

引用格式:张凯旋,丁黎黎.不同互惠情境下工业共生链企业碳减排博弈行为[J].资源科学,2023,45(10):1947-1960.[Zhang K X, Ding L L. Game behavior to carbon reduction of enterprises in the industrial symbiosis chain under different reciprocal scenario [J]. Resources Science, 2023, 45(10): 1947-1960.] DOI: 10.18402/resci.2023.10.03

# 不同互惠情境下工业共生链企业碳减排博弈行为

张凯旋,丁黎黎

(中国海洋大学经济学院,青岛266100)

**摘要:**【目的】针对工业共生链企业碳减排动力不足的问题,本文基于互惠偏好理论,探究工业共生链上、下游企业间的博弈决策,以期探明影响工业共生链企业碳减排的因素及其作用效果,从而为政府的环境规制政策提供决策依据。【方法】考虑上、下游企业存在互惠偏好,本文从直接互惠与间接互惠两种情境入手,分别建立政府干预下的工业共生链企业碳减排演化博弈模型,并利用 Matlab 2019b 软件进行模拟仿真,分析影响因素的敏感性。【结果】研究表明:①在政府严格监管时,上、下游企业共生概率增加,反之则减小。②直接互惠偏好对工业共生链企业碳减排具有促进作用。相较于收益分配契约,成本分担契约对工业共生链上、下游企业共生的促进作用更显著。③间接互惠偏好对工业共生链企业碳减排行为也产生积极影响。成本分担和收益分配契约对上游企业共生策略的影响呈现出差异性,即成本分担超过一定阈值后,上游企业的非共生概率增大,而收益分配的影响与之相反。但是,成本分担和收益分配契约对下游企业共生策略的作用效果并不显著。【结论】研究认为,政府监管、互惠偏好系数、收益分配系数的增加,成本分担系数的减少均会对企业碳减排积极性产生影响。本文从政府有效监管、完善声誉机制和契约设计等方面,提出了促进工业共生链企业互惠合作的相关对策建议,以期更好地激励企业碳减排。

**关键词:**工业共生链;碳减排;互惠偏好;直接互惠;间接互惠;演化博弈

DOI: 10.18402/resci.2023.10.03

## 1 引言

党的二十大报告提出要“积极稳妥推进碳达峰碳中和”。工业共生(Industrial Symbiosis, IS)正是落实双碳目标,实现可持续发展的有力抓手。工业园区通过积极打造工业共生模式,形成“资源—产品—再生资源”的物质闭环流动。工业共生链是工业共生模式的基本构成单元,链内上下游企业开发碳减排技术,将处理后的含碳废弃物作为下游企业的生产原料,不再是传统的废弃物末端无害化处理<sup>[1]</sup>。实践中,企业的互惠偏好为推进工业共生链建设提供了可能。在政府或第三方平台的引导下,工业共生链中某一具有互惠偏好的企业可在前期先行投资开发碳减排技术,后期与其上游或下游企业合作共生,双方直接共担碳减排投资成本和收益。这种

积极的碳减排行动可为企业塑造良好声誉形象,获得工业共生链外部企业的合作机会。因此,从工业共生链的多方利益主体入手,分析这些利益主体互惠偏好与企业碳减排行为的内在逻辑,对推进工业园区工业共生发展、政府环境规制政策制定具有重要的现实意义。

当前供应链视角下企业碳减排行为研究主要分为以下两方面:①在理性假设下,学者通过建模发现供应链企业碳减排行为受到多种因素影响,其中减排成本、减排收益以及声誉效应等为关键因素<sup>[2,3]</sup>。因此,可通过成本、收益、声誉等进行机制设计,促进供应链企业合作减排,实现供应链的帕累托改进<sup>[4-6]</sup>。②在有限理性假设下,学者通过构建工业共生链模型,分析环境规制政策对碳减排行为的

收稿日期:2022-11-02 修订日期:2023-07-10

基金项目:国家自然科学基金项目(71973132);中央高校基本科研业务费专项(202161046)。

作者简介:张凯旋,女,山东禹城人,博士生,研究方向为碳金融与低碳行为。E-mail: kaixuanzhangouc@163.com

通讯作者:丁黎黎,女,山东五莲人,教授,研究方向为风险管理与行为金融。E-mail: llding@ouc.edu.cn

影响。碳限额交易政策下,较高的碳交易价格有利于提高企业的减排意愿,促进工业共生链的生成<sup>[7]</sup>。不同碳税政策下,相对静态碳税,动态碳税对下游企业的碳减排促进作用更为有效<sup>[8]</sup>。相对以上单一环境规制政策,征税和补贴相结合的混合式环境规制政策推动减排作用更强<sup>[9]</sup>。随着工业共生的发展,政府政策应逐步由经济刺激转变为共生引导,以激励企业碳减排<sup>[10]</sup>。

上述研究多以决策者完全理性或有限理性为前提,然而现实中参与主体并不仅仅以个人利益最大化为目标,往往还体现出互惠、利他等倾向<sup>[11,12]</sup>,这种社会偏好更强调参与主体的意图,深化多个主体间的战略合作<sup>[13]</sup>。当前关于互惠偏好的研究主要集中在以下两个方面:①互惠偏好对碳减排合作的影响。有学者指出,共生互惠可提高系统最大市场容量,促进双方协同发展<sup>[14,15]</sup>,并在一定程度上促进碳减排合作的达成<sup>[16,17]</sup>。②政府对互惠偏好决策主体的影响。研究显示,基于互惠偏好设计的政府奖惩方案能够取得积极效果<sup>[18,19]</sup>。如,政府通过减少补贴可促进企业形成互惠情形下的合作<sup>[20]</sup>,最终提升社会福利<sup>[21]</sup>。

现有文献对供应链企业碳减排行为研究已经比较丰富,但仍存在以下不足:①现有研究多以个人利益最大化为目标,较少考虑碳减排主体的互惠偏好,更未关注碳减排主体互惠情境的多样性。②工业共生链企业碳减排研究更多关注个体行为,只有少数文献采用微分博弈的方法将互惠偏好与政府规制相结合。对于政府环境规制的研究多以分析政府是否干预为主,缺乏从多方利益主体视角对工业共生链上下游企业成本分担和收益分配契约的讨论。因此,针对工业共生链企业碳减排决策问题,本文从直接互惠、间接互惠两种情境入手,建立了政府和具有互惠偏好的上下游企业三方演化博

弈模型,探究它们之间的博弈行为。本文的创新之处在于:①将工业共生链企业的直接互惠和间接互惠偏好引入演化博弈模型,弥补现有工业共生链理性人假设的研究不足,更实际地刻画了工业共生模式下的企业社会偏好。②明晰了不同互惠偏好对上、下游企业的成本分担和收益分配契约影响机理,为工业共生链企业碳减排互惠合作的建立和完善提供理论依据。

## 2 问题阐述与理论分析

### 2.1 问题阐述

考虑工业共生链企业存在碳减排合作和互惠偏好,本文构建了一个包含政府、存在潜在共生关系的上、下游企业的碳减排演化博弈模型。为激励企业积极开展碳减排,在政府间接调控举措下,上游企业和下游企业会签订成本分担和收益分配两种契约。成本分担契约是指上游企业和下游企业共同投入资金,对上游企业的含碳废弃物进行技术处理,处理后的含碳废弃物可作为下游企业的生产原材料。收益分配契约是指在上游企业和下游企业均参与共生后,上、下游企业共享共生收益。工业共生的碳减排行为具有正向溢出效应,政府给与企业绿色补贴。博弈决策:工业共生链上游企业和下游企业出于对利润的追求,判断是否选择共生减排;由于信息非对称,政府对于企业碳减排真实情形不了解,存在严格监管和宽松监管的选择。

互惠偏好已被证明存在于上下游供应链中<sup>[22]</sup>。本文假定存在两种互惠情境。第一是直接互惠,即具有互惠偏好的工业共生链上下游企业采取利他行动,形成合作来回报对方,具体如图1所示。第二是间接互惠,即工业共生链上游企业或下游企业因碳减排投入赢得良好声誉,获得来自第三方企业的好处,如潜在合作机会,具体如图2所示。

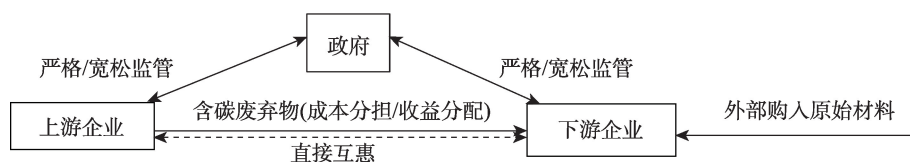


图1 直接互惠情境下工业共生链企业碳减排简化流程图

Figure 1 Simplified carbon emission reduction flow chart of enterprises in the industrial symbiosis chain under the direct reciprocity scenario

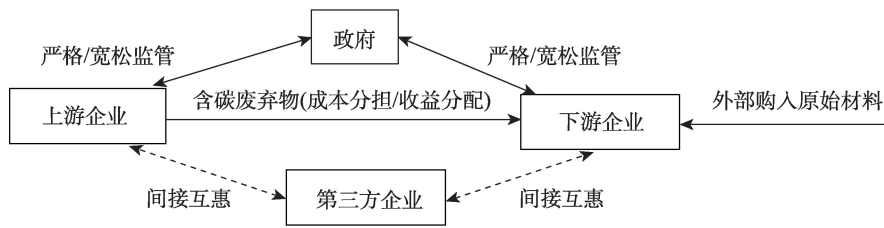


图2 间接互惠情境下工业共生链企业碳减排简化流程图

Figure 2 Simplified carbon emission reduction flow chart of enterprises in the industrial symbiosis chain under the indirect reciprocity scenario

## 2.2 参与主体及其行为逻辑分析

(1)参与主体及其策略空间。工业共生企业碳减排演化博弈涉及政府、上游企业和下游企业3个参与主体。政府的行为策略集为{严格监管, 宽松监管}, 所对应概率为 $\{x, 1-x\}$ , 其中 $x \in [0, 1]$ ; 上游企业的行为策略集为{共生, 非共生}, 所对应概率为 $\{y, 1-y\}$ , 其中 $y \in [0, 1]$ ; 下游企业的行为策略集为{共生, 非共生}, 所对应概率为 $\{z, 1-z\}$ , 其中 $z \in [0, 1]$ 。

(2)共生机制的有效性。只有一方参与共生时, 无法形成有效的共生机制, 不能获得共生收益; 只有双方共同参与共生时, 才可获碳减排合作、废物再循环所带来的收益等。

(3)参与主体的有限理性。参与主体之间信息非对称, 在博弈过程中会根据获得的信息不断改变策略, 作出最有利于自身的决策, 实现其利益最大化。

(4)参与主体的社会偏好。根据文献[10], 假设政府为风险中性, 上游企业和下游企业之间表现出互惠偏好。

## 2.3 互惠偏好理论

作为社会性偏好的一种, 互惠偏好通俗来讲就是“一报还一报”, 即“以善报善”, 这种直接回报所产生的互惠是“直接互惠”<sup>[23]</sup>。由于社会活动的复杂性, 善意有时不能产生直接回报, 但可通过声誉机制等传递方式获得第三方的回报, 所产生的互惠是“间接互惠”<sup>[24]</sup>。

### 2.3.1 直接互惠

根据直接互惠的定义<sup>[17]</sup>, 本文构建上游企业和下游企业的效用函数 $U_1$ 和 $U_2$ :

$$U_1 = \eta_1 \pi_1 + (1 - \eta_1) \pi_1 \quad (1)$$

$$U_2 = \eta_2 \pi_2 + (1 - \eta_2) \pi_2 \quad (2)$$

式中:  $\pi_1$ 和 $\pi_2$ 分别为上游和下游企业从事正常经营活动的基本收益;  $\eta_1 (-1 < \eta_1 < 1)$ 为上游企业的直接互惠偏好系数;  $\eta_2 (-1 < \eta_2 < 1)$ 为下游企业的直接互惠偏好系数。当 $0 \leq \eta_1 < 1$ ,  $0 \leq \eta_2 < 1$ , 说明对方行为是友好的, 决策主体表现为利他的互惠, 其效用函数不仅包含自身得益, 还包含对方得益增加给自身带来的正效用。随着 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 增大, 对方友好行为对决策主体的正效用也增大, 决策主体愈加关注对方得益。当 $-1 < \eta_1 < 0$ ,  $-1 < \eta_2 < 0$ , 说明对方行为是恶意的, 决策主体表现为互相惩罚, 一方会对对方的恶意行为进行惩罚。互惠倾向程度与直接互惠偏好系数 $\eta$ 呈负相关, 即 $\eta$ 越小, 决策主体越表现为互惠倾向, 对对方恶意行为的惩罚越大。

### 2.3.2 间接互惠

根据间接互惠的定义, 若只有一方参与共生, 参与方单独付出碳减排成本, 却不能获得共生收益, 但是在声誉传播机制下, 参与方将因其较好的声誉在群体中其他施惠者处得到外部收益, 所得外部收益记为 $r$ 。在间接互惠情境下, 依据文献[16], 单一上游企业或下游企业参与共生的效用函数分别为 $U'_1$ 和 $U'_2$ :

$$U'_1 = \pi_1 + r \quad (3)$$

$$U'_2 = \pi_2 + r \quad (4)$$

接下来分别探讨直接互惠和间接互惠两种情境下工业共生链企业如何选择碳减排策略。

## 3 模型构建与求解

### 3.1 直接互惠情境下的演化博弈模型构建与求解

#### 3.1.1 三方博弈收益矩阵构建

在直接互惠情境下, 政府的基本收益为 $e_1$ , 包含公信力、政绩考核和区域经济效益等。政府可选择严格监管或宽松监管企业的碳减排落实情况, 两

者监管成本分别为  $c_1$  和  $c_2$  ( $c_1 > c_2$ )。政府严格监管,表明政府积极承担社会责任,在上、下游企业均参与共生时,政府声誉改善,社会收益为  $e_2$ 。

上游企业和下游企业从事正常经营活动的基本收益分别为  $\pi_1$  和  $\pi_2$ 。当上、下游企业参与共生,共需投入  $m$  资金进行设备更新等,其中上游企业的成本分担系数为  $\alpha$ ,后期通过碳减排和原材料投入减少等带来的收益为  $\Delta\pi$ ,其中上游企业的收益分配系数为  $\beta$ 。

共生带来环境改善收益  $e_3$ ,政府对上、下游企业的碳减排补贴分别为  $s_i$  ( $i=1, 2$ ),若企业不参与共生,政府对其非法排污罚款  $f_i$ 。具体的相关变量含

义和符号见表1。

基于以上变量设定,可得出直接互惠情境下政府、上游企业和下游企业的博弈支付矩阵(表2)。

### 3.1.2 复制动态分析

根据上述直接互惠情境下政府、上游企业和下游企业的博弈支付矩阵,构建三者的期望收益函数。

#### (1) 政府复制动态方程

政府选择严格监管和宽松监管两种策略的期望效用为  $U_x$  和  $U_{1-x}$  :

$$U_x = e_1 - c_1 + yz(e_2 + e_3) - ys_1 - zs_2 + (1 - z)f_2 + (1 - y)f_1 \quad (5)$$

表1 相关变量含义及其符号

Table 1 Definition and symbols of variables

含义	符号	含义	符号
政府积极监管,在上、下游企业均参与共生时,政府声誉改善,社会收益	$e_2$	碳减排投入	$m$
环境改善收益	$e_3$	声誉传递机制,从第三方获得的外部收益	$r$
政府积极监管成本	$c_1$	共生带来的效益改善	$\Delta\pi$
政府消极监管成本	$c_2$	上游企业收益分配系数	$\beta$
上游企业成本分担系数	$\alpha$	政府对企业的碳减排补贴	$s_i$ ( $i=1, 2$ )
政府基本收益	$e_1$	企业非共生时,政府对其罚款	$f_i$ ( $i=1, 2$ )
上游企业基本收益	$\pi_1$	上游企业的直接互惠偏好系数	$\eta_1$
下游企业基本收益	$\pi_2$	下游企业的直接互惠偏好系数	$\eta_2$

表2 直接互惠情境下政府、上游企业和下游企业三方的博弈支付矩阵

Table 2 Game payment matrix of the government, upstream enterprises, and downstream enterprises under the direct reciprocity scenario

				上游企业	
				共生	非共生
政府	严格监管	下游企业	共生	$e_1 + e_2 + e_3 - c_1 - s_1 - s_2$ $\eta_1[\pi_2 - (1 - \alpha)m + (1 - \beta)\Delta\pi + s_2] + (1 - \eta_1)(\pi_1 - am + \beta\Delta\pi + s_1)$ $\eta_2(\pi_1 - am + \beta\Delta\pi + s_1) + (1 - \eta_2)[\pi_2 - (1 - \alpha)m + (1 - \beta)\Delta\pi + s_2]$	$e_1 - c_1 + f_1 - s_2$ $\eta_1[\pi_2 - (1 - \alpha)m + s_2] + (1 - \eta_1)(\pi_1 - f_1)$ $\eta_2(\pi_1 - f_1) + (1 - \eta_2)[\pi_2 - (1 - \alpha)m + s_2]$
			非共生	$e_1 - c_1 + f_2 - s_1$ $\eta_1(\pi_2 - f_2) + (1 - \eta_1)(\pi_1 - am + s_1)$ $\eta_2(\pi_1 - am + s_1) + (1 - \eta_2)(\pi_2 - f_2)$	$e_1 - c_1 + f_1 + f_2$ $\eta_1(\pi_2 - f_2) + (1 - \eta_1)(\pi_1 - f_1)$ $\eta_2(\pi_1 - f_1) + (1 - \eta_2)(\pi_2 - f_2)$
	宽松监管	下游企业	共生	$e_1 + e_3 - c_2$ $\eta_1[\pi_2 - (1 - \alpha)m + (1 - \beta)\Delta\pi] + (1 - \eta_1)(\pi_1 - am + \beta\Delta\pi)$ $\eta_2(\pi_1 - am + \beta\Delta\pi) + (1 - \eta_2)[\pi_2 - (1 - \alpha)m + (1 - \beta)\Delta\pi]$	$e_1 - c_2$ $\eta_1[\pi_2 - (1 - \alpha)m] + (1 - \eta_1)\pi_1$ $\eta_2\pi_1 + (1 - \eta_2)[\pi_2 - (1 - \alpha)m]$
			非共生	$e_1 - c_2$ $\eta_1\pi_2 + (1 - \eta_1)(\pi_1 - am)$ $\eta_2(\pi_1 - am) + (1 - \eta_2)\pi_2$	$e_1 - c_2$ $\eta_1\pi_2 + (1 - \eta_1)\pi_1$ $\eta_2\pi_1 + (1 - \eta_2)\pi_2$



2023年10月

$$U_{1-x} = e_1 - c_2 + yze_3 \quad (6)$$

政府的平均期望收益为  $\bar{U}_x$  :

$$\bar{U}_x = xU_x + (1-x)U_{1-x} \quad (7)$$

由式(5)和(6)可得政府的复制动态方程  $L(x)$  :

$$L(x) = x(1-x)[c_2 - c_1 + yze_2 - yS_1 - zS_2 + (1-z)f_2 + (1-y)f_1] \quad (8)$$

(2)上游企业复制动态方程

上游企业选择共生和非共生两种策略的期望效用为  $U_y$  和  $U_{1-y}$  :

$$U_y = \eta_1\pi_2 + (1-\eta_1)(\pi_1 - \alpha m) + z(1-\eta_1)\beta\Delta\pi + x(1-\eta_1)s_1 + z\eta_1[-(1-\alpha)m + (1-\beta)\Delta\pi] + xz\eta_1s_2 - x(1-z)\eta_1f_2 \quad (9)$$

$$U_{1-y} = \eta_1\pi_2 + (1-\eta_1)\pi_1 - x(1-\eta_1)f_1 - z\eta_1(1-\alpha)m + xz\eta_1s_2 - x(1-z)\eta_1f_2 \quad (10)$$

上游企业的平均期望收益为  $\bar{U}_y$  :

$$\bar{U}_y = yU_y + (1-y)U_{1-y} \quad (11)$$

由式(9)和(10)可得上游企业的复制动态方程  $L(y)$  :

$$L(y) = y(1-y)[-(1-\eta_1)\alpha m + z(1-\eta_1)\beta\Delta\pi + x(1-\eta_1)s_1 + z\eta_1(1-\beta)\Delta\pi + x(1-\eta_1)f_1] \quad (12)$$

(3)下游企业复制动态方程

下游企业选择共生和非共生策略的期望效用为  $U_z$  和  $U_{1-z}$  :

$$U_z = (1-\eta_2)[\pi_2 - (1-\alpha)m] + \eta_2\pi_1 + y(1-\eta_2)(1-\beta)\Delta\pi + x(1-\eta_2)s_2 + y\eta_2(-\alpha m + \beta\Delta\pi) + xy\eta_2s_1 - x(1-y)\eta_2f_1 \quad (13)$$

$$U_{1-z} = (1-\eta_2)\pi_2 + \eta_2\pi_1 - x(1-\eta_2)f_2 - y\eta_2\alpha m + xy\eta_2s_1 - x(1-y)\eta_2f_1 \quad (14)$$

下游企业的平均期望收益为  $\bar{U}_z$  :

$$\bar{U}_z = zU_z + (1-z)U_{1-z} \quad (15)$$

由式(13)和(14)可得下游企业的复制动态方程  $L(z)$  :

$$L(z) = z(1-z)\{(1-\eta_2)[-(1-\alpha)m] + y(1-\eta_2)(1-\beta)\Delta\pi + x(1-\eta_2)s_2 + y\eta_2\beta\Delta\pi + x(1-\eta_2)f_2\} \quad (16)$$

### 3.1.3 演化稳定性分析

令复制动态方程式  $L(x)$ 、 $L(y)$ 、 $L(z)$  取值为 0, 可得到 8 个纯策略均衡点:  $E_1(0, 0, 0)$ ,  $E_2(1, 0, 0)$ ,  $E_3(0, 1, 0)$ ,  $E_4(0, 0, 1)$ ,  $E_5(1, 1, 0)$ ,  $E_6(1, 0, 1)$ ,  $E_7(0, 1, 1)$ ,  $E_8(1, 1, 1)$ 。利用雅可比矩阵的局部稳定性来分析均衡点稳定性<sup>[25]</sup>。若特征值均为负, 表明均衡点有较好的渐进稳定性, 该均衡点对应演化稳定策略(Evolutionarily Stable Strategy, ESS); 若特征值有 0, 则该均衡点对应的是鞍点; 若特征值有正值, 则该均衡点对应的是不稳定点。

计算可得雅可比矩阵的特征值  $\lambda$  以及各值正负性, 各均衡点的局部稳定性分析见表 3。

由表 3 可知, 系统存在 5 个不稳定点, 分别是  $E_1(0, 0, 0)$ ,  $E_3(0, 1, 0)$ ,  $E_4(0, 0, 1)$ ,  $E_5(1, 1, 0)$  和  $E_6(1, 0, 1)$ , 存在 3 个不确定点, 分别是  $E_2(1, 0, 0)$ ,  $E_7(0, 1, 1)$  和  $E_8(1, 1, 1)$ 。当参数发生变化时, 不确定点有可能演化为博弈稳定状态。下面分别就 3 个不确定点满足演化稳定状态的条件展开讨论, 以期挖掘影响企业共生的条件。

情形一: 当  $-c_1 + f_1 + f_2 > -c_2$ , 在上、下游企业都非共生时, 政府严格监管的收益大于宽松监管的收

表 3 各个均衡点局部稳定性分析

Table 3 Local stability analysis of each equilibrium point

均衡点	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	符号	稳定性
$E_1$	$c_2 - c_1 + f_1 + f_2$	$-(1-\eta_1)\alpha m$	$-(1-\eta_2)(1-\alpha)m$	+, -, -	不稳定点
$E_2$	$-(c_2 - c_1 + f_1 + f_2)$	$(1-\eta_1)(s_1 + f_1 - \alpha m)$	$(1-\eta_2)[-(1-\alpha)m + s_2 + f_2]$	-, N, N	不确定
$E_3$	$c_2 - c_1 - s_1 + f_2$	$(1-\eta_1)\alpha m$	$(1-\eta_2)[-(1-\alpha)m + (1-\beta)\Delta\pi] + \eta_2\beta\Delta\pi$	N, +, N	不稳定点
$E_4$	$c_2 - c_1 - s_2 + f_1$	$-(1-\eta_1)\alpha m + (\eta_1 + \beta)\Delta\pi$	$(1-\eta_2)(1-\alpha)m$	N, N, +	不稳定点
$E_5$	$-(c_2 - c_1 - s_1 + f_2)$	$-(1-\eta_1)(s_1 + f_1 - \alpha m)$	$(1-\eta_2)[-(1-\alpha)m + (1-\beta)\Delta\pi + s_2 + f_2] + \eta_2\beta\Delta\pi$	N, +, N	不稳定点
$E_6$	$-(c_2 - c_1 - s_2 + f_1)$	$(1-\eta_1)(-\alpha m + \beta\Delta\pi + s_1 + f_1) + \eta_1(1-\beta)\Delta\pi$	$(1-\eta_2)[(1-\alpha)m - s_2 - f_2]$	N, N, +	不稳定点
$E_7$	$c_2 - c_1 + e_2 - s_1 - s_2$	$(1-\eta_1)(\alpha m - \beta\Delta\pi) - \eta_1(1-\beta)\Delta\pi$	$(1-\eta_2)[(1-\alpha)m - (1-\beta)\Delta\pi] - \eta_2\beta\Delta\pi$	N, N, N	不确定
$E_8$	$-c_2 + c_1 - e_2 + s_1 + s_2$	$(1-\eta_1)(\alpha m - \beta\Delta\pi - s_1 - f_1) - \eta_1(1-\beta)\Delta\pi$	$(1-\eta_2)[(1-\alpha)m - (1-\beta)\Delta\pi - s_2 - f_2] - \eta_2\beta\Delta\pi$	N, N, N	不确定

注: +表示特征值为正数, -表示特征值为负数, N表示特征值正负不确定。下同。

益,政府选择严格监管。 $(1-\eta_1)(-am+\beta\Delta\pi+s_1)+\eta_1(1-\beta)\Delta\pi<-(1-\eta_1)f_1$ ,在政府严格监管、下游企业非共生时,上游企业共生的收益小于非共生收益,上游企业选择非共生。 $-(1-\eta_2)f_2>(1-\eta_2)[-(1-\alpha)m+s_2]$ ,在政府严格监管、上游企业非共生时,下游企业非共生的收益大于共生收益,下游企业选择非共生。此时  $E_2(1, 0, 0)$  是 ESS, 对应策略是(严格监管,非共生,非共生)。

情形二:当  $-c_1+e_2-s_1-s_2<-c_2$ ,在上、下游企业均共生时,政府严格监管的收益小于宽松监管的收益,政府选择宽松监管。 $(1-\eta_1)(-am+\beta\Delta\pi)+\eta_1(1-\beta)\Delta\pi>0$ ,在政府宽松监管、下游企业共生时,上游企业共生的收益大于非共生收益,上游企业选择共生。 $(1-\eta_2)[-(1-\alpha)m+(1-\beta)\Delta\pi]+\eta_2\beta\Delta\pi>0$ ,在政府宽松监管、上游企业共生时,下游企业非共生的收益小于共生收益,下游企业选择共生。此时  $E_7(0, 1, 1)$  是 ESS, 对应策略是(宽松监管,共生,共生)。

情形三:当  $-c_1+e_2-s_1-s_2>-c_2$ ,此种情形与情形二相反,政府选择严格监管。 $(1-\eta_1)(-am+\beta\Delta\pi+s_1)+\eta_1(1-\beta)\Delta\pi>-(1-\eta_1)f_1$ ,与情形一相反,上游企业选择共生。 $(1-\eta_2)[-(1-\alpha)m+(1-\beta)\Delta\pi+s_2]+\eta_2\beta\Delta\pi>-(1-\eta_2)f_2$ ,在政府严格监管、上游企业共生时,下游企业共生的收益大于非共生收益,下游企业选择共生。此时  $E_8(1, 1, 1)$  是 ESS, 对应策略是

(严格监管,共生,共生)。

### 3.2 间接互惠情境下的演化博弈模型构建与求解

#### 3.2.1 三方博弈收益矩阵构建

对于间接互惠情境下的政府、上游企业和下游企业三方演化博弈模型,假设在政府严格监管下,上、下游企业均参与共生时,可实现最大化个体收益。在政府宽松监管下,若上、下游企业只有一方参与共生,依据参与主体的行为逻辑分析,此时无法形成有效的共生机制,不能获得共生收益,参与共生收益小于非共生收益。基于2.3小节,可得出间接互惠情境下的三方博弈支付矩阵(表4)。

#### 3.2.2 复制动态分析

##### (1)政府复制动态方程

政府选择严格监管和宽松监管两种策略的期望效用分别为  $U'_x$  和  $U'_{1-x}$ ,与3.1.2小节类似,由表2和表4对比可知,政府的得益函数未变,故政府的复制动态方程  $L'(x)$  也未变。

$$L'(x)=L(x) \quad (17)$$

##### (2)上游企业复制动态方程

上游企业选择共生和非共生两种策略的期望效用分别为  $U'_y$  和  $U'_{1-y}$ ,由表4可计算推出上游企业的复制动态方程  $L'(y)$ :

$$L'(y)=y(1-y)[-am+z\beta\Delta\pi+xs_1+(1-z)r+xf_1] \quad (18)$$

##### (3)下游企业复制动态方程

下游企业选择共生和非共生策略的期望效用

表4 间接互惠情境下政府、上游企业和下游企业三方的博弈支付矩阵

Table 4 Game payment matrix of the government, upstream enterprises, and downstream enterprises under the indirect reciprocity scenario

				上游企业	
				共生	非共生
政府	严格监管	下游企业	共生	$e_1+e_2+e_3-c_1-s_1-s_2$	$e_1-c_1+f_1-s_2$
				$\pi_1-am+\beta\Delta\pi+s_1$	$\pi_1-f_1$
				$\pi_2-(1-\alpha)m+(1-\beta)\Delta\pi+s_2$	$\pi_2-(1-\alpha)m+s_2+r$
		非共生		$e_1-c_1+f_2-s_1$	$e_1-c_1+f_1+f_2$
				$\pi_1-am+s_1+r$	$\pi_1-f_1$
				$\pi_2-f_2$	$\pi_2-f_2$
	宽松监管	下游企业	共生	$e_1+e_3-c_2$	$e_1-c_2$
				$\pi_1-am+\beta\Delta\pi$	$\pi_1$
				$\pi_2-(1-\alpha)m+(1-\beta)\Delta\pi$	$\pi_2-(1-\alpha)m+r$
		非共生		$e_1-c_2$	$e_1-c_2$
				$\pi_1-am+r$	$\pi_1$
				$\pi_2$	$\pi_2$

2023年10月

分别为  $U'_z$  和  $U'_{1-z}$ , 由表4可计算推出下游企业的复制动态方程  $L'(z)$ :

$$L'(z) = z(1-z)[-(1-\alpha)m + y(1-\beta)\Delta\pi + xs_2 + (1-y)r + xf_2] \quad (19)$$

### 3.2.3 演化稳定性分析

令复制动态方程式  $L'(x)$ 、 $L'(y)$ 、 $L'(z)$  取值为0, 可得到8个纯策略均衡点:  $E'_1(0, 0, 0)$ ,  $E'_2(1, 0, 0)$ ,  $E'_3(0, 1, 0)$ ,  $E'_4(0, 0, 1)$ ,  $E'_5(1, 1, 0)$ ,  $E'_6(1, 0, 1)$ ,  $E'_7(0, 1, 1)$  和  $E'_8(1, 1, 1)$ 。

计算可得雅可比矩阵的特征值  $\lambda'$  以及各值正负性, 各均衡点的局部稳定性分析见表5。

由表5可知, 系统存在4个不稳定点, 分别是  $E'_1(0, 0, 0)$ ,  $E'_3(0, 1, 0)$ ,  $E'_5(1, 1, 0)$  和  $E'_6(1, 0, 1)$ , 其他4个点均是不确定点。下面分别就4个不确定点满足演化稳定状态的条件展开讨论, 以期挖掘影响企业共生的条件。

情形四: 当  $-c_1 + f_1 + f_2 > -c_2$ , 在上、下游企业都非共生时, 政府严格监管的收益大于宽松监管的收益, 政府选择严格监管。  $-am + s_1 + r < -f_1$ , 在政府严格监管、下游企业非共生时, 上游企业共生的收益小于非共生收益, 上游企业选择非共生。  $-(1-\alpha)m + s_2 + r < -f_2$ , 在政府严格监管、上游企业非共生时, 下游企业共生的收益小于非共生收益, 下游企业选择非共生。此时  $E'_2(1, 0, 0)$  是 ESS, 对应策略是(严格监管, 非共生, 非共生)。

情形五: 当  $-c_1 - s_2 + f_1 < -c_2$ , 在上游企业非共生、下游企业共生时, 政府严格监管的收益小于宽松监管的收益, 政府选择宽松监管。  $-am + \beta\Delta\pi < 0$ , 在政府宽松监管、下游企业共生时,

上游企业共生的收益小于非共生收益, 上游企业选择非共生。  $-(1-\alpha)m + r > 0$ , 在政府宽松监管、上游企业非共生时, 下游企业共生的收益大于非共生收益, 下游企业选择共生。此时  $E'_4(0, 0, 1)$  是 ESS, 对应策略是(宽松监管, 非共生, 共生)。

情形六: 当  $-c_1 + e_2 - s_1 - s_2 < -c_2$ , 在上、下游企业均共生时, 政府严格监管的收益小于宽松监管的收益, 政府选择宽松监管。  $-am + \beta\Delta\pi > 0$ , 此情形与情形五相反, 上游企业选择共生。  $-(1-\alpha)m + (1-\beta)\Delta\pi > 0$ , 在政府宽松监管、上游企业共生时, 下游企业共生的收益大于非共生收益, 下游企业选择共生。此时  $E'_7(0, 1, 1)$  是 ESS, 对应策略是(宽松监管, 共生, 共生)。

情形七: 当  $-c_1 + e_2 - s_1 - s_2 > -c_2$ , 此情形与情形六相反, 政府选择严格监管。  $-am + \beta\Delta\pi + s_1 > -f_1$ , 在政府严格监管、下游企业共生时, 上游企业共生的收益大于非共生收益, 上游企业选择共生。  $-(1-\alpha)m + (1-\beta)\Delta\pi + s_2 > -f_2$ , 在政府严格监管、上游企业共生时, 下游企业共生的收益大于非共生收益, 下游企业选择共生。此时  $E'_8(1, 1, 1)$  是 ESS, 对应策略是(严格监管, 共生, 共生)。

## 4 数值仿真分析

为进一步分析互惠偏好相关系数以及成本分担和收益分配系数对演化博弈均衡的影响, 采用 Matlab 2019b 进行仿真分析, 对互惠偏好模型的主要参数进行敏感性分析。兰龙辉等<sup>[22]</sup>和丁军飞等<sup>[26]</sup>均研究了互惠偏好对闭环供应链的影响, 前者可为本文成本分担和收益分配系数数值设置提供参考, 后者可为本文互惠偏好系数数值设置提供借鉴。

表5 各个均衡点局部稳定性分析

Table 5 Local stability analysis of each equilibrium point

均衡点	$\lambda'_1$	$\lambda'_2$	$\lambda'_3$	符号	稳定性
$E'_1$	$c_2 - c_1 + f_1 + f_2$	$-am + r$	$-(1-\alpha)m + r$	+, -, N	不稳定点
$E'_2$	$-(c_2 - c_1 + f_1 + f_2)$	$s_1 + f_1 - am + r$	$-(1-\alpha)m + s_2 + f_2 + r$	-, -, N	不确定
$E'_3$	$c_2 - c_1 - s_1 + f_2$	$am - r$	$-(1-\alpha)m + (1-\beta)\Delta\pi$	N, +, N	不稳定点
$E'_4$	$c_2 - c_1 - s_2 + f_1$	$-am + \beta\Delta\pi$	$(1-\alpha)m - r$	N, N, N	不确定
$E'_5$	$-(c_2 - c_1 - s_1 + f_2)$	$-s_1 - f_1 + am - r$	$-(1-\alpha)m + (1-\beta)\Delta\pi + s_2 + f_2$	N, +, +	不稳定点
$E'_6$	$-(c_2 - c_1 - s_2 + f_1)$	$-am + \beta\Delta\pi + s_1 + f_1$	$(1-\alpha)m - s_2 - f_2 - r$	N, +, N	不稳定点
$E'_7$	$c_2 - c_1 + e_2 - s_1 - s_2$	$am - \beta\Delta\pi$	$(1-\alpha)m - (1-\beta)\Delta\pi$	N, N, N	不确定
$E'_8$	$-c_2 + c_1 - e_2 + s_1 + s_2$	$am - \beta\Delta\pi - s_1 - f_1$	$(1-\alpha)m - (1-\beta)\Delta\pi - s_2 - f_2$	N, -, -	不确定

周泽辉等<sup>[27]</sup>分析了政府低碳奖惩对企业低碳服务的影响,可为本文政府监管成本、奖惩机制以及社会收益参数设置提供参考。基于上述研究,以国家级循环化改造示范园区和大宗固废综合利用示范基地——嘉峪关工业园区的“5万吨电解铝槽大修渣无害化再利用”项目数据资料为基础,修正相关参数。园区内项目充分利用嘉峪关市重点企业布局完备和固废产量大优势,发挥延链、补链、强链作用,计划投资13.6亿元,项目建成后可年处理各类固废892万t,减碳344 t,实现工业总产值近21亿元。为了简化分析,依据前文参与主体行为逻辑分析,对相关参数赋值进行等比例缩放,具体见表6。

表6 参数值的确定

Table 6 Determination of parameter values

参数	$e_2$	$c_1$	$c_2$	$\alpha$	$r$	$\Delta\pi$	$\beta$
数值	1.5	2.0	1.5	0.8	2.1	4.0	0.5
参数	$s_1$	$s_2$	$f_1$	$f_2$	$m$	$\eta_1$	$\eta_2$
数值	0.4	0.4	0.5	1.0	3.0	-0.9	-0.9

#### 4.1 互惠偏好相关系数对演化稳定策略的影响

##### 4.1.1 直接互惠偏好系数变化对演化稳定策略的影响

图3给出了直接互惠偏好系数变化的演化对比图。如图3所示,随着上游企业直接互惠偏好系数的增大,上游企业选择非共生,政府策略变动为严格监管,下游企业参与共生的概率也随之增加。当下游企业互惠偏好系数 $\eta_2$ 为正,即下游企业表现为利他偏好时,政府以较大概率选择严格监管,受利他偏好和政府严格监管影响,下游企业以较大概率选择共生,上游企业共生概率也随之增大。系统最终达到(1, 1, 1)的稳定状态,对应3.1.3小节的情形三。

##### 4.1.2 间接互惠下外部收益对演化稳定策略的影响

图4给出了间接互惠所带来外部收益变化的演化对比图。如图4所示,在无外部收益( $r=0$ )时,政府和下游企业的策略选择均处于周期震荡状态,无法稳定。随着外部收益的增大,政府最初选择严格监管的概率略有增大,但最终仍将选择宽松监管。外部收益的增大意味着背叛对方成本加大,若一方

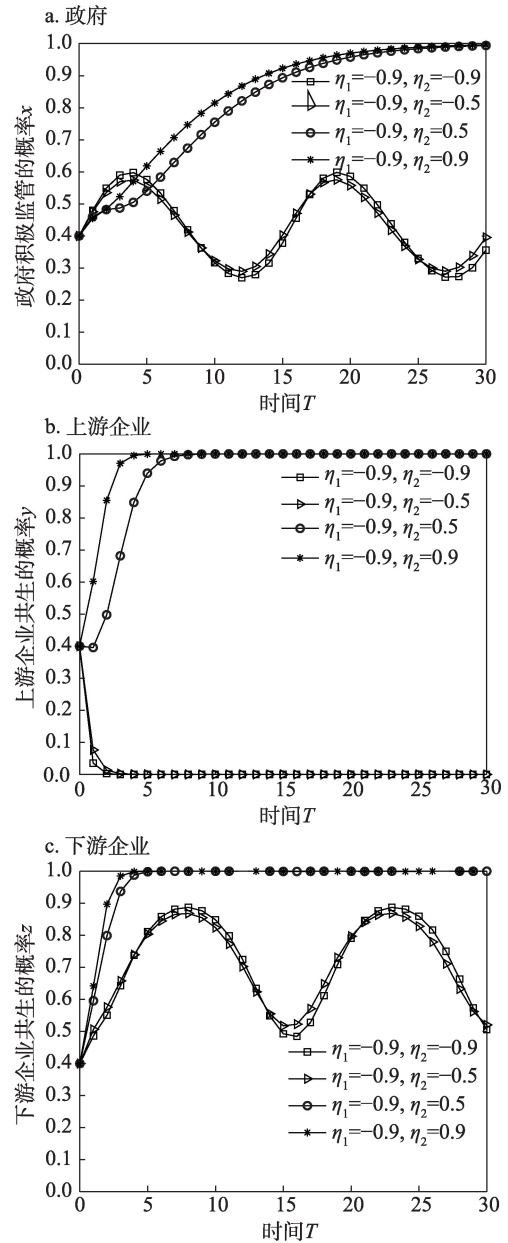


图3 不同直接互惠偏好系数的演化趋势图

Figure 3 Evolution trend of different direct reciprocity preference coefficients

选择非共生,则其将来会面对较大的损失。因此,上游企业共生意愿略有增加,下游企业共生概率也随之增大。但长期来看,企业仍会衡量共生成本和收益差异,因上游企业承担了较大的碳减排投入,故上游企业最终仍会选择非共生。系统最终达到(0, 0, 1)的稳定状态,这与3.2.3小节中情形不一致,原因是在现实情境中,间接互惠带来的外部收益有限,很难完全覆盖企业参与共生的成本。



2023年10月

## 4.2 成本分担和收益分配系数对演化稳定策略的影响

### 4.2.1 成本分担系数变化对演化稳定策略的影响

图5给出了直接互惠情境下成本分担系数变化的演化对比图。如图5所示,随着成本分担系数的增大,上下游企业的共生意愿变小。在成本分担系数超过一定数值后( $0.5 < \alpha < 0.7$ ),下游企业共生意愿略有增加,但受政府监管和上游企业共生不确定性影响,下游企业策略选择处于周期震荡状态。下

游企业是否选择共生紧随政府是否严格监管震荡,即在政府严格监管后一段时间,下游企业选择共生,反之选择非共生。

图6给出了间接互惠情境下成本分担系数变化的演化对比图。如图6所示,随着成本分担系数的增大,上游企业共生成本加大,故在成本分担系数超过一定数值后( $0.7 < \alpha < 0.9$ ),共生概率减小。而对于下游企业而言,其共生成本减小,故共生概率

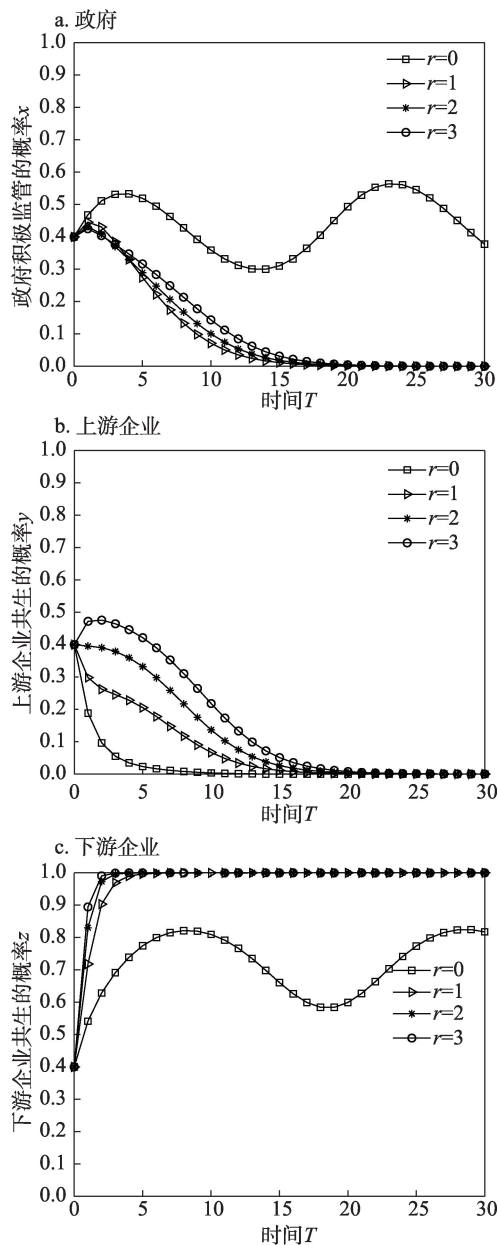


图4 间接互惠下不同外部收益的演化趋势图

Figure 4 Evolution trend of different external benefits under the indirect reciprocity scenario

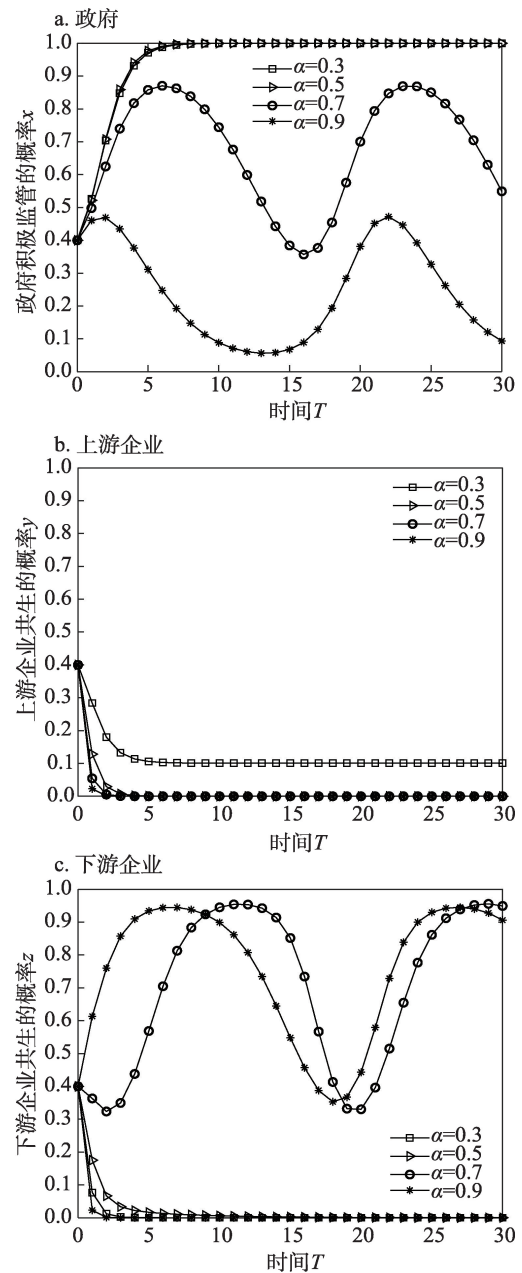


图5 直接互惠情境下不同成本分担系数的演化趋势图

Figure 5 Evolution trend of different cost sharing coefficients under the direct reciprocity scenario

增加,政府严格监管概率随之下降,系统稳定状态由(1, 1, 1)演变为(0, 0, 1)。

#### 4.2.2 收益分配系数变化对演化稳定策略的影响

图7给出了直接互惠情境下收益分配系数变化的演化对比图。如图7所示,在收益分配系数较小的时候,政府策略选择随时间推移上下波动,并不断循环,下游企业策略紧随其后波动,因政府平均严格监管概率较低,上游企业选择非共生。而当收

益分配系数超过一定数值后,上游企业共生收益加大,故其共生概率提高,但因其观察到下游企业共生选择呈现周期变化,故上游企业共生选择也波动前进。因上、下游企业共生概率平均较低,故政府严格监管。

图8给出了间接互惠情境下收益分配系数变化的演化对比图。如图8所示,随着收益分配系数的

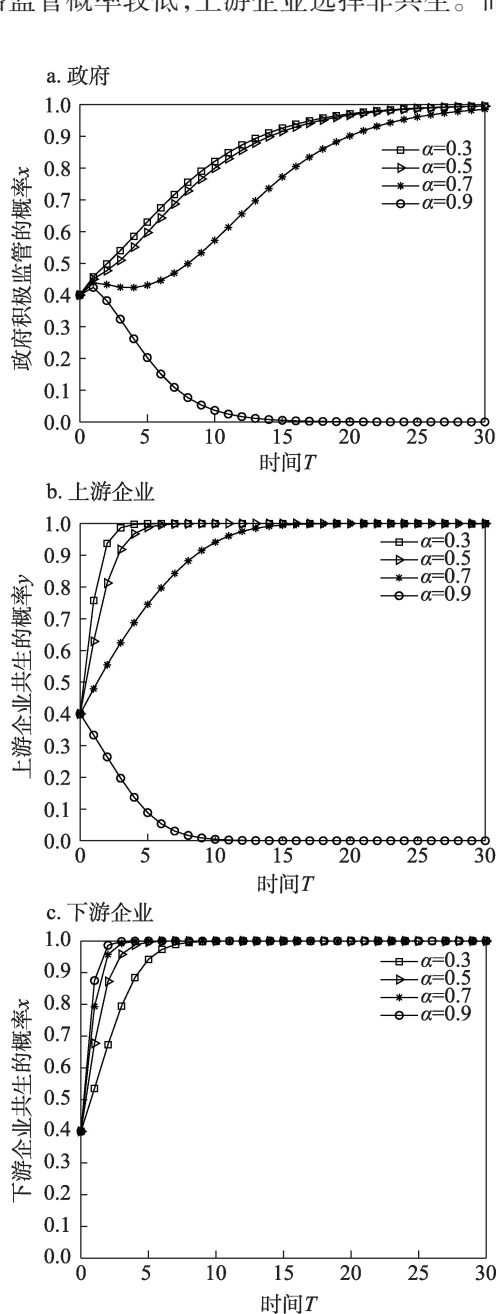


图6 间接互惠情境下不同成本分担系数的演化趋势图

Figure 6 Evolution trend of different cost sharing coefficients under the indirect reciprocity scenario

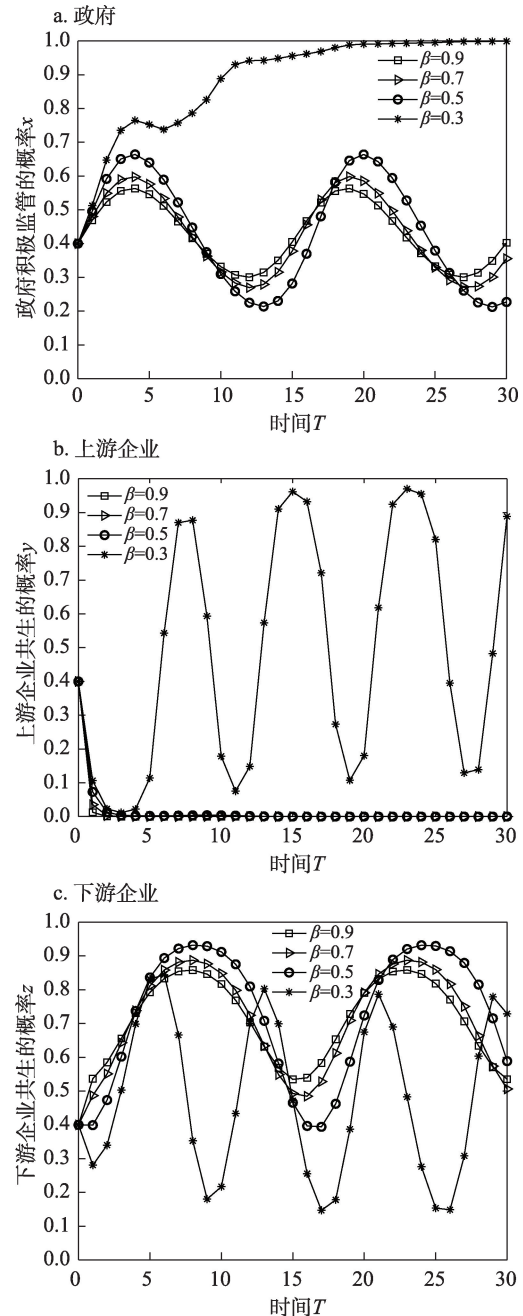


图7 直接互惠情境下不同收益分配系数的演化趋势图

Figure 7 Evolution trend of different income distribution coefficients under the direct reciprocity scenario

2023年10月

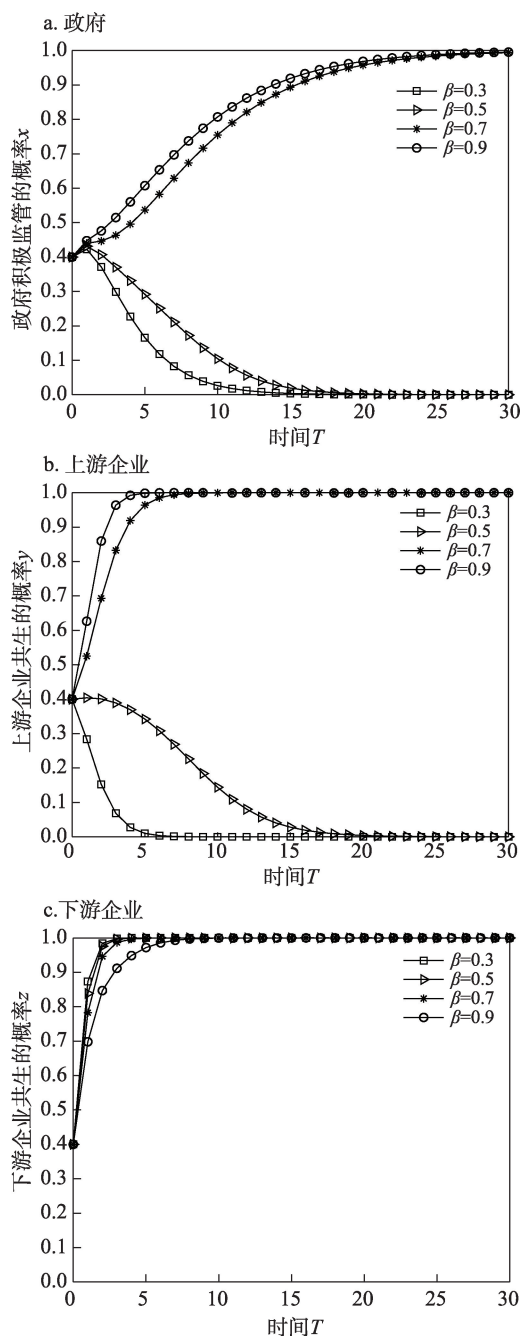


图8 间接互惠情境下不同收益分配系数的演化趋势图

Figure 8 Evolution trend of different income distribution coefficients under the indirect reciprocity scenario

增大,上游企业共生收益加大,故其选择共生概率加大。而对于下游企业而言,共生收益下降,故其共生收敛速度略有下降,政府严格监管概率随之增加。但下游企业的共生收益仍大于非共生收益,故下游企业选择共生,最终系统稳定状态由(0, 0, 1)演变为(1, 1, 1)。

## 5 结论、政策建议与研究展望

### 5.1 结论

考虑上游企业和下游企业存在互惠偏好的情形,本文构建了包含政府、上游企业和下游企业的三方演化博弈模型。进一步地,本文将互惠细化为直接互惠和间接互惠两种情境,以探究不同互惠情境对工业共生链企业碳减排行为的影响。主要有以下结论:

(1)上游企业和下游企业的策略选择会跟随政府策略选择变动。在政府严格监管时,上下游企业的共生概率随之增大,反之则减小;3个利益主体的震荡周期基本保持一致,不过震荡幅度有所不同。

(2)直接互惠偏好对于工业共生链企业碳减排具有促进作用。但是,当上游企业直接互惠偏好系数超过一定阈值后,上游企业会倾向于选择非共生。对于上下游企业,成本分担和收益分配契约均能促进工业共生链的共生合作产生,尤其是成本分担契约的作用更加显著。

(3)间接互惠偏好对工业共生链企业碳减排行为也产生积极影响。成本分担和收益分配契约对下游企业共生策略的作用效果并不显著。对于上游企业而言,成本分担和收益分配契约的影响呈现出不同结论。成本分担超过一定阈值后,上游企业的非共生概率增大,而收益分配的影响与之相反。

### 5.2 政策建议

基于以上结论,本文主要提出以下建议:

(1)政府适当加强严格监管,加深绿色经济宣传引导

通过奖惩制度和营造培育上、下游企业的互惠倾向。一方面,政府在初期应严格监管,完善相关政策法规,要求违法排污的企业缴纳碳税,而对参与共生的企业给与补贴;在发展后期,待市场发育成熟后,政府可宽松监管,依靠市场机制,如可交易的碳市场,鼓励企业参与共生碳减排活动。另一方面,应调整评价指标,倡导绿色、环保、可持续发展理念,强化工业共生链企业的环保意识,引导企业采取互惠的态度,加强彼此共生合作,提高经济收益。

(2)增强信息共享,完善声誉传播机制

通过建立外部声誉传播机制,增强上、下游企

业的间接互惠偏好。长期而言,应在工业共生链企业内部,建立有效的信息共享机制,如信息公示、资格准入规定等。通过制度、承诺和舆论约束等,确保参与共生者声誉得到提升,同时“搭便车”企业的惩罚成本足够大。外部收益的增加激励间接互惠偏好的施行,形成共生合作的外在约束力,促进企业获得共生活的正反馈,增强企业参与共生的积极性和主动性,达到社会资源最优配置的情形。

(3)建立有效契约机制,减少双方机会主义行为

通过建立内部契约机制,增强上、下游企业的直接互惠偏好。短期而言,在工业共生链企业内部,营造互惠协调的共生环境和氛围,建立有效的协调契约。一方面,明确合理的成本分担机制;另一方面,协调适当的收益分配机制,使得上游企业和下游企业形成互惠合作的理性预期,成为紧密的利益共同体。最终有效保证工业共生链内部成员之间的合作关系,形成上游企业和下游企业稳定的协调碳减排关系。

### 5.3 研究展望

本文通过构建政府、工业共生链上游企业和下游企业碳减排演化博弈模型,分析了不同互惠情境对工业共生链企业碳减排的动态影响。研究发现,直接互惠偏好和间接互惠偏好均只有在满足某些参数条件时,才能有效推动工业共生链生成。因此,未来可考虑参考谭婉冰<sup>[28]</sup>的研究,引入强互惠政府(由政府“搭便车者”进行惩罚)的概念,构建强互惠政府和具有互惠偏好的上、下游企业三方演化博弈模型,探究外部约束机制对工业共生链企业碳减排的影响。

### 参考文献(References):

- [1] Yan H, Lu R, Liu Y, et al. Development of microalgae-bacteria symbiosis system for the enhanced treatment of biogas slurry[J]. Bioresource Technology, 2022, DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127187.
- [2] Kerdlap P, Low J S C, Tan D Z L, et al. M3-IS-LCA: A methodology for multi-level life cycle environmental performance evaluation of industrial symbiosis networks[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104963.

- [3] 李小燕,王道平. 碳交易机制下考虑竞争和信息非对称的供应链协调研究[J]. 运筹与管理, 2021, 30(11): 47-52. [Li X Y, Wang D P. Study on the coordination of supply chain based on carbon trading mechanism considering the competition and asymmetry information[J]. Operations Research and Management Science, 2021, 30(11): 47-52.]
- [4] Zhong Y, Sun H. Game theoretic analysis of prices and low-carbon strategy considering dual-fairness concerns and different competitive behaviours[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, DOI: 10.1016/j.cie.2022.108195.
- [5] Wang B, Ji F, Zheng J, et al. Carbon emission reduction of coal-fired power supply chain enterprises under the revenue sharing contract: Perspective of coordination game[J]. Energy Economics, 2021, DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105467.
- [6] 武丹, 杨玉香. 考虑消费者低碳偏好的供应链减排微分博弈模型研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(4): 126-137. [Wu D, Yang Y X. Study on the differential game model for supply chain with consumers low carbon preference[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(4): 126-137.]
- [7] 丁黎黎, 张凯旋, 王垒. 资金约束下的工业共生链碳减排演化博弈分析[J]. 研究与发展管理, 2020, 32(5): 29-41. [Ding L L, Zhang K X, Wang L. Analysis of carbon emission reduction in industrial symbiotic chain under capital constraint based on evolutionary game theory[J]. R&D Management, 2020, 32(5): 29-41.]
- [8] 郎庆喜, 肖忠东, 赵冰, 等. “征税+限额交易”环境规制下工业共生链演化博弈行为分析[J]. 系统工程, 2019, 37(2): 38-57. [Lang Q X, Xiao Z D, Zhao B, et al. Analysis of evolutionary game behavior of industrial symbiosis chain under environmental regulation of ‘taxation + cap and trade’[J]. Systems Engineering, 2019, 37(2): 38-57.]
- [9] 肖忠东, 曹全垚, 郎庆喜, 等. 环境规制下的地方政府与工业共生链上下游企业间三方演化博弈和实证分析[J]. 系统工程, 2020, 38(1): 1-13. [Xiao Z D, Cao Q Y, Lang Q X, et al. Evolutionary game and empirical analysis of the local governments and the upstream and downstream enterprises in the industrial symbiosis chain under environmental regulations[J]. Systems Engineering, 2020, 38(1): 1-13.]
- [10] 孙熠譔, 张建华, 李菁萍. 间接互惠理论研究进展[J]. 经济动态, 2022, (1): 146-160. [Sun Y X, Zhang J H, Li J P. Research progress on indirect reciprocity[J]. Economic Perspectives, 2022, (1): 146-160.]
- [11] 杨超, 吴立军, 李江风, 等. 公平视角下中国地区碳排放权分配研究[J]. 资源科学, 2019, 41(10): 1801-1813. [Yang C, Wu L J, Li J F, et al. Distribution of carbon emission rights in China based on equity perspective[J]. Resources Science, 2019, 41(10): 1801-1813.]



2023年10月

- [12] 徐鹏, 王磊, 伏红勇, 等. 互惠性偏好视角下农产品供应链金融的4PL对3PL的激励策略研究[J]. 管理评论, 2019, 31(1): 62-70. [Xu P, Wang L, Fu H Y, et al. Incentive mechanism between 4PL and 3PL considering reciprocal preference in agricultural product supply chain finance[J]. Management Review, 2019, 31(1): 62-70.]
- [13] 梁杰, 高强, 邱浩然. 加工企业食品质量安全互惠偏好行为研究: 以HACCP认证加工水产品为例[J]. 宏观质量研究, 2022, 10(1): 46-58. [Liang J, Gao Q, Qiu H R. A research on the reciprocal preference behavior of food quality and safety in food processing enterprises: Taking HACCP certification of processed aquatic products as an example[J]. Journal of Macro-quality Research, 2022, 10(1): 46-58.]
- [14] 黄定轩, 李树良, 吴永娇, 等. 同时考虑博弈支付与有限市场容量的绿色建筑与传统建筑共生研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(8): 94-105. [Huang D X, Li S L, Wu Y J, et al. A study on the symbiotic model for green and conventional buildings considering the game payoff matrix and limited market capacity[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(8): 94-105.]
- [15] Pei H Y, Yan G H, Wang H M. Reciprocal rewards promote the evolution of cooperation in spatial prisoner's dilemma game[J]. Physics Letters A, 2021, DOI: 10.1016/j.physleta.2020.127108.
- [16] 许娇. 异质性知识团队互惠合作生产机制及制度保障研究[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2016, 22(4): 62-70. [Xu J. A study on mutual cooperation mechanism in heterogeneous knowledge team and external security system[J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 2016, 22(4): 62-70.]
- [17] 范如国, 林金钗, 朱开伟. 基于批发价格契约的低碳供应链协调研究: 考虑互惠和利他偏好的分析视角[J]. 商业研究, 2020, (6): 46-54. [Fan R G, Lin J C, Zhu K W. Research on coordination of low carbon supply chain based on wholesale price contract: An analysis perspective considering reciprocity and altruism preference[J]. Commercial Research, 2020, (6): 46-54.]
- [18] 谢萍萍, 李芳. 基于第三方回收模式考虑互惠偏好的闭环供应链决策分析[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(8): 2359-2362. [Xie P P, Li F. Decision analysis of closed loop supply chain based on third party recycling model considering reciprocal preference[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(8): 2359-2362.]
- [19] 张克勇, 张娜. 政府补贴下具互惠偏好的绿色供应链定价与协调[J]. 山东大学学报(理学版), 2022, 57(1): 30-41. [Zhang K Y, Zhang N. Green supply chain pricing and coordination with reciprocal preferences under government subsidies[J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2022, 57(1): 30-41.]
- [20] 王道平, 尹一博, 董汉玺. 考虑政府补贴和企业互惠偏好的碳减排策略研究[J]. 系统科学与数学, 2023, 43(8): 2064-2085. [Wang D P, Yin Y B, Dong H X. Research on carbon emission reduction strategies considering government subsidies and manufacturers' reciprocal preferences[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2023, 43(8): 2064-2085.]
- [21] 尚春燕, 关志民, 米力阳. 政府干预下考虑互惠偏好的闭环供应链决策分析[J]. 工业工程与管理, 2021, 26(1): 111-120. [Shang C Y, Guan Z M, Mi L Y. Decision analysis of closed-loop supply chain considering reciprocity preference under government intervention[J]. Industrial Engineering and Management, 2021, 26(1): 111-120.]
- [22] 兰龙辉, 郑小雪, 李登峰, 等. 考虑互惠偏好的闭环供应链合作博弈模型[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(12): 3458-3470. [Lan L H, Zheng X X, Li D F, et al. Cooperative game models in closed-loop supply chain considering reciprocity preference[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(12): 3458-3470.]
- [23] Sobel J. Interdependent preferences and reciprocity[J]. Journal of Economic Literature, 2005, 43(2): 392-436.
- [24] Nowak M A, Sigmund K. Evolution of indirect reciprocity[J]. Nature, 2005, 437(7063): 1291-1298.
- [25] Friedman D. Evolutionary games in economics[J]. Econometrica, 1991, 59(3): 637-666.
- [26] 丁军飞, 陈伟达, 付帅帅. 规模不经济下互惠偏好对闭环供应链的影响研究[J]. 管理工程学报, 2022, 36(1): 194-204. [Ding J F, Chen W D, Fu S S. The impact of reciprocal preferences on closed-loop supply chain with diseconomies of scale[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2022, 36(1): 194-204.]
- [27] 周泽辉, 张桂涛, 尹晓娜. 低碳背景下政府、企业与低碳服务提供者的演化博弈[J]. 运筹与管理, 2023, 32(4): 35-40. [Zhou Z H, Zhang G T, Yin X N. Evolution game analysis among government, enterprises and low carbon service providers under low carbon background[J]. Operations Research and Management Science, 2023, 32(4): 35-40.]
- [28] 谭婉冰. 基于强互惠理论的湘江流域生态补偿演化博弈研究[J]. 湖南社会科学, 2018, (3): 158-165. [Tan W B. Evolutionary game study of ecological compensation in Xiangjiang River Basin based on strong reciprocity theory[J]. Hunan Social Sciences, 2018, (3): 158-165.]

## Game behavior to carbon reduction of enterprises in the industrial symbiosis chain under different reciprocal scenario

ZHANG Kaixuan, DING Lili

(School of Economics, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** [Objective] Aiming at addressing the issue of insufficient enterprises' carbon emission reduction power of industrial symbiosis chain, and based on the reciprocity preference theory, this study explores the game decision making between upstream and downstream enterprises of industrial symbiosis chain. It examines the influencing factors, mechanism, and effect of carbon reduction of industrial symbiosis chain, to provide a decision-making basis for environmental policy makers. [Methods] Considering the reciprocity preference behavior of upstream and downstream enterprises, this paper starts with two scenarios of direct reciprocity and indirect reciprocity, an evolutionary game model of industrial symbiosis chain enterprises' emission reduction under government intervention was established. Using the Matlab 2019b software, this study simulates and analyzes the sensitivity of influencing factors. [Results] (1) When the government strictly regulates, the symbiosis probability of upstream and downstream enterprises increases, and vice versa. (2) The direct reciprocity preference can promote enterprises' carbon emission reduction of industrial symbiosis chain. Relative income distribution contract and cost sharing contract have more significant promoting effect on the symbiosis of the upstream and downstream enterprises in the industrial symbiosis chain. (3) Indirect reciprocity preference also has a positive impact on carbon emission reduction behavior of industrial symbiosis chain enterprises. The influence of cost-sharing and benefit-sharing contracts on the symbiosis strategy of upstream enterprises is symmetrical, that is, when the cost sharing exceeds a certain threshold, the non-symbiosis probability of upstream enterprises increases, while the impact of benefit-sharing contracts is opposite. However, the effect of cost-sharing and benefit-sharing contracts on downstream enterprises' symbiosis strategy is not significant. [Conclusion] The study concluded that the increase of government regulation, reciprocity preference coefficient and income-sharing coefficient, together with the decrease of cost-sharing coefficient would all have an impact on manufacturers' enthusiasm for carbon emission reduction. This study puts forward relevant countermeasures and recommendations for improving enterprises reciprocal cooperation system of industrial symbiosis chain in terms of effective government supervision, establishment of contract mechanism and reputation mechanism, to better encourage enterprises to reduce emissions.

**Key words:** industrial symbiosis chain; carbon reduction; reciprocity preference; direct reciprocity; indirect reciprocity; evolutionary game