

# Evolutionary Game of Competitive Centralized Supply Chain Carbon Reduction Strategies

Shengyuan Xiong

Henan University, Kaifeng, Henan, 475000, China

## Abstract

Due to the obvious information asymmetry and bounded rationality of competitive centralized supply chain decision-makers in the transportation sector when facing carbon emission restrictions, decision-makers may randomly make decisions on transportation or other departments. Therefore, the paper uses the Stackelberg game model to characterize the heterogeneity of carbon emission reduction decisions in centralized supply chains, and finds that reducing the cost of executing decision tasks will lead to an increase in emission reduction levels. The potential marginal contribution of the paper lies in the use of Stackelberg game models to address supply chain selection strategies in carbon reduction, providing a new direction for future research by scholars.

## Keywords

competitive centralized supply chain; carbon emission reduction strategy; Stackelberg game mode

## 竞争性集中式供应链碳减排策略演化博弈

熊盛源

河南大学, 中国·河南 开封 475000

## 摘要

由于交通运输部门竞争性集中式供应链决策者在面对碳排放限制时存在明显的信息不对称性和有限理性, 决策者可能随机地对运输或其他部门实行决策。因此, 论文运用Stackelberg博弈模型刻画集中式供应链异质性碳减排决策, 发现降低执行决策任务的成本将会使减排水平上升。论文可能存在的边际贡献在于结合Stackelberg博弈模型来处理碳减排中供应链的选择策略, 为以后学者们的相关研究指明了一条新的方向。

## 关键词

竞争性集中式供应链; 碳减排策略; Stackelberg博弈模型

## 1 引言

过度的能源消耗引发的自然资源的短缺可能会导致严重的全球能源危机, 自2010年起, 中国已成为最大的能源消耗国。为了可持续发展, 平衡环境和经济, 中国提出了“双碳”目标, 该目标是党中央统筹国内国际两个大局, 为贯彻新发展理念, 处理好发展和减排, 建设现代化经济体系做出的重大战略决策。而运输部门作为高能耗部门, 对国家碳减排工作的进行有着重要影响。因此, 论文依照 Stackelberg 博弈模型, 研究处于竞争关系的集中式供应链决策者在面对同质的减排任务时实施碳减排策略的异质性。在此基础上, 论文拟将碳减排与异质性选择策略联系起来以获得运输碳减排策略的路径。

## 2 文献综述

学者们的运输结构调整优化研究主要分为两类: 一类

是从宏观层面进行, 例如优化综合交通技术结构、提高综合交通运输组织效率、政府引导与市场相结合等(孙启鹏等, 2010); 另一类则建议中国发展以铁路为主的多式联运, 努力促进“公转铁”的发展(陈淑玲等, 2018)。大量的文献研究以及综合交通运输实践表明运输结构是影响交通运输中碳排放的重要因素, 学者们共同得出了一个相似的结论, 即铁路和水路的运输比例对交通运输业的碳排放具有抑制作用, 而公路和民航占比的增加则会促进碳排放(柴建、刑丽敏、周友洪等, 2012)。以上学者在优化运输结构时采用了定性方法, 而对运输节能减排的研究已经从定性归纳稳步发展到定量计算。例如, 尚玲宇(2020)以2020年广东省运输结构为研究对象, 利用线性规划的方法对运输结构进行优化, 优化后的结构在满足高效用的同时又减轻了碳排放量。在研究方法上, 刘艳楠(2014)设定了一个线性规划模型来优化货物运输结构, 以中国2020年的货物运输结构及能源消耗为研究对象进行实证分析得出结论: 货物运输结构在优化后可以节约2.7%的能源消耗并且可以满足相同的货物运输需求。王芹鹏等(2014)创新性地将博弈模型与企业

【作者简介】熊盛源(2000-), 男, 中国河南驻马店人, 硕士, 从事经济学研究。

投资联系起来，并从供应链的角度构建上下游企业采用不同行为策略的支付矩阵。研究表明，当需要较大的投资或下游企业分担减排成本的意愿较强时，稳定的策略是处于主导地位的上游企业实施投资减排；而当下游企业不愿分担减排成本时，此时即使需要较小的投资，稳定的策略也是必然会有一个企业实施减排。孙佳（2023）采用 NSGA2 算法来优化交通运输结构，研究表明，2030 年公铁水航四种运输方式占比分别为：14.63%、24.57%、60.39%、0.41%。优化后的运输结构能源消耗降低了 28%、碳排放降低了 15%，优化后的运输结构明显优于原有运输结构。梳理上述文献研究发现，大多数学者都将注意力放在“交通运输结构优化”上，通过改进交通运输结构以降低碳排放，但是却忽略了领导者与跟随者之间存在着策略博弈：领导者减排跟随者是否减排；跟随者减排领导者是否减排。因此，论文使用 Stackelberg 博弈模型来分析交通运输之间领导者与跟随者之间的策略博弈，既拓宽了相关领域的研究，又为研究者在研究交通运输与碳减排这一方面提供了新的思路。

### 3 模型建立

研究只含有两个决策者的供应链，假设碳减排任务是同质的并依次经过决策者 A 和决策者 B，两个决策者处于竞争关系。决策者 A 为主导者，假设两者都是经济学里的“理性人”，在 A 首先做出收益最大化的决策后，决策者 B 作为跟随者也会在此基础上寻求自身利润的最大化。由于处于竞争关系的集中式供应链决策者在面对同质的减排任务时有可能实施不同决策，同时消费者对低碳运输的偏好日益上升，低碳运输会给消费者带来更多的效用，消费者为了得到效用最大化也会为此付出更多的成本，这一行为提供给了决策者们寻求自身收益最大化的机会。论文假设在静态层面上，决策者 A、B 的行为策略空间均为（减排策略，不减排策略）。

本研究所用到的符号含义如表 1 所示。

表 1 符号含义汇总表

含义	记号
决策者 A	A
决策者 B	B
决策者 A 执行决策任务的成本	$C_a$
决策者 B 执行决策任务的成本	$C_b$
减排水平	$\theta$
减排成本	$C_\theta$
减排补贴	$I_\theta$
运输量	D
运输价格	P

假设  $I(\theta) \geq 0$ ,  $I'(\theta) > 0$ ,  $I''(\theta) < 0$ 。即减排程度越高所需要的减排补贴越多； $I''(\theta) < 0$  表明随着减排水平的升高，减排补贴的边际减排效用是递减的，参照文献 D'Aspremont 和 Jacquemin 中广泛使用二次函数关系反映减排补贴的报酬递减特征，论文中令  $I(\theta)=K\theta^2/2$ 。

假定在没有减排时运输逆需求函数为  $S=\alpha-\beta D$ ， $\alpha$  为消

费者愿意为运输支付的最高价格， $\beta$  为随着运输量的增多消费者降低运输支付价格的系数，为了确保决策者有利可图，令  $\alpha > C_a+C_b$ ；当存在减排时，消费者愿意多支付的价格系数为，此时的逆需求函数为：

$$S=\alpha-\beta D+\gamma\theta \quad (1)$$

用  $\pi$  来表示利润，上标 N 表示决策者 A 和 B 都不采取减排策略；上标 U 表示决策者 A 采取减排策略而决策者 B 不采取减排策略；上标 D 表示决策者 B 采取减排策略而决策者 A 不采取减排策略；上标 B 表示决策者 A 和 B 都采取减排策略；下标 A 表示决策者 A 的利润；下标 B 表示决策者 B 的利润。

#### 3.1 情形一：决策者 A 和 B 都不采取减排策略

当决策者 A、B 都不实施减排时，此时即为普通的 Stackelberg 模型。在二者的博弈中，决策者 A 为主导者，首先做出决策，它的决策变量为运输价格 P；决策者 B 为追随者，它在决策者 A 做出利润最大化决策的基础上，寻求自身的利润最大化，其决策变量为运输量 D。

决策者 A 的决策目标函数为：

$$\text{MAX}_P \pi_A=(P-C_a)D \quad (2)$$

决策者 B 的决策目标函数为：

$$\text{MAX}_D \pi_B=(S-P-C_b)D \quad (3)$$

把 (1) 式代入 (3) 式得：

$$\text{MAX}_D \pi_B=(\alpha-\beta D+\gamma\theta-P-C_b)D \quad (4)$$

对 (4) 式求二阶导得： $\frac{\partial^2 \pi_B}{\partial D^2}=-2\beta < 0$ ，存在最大值，令其一阶导为零求得：

$$D=\frac{\alpha-P-C_b}{2\beta} \quad (5)$$

把 (5) 式代入 (2) 式可得决策者 A 的目标函数：

$$P=\frac{\alpha+C_a-C_b}{2} \quad (6)$$

可得决策者 A 的利润为： $\pi_A^N=\frac{(-C_a+\alpha-C_b)^2}{8\beta}$ ，

决策者 B 的利润为： $\pi_B^N=\frac{(-C_a+\alpha-C_b)^2}{16\beta}$ 。

#### 3.2 情形二：决策者 A 不减排决策者 B 减排

当决策者 B 采取减排策略时，此时的减排水平为  $\theta$ ，需要的减排补贴为  $I(\theta)=K\theta^2/2$ ，减排所需成本为  $C_\theta$ ，仍然假设逆需求函数为  $S=\alpha-\beta D+\gamma\theta$ 。决策者 A 为主导者首先做出决策，它的决策变量为运输价格 P；决策者 B 作为跟随者，在决策者 A 做出利润最大化决策的基础上，寻求自身利润的最大化，其决策变量为运输量 D 和减排水平  $\theta$ 。

决策者 A 的决策目标函数为：

$$\text{MAX}_P \pi_A=(P-C_a)D \quad (7)$$

此时决策者 B 的决策目标函数为：

$$\text{MAX}_{D,\theta} \pi_B=(S-P-C_b)D-I(\theta)=[\alpha+\gamma\theta-P-C_b]D-\beta D^2-I(\theta) \quad (8)$$

由海塞矩阵相关理论可知(9)式存在最大值,因此可求得:

$$\theta = \frac{\gamma}{K}D, D = K(\alpha - P - C_b) \quad (9)$$

把(10)式代入(8)式得:

$$\text{MAX}_P \pi_A = \frac{K(P - C_a)(\alpha - P - C_d)}{2\beta K - \alpha^2} \quad (10)$$

由  $\frac{\partial^2 \pi_A}{\partial P^2} = -\frac{2K}{2\beta K - \alpha^2} > 0$ , (8)式存在最大值,对其求一阶导数得:

$$P = \frac{1}{2}(C_a + \alpha - C_b) \quad (11)$$

把(12)式代入方程组(10)式得:

$$\theta = \frac{\gamma^2(\alpha - C_a - C_b)}{2(2\beta K - \gamma^2)} D = \frac{K(\alpha - C_a - C_b)}{2(2\beta K - \gamma^2)} \quad (12)$$

把(12)和(13)式代入(8)和(9)式可得决策者A、B利润为:

$$\pi_A^D = \frac{K(-C_a + \alpha - C_b)^2}{4(2\beta K - \gamma^2)}, \pi_B^D = \frac{K(-C_a + \alpha - C_b)^2}{8(2\beta K - \gamma^2)}$$

### 3.3 情形三: 决策者A减排决策者B不减排

当决策者A采取减排策略时,假设决策者A降低的减排水平需要的补贴为  $I(\theta)=K\theta^2/2$ , 此时的逆需求函数为  $S=\alpha-\beta D+\gamma\theta$ , 决策者A作为主导者首先做出决策, 它的决策变量是运输价格P和减排水平 $\theta$ ; 决策者B作为跟随者, 在决策

者A做出利润最大化的决策后, 寻求自身利润最大化, 其决策变量为运输量D。由于篇幅原因, 证明过程同上因此略过, 得决策者A、B的利润为:

$$\pi_A^U = \frac{K(-C_a + \alpha - C_b)^2}{2(4\beta K - \gamma^2)}, \pi_B^U = \beta K^2 \left( \frac{-C_a + \alpha - C_b}{4\beta K - \gamma^2} \right)^2$$

### 3.4 情形四: 决策者A减排决策者B承担部分减排任务

当决策者A和B都共同实施减排策略时, 由决策者A实施减排, 决策者B承担比例为  $1-C_\theta$  的 ( $0 < C_\theta < 1$ ) 减排成本, 减排水平为 $\theta$ 。设  $S=\alpha-\beta D+\gamma\theta$ , 决策者A为主导者, 它的决策变量为运输价格P和减排水平 $\theta$ , 决策者A所需的减排补贴为  $I(\theta)=K\theta^2/2$ , 上游企业承担的减排的成本为下游分担成本剩余部分为  $(1-C_\theta)K\theta^2/2$ ; 决策者B为跟随者, 在决策者A做出利润最大化决策后, 追求自身利润的最大化, 其决策变量为运输量D, 承担的减排成本为  $(1-C_\theta)K\theta^2/2$ 。

同理可得决策者A、B的利润为:

$$\pi_A^B = \frac{K(-C_a + \alpha - C_b)^2(1 - C_\theta + \gamma^2)}{2[4\beta K(1 - C_\theta) - \gamma^2]}$$

主要变量的汇总见表2。

## 4 结论

表2 供应链不同减排策略情形下的均衡解

	情形一	情形二	情形三	情形四
$\pi_A$	$\frac{(-C_a + \alpha - C_b)^2}{8\beta}$	$\frac{K(-C_a + \alpha - C_b)^2}{4(2\beta K - \gamma^2)}$	$\frac{K(-C_a + \alpha - C_b)^2}{2(4\beta K - \gamma^2)}$	$\frac{K(-C_a + \alpha - C_b)^2(1 - C_\theta + \gamma^2)}{2[4\beta K(1 - C_\theta) - \gamma^2]}$
$\pi_B$	$\frac{(-C_a + \alpha - C_b)^2}{16\beta}$	$\frac{K(-C_a + \alpha - C_b)^2}{8(2\beta K - \gamma^2)}$	$\beta K^2 \left( \frac{-C_a + \alpha - C_b}{4\beta K - \gamma^2} \right)^2$	$\frac{K(-C_a + \alpha - C_b)^2[2\beta K(1 - C_\theta)^2 - C_\theta \gamma^2]}{2[4\beta K(1 - C_\theta) - \gamma^2]}$
D	$\frac{\alpha - P - C_b}{2\beta}$	$\frac{K(\alpha - C_a - C_b)}{2(2\beta K - \gamma^2)}$	$\frac{K(\alpha - C_a - C_b)}{4\beta K - \gamma^2}$	$\frac{K(1 - C_\theta)(\alpha - C_a - C_b)}{4\beta K(1 - C_\theta) - \gamma^2}$
P	$\frac{\alpha + C_a - C_b}{2}$	$\frac{1}{2}(C_a + \alpha - C_b)$	$\frac{2\beta K(\alpha + C_a - C_b) - \gamma^2 C_a}{4\beta K - \gamma^2}$	$\frac{2\beta K(\alpha + C_a - C_b)(1 - C_\theta) - \gamma^2 C_a}{4\beta K(1 - C_\theta) - \gamma^2}$
$\theta$	-	$\frac{\gamma(\alpha - C_a - C_b)}{2(2\beta K - \gamma^2)}$	$\frac{\gamma(\alpha - C_a - C_b)}{4\beta K - \gamma^2}$	$\frac{\gamma(\alpha - C_a - C_b)}{4\beta K(1 - C_\theta) - \gamma^2}$

论文通过研究竞争性供应链在面对同质的减排任务时, 决策者A(领导者)以及B(追随者)可能做出的博弈(A减排B不减排, A不减排B减排, A、B都不减排, A、B都减排)。进一步分析减排水平的表达式不难发现, 降低供应链决策者执行决策任务的成本, 将直接提升减排水平。因此, 为了实现更高的减排目标, 减少交通运输中的碳排放, 相关部门除了增加减排补贴外还可以考虑降低决策者执行决策任务的成本这一有效方法。这一发现拓宽了人们对减排策略的理解并意识到减排并非仅与执行决策任务的成本相关, 而是需要综合考虑多种因素。

然而, 本研究主要在静态层面对竞争性供应链决策者可能实行的减排策略进行了研究, 但两者博弈的策略均衡

并不是稳定不变的, 因此后续的研究可以基于演化动态性均衡来进行。

### 参考文献

- [1] 韩敬稳,赵道致,秦娟娟.Bertrand双寡头对上游供应商行为的演化博弈分析[J].管理科学,2009,22(2):57-63.
- [2] 李海锋,孙睿,任玉珑,等.基于演化博弈的发电企业二氧化碳排放市场交易机制创新[J].系统工程,2010,28(7):56-60.
- [3] 柴建,邢丽敏,周友洪,等.交通运输结构调整对碳排放的影响效应研究[J].运筹与管理,2017,26(7):110-116.
- [4] 孙佳,孙启鹏,高捷,等.碳达峰约束下的运输结构优化研究[J].生态经济,2023,39(11):54-59.