  的概率越大. 反之, 博弈的均衡状态为  $(N, D)$  的概率越小. 与命题 3 结论一致.

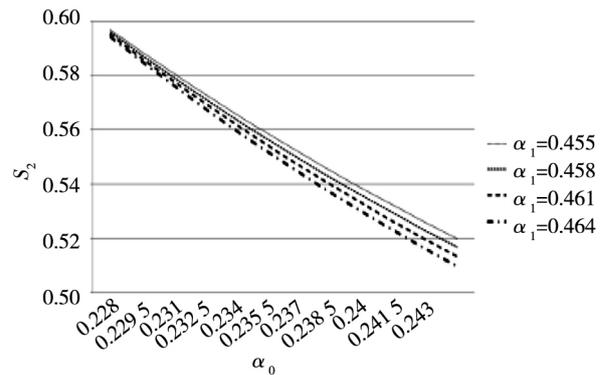


图 2  $\alpha_0$  和  $\alpha_1$  对  $(N, D)$  均衡概率的影响  
Fig. 2 Impact of  $\alpha_0$  and  $\alpha_1$  to equilibrium probability

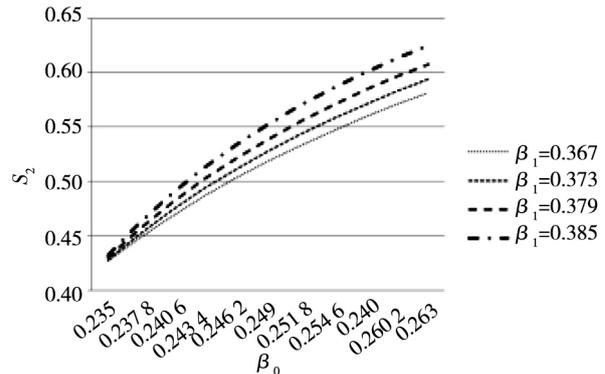


图 3  $\beta_0$  和  $\beta_1$  对  $(N, D)$  均衡概率的影响  
Fig. 3 Impact of  $\beta_0$  and  $\beta_1$  to equilibrium probability

2) 碳减排投入成本对博弈均衡的影响

当  $F$  公司的供应商碳减排投入成本  $C_S \in [800, 900]$  万元, 其他参数的值如上文所述. 根据式(11)可以得到供应商碳减排成本对均衡状态  $(N, D)$  的概率的影响情况, 如图 4 所示. 由图 4 可知,  $S_2$  随着供应商碳减排投入成本  $C_S$  的增大而增大.

当  $F$  公司碳减排投入成本  $C_M \in [1\,350, 1\,450]$  万元, 其他参数的值如上文所述. 根据式(11)可以得到供应商碳减排成本对均衡状态  $(N, D)$  的概率的影响情况如图 5 所示. 由图 5 可知,  $S_2$  随着供应商碳减排投入成本  $C_M$  的减小而增大.

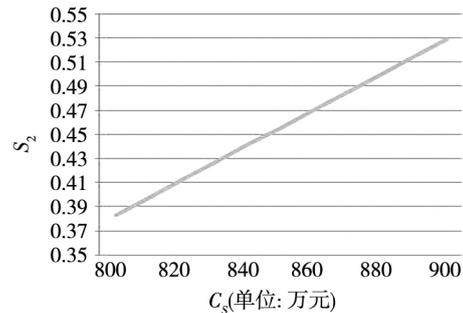


图 4  $C_S$  对  $(N, D)$  均衡概率的影响  
Fig. 4 Impact of  $C_S$  to equilibrium probability

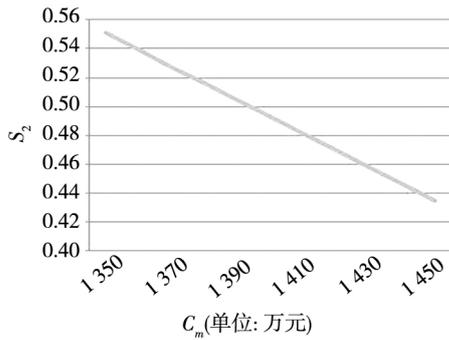


图5  $C_m$ 对(N, D)均衡概率的影响

Fig. 5 Impact of  $C_m$  to equilibrium probability

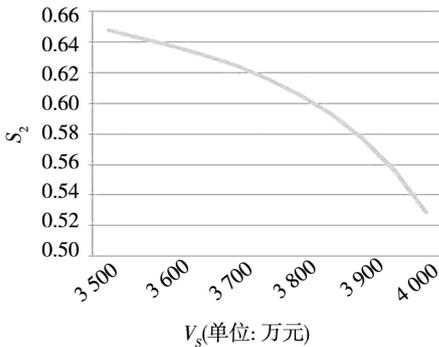


图6  $V_S$ 对(N, D)均衡概率的影响

Fig. 6 Impact of  $V_S$  to equilibrium probability

由图4和图5可知: 供应商碳减排投入成本越大, 其进行碳减排投入的动机越小, F公司碳减排投入成本越小, 其进行碳减排投入的动机越大, 博弈的均衡状态为(N, D)的概率越大. 反之, 博弈的均衡状态为(N, D)的概率越小. 与命题4的结论一致.

### 3) 双方均不进行碳减排投入时的收益对博弈均衡的影响

当双方均不进行碳减排投入时, 供应商的收益  $V_S \in [3\ 500\ 4\ 000]$  万元, 其他参数的值如上文所述. 根据式(11)可以得到, 当均不减排时, 供应商收益对均衡状态(N, D)的概率的影响情况, 如图6所示. 由图6可知,  $S_2$  随着供应商收益  $V_S$  的减小而增大.

当双方均不进行碳减排投入时, F公司的收益  $V_M \in [5\ 700\ 6\ 200]$  万元, 其他参数的值如上文所述. 根据式(11)可以得到, 双方均不减排时, F公司收益对均衡状态(N, D)的概率的影响情况, 如图7所示. 由图7可知,  $S_2$  随着F公司收益  $V_M$  的增大而增大.

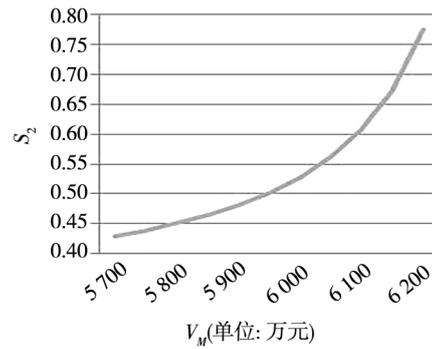


图7  $V_M$ 对(N, D)均衡概率的影响

Fig. 7 Impact of  $V_M$  to equilibrium probability

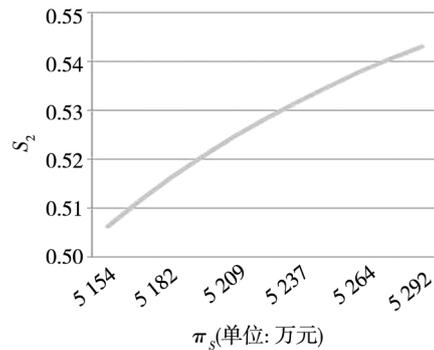


图8  $\pi_S$ 对(N, D)均衡概率的影响

Fig. 8 Impact of  $\pi_S$  to equilibrium probability

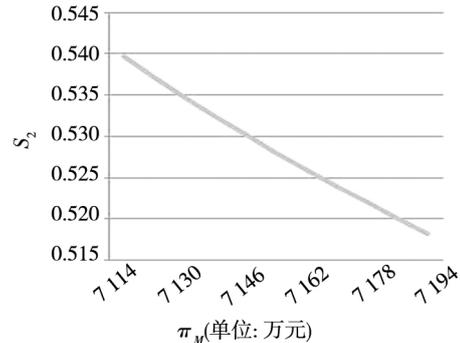


图9  $\pi_M$ 对(N, D)均衡概率的影响

Fig. 9 Impact of  $\pi_M$  to equilibrium probability

由图6和图7可知: 双方均不进行碳减排投入时, 供应商的收益越小, 其进行碳减排投入的动机越小, F公司的收益越大, 其进行碳减排投入的动机越大, 博弈的均衡状态为(N, D)的概率越大. 反之, 博弈的均衡状态为(N, D)的概率越小. 与命题5的结论一致.

### 4) “搭便车”所获收益对博弈均衡的影响

当F公司进行碳减排投入而供应商不进行碳减排投入时, 供应商“搭便车”收益为  $\pi_S \in [5\ 142\ 5\ 292]$  万元, 其他参数值如上文所述. 根

据式(11)可以得到,双方均不减排时供应商收益对均衡状态(N,D)的概率的影响情况,如图8所示。由图8可知, $S_2$ 随着供应商“搭便车”的收益 $\pi_S$ 的增大而增大。

当供应商进行碳减排投入而F公司不进行碳减排投入时,F公司“搭便车”的收益取值 $\pi_M \in [7\ 114, 7\ 190]$ 万元,其他参数的值如上所述。根据式(11)可以得到,双方均不减排时F公司收益对均衡状态(N,D)的概率的影响情况如图9所示。由图9可知, $S_2$ 随着F公司“搭便车”的收益 $\pi_M$ 减小而增大。

由图8和图9可知:当供应商“搭便车”减排收益越大,则其进行碳减排投入的动机越小;当F公司“搭便车”碳减排收益越小,其进行碳减排投入的动机越大,博弈的均衡状态为(N,D)的概率越大。反之,博弈的均衡状态为(N,D)的概率越小。与命题6的结论一致。

## 5.2 惩罚机制对博弈均衡的影响

由上文可得,当 $0 < K < \max(\pi_S - (\alpha_1 + 1)V_S + C_S, \pi_M - (\beta_1 + 1)V_M + C_M)$ 时,系统演化的结果可能是(N,N)、(N,D)、(D,N)、(D,D)。根据相关给定的参数进行计算可知,当罚金 $0 < K < \max(284, 332)$  ( $0 < K < 332$ 万)时,系统稳定在双方都不减排、有一方减排和双方都进行减排中的任一种情况;只有当 $K > \max(\pi_S - (\alpha_1 + 1)V_S + C_S, \pi_M - (\beta_1 + 1)V_M + C_M)$ 时,系统演化的结果将是双方都进行碳减排投入。此时,为了确保供应商和F公司都能进行碳减排投入策略,双方约定不进行碳减排投入一方应给进行减排投入

一方支付的罚金应满足 $K > \max(284, 332)$ ,即332万元。供应商和F公司通过建立供应链契约与惩罚机制,调整了供应链双方的收益矩阵,使“搭便车”行为无利可图,减少“搭便车”的概率,从而提高了F公司和其他供应商进行碳减排投入的动力。与命题8结论一致。

## 6 结束语

本文通过演化博弈论研究了作为供应链低碳管理主体的供应商和制造商的碳排放投入行为策略,研究结果表明:供应商与制造商的策略选择与其碳减排投入收益比密切相关,与其“搭便车”行为所获得的收益大小亦相关。当双方碳单独进行碳减排投入和共同进行碳减排投入的收益比不断从小向大变化时,会依次出现(不进行碳减排投入,不进行碳减排投入)、(进行碳减排投入,不进行碳减排投入)、(不进行碳减排投入,进行碳减排投入)和(进行碳减排投入,进行碳减排投入)。同时,如果“搭便车”行为从对方碳减排投入中获得的收益很大,会降低供应链节点企业进行碳减排投入的概率。但是,本文仅考虑了消费者对低碳产品的偏好会导致低碳产品价格高于普通产品,未考虑消费者低碳产品需求量的改变对演化博弈均衡的影响。而随着消费者的低碳环保意识的增强,其不仅愿意支付的产品价格更高,对低碳产品的需求往往也会增加。因此,在后续研究中,将尝试同时考虑这两个因素对供应链碳减排投入决策的影响。

## 参考文献:

- [1]庞晶,李文东. 低碳消费偏好与低碳产品需求分析[J]. 中国人口、资源与环境, 2011, 21(9): 76-80.  
Pang Jing, Li Wendong. On low-carbon preference and consumption [J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(9): 76-80. (in Chinese)
- [2]Eckel A. The Reality of Carbon Neutrality[R]. London: Energetics, 2007.
- [3]Hammond G. Time to give due weight to the carbon foot print issue [J]. Nature, 2007, 445(7125): 256-270.
- [4]Wiedmann T, Minx J. A definition of carbon footprint [J]. Ecological Economics Research Trends, 2007, 2(10): 55-65.
- [5]Zhang, et al. Companies' behavior of carbon emission reduction at the risk of oil price volatility [J]. Procedia Computer Science, 2014, 31(5): 291-298.
- [6]Alan Braithwaite, Daniel Knivett. Evaluating a supply chain's carbon footprint: A methodology and case example of carbon-

- to-serve[J]. *Logistics Research Network*, 2009, 11(1): 18–22.
- [7] Susan Cholette, Kumar Venkat. The energy and carbon intensity of wine distribution: A study of logistical options for delivering wine to consumers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(16): 1401–1413.
- [8] Benjaafar S, Li Y Z, Daskin M. Carbon Footprint and the Management of Supply Chain: Insights from Simple Models[R]. Minneapolis: University of Minnesota, 2009.
- [9] Sundarakani B, et al. Modeling carbon footprints across the supply chain[J]. *International Journal of Production Economics*, 2010, 128(1): 43–50.
- [10] 姜庆国. 电煤供应链碳排放过程及测度研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.  
Jiang Qingguo. Research on the Process and Measurement of Electric-Coal Supply Chain Carbon Emissions[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [11] 许舒婷. 区域生态供应链信息共享对碳排放的影响分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.  
Xu Shuting. Research on the Affect of Regional Eco-Supply Chain Information Sharing on the Carbon Emission[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [12] 杨 珺, 李金宝, 卢 巍. 系统动力学的碳排放政策对供应链影响[J]. *工业工程与管理*, 2012, 17(4): 21–30.  
Yang Jun, Li Jinbao, Lu Wei. The impact of emission policies on supply chain based on system dynamics[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2012, 17(4): 21–30. (in Chinese)
- [13] Alan McKinnon. The possible influence of the shipper on carbon emissions from deep-sea container supply chains: An empirical analysis[J]. *Maritime Economics & Logistics*, 2014, 16(1): 1–19.
- [14] 杨文佳. 基于投入产出分析的供应链碳排放评价研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.  
Yang Wenjia. Research on Carbon Emissions Assessment of Supply Chain Based on Input-Output Analysis[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [15] Adolf Acquaye, et al. Benchmarking carbon emissions performance in supply chains[J]. *Supply Chain Management: An International Journal*, 2014, 19(3): 306–321.
- [16] Samir Elhedhli, Ryan Merrick. Green supply chain network design to reduce carbon emissions[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2012, 17(5): 370–379.
- [17] 李 昊, 赵道致. 碳排放权交易机制对供应链影响的仿真研究[J]. *科学学与科学技术管理*, 2012, 33(11): 117–123.  
Li Hao, Zhao Daozhi. The simulation research on the impact of carbon permits trading on supply chain[J]. *Science of Science and Management of Science and Technology*, 2012, 33(11): 117–123. (in Chinese)
- [18] 高举红, 侯丽婷, 王海燕, 等. 考虑碳排放的闭环供应链收益波动规律分析[J]. *机械工程学报*, 2014, 49(56): 89–97.  
Gao Juhong, Hou Liting, Wang Haiyan, et al. Regularity research on revenue fluctuation analysis of closed-loop supply chain considering carbon emissions[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 49(56): 89–97. (in Chinese)
- [19] 郭成恒, 丁雪峰. 考虑碳排放差异的闭环供应链奖惩机制与减排策略[J]. *统计与决策*, 2014, (13): 54–57.  
Guo Chengheng, Ding Xuefeng. Emission policies and punishment mechanism of closed-loop supply chain with the constraint of carbon emissions difference[J]. *Statistics & Decision*, 2014, (13): 54–57. (in Chinese)
- [20] Tseng Shih-Chang, Hung Shiu-Wan. A strategic decision-making model considering the social costs of carbon dioxide emissions for sustainable supply chain management[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 133(15): 315–322.
- [21] 赵道致, 原白云, 徐春秋. 考虑产品碳排放约束的供应链协调机制研究[J]. *预测*, 2014, 33(5): 76–80.  
Zhao Daozhi, Yuan Baiyun, Xu Chunqiu. Research on coordination mechanism of the supply chain with the constraint of product carbon emissions[J]. *Forecasting*, 2014, 33(5): 76–80. (in Chinese)
- [22] 李 媛, 赵道致. 考虑公平偏好的低碳化供应链契约协调研究[J]. *管理工程学报*, 2015, 29(1): 156–161.  
Li Yuan, Zhao Daozhi. Low-carbon supply chain coordination with contracts considering fairness preference[J]. *Journal of*

- Industrial Engineering and Engineering Management ,2015 ,29( 1) : 156 – 161. ( in Chinese)
- [23] 鲁力, 陈旭. 不同碳排放政策下基于回购合同的供应链协调策略[J]. 控制与决策, 2014 ,29( 12) : 2212 – 2220.  
Lu Li ,Chen Xu. Supply chain coordination with buyback contract under different carbon emission policies [J]. Control and Decision ,2014 ,29( 12) : 2212 – 2220. ( in Chinese)
- [24] Rui Zhao ,Gareth Neighbour ,Jiaojie Han ,et al. Using game theory to describe strategy selection for environmental risk and carbon emissions reduction in the green supply chain [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries ,2012 ,25 ( 6) : 927 – 936.
- [25] 熊中楷, 张盼, 郭年. 供应链中碳税和消费者环保意识对碳排放影响[J]. 系统工程理论与实践, 2014 ,34 ( 9) : 2245 – 2252.  
Xiong Zhongkai ,Zhang Pan ,Guo Nian. Impact of carbon tax and consumers' environmental awareness on carbon emissions in supply chains [J]. Systems Engineering: Theory & Practice ,2014 ,34( 9) : 2245 – 2252. ( in Chinese)
- [26] 赵道致, 原白云, 徐春明. 低碳供应链纵向合作减排的动态优化[J]. 控制与决策, 2014 ,29( 7) : 1340 – 1344.  
Zhao Daozhi ,Yuan Baiyun ,Xu Chunming. The dynamic optimization of low carbon supply chain's vertical cooperation and emission reduction [J]. Control and Decision ,2014 ,29( 7) : 1340 – 1344. ( in Chinese)
- [27] 王芹鹏, 赵道致, 何龙飞. 供应链企业碳减排投资策略选择与行为演化研究[J]. 管理工程学报, 2014 ,28( 3) : 181 – 189.  
Wang Qinpeng ,Zhao Daozhi ,He Longfei. Strategic choice and behavior evolution of carbon emission reduction investment in supply chain enterprises [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management ,2014 ,28( 3) : 181 – 189. ( in Chinese)
- [28] 骆瑞玲, 范体军, 夏海洋. 碳排放交易政策下供应链碳减排技术投资的博弈分析[J]. 中国管理科学, 2014 ,22 ( 11) : 44 – 53.  
Luo Ruiling ,Fan Tijun ,Xia Haiyang. The game analysis of carbon reduction technology investment on supply chain under carbon cap-and-trade rules [J]. Chinese Journal of Management Science ,2014 ,22( 11) : 44 – 53. ( in Chinese)
- [29] 张国兴, 张绪涛, 汪应洛, 等. 节能减排政府补贴的最优边界问题研究[J]. 管理科学学报, 2014 ,17( 11) : 129 – 138.  
Zhang Guoxing ,Zhang Xutao ,Wang Yingluo ,et al. Analysis of optimal boundary of government subsidies for energy conservation and emission reduction [J]. Journal of Management Sciences in China ,2014 ,17( 11) : 129 – 138. ( in Chinese)
- [30] 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)
- [31] S G3/4chter ,Renner E ,Sefton M. The long-run benefits of punishment [J]. Science ,2008 ,322( 5907) : 1510.
- [32] 谢识予. 经济博弈论( 第三版) [M]. 上海: 复旦大学出版社, 2007.  
Xie Shiyu. Economic Game Theory ( Third Edition) [M]. Shanghai: Fudan University Press ,2007. ( in Chinese)
- [33] 许民利, 王俏, 欧阳林寒. 食品供应链中质量投入的演化博弈分析[J]. 中国管理科学, 2012 ,20( 5) : 131 – 141.  
Xu Minli ,Wang Qiao ,Ouyang Linhan. Investment decision of food supply chain quality based on the evolutionary game [J]. Chinese Journal of Management Science ,2012 ,20( 5) : 131 – 141. ( in Chinese)
- [34] Friedman D. Evolutionary game in economics [J]. Economy Erica ,1991 ,59( 3) : 637 – 666.
- [35] 王玉燕, 李帮义, 申亮. 两个生产商的逆向供应链演化博弈分析[J]. 系统工程理论与实践, 2008 ,( 4) : 43 – 49.  
Wang Yuyan ,Li Bangyi ,Shen Liang. A study of the evolutionary game of two manufacturer's reverse supply chain [J]. Systems Engineering: Theory & Practice ,2008 ,( 4) : 43 – 49. ( in Chinese)
- [36] Sikhar ,et al. A decision framework for the analysis of green supply chain contracts: An evolutionary game approach [J].

Expert Systems with Applications ,2012 ,39( 3) : 2965 – 2976.

## Evolutionary game of carbon-emission-reduction investment in supply chains under a contract with punishment mechanism

*FU Qiu-fang*<sup>1</sup> , *XIN Li-yan*<sup>2</sup> , *MA Shi-hua*<sup>3</sup>

1. School of Business , Guangdong University of Foreign Studies , Guangzhou 510420 , China;

2. HQC ( GuangDong) Company , Guangzhou 510655 , China;

3. School of Management , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China

**Abstract:** Increased consumer preference for low carbon products provides many business opportunities; investment in reducing carbon emissions results in positive externalities in supply chains. This paper investigates the strategy of promoting investment in reducing carbon emissions for suppliers and manufacturers in a two-echelon supply chain under a contract with punishment mechanism. According to the different payoff matrices of suppliers and manufacturers when adopting different strategies , this paper develops an evolutionary game model , and proposes evolutionary stable strategies of investments in reducing carbon emissions for upstream and downstream firms. The results show that investment strategies of suppliers and manufacturers are related to the ratio of input-output. When the input-output ratios of both parties in supply chains change , some evolutionarily stable equilibrium is found. Finally , a numerical verification for the mathematical model is given. If a ‘free rider’ can gain a lot in a supply chain , suppliers or manufacturers will not invest in reducing carbon emissions.

**Key words:** supply chain; carbon emission reduction investment; contract with punishment mechanism; evolutionary game