

# 基于博弈论低碳供应链投入产出减排策略研究

杨茜

中国石油大学(北京)经济管理学院

DOI:10.12238/ej.v5i3.916

**[摘要]** 限制温室气体的排放目前已经成为了国际共识,世界各国都积极采取措施努力降低本国企业生产的碳排放量,大力提倡发展低碳经济。因此,低碳经济发展形势下,碳减排问题成为了全球企业生产经营活动无法避开的问题,而且碳排放权也随之成为了低碳经济背景下企业生存发展必不可少的资源。基于此,本文利用投入产出原理和博弈论的方法,建立供应链中节点企业的低碳改造资金投入产出模型,研究供应链中各节点企业用于低碳减排的资金投入和企业获利情况,以求探究供应链间企业生产产品实现碳减排目标的可行性。

**[关键词]** 博弈论; 投入产出; 低碳供应链

**中图分类号:** F252.21 **文献标识码:** A

## Research on Emission Reduction Strategy of Low Carbon Supply Chain Based on Game Theory

Xi Yang

School of Economics and Management, China University of Petroleum(Beijing)

**[Abstract]** At present, limiting greenhouse gas emissions has become an international consensus, and countries all over the world actively take measures to reduce carbon emissions produced by domestic enterprises and vigorously advocate the development of low-carbon economy. Therefore, under the situation of low-carbon economy development, carbon emission reduction has become an unavoidable problem in the production and operation activities of global enterprises, and carbon emission rights have become an essential resource for the survival and development of enterprises under the background of low-carbon economy. Based on this, this paper uses the methods of input and output principle and game theory to establish the input and output model of low-carbon transformation funds of node enterprises in the supply chain, and studies the capital investment and profits of node enterprises in the supply chain for low-carbon emission reduction, so as to explore the feasibility of enterprises in the supply chain to produce products to achieve the goal of carbon emission reduction.

**[Key words]** game theory; input and output; low carbon supply chain

### 引言

我国在气候峰会上作出控制和降低碳排放量的承诺,我国在2020年的碳排放量相比于2005年,碳排放当量已经降低了45%。按照前世界银行首席经济学家斯特恩的《斯特恩报告》,全球低碳产品和服务将超过石油市场成为全球第一大市场,其市场价值预计在2050年将达到5000亿美元,甚至比这更高<sup>[1]</sup>。

随全球推行发展低碳经济,因此供应链概念也不断地被赋予了新的概念。“供应链”一词最早出现于经济学家彼得·德鲁克的“经济链”中,在该理论中供应链企业涉及产品制造商、产品销售商、产品原材料供应商以及终端消费者在内的一条业务活动链条<sup>[2]</sup>。

### 1 投入产出分析理论

投入产出分析理论最早是由美国经济学家里昂惕夫在1936年出版的《美国经济体系中投入产出的数量关系》一书中提出,并于1941年在《美国经济(1919-1929)》一书中正式公布投入产出分析表及其相关原理。依照里昂惕夫的阐述,投入产出分析法主要是通过国民经济划分为若干部门,然后对各部门间的数量关系进行研究的经济数学分析法。其中,投入产出分析法的主要优势在于较强的适用性。该方法可以依据研究对象和研究目的不同进行灵活性的设计适用于企业层面<sup>[3]</sup>。其中,企业层面是关于企业内部产品间经济联系的说明。

#### 1.1 投入产出模型系数分析

从产出角度而言,企业产出在为下游各个企业的生产投入进行供给外还为终端消费者提供最终产品。因此,供应链企业间

的投入产出关系可以表示为,企业*i*产出流入至下游企业*j*的产量用表示,企业*j*将产品销售给消费者的产品数量用表示,而总产出用表示,劳动投入用表示。其中,表1中的各项数据展示了供应链中上下游企业间投入与产出间的价值量。

表1 供应链企业间价值投入产出表

投入 产出	中间需求				最终 产品	总支出	
	企业 1	企业 2	...	企业 n			
中 间 投 入	企业 1	0	$x_{12}$	...	$x_{1n}$	$y_1$	$x_1$
	企业 2	$x_{21}$	0	...	$x_{2n}$	$y_2$	$x_2$
	...	...	...	...	...	...	...
	企业 n	$x_{n1}$	$x_{n2}$	...	0	$y_n$	$x_n$
增加值		$v_1$	$v_2$	...	$v_n$		
总投入		$x_1$	$x_2$	...	$x_n$		

依据表2关于供应链企业投入产出分析模型可知,企业中间投入( $x_{ij}$ )和增加值( $v_j$ )之和就等于总投入( $x_j$ ),其具体关系式为:

$$X_j = \sum_{i=1}^n x_{ij} + V_j \quad (1)$$

供应链间企业的总支出( $x_j$ ),其具体表示供应链中企业*j*为企业*k*提供中间产品 $x_{jk}$ 和最终产品 $y_j$ ,具体关系式可表示为:

$$X_j = \sum_{k=1}^n x_{jk} + Y_j \quad (2)$$

基于上述有关投入产出分析模型的研究可知,供应链中下游企业*j*对上游企业*i*提供的产品原材料所产生的消耗系数为

$a_{ij}$ ,两者间关系式可表述为 $a_{ij} = \frac{x_{ij}}{X_j}$ ,并通过投入产出模型,

以矩阵A表示直接消耗系数的矩阵,并用 $(1 - A)^{-1}$ 表示其具体

关系,以及用矩阵 $\bar{B} = \{\bar{b}_{ij}\}_{n \times n}$ 表示投入产出分析逆阵,而企

业*j*完全需求系数然后采用 $\sum_{i=1}^n \bar{b}_{ij}$ 关系式,该关系式具体表示供应链企业*j*在生产某一单位产品对供应链中上游企业提供产品原材料的需求关系。

为了方便比较供应链上各个企业的需求系数和得到影响力系数,本文将各个企业的完全需求系数除以平均值,其关系式表

示为 $a_j = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij}}$ ,而 $a_j$ 值变得越来越大时,这说明企业

*j*对供应链总产值就会发挥越来越大的作用。

### 1.2 企业碳排放投入产出模型分析

博弈论下供应链企业碳排放放在流入至下游各个企业时,还会流至消费者。其具体关系如表2所述,企业*i*直接流入到下游企业*j*的碳排放用 $e_{ij}$ 表示,而销售至终端消费者最终产品中的碳排放用 $F_j$ 表示,总产出碳排放用 $E_j$ ,而 $\Delta E$ 表示企业的新增碳排放。

表2 企业碳排放中间投入产出表

投入 产出	中间需求碳排放				最终产品 碳排放	总支出 碳排放	
	企业 1	企业 2	...	企业 n			
中 间 投 入 碳 排 放	企业 1	0	$e_{12}$	...	$e_{1n}$	$F_1$	$E_1$
	企业 2	$e_{21}$	0	...	$e_{2n}$	$F_2$	$E_2$
	...	...	...	...	...	...	...
	企业 n	$e_{n1}$	$e_{n2}$	...	0	$F_n$	$E_n$
增加值 总投入		$\Delta E_1$	$\Delta E_2$	...	$\Delta E_n$		
		$E_1$	$E_2$	...	$E_n$		

由上述供应链间企业碳排放中间投入产出分析表可知,式中 $E_j$ 具体表示为供应链中企业中间需求的碳排放总量,中间需求碳排放总量主要包括了中间投入( $X_{ij}$ )所对应的碳排放( $e_{ij}$ )和企业*j*在生产过程中新增的碳排放( $\Delta e_j$ ),其模型关系式如下所示:

$$E_j = \sum_{i=1}^n e_{ij} + \Delta E_j \quad (3)$$

而供应链间企业产出的碳排放总量( $E_j$ ),包含企业*j*向企业*k*提供中间产品( $X_{jk}$ )产生的碳排放( $e_{jk}$ )和向消费者提供终端消费产品( $Y_j$ )而产生的碳排放量( $F_j$ ),它们之间的具体模型关系式为:

$$E_j = \sum_{i=1}^n e_{jkj} + F_j \quad (4)$$

基于投入产出分析理论可知,供应链企业*j*对供应链企业*i*产生的碳排放消耗系数的关系式为 $a_{ij}^e$ ,依据企业*j*与企业*i*的关

系式 $a_{ij}^e = \frac{e_{ij}}{E_j}$ ,对它们的碳排放量进行研究,其中供应链企业*j*

每单位产品生产的碳排放量有一部分源于企业*i*的生产资料的

供应, 因此采用矩阵  $A^e = \{a_{ij}^e\}_{n \times n}$  具体表示为碳排放直接直

接消耗系数, 而矩阵  $\bar{b}^e = \{\bar{b}_{ij}^e\}_{n \times n}$  表示投入产出分析模型的逆

阵  $(1 - A^e)^{-1}$ 。由此可知企业j碳排放完全需求系数  $\sum_{i=1}^n \bar{b}_{ij}^e$ , 即

企业j在总产出中所消耗和增加单位碳排放对上游企业产品原

材料的需求。  
 而企业j的碳排放乘数就可以用  $\beta_j = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij}^e}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij}^e}$  表示,

一旦当  $\beta_j > 1$  时就说明企业j碳排放的波及程度已经超过了平均水平, 而  $\beta_j$  越大表示企业j对供应链中企业碳排放拉动作用越大。

## 2 基于投入产出分析的低碳供应链企业减排可行性指数

### 2.1 同时行动博弈的纳什均衡可行性分析

根据市场营销领域最新的研究结果表明, 低碳供应链中原材料供应商对产品制造商产生的影响逐渐增强, 因此很有必要研究供应链中上游企业和下游企业间处于同等地位时进行的非合作博弈状况, 即原材料供应商和产品制造商同时进行决策时, 双方的关系就会转为非合作关系, 各自决策目的为最大化的降低产品碳排当量, 这种博弈属于静态博弈, 而此类问题的解就被称为纳什均衡。

### 2.2 低碳供应链企业减排可行性分析

企业低碳供应链碳排放的降低主要源于两方面, 其一是企业改进和更新碳排放净化工艺, 从而降低新增碳排放量; 其二是企业革新生产工艺, 提高物料利用效率, 降低对上游产品的中间需求, 从而实现供应链整体碳排放量的降低, 但是会对上游企业产生冲击。

因此, 选择低碳供应链减排重点企业需要同时考虑价值和碳排放影响力系数。文中构造碳排放影响力系数与价值影响力

系数之比为  $\frac{\beta_j}{a_j}$ , 以此作为企业制定供应链碳减排策略的有效

依据。

当  $\frac{\beta_j}{a_j} > 1$  时, 表明供应链中企业j对整个供应链的碳减排

拉动作用超过了供应链的产值, 说明供应链中企业产出产品更偏重于低值高碳类型产品, 而将其作为低碳供应减排重点企业对整个供应链产值产生的冲击就会减小。此时, 该企业在供应链碳减排过程中就会起到关键性作用, 从而获得良好的碳减排效果, 这也符合供应链中所有企业的整体利益。

当  $\frac{\beta_j}{a_j} < 1$  时, 表明供应链中企业j的拉动作用较弱, 企业产

品所需物料偏向于高值低碳型产品, 企业j投资减排会对供应链产值的发展产生较大冲击, 并且供应链整体减排效果不明显, 因而短期内不宜对该企业采取严厉的碳减排措施, 以免影响其正常生产, 剧烈冲击供应链产值。

### 2.3 低碳供应链企业碳减排可行性算例分析

本研究就以供应链中的汽车制造商为例, 具体假设如表1所示, 而供应链中各个企业的投入产出具体的关系如表3所示, 然后结合供应链企业生产中碳排放系数研究碳排放的投入产出关系。

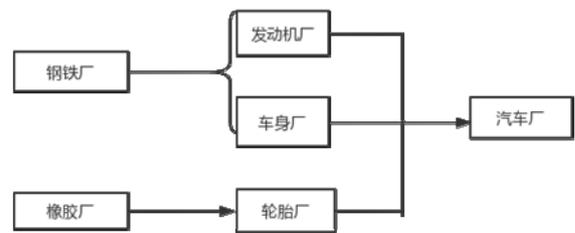


图1 汽车制造供应链网络图

表3 某汽车制造厂供应链企业间价值投入产出表

投入 \ 产出	中间需求碳排放						最终产品碳排放	总支出碳排放
	钢铁厂	橡胶厂	发动机厂	车身厂	轮胎厂	汽车厂		
中间投入	0	0	2000	5000	0	0	2000	9000
橡胶厂	0	0	0	0	2000	0	1000	3000
发动机厂	0	0	0	0	0	4000	1000	5000
车身厂	0	0	0	0	0	5000	2000	7000
汽车厂	0	0	0	0	0	3000	1000	4000
轮胎厂	0	0	0	0	0	0	17000	17000
增加值	9000	3000	3000	2000	2000	5000		
总投入	9000	3000	5000	7000	4000	17000		

表4 某汽车制造厂供应链企业间碳排放投入产出表

投入 \ 产出	中间需求碳排放						最终产品碳排放	总支出碳排放
	钢铁厂	橡胶厂	发动机厂	车身厂	轮胎厂	汽车厂		
中间投入	0	0	400	1000	0	0	400	1800
橡胶厂	0	0	0	0	67	0	33	100
发动机厂	0	0	0	0	0	640	160	800
车身厂	0	0	0	0	0	1143	457	1600
汽车厂	0	0	0	0	0	425	142	567
轮胎厂	0	0	0	0	0	0	2508	2508
新增碳排放	1800	100	400	600	500	300		
总投入碳排放	1800	100	400	1600	567	2508		

根据前述投入产出模型分别计算某汽车制造供应链各企业

的价值影响力系数  $a_j$ 、碳排放影响力系数  $\beta_j$  以及其比值  $\frac{\beta_j}{a_j}$ ,

按照  $\frac{\beta_j}{a_j}$  由高到低排序后如表6所示。

求解结果表明, 供应链中汽车厂以及发动机厂的碳减排可行性明显高于其他企业。其中, 汽车厂价值影响力系数为1.4450, 碳排放影响力系数更是高达1.6219, 两者均远高于供应链平均水平, 该环节的减排效果最优, 但对供应链产值的冲击也不可忽视, 因而适合采取温和的减排措施。而发动机厂的价值影响力系数为0.9641, 低于供应链平均水平, 碳排放影响力系数为1.0519, 高于供应链平均水平, 该环节减排效果明显, 同时不会对供应链产值产生较大冲击, 属于低碳供应链减排的焦点企业。

为了更加直观分析算例结果, 可以把价值影响力系数  $a_j$  作

为横轴、碳排放影响力系数  $\beta_j$  作为纵轴作图, 如图2所示。各

企业的价值以及碳排放影响力系数分别在  $a_j=1$  和  $\beta_j=1$  为界的四个象限中。其中, 第二象限的企业价值影响力系数低, 碳排放影响力系数高, 具有更高的减排可行性, 属于低碳供应链减排焦点企业。

表5 某汽车制造供应链各企业价值以及碳排放影响力系数

	价值影响力系数 $a_j$	碳排放影响力系数 $\beta_j$	$\frac{\beta_j}{a_j}$
汽车厂	1.4450	1.6219	1.1224
发动机厂	0.9641	1.0519	1.0910
钢铁厂	0.6887	0.7013	1.0183
橡胶厂	0.6887	0.7013	1.0183
车身厂	1.1806	1.1396	0.9653
轮胎厂	1.0330	0.7841	0.7591

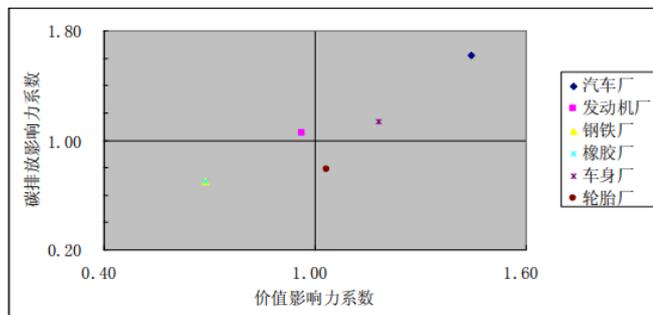


图2 某汽车制造供应链各企业价值以及碳排放影响力系数分布图

由算例可以发现, 供应链下游企业的价值以及碳排放影响力系数明显高于上游企业, 这是由于价值以及碳排放随着产品生命周期的延续沿供应链不断积累的缘故。也就是说, 价值以及碳排放影响力系数沿供应链自上而下逐级递增, 与企业距离供应链源头的距离正相关。供应链下游企业的价值以及碳排放影响力系数大于上游企业, 其对供应链总产值以及碳排放的拉动作用更大, 提高其物料利用率可以明显降低供应链整体碳排放, 但需要注意的是, 对其采取严厉的减排措施会对供应链总产值产生较大冲击。

通过低碳供应链企业减排可行性分析, 已经确定减排焦点企业为发动机厂。然后, 假设发动机厂减排投资与减排水平间的

函数关系式用  $I(1) 1000 \tan \frac{\pi}{2} t_1$  表示, 碳交易市场单位碳排放

价格大约为0.64万元/百吨。根据价值以及碳排放投入产出关系表可以得到, 发动机厂对上游的中间需求为2000万元, 优化前碳排放量为40000吨。

结合上述算例发现, 焦点企业投资减排主要收益来自企业生产工艺改进物料价值。随目前碳交易市场碳排放权价格的下跌, 投资减排获得碳排放权收益比重会相对较低。尤其是各国碳减排政策的相继出台和碳交易市场的发展, 未来碳排放权交易价格将会出现较大增长, 从而带动投资减排获得碳排放权收益比重的上升, 焦点企业的最优减排水平也会不断增长, 从而驱动低碳供应链焦点企业加大投资减排力度。

### 3 投入产出下供应链焦点企业减排优化

#### 3.1 低碳供应链焦点企业减排优化模型

低碳供应链减排焦点企业确定后, 以焦点企业为研究对象, 构建基于投入产出分析的低碳供应链焦点企业减排优化模型, 研究焦点企业在碳排放权约束下的最优减排策略。低碳供应链焦点企业减排优化模型的基本假设包括以下方面:

第一, 企业碳排放权的来源。碳排放权可以在碳交易市场自由交易, 考虑到碳排放权产品同质, 供应主体众多, 可以近似认为碳交易市场为完全竞争市场, 买卖双方只是市场价格的被动接受者, 对碳排放权价格没有控制力量。

第二, 焦点企业减排投资主要用于革新净化以及生产工艺: 一方面, 通过革新净化工艺, 焦点企业新增碳排放降低, 节约的碳排放权与减排水平以及投资减排前碳排放有关; 另一方面, 通过革新生产工艺, 焦点企业物料利用率提高, 对上游企业的物料需求以及碳排放拉动降低, 节约的物料价值与减排水平以及中间需求有关。为了简化模型, 假设同一减排水平下, 净化以及生产工艺改善程度相同。

第三, 根据碳减排具体实践, 减排投资  $I(t_j)$  随减排水平

$t_j$  的上升而加速上升, 当减排  $t_j$  趋近于1是, 焦点企业碳减排

$I_j(t_j)$  无限大。因此, 可以, 假设碳减排  $I(t_j)$  与减排水平  $t_j$  之间存在如下关系:

$$I_j(t_j) = f_j \tan \frac{\pi}{2} t_j \quad (5)$$

式中,  $f_j$  为大于0的常数, 与焦点企业j的碳排放结构等因素相关。

第四, 利用模型考虑单个生产周期内焦点企业的最优减排策略。在单个生产周期内, 焦点企业的总产出不变。同时, 碳排放权不会存留, 一旦盈余, 焦点企业会通过碳交易市场出售获利, 碳排放权不足时则需要投资减排或者通过碳交易市场购买。其中模型包含的主要参数符号有表示焦点企业j减排水平的  $t_j$  ( $0 < t_j < 1$ ) 表示焦点企业j减排投资的  $I_j(t_j)$ ,  $I_j(t_j) \geq 0$ ; 表示碳交易市场单位碳排放权价格的  $P$ ; 表示焦点企业j投资减排前碳排放的  $\Delta E_j$ ; 表示焦点企业j通过政府分配获得的碳配额  $E_j^G$ ; 表示焦点企业j通过市场交易获得的碳排放权  $E_j^B$ , 其中  $E_j^B > 0$  时表示购买,  $E_j^B < 0$  时为出售; 表示焦点企业j通过投资减排节约的碳排放权为  $E_j^1$ 。

目标函数为焦点企业j在总产出不受影响的情况下碳排放成本最低。碳排放成本主要包括投资减排成本  $I_j(t_j)$  以及购买或者出售碳排放权成本  $pE_j^B$ 。在焦点企业j投资减排后, 物料利用效率提高, 焦点企业节约物料的价值与企业j对上游的中间需求  $\sum_{i=1}^n x_{ij}$  和企业j的减排水平  $t_j$  有关, 可以用  $t_j \sum_{i=1}^n x_{ij}$  表示。因此, 目标函数可以表示为:

$$\min I_j(t_j) + pE_j^B - t_j \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad (6)$$

基于碳排放权约束, 焦点企业j有三种碳排放权来源, 包括政府分配  $E_j^G$ 、市场交易  $E_j^B$  以及投资减排  $E_j^1$ , 其最终排放量不会超过总的碳排放权, 即

$$\Delta E_j \leq E_j^G + E_j^B + E_j^1 \quad (7)$$

由于碳排放权可以通过碳交易市场自由交易。因此, 在单周期情况下, 焦点企业出现碳排放权盈余时, 企业就会通过碳交易市场将其出售而获取收益, 而焦点企业j投资减排节约的碳排放权  $E_j^1$  可以用  $t_j \Delta E_j$  表示, 然后将其代入⑦中, 可以得到:

$$E_j^B = (1-t_j)\Delta E_j - E_j^G \quad (8)$$

然后将⑤⑧代入目标函数后得到:

$$\min f_j \tan \frac{\pi}{2} t_j + p[(1-t_j)\Delta E_j - E_j^G] - t_j \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad (9)$$

### 3.2 供应链焦点企业减排优化模型分析

为确定焦点企业j最优减排水平  $t_j^*$ , 对焦点企业j减排水平  $t_j$  求导, 然后令其导数为零可以得到:

$$\frac{f_j \pi}{2 \cos^2 \frac{\pi}{2} t_j} - p \Delta E_j - \sum_{i=1}^n x_{ij} = 0 \quad (10)$$

由⑩可得, 低碳供应链焦点企业在总产出不受影响的情况下碳排放成本最低的减排水平为

$$t_j^* = \frac{2}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{f_j \pi}{2(p \Delta E_j + \sum_{i=1}^n x_{ij})}} \quad (11)$$

焦点企业j投资减排带来的收益包括两个方面: 通过革新净化工艺节约的碳排放权为  $E_j^1 = t_j \Delta E_j$ , 其中价值为  $p t_j \Delta E_j$ 。焦点企业通过对生产工艺进行更新换代后, 原材料利用率节约的原材料价值为  $t_j \sum_{i=1}^n x_{ij}$ 。因此, 焦点企业j的投资

减排的收益可以用  $p t_j \Delta E_j + t_j \sum_{i=1}^n x_{ij}$  表示。

其中, 当  $t_j < t_j^*$  时, 焦点企业j的碳排放成本随着减排水平的增加单调递减, 其原因在于, 减排投资的增长速度小于节约的物料以及碳排放权价值增长速度, 焦点企业继续追加减排投资、提高减排水平可以扩大盈利, 盈余的碳排放权可以通过碳交易

市场出售获利。

当  $t_j > t_j^*$  时, 焦点企业j的碳排放成本随着减排水平的增加单调递增, 其原因在于, 减排投资的增长速度大于节约的物料以及碳排放权价值增长速度, 焦点企业可以考虑减少减排投资、降低减排水平, 通过碳交易市场购买不足的碳排放权更加经济。

当  $t_j = t_j^*$  时, 焦点企业j的碳排放成本最低。此时, 减排投资的增长速度等于节约的物料以及碳排放权价值增长速度, 减排收益与减排投资之差最大。

### 3.3 焦点企业碳减排策略算例

根据前述汽车制造供应链为例, 并通过低碳供应链企业减排可行性分析, 已经确定减排焦点企业为发动机厂。

假设发动机厂减排投资与减排水平间的函数关系可以用

$I(t_j) = 1000 \tan \frac{\pi}{2} t_j$  表示, 其中碳交易市场单位碳排放权

价格为0.64万元/百吨。根据价值以及碳排放投入产出关系表可以得到, 发动机厂对上游的中间需求为2000万元, 优化前碳排放量为40000吨。

然后, 将数据代入式(1)以得到, 焦点企业发动机厂的最优减排水平为0.3716。此时, 减排投资为660万元, 通过投资减排节约的物料价值为743万元, 降低碳排放14900吨, 价值95万元。

通过算例可以发现, 目前焦点企业投资减排的主要收益来自于生产工艺改进后节约物料的价值。相比之下, 由于目前碳交易市场排放权价格大跌, 投资减排获得的碳排放权收益比重相对较低。随着各国碳减排政策的陆续出台已经碳交易市场的不断

断发展, 可以预见, 未来碳排放权交易价格将会出现较大增长, 从而带动投资减排获得碳排放权收益比重逐渐上升, 焦点企业的最优减排水平不断增加, 驱动低碳供应链焦点企业进一步加大投资减排力度。

## 4 结论

本文依据博弈方法下分析供应链企业碳减排投入产出的相关问题, 有效发挥了投入产出模型在分析企业间经济联系中的优势, 通过供应链中碳排放投入产出分析模型以及影响力系数来衡量企业在供应链中所处的经济地位, 然后利用碳排放乘数评价供应链中企业碳减排成效, 从而构建碳减排可行性指数, 以此作为企业进行碳减排的依据。而本文运用灰色投入产出分析方式研究供应链中企业实施碳减排策略也将会成为未来研究的一大方向。此外, 从消费者和社会需要的角度来讲, 由于供应链中企业的低碳改造资金投入将扩大低碳产品的销量、减少对于环境和人类的危害, 因此从促进低碳经济发展的角度来讲, 制造商和供应商在由供应商主导的纳什均衡下的最优决策将带来更大的社会福利。

### [参考文献]

- [1] 尹伟华, 张亚雄, 李继峰, 等. 基于投入产出表的中国八大区域碳排放强度分析[J]. 资源科学, 2017, 12(39): 52-58.
- [2] 王丽萍, 刘明浩. 基于投入产出法的中国物流业碳排放测算及影响因素研究[J]. 资源科学, 2018, 40(01): 195-206.
- [3] 赵巧芝, 闫庆友, 何永贵. 基于投入产出方法的各行业碳减排效果模拟研究[J]. 统计研究, 2017, (08): 71-79.

### 作者简介:

杨茜(1989—), 女, 汉族, 四川省绵阳市人, 中国石油大学(京)济管理学院博士在读, 研究方向: 能源经济。