

不同碳配额分配机制下供应链的减排决策及契约协调

吴婉莹, 赵孙媛

长沙理工大学数学与统计学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2024年4月29日; 录用日期: 2024年5月22日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

为应对气候变化, 我国大力推动双碳政策的实施, 加快实现低碳发展的步伐。在双碳政策背景下, 供应链作为温室气体排放主体低碳发展是必然之趋。本文研究碳配额分配机制对契约供应链的影响。在完全免费分配、完全拍卖分配和混合碳配额分配机制下, 为存在无契约、减排成本分担契约和绿色成本分担契约的供应链分别构建Stackelberg博弈模型, 求解对应的最优均衡解。研究发现, 相比完全免费分配和完全拍卖分配机制, 混合碳配额分配机制既可以发挥免费分配机制的作用, 促进减排水平提高, 又可以发挥拍卖的市场价格功能, 平衡碳交易的稳定性。同时, 供应链内的契约有利于制造商提高减排水平, 零售商在有利可图的条件下, 零售商分担的减排成本越多, 制造商的减排水平越高。

关键词

Stackelberg博弈, 碳配额分配机制, 成本分担契约, 供应链

Emission Reduction Decision and Contract Coordination of Supply Chain under Different Carbon Quota Allocation Mechanisms

Wanying Wu, Sunyuan Zhao

School of Mathematics and Statistics, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan

Received: Apr. 29th, 2024; accepted: May 22nd, 2024; published: May 31st, 2024

Abstract

In order to cope with climate change, China vigorously promotes the implementation of dual-carbon policy and accelerates the pace of realizing low-carbon development. Under the background of

文章引用: 吴婉莹, 赵孙媛. 不同碳配额分配机制下供应链的减排决策及契约协调[J]. 应用数学进展, 2024, 13(5): 2506-2519. DOI: 10.12677/aam.2024.135239

dual-carbon policy, the low-carbon development of supply chain as the main body of greenhouse gas emissions is an inevitable trend. This paper studies the impact of carbon allowance allocation mechanism on contractual supply chain. Under completely free allocation, complete auction allocation and mixed carbon allowance allocation mechanism, Stackelberg game models are constructed for the supply chain with no contract, emission reduction cost sharing contract and green cost sharing contract, and the corresponding optimal equilibrium solutions are solved. It is found that compared with the full free allocation and full auction allocation mechanisms, the mixed carbon allowance allocation mechanism can not only play the role of the free allocation mechanism to promote the level of emission reduction, but also play the market price function of the auction to balance the stability of carbon trading. At the same time, the contract within the supply chain is favorable to the manufacturer to improve the level of emission reduction, and the more the retailer shares the cost of emission reduction, the higher the level of emission reduction of the manufacturer under the condition of profitability.

Keywords

Stackelberg Game, Carbon Quota Allocation Mechanism, Cost Sharing Contract, Supply Chain

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

共同应对气候变化问题, 争取在 21 世纪下半叶实现温室气体净零排放是世界众多国家的减排目标, 也是中国的减排目标。在第七十五届联合国大会上, 中国提出将力争 2030 年前达到“碳达峰”, 努力争取 2060 年前实现“碳中和”[1]。为了实现“碳达峰”和“碳中和”减排目标, 我国大力推进全国实行绿色可持续发展, 出台了一系列政策文件《“十三五”控制温室气体排放工作方案》等。2017 年, 我国碳排放权交易市场开始启动[2]。2021 年 2 月 1 日, 《碳排放权交易管理办法(试行)》开始施行, 中国的碳交易市场正在稳步推进。由于二氧化碳的排放主要来自于工业生产, 而工业往往与供应链密不可分, 因此供应链, 作为碳排放的主体, 是国家改革的首要目标。同时“十九大”报告指出: 要加快建立健全绿色低碳循环发展的经济体系。综上所述, 研究碳配额分配机制下供应链如何实现低碳可持续发展是国家实现减排目标的关键。

随着全球对气候变化的重视以及我国相关法律法规的实施, 人类作为命运共同体意识到了环境保护的重要性, 低碳经济、节能减排成为人们关注的热点问题。我国碳交易机制的实施推动并加深了供应链企业间的合作, 尤其在减排方面的合作。为解决双边边际效应问题[3], 很多研究尝试采用减排契约的方式实现供应链协调。目前关于契约供应链的研究主要集中于考虑不同因素时, 不同契约供应链对供应链决策或者供应链绩效的影响。这些研究往往在碳配额市场交易机制下进行研究, 很少有研究深入碳配额分配方法对契约供应链决策的影响。Wang 等[4]在 Stackelberg 模型的框架下, 引入了煤电供应链企业碳配额的总量控制和交易条件, 并在考虑碳配额约束的情况下, 构建了煤电供应链企业碳减排协调博弈模型, 设计了供应链企业间的收益共享协调机制。Wang 等[5]构建了集中式、无利他偏好的分散决策和有利他偏好的分散决策, 比较零售商和制造商的决策和利润, 其中两种分散决策模型中具有利他偏好的协调契约, 即成本分担契约, 研究发现在协调合同中批发价格最低, 单位利润的比较取决于碳减排成本系数。Ma 等[6]在排放交易机制下, 为信息不对称的供应链设计了一个具有多个供应商的竞争性采购方案, 并针对拍卖的多样性,

分析了三种不同的拍卖类型, 包括绿色度拍卖、带有排放目标的价格拍卖和基于性能的拍卖。Hong 等[7]在考虑环境责任下研究了绿色产品供应链中的纯价格合同、绿色营销成本分担合同和两部分关税合同, 并调查了它们的环境绩效, 研究发现契约合同在实践中是有价值的, 可以帮助供应链实现环境绩效, 也可以使得消费者更加注意可持续性, 也更加具有环境意识, 但是契约合同可能并不总是对所有合作伙伴都有利。Xia 等[8]研究了渠道成员在三种情况下的决策和绩效, 包括有和没有成本分摊合同的去中心化场景以及集中式场景。研究发现成本分摊比例会随着制造商对关系的重视而增加, 随着零售商对这种关系的重视程度增加而降低; 成本分摊合同改变了渠道成员的社会偏好和边际利润对其决策的影响。

关于碳配额分配机制对供应链影响的研究主要集中于免费分配机制对供应链的影响。Wang 等[9]考虑在祖父制和基准制两种碳配额分配方式下, 构建并求解电子商务平台在两个周期中主导生产普通产品和低碳产品的制造商的两个周期的博弈模型。研究发现祖父制更适合低碳节约的厂商, 基准制更适合高碳节约的厂商。夏西强等[10]通过构建并对比分析无碳交易政策、基于历史排放法的碳交易政策和基于基准法的碳交易政策三种模式下原始制造商和再制造商博弈模型发现, 历史排放法有利于控制高排放企业的碳排放总量, 且当总量碳配额和基准碳配额满足一定条件时, 历史排放法有利于实现两种产品制造商双赢; 而基准法约束低碳排放企业更为有效, 且当基准碳配额较大时, 基准法更有利于提高社会福利。余敏[11]在基于碳限额与交易政策下, 分析了不同碳配额分配机制对供应链碳减排策略、定价策略、总收益及市场需求的影响, 同时比较政府进行碳排放目标控制和总量控制时的碳减排优化策略。研究发现总量控制下, 当碳减排成本系数较小时, 免费分配机制最优, 当碳减排成本系数较大时, 有偿分配机制优于免费分配。Zhang 等[12]研究了当分配规则发生变化时, 如何实现合作供应链中 CET 覆盖企业的最优产品价格和有效分配碳减排利润。研究发现只有在拍卖规则下, 碳价格的提高才能提高零售价格; 拍卖规则比自由分配规则更能减少碳排放。

综上所述, 当前大部分研究集中于研究碳配额分配机制对供应链的影响, 未研究碳配额分配机制与供应链契约之间的联系。鉴于此, 本文研究完全免费碳配额分配、完全拍卖分配和混合碳配额分配三种机制下, 无契约、减排成本分担契约和绿色成本分担契约下供应链的减排决策。本文的创新点如下:

- 1、本文研究了三种不同碳配额分配机制对契约供应链减排决策的影响, 分析了碳配额分配机制与成本分担契约之间的联系。
- 2、本文分析了两种不同的成本分担契约对供应链的影响, 两者的区别是绿色成本分担契约比减排成本分担多了碳排放成本, 以此分析在成本分担契约中, 分担成本的内容与供应链决策之间的关系。
- 3、本文在混合碳配额分配机制中, 将免费分配和拍卖分配融合, 两者均与单位绿色产品的碳减排水平建立了联系。研究的完全拍卖机制是多轮拍卖, 且考虑到实际中, 投标企业往往会在所有拍卖结束后再购买所需的碳配额, 以最小化碳排放成本, 因此本文将碳交易价格设为最后一轮拍卖的出清价格, 从而使得拍卖分配与供应链决策变量建立联系。

2. 模型的假设与说明

考虑由单个制造商和单个零售商构成的二阶供应链, 其中制造商为领导者, 零售商为追随者。制造商仅生产一种绿色产品, 该产品仅出售给零售商, 零售商在消费市场进行销售。假设制造商和零售商之间是信息对称的。制造商的碳减排行为会吸引更多的消费者购买绿色产品, 从而影响产品的市场需求。根据文献[5], 绿色产品的市场需求为

$$D = a - p_{pro} + \phi e_s^* \quad (1)$$

其中, a 表示市场规模, p_{pro} 表示绿色产品的零售价格, e_s^* 表示单位绿色产品的碳减排水平, ϕ 表示制造

商的减排行为对市场需求影响的敏感系数。

假设制造商为了响应国家的碳减排政策, 在生产过程中, 会选择主动投资碳减排, 零售商仅通过契约分担制造商的碳减排成本, 自身无减排投资。由于制造商的碳减排投资是一次性投资, 因此假设碳减排投资成本与单位碳减排量是二次函数关系[4]。制造商的碳减排投资成本为

$$C_{sub} = \frac{1}{2} \beta_M (e_s^*)^2 \quad (2)$$

其中, β_M 表示制造商的减排研发成本系数。

本节研究的二阶供应链是主从供应链, 制造商和零售商之间存在 Stackelberg 博弈。博弈双方的决策顺序如下: 在碳交易政策下, 制造商首先决策其绿色产品的碳减排水平、批发价格和碳减排水平; 零售商根据制造商决策, 确定绿色产品的零售价格。假设制造商的生产成本为 c_{pro} , 其满足关系:

$$p_{pro} > w_{pro} > c_{pro}.$$

制造商投资碳减排需要大量的资金, 这会加重制造商的运营成本。为了减少成本, 制造商往往会增加批发价或与零售商签订减排契约。减排契约的类型与供应链类型, 减排方式等有关, 由于本节研究的碳减排成本仅来自于制造商的减排投资成本和碳排放成本且制造商是供应链的主导者, 因此本节研究碳减排成本分担契约和绿色成本分担契约。碳减排成本分担契约是指制造商与零售商签订契约, 零售商会帮制造商分担一定比例的减排投资成本, 而制造商会适当降低批发价, 使得零售商可以从中获利。绿色成本分担契约是指制造商与零售商签订契约, 零售商会帮制造商分担一定比例的减排投资成本和碳排放成本, 而制造商会适当降低批发价, 使得零售商可以从中获利。碳减排成本分担契约和绿色成本分担契约之间的区别在于绿色成本分担契约分配除了分担减排投资成本外, 还分担了碳排放成本。减排成本分担契约成立的前提条件是零售商有利可图, 因此本文还研究了无减排契约的情况与两种减排契约的情况对比分析。适当的减排分担比例不仅有利于制造商进一步提高减排水平, 减少碳排放量, 而且可以实现双方共赢。

假设 N、R 和 G 分别表示无契约、减排成本分担契约和绿色成本分担契约; F、A 和 M 分别表示完全免费分配、完全拍卖分配和混合碳配额分配。

3. 不同碳配额分配机制下的供应链决策

3.1. 完全免费分配机制下供应链决策

完全免费分配机制下, 制造商可以获得一定量的免费碳配额量, 若免费碳配额量大于制造商的碳排放, 制造商可以出售剩余的碳配额量获得收益; 若免费碳配额量小于制造商的碳排放, 制造商需要到碳交易市场购买剩余所需的碳配额量。

3.1.1. 无契约供应链的决策

供应链之间无减排契约, 表明制造商要独自承担减排投资成本和碳排放成本, 故制造商的利润函数为

$$\pi_M^{NF} = (w_{pro}^{NF} - c_{pro}) D^{NF} - \frac{1}{2} \beta_M (e_s^{NF})^2 - [(e_M - e_s^{NF}) D^{NF} - E_M^{Free}] p_e, \quad (3)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_R^{NF} = (p_{pro}^{NF} - w_{pro}^{NF}) D^{NF}. \quad (4)$$

由于制造商和零售商之间存在 Stackelberg 博弈, 故采用逆向归纳法求解制造商的批发价格和零售商的零售价格。

首先, 将市场需求函数 D 代入零售商的利润函数中

$$\pi_R^{NF} = (p_{pro}^{NF} - w_{pro}^{NF}) D^{NF} = (p_{pro}^{NF} - w_{pro}^{NF}) (a - p_{pro}^{NF} + \phi e_s^{NF})$$

对零售价格 p_{pro}^{NF} 求导有

$$\frac{\partial \pi_R^{NF}}{\partial p_{pro}^{NF}} = a - 2p_{pro}^{NF} + \phi e_s^{NF} + w_{pro}^{NF},$$

一阶导数等于 0 求得零售价格为

$$p_{pro}^{NF} = \frac{1}{2} (a + \phi e_s^{NF} + w_{pro}^{NF}).$$

由于二阶导数

$$\frac{\partial^2 \pi_R^{NF}}{\partial (p_{pro}^{NF})^2} = -2,$$

因此, 零售商的利润函数是严格地凹于零售价格。

由于制造商和零售商之间的信息对称的, 将零售价格代入市场需求函数中得

$$D = a - p_{pro}^{NF} + \phi e_s^{NF} = a - \frac{1}{2} (a + \phi e_s^{NF} + w_{pro}^{NF}) + \phi e_s^{NF} = \frac{1}{2} (a + \phi e_s^{NF} - w_{pro}^{NF}),$$

再将上式代入制造商的利润函数有

$$\pi_M^{NF} = (w_{pro}^{NF} - c_{pro}^{NF}) \left(\frac{1}{2} (a + \phi e_s^{NF} - w_{pro}^{NF}) \right) - \left[(e_M - e_s^{NF}) \left(\frac{1}{2} (a + \phi e_s^{NF} - w_{pro}^{NF}) \right) - E_M^{Free} \right] p_e - \frac{1}{2} \beta_M (e_s^{NF})^2,$$

对批发价格 w_{pro}^{NF} 求一阶导有

$$\frac{\partial \pi_M^{NF}}{\partial w_{pro}^{NF}} = \frac{1}{2} [a + \phi e_s^{NF} - 2w_{pro}^{NF} + c_{pro} + p_e (e_M - e_s^{NF})],$$

对单位绿色产品的碳减排水平 e_s^{NF} 求一阶导得

$$\frac{\partial \pi_M^{NF}}{\partial e_s^{NF}} = \frac{1}{2} \phi (w_{pro}^{NF} - c_{pro}) - \beta_M e_s^{NF} - \frac{1}{2} p_e (\phi e_M - a - 2\phi e_s^{NF} + w_{pro}^{NF}),$$

从而二阶导数为

$$\frac{\partial^2 \pi_M^{NF}}{\partial (w_{pro}^{NF})^2} = -1, \frac{\partial^2 \pi_M^{NF}}{\partial w_{pro}^{NF} \partial e_s^{NF}} = \frac{1}{2} (\phi - p_e), \frac{\partial^2 \pi_M^{NF}}{\partial (e_s^{NF})^2} = \phi p_e - \beta_M.$$

π_M^{NF} 的 Hessian 矩阵为

$$H(\pi_M^{NF}) = \begin{bmatrix} -1 & \frac{1}{2}(\phi - p_e) \\ \frac{1}{2}(\phi - p_e) & \phi p_e - \beta_M \end{bmatrix}.$$

为了保证制造商的利润函数对决策变量具有联合凹性, 并具有最大值, Hessian 矩阵必须是负定的, 故需要满足条件

$$H_{11} < 0, \det(H) > 0$$

而 $H_{11} = -1 < 0$, 因此只要使得 $\beta_M - \frac{1}{4}(\phi + p_e)^2 > 0$ 即可。

令批发价格的一阶导数等于 0, 求得批发价格为

$$w_{pro}^{NF} = \frac{1}{2} \left[a + \phi e_s^{NF} + c_{pro} + p_e (e_M - e_s^{NF}) \right].$$

批发价格代入市场需求得到

$$\begin{aligned} D^{NF} &= \frac{1}{2} (a + \phi e_s^{NF}) - \frac{1}{4} [a + \phi e_s^{NF} + c_{pro} + p_e (e_M - e_s^{NF})] \\ &= \frac{1}{4} [a + \phi e_s^{NF} - c_{pro} - p_e (e_M - e_s^{NF})], \end{aligned}$$

将上式和批发价格代入制造商的利润函数

$$\begin{aligned} \pi_M^{NF} &= \frac{1}{8} [a + \phi e_s^{NF} - c_{pro} + p_e (e_M - e_s^{NF})] [a + \phi e_s^{NF} - c_{pro} - p_e (e_M - e_s^{NF})] - \frac{1}{2} \beta_M (e_s^{NF})^2 \\ &\quad - \frac{1}{4} p_c (e_M - e_s^{NF}) [a + \phi e_s^{NF} - c_{pro} - p_e (e_M - e_s^{NF})] - E_M^{Free} p_e, \end{aligned}$$

对单位绿色产品的碳减排水平 e_s^{NF} 求导得

$$\frac{\partial \pi_M^{NF}}{\partial e_s^{NF}} = \frac{1}{4} [(a - c_{pro})\phi - p_e (\phi e_M + p_e e_M - a + c_{pro})] - \beta_M e_s^{NF} + \frac{1}{4} [\phi^2 e_s^{NF} + p_e (2\phi e_s^{NF} + p_e e_s^{NF})],$$

令一阶导数等于 0, 得

$$e_s^{NF} = \frac{(a - c_{pro} - p_e e_M)(\phi + p_e)}{4\beta_M - (\phi + p_e)^2},$$

将上式分别代入批发价格和零售价格可得

$$\begin{aligned} w_{pro}^{NF} &= \frac{1}{2} (a + c_{pro} + p_e e_M) + \frac{1}{2} \frac{(a - c_{pro} - p_e e_M)(\phi + p_e)(\phi - p_e)}{4\beta_M - (\phi + p_e)^2}, \\ p_{pro}^{NF} &= \frac{1}{4} \left[3a + c_{pro} + e_M p_e + \frac{(a - c_{pro} - p_e e_M)(\phi + p_e)(3\phi - p_e)}{4\beta_M - (\phi + p_e)^2} \right]. \end{aligned}$$

定理 1: 在完全免费分配的碳交易机制下, 当 $\beta_M - \frac{1}{4}(\phi + p_e)^2 > 0$ 时, 供应链内无契约时的最优均衡解为

$$e_s^{NF} = \frac{(a - c_{pro} - p_e e_M)(\phi + p_e)}{4\beta_M - (\phi + p_e)^2}, \quad (5)$$

$$w_{pro}^{NF} = \frac{1}{2} (a + c_{pro} + p_e e_M) + \frac{1}{2} \frac{(a - c_{pro} - p_e e_M)(\phi + p_e)(\phi - p_e)}{4\beta_M - (\phi + p_e)^2}, \quad (6)$$

$$p_{pro}^{NF} = \frac{1}{4} \left[3a + c_{pro} + e_M p_e + \frac{(a - c_{pro} - p_e e_M)(\phi + p_e)(3\phi - p_e)}{4\beta_M - (\phi + p_e)^2} \right]. \quad (7)$$

3.1.2. 减排成本分担契约下的供应链决策

假设在减排成本分担契约中, 零售商帮制造商分担 ϕ_1 ($0 < \phi_1 < 1$) 比例的碳减排投资成本, 由此制造

商的利润函数为

$$\pi_M^{RF} = (w_{pro}^{RF} - c_{pro})D - \frac{1}{2}\beta_M(e_s^{RF})^2(1-\varphi_1) - [(e_M - e_s^{RF})D^{RF} - E_M^{Free}]p_e, \quad (8)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_R^{RF} = (p_{pro}^{RF} - w_{pro}^{RF})D^{RF} - \frac{1}{2}\beta_M\varphi_1(e_s^{RF})^2. \quad (9)$$

同样采用逆向求解法进行求解得到如下定理:

定理 2: 在完全免费分配的碳交易机制下, 当 $\beta_M(1-\varphi_1) - \phi p_e - \frac{1}{4}(\phi + p_e)^2 > 0$ 时, 供应链内存在减排成本分担契约时的最优均衡解为

$$e_s^{RF} = \frac{(a - c_{pro} - p_e e_M)(\phi + p_e)}{4\beta_M(1-\varphi_1) - (\phi + p_e)^2}, \quad (10)$$

$$w_{pro}^{RF} = \frac{1}{2}(a + c_{pro} + p_e e_M) + \frac{1}{2} \frac{(a - c_{pro} - p_e e_M)(\phi + p_e)(\phi - p_e)}{4\beta_M(1-\varphi_1) - (\phi + p_e)^2}, \quad (11)$$

$$p_{pro}^{RF} = \frac{1}{4} \left[3a + c_{pro} + e_M p_e + \frac{(a - c_{pro} - p_e e_M)(\phi + p_e)(3\phi - p_e)}{4\beta_M(1-\varphi_1) - (\phi + p_e)^2} \right]. \quad (12)$$

3.1.3. 绿色成本分担契约下供应链决策

假设在绿色减排成本分担契约中, 零售商帮制造商分担 φ_2 ($0 < \varphi_2 < 1$) 比例的碳减排投资成本和碳排放成本, 由此制造商的利润函数为

$$\pi_M^{GF} = (w_{pro}^{GF} - c_{pro})D^{GF} - \frac{1}{2}\beta_M(1-\varphi_2)(e_s^{GF})^2 - [(e_M - e_s^{GF})D - E_M^{Free}]p_e(1-\varphi_2), \quad (13)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_R^{GF} = (p_{pro}^{GF} - w_{pro}^{GF})D^{GF} - \frac{1}{2}\beta_M\varphi_2(e_s^{GF})^2 - [(e_M - e_s^{GF})D - E_M^{Free}]p_e\varphi_2. \quad (14)$$

同样采用逆向求解法进行求解得到如下定理。

定理 3: 在完全免费分配的碳交易机制下, 当

$$\beta_M(1-\varphi_2) - p_e(1-\varphi_2)(\phi + 2p_e\varphi_2) - \frac{1}{4}[\phi - p_e(1-2\varphi_2)]^2 > 0$$

时, 供应链内存在绿色成本分担契约时的最优均衡解为

$$e_s^{GF} = \frac{AB - 2c_{pro}(\phi + p_e\varphi_2) - 2D[e_M C - a]}{4\beta_M(1-\varphi_2) - 4CD - A^2}, \quad (15)$$

$$w_{pro}^{GF} = e_s^{GF} = \frac{1}{2} \left[B + A \frac{AB - 2c_{pro}(\phi + p_e\varphi_2) - 2D[e_M C - a]}{4\beta_M(1-\varphi_2) - 4CD - A^2} \right], \quad (16)$$

$$p_{pro}^{GF} = \frac{1}{4} \left[3a + c_{pro} + D e_M + (3\phi - D) \frac{AB - 2c_{pro}(\phi + p_e\varphi_2) - 2D[e_M C - a]}{4\beta_M(1-\varphi_2) - 4CD - A^2} \right], \quad (17)$$

其中

$$A = \phi - p_e(1 - 2\varphi_2), B = [a + c_{pro} + p_e e_M(1 - 2\varphi_2)], C = (\phi + p_e \varphi_2), D = p_e(1 - \varphi_2).$$

3.2. 完全拍卖分配机制下供应链决策

完全拍卖机制下, 制造商通过参加配额拍卖获得所需的碳配额量, 若制造商未通过拍卖获得所需的全部碳配额, 则需要到碳交易市场购买剩余所需的碳配额。假设每轮拍卖投标企业可以投标的最大碳配额量为 E_{bib} , 制造商在拍卖中获胜的轮次分别为 $win_1, win_2, \dots, win_{Rw}$, 一共获胜了 Rw 次。为方便计算, 本节不考虑制造商处于临界点的情况, 即制造商拍卖获胜一定获得投标的全部碳配额。

3.2.1. 无契约供应链的决策

供应链之间无减排契约, 表明制造商要独自承担减排投资成本和碳排放成本。由于政府要求制造商最多只能拍卖获得自身所需的碳配额, 因此制造商的利润函数可以分为以下两种情况:

1、碳排放量 > 拍卖获得的碳配额量

制造商的利润函数为

$$\pi_M^{NA} = (w_{pro}^{NA} - c_{pro})D^{NA} - \frac{1}{2}\beta_M(e_s^{NA})^2 - [(e_M - e_s^{NA})D^{NA} - nE_{bib}]p_e - \sum_{win_{rw}=1}^{Rw} E_{bib}p_c^{win_{rw}}, \quad (18)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_R^{NA} = (p_{pro}^{NA} - w_{pro}^{NA})D^{NA}.$$

观察制造商的利润函数可知, 该函数与完全免费分配机制下无契约的制造商利润函数十分相似, 拍卖相关变量与变量 $w_{pro}^{NA}, p_{pro}^{NA}, e_s^{NA}$ 无关, 因此该情况的结论与完全免费分配机制下无契约结论相同。

2、若碳排放量 = 拍卖获得的碳配额量

制造商的利润函数为

$$\pi_M^{NA} = (w_{pro}^{NA} - c_{pro})D^{NA} - \frac{1}{2}\beta_M(e_s^{NA})^2 - \sum_{win_{rw}=1}^{Rw} E_{bib}p_c^{win_{rw}}, \quad (19)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_R^{NA} = (p_{pro}^{NA} - w_{pro}^{NA})D^{NA}. \quad (20)$$

同样逆向归纳法可以求解得到如下定理。

定理 4: 在完全拍卖分配的碳交易机制下, 当 $\beta_M - \frac{1}{4}\phi^2 > 0$ 时, 供应链内无契约时的最优均衡解为

$$e_s^{NA} = \frac{\phi(a - c_{pro})}{4\beta_M - \phi^2}, \quad (21)$$

$$w_{pro}^{NA} = \frac{1}{2} \left[a + c_{pro} + \frac{\phi^2(a - c_{pro})}{4\beta_M - \phi^2} \right], \quad (22)$$

$$p_{pro}^{NA} = \frac{1}{4} \left[3a + c_{pro} + \frac{3\phi^2(a - c_{pro})}{4\beta_M - \phi^2} \right]. \quad (23)$$

3.2.2. 减排成本分担契约下供应链决策

假设在减排成本分担契约中, 零售商帮制造商分担比例 φ_3 ($0 < \varphi_3 < 1$) 的碳减排投资成本。同无契约的情况一样, 分两种情况讨论:

1、碳排放量 > 拍卖获得的碳配额量

制造商的利润函数为

$$\pi_M^{RA} = (w_{pro}^{RA} - c_{pro})D^{RA} - \frac{1}{2}\beta_M\varphi_3(e_s^{RA})^2 x - \left[(e_M - e_s^{RA})D^{RA} - nE_{bib}\right]p_e - \sum_{win_{rw}=1}^{Rw} E_{bib}p_c^{win_{rw}}, \quad (24)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_R^{RA} = (p_{pro}^{RA} - w_{pro}^{RA})D^{RA} - \frac{1}{2}\beta_M\varphi_3(e_s^{RA})^2. \quad (25)$$

观察制造商的利润函数可知, 该函数与完全免费分配机制下减排成本分担契约的制造商利润函数十分相似, 拍卖相关变量与变量 $w_{pro}^{RA}, p_{pro}^{RA}, e_s^{RA}$ 无关, 因此该情况的结论与完全免费分配机制下减排成本分担契约结论相同。

2、碳排放量 = 拍卖获得的碳配额量

制造商的利润函数为

$$\pi_M^{RA} = (w_{pro}^{RA} - c_{pro})D^{RA} - \frac{1}{2}\beta_M(1-\varphi_3)(e_s^{RA})^2 - \sum_{win_{rw}=1}^{Rw} E_{bib}p_c^{win_{rw}}, \quad (26)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_R^{RA} = (p_{pro}^{RA} - w_{pro}^{RA})D^{RA} - \frac{1}{2}\beta_M(e_s^{RA})^2\varphi_3. \quad (27)$$

同样的采用逆向归纳法可以求解得到相应的定理。

定理 5: 在完全拍卖分配的碳交易机制下, 当 $\beta_M(1-\varphi_3) - \frac{1}{4}\phi^2 > 0$ 时, 供应链内存在减排成本分担契约时的最优均衡解为

$$e_s^{RA} = \frac{\phi(a - c_{pro})}{4\beta_M(1-\varphi_3) - \phi^2}, \quad (28)$$

$$w_{pro}^{RA} = \frac{1}{2} \left(a + c_{pro} + \frac{\phi^2(a - c_{pro})}{4\beta_M(1-\varphi_3) - \phi^2} \right), \quad (29)$$

$$p_{pro}^{RA} = \frac{1}{4} \left[3a + c_{pro} + \frac{3\phi^2(a - c_{pro})}{4\beta_M(1-\varphi_3) - \phi^2} \right]. \quad (30)$$

3.2.3. 绿色成本分担契约下供应链决策

假设在绿色成本分担契约中, 零售商帮制造商分担 φ_4 ($0 < \varphi_4 < 1$) 比例的碳减排投资成本和碳排放成本。同无契约的情况一样, 分两种情况讨论:

1、碳排放量 > 拍卖获得的碳配额量

制造商的利润函数为

$$\begin{aligned} \pi_M^{GA} = & (w_{pro}^{GA} - c_{pro})D^{GA} - \frac{1}{2}\beta_M(1-\varphi_4)(e_s^{GA})^2 - \left[(e_M - e_s^{GA})D^{GA} - nE_{bib}\right]p_e(1-\varphi_4) \\ & - \sum_{win_{rw}=1}^{Rw} E_{bib}p_c^{win_{rw}}(1-\varphi_4), \end{aligned} \quad (31)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_R^{GA} = (p_{pro}^{NA} - w_{pro}^{GA}) D^{GA} - \frac{1}{2} \beta_M \varphi_4 (e_s^{GA})^2 - [(e_M - e_s^{GA}) D^{GA} - n E_{bib}] p_e \varphi_4 - \sum_{win_{rw}=1}^{Rw} E_{bib} p_c^{win_{rw}} \varphi_4. \quad (32)$$

观察制造商的利润函数可知, 该函数与完全免费分配机制下绿色成本分担契约的制造商利润函数十分相似, 拍卖相关变量与变量 $w_{pro}^{GA}, p_{pro}^{GA}, e_s^{GA}$ 无关, 因此该情况的结论与完全免费分配机制下绿色成本分担契约结论相同。

2、若碳排放量 = 拍卖获得的碳配额量

制造商的利润函数为

$$\pi_M^{GA} = (w_{pro}^{GA} - c_{pro}) D^{GA} - \frac{1}{2} \beta_M (1 - \varphi_4) (e_s^{GA})^2 - \sum_{win_{rw}=1}^{Rw} E_{bib} p_c^{win_{rw}} (1 - \varphi_4), \quad (33)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_R^{GA} = (p_{pro}^{GA} - w_{pro}^{GA}) D^{GA} - \frac{1}{2} \beta_M \varphi_4 (e_s^{GA})^2 - \sum_{win_{rw}=1}^{Rw} E_{bib} p_c^{win_{rw}} \varphi_4. \quad (34)$$

观察制造商的利润函数可知, 该函数与完全拍卖分配机制下减排成本分担契约的制造商利润函数十分相似, 拍卖相关变量与变量 $w_{pro}^{GA}, p_{pro}^{GA}, e_s^{GA}$ 无关, 因此该情况的结论与完全拍卖分配机制下减排成本分担契约结论相同。

3.3. 混合碳配额分配机制下供应链决策

混合碳配额分配机制下, 政府先向制造商发放一定量的免费碳配额, 若制造商的碳排放量大于所获得的免费碳配额量, 则制造商可以通过参与配额拍卖获得所需的碳配额。若参与拍卖仍未获得所需的碳配额, 只需要到碳交易市场购买剩余所需的碳配额。假设本节研究的是第三章求得的最优拍卖比例和拍卖总次数下的混合碳配额分配的情况, 且此时制造商在碳交易市场购买碳配额的价格等于最后一次拍卖的出清价格 p_c^R 。

3.3.1. 无契约供应链的决策

供应链之间无减排契约, 表明制造商要独自承担减排投资成本和碳排放成本。根据混合碳配额分配机制的原理分以下 4 种情况讨论:

1、碳排放量 $\leq$ 免费碳配额量

若碳排放量小于免费碳配额量, 表明制造商不需要参与拍卖, 该情况等同于完全免费分配下的无契约的情况, 因此不再进行详细讨论。

2、碳排放量 $>$ 免费碳配额量, 且未从拍卖获得碳配额

该情况等同于完全免费分配下的无契约的情况, 因此也不再进行详细讨论。

3、免费碳配额量 + 拍卖碳配额量 = 碳排放量

制造商的利润函数为

$$\pi_M^{NM} = (w_{pro}^{NM} - c_{pro}) D^{NM} - \frac{1}{2} \beta_M (e_s^{NM})^2 - \sum_{win_{rw}=1}^{Rw} E_{bib} p_c^{win_{rw}}, \quad (35)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_R^{NM} = (p_{pro}^{NM} - w_{pro}^{NM}) D^{NM}. \quad (36)$$

根据利润函数可知, 该情况的结论与完全拍卖分配机制下无契约的情况中碳排放量 = 拍卖获得的碳

配额量情况一致, 故不再讨论。

4、碳排放量 > 免费碳配额量 + 拍卖碳配额量

制造商的利润函数为

$$\pi_M^{NM} = (w_{pro}^{NM} - c_{pro})D^{NM} - \frac{1}{2}\beta_M(e_s^{NM})^2 - [(e_M - e_s^{NM})D^{NM} - E_M^{Free} - nE_{bib}]p_c^{\bar{R}} - \sum_{win_{rw}=1}^{Rw} E_{bib}p_c^{win_{rw}}, \quad (37)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_R^{NM} = (p_{pro}^{NM} - w_{pro}^{NM})D^{NM}. \quad (38)$$

由于该情况的证明过程与完全免费分配的无契约情况证明过程相似, 故不再给出证明过程。

定理 6: 在混合碳配额分配的碳交易机制下, 当 $\beta_M - \frac{1}{4}(\phi + p_c^{\bar{R}})^2 > 0$ 时, 供应链内无契约时的最优均衡解为

$$e_s^{NM} = \frac{(a - c_{pro} - p_c^{\bar{R}}e_M)(\phi + p_c^{\bar{R}})}{4\beta_M - (\phi + p_c^{\bar{R}})^2}, \quad (39)$$

$$w_{pro}^{NM} = \frac{1}{2}(a + c_{pro} + p_c^{\bar{R}}e_M) + \frac{1}{2} \frac{(a - c_{pro} - p_c^{\bar{R}}e_M)(\phi + p_c^{\bar{R}})(\phi - p_c)}{4\beta_M - (\phi + p_c^{\bar{R}})^2}, \quad (40)$$

$$p_{pro}^{NM} = \frac{1}{4} \left[3a + c_{pro} + e_M p_c^{\bar{R}} + \frac{(a - c_{pro} - p_c^{\bar{R}}e_M)(\phi + p_c^{\bar{R}})(3\phi - p_c^{\bar{R}})}{4\beta_M - (\phi + p_c^{\bar{R}})^2} \right]. \quad (41)$$

3.3.2. 减排成本分担契约下供应链决策

假设在减排成本分担契约中, 零售商帮制造商分担 φ_5 ($0 < \varphi_5 < 1$) 比例的碳减排投资成本。结合无契约的分类讨论, 本节只讨论第 3 和第 4 两种情况。

1、免费碳配额量 + 拍卖碳配额量 = 碳排放量

制造商的利润函数为

$$\pi_M^{RM} = (w_{pro}^{RM} - c_{pro})D^{RM} - \frac{1}{2}\beta_M(e_s^{RM})^2(1 - \varphi_5) - \sum_{win_{rw}=1}^{Rw} E_{bib}p_c^{win_{rw}}, \quad (42)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_R^{RM} = (p_{pro}^{RM} - w_{pro}^{RM})D^{RM} - \frac{1}{2}\beta_M\varphi_5(e_s^{RM})^2. \quad (43)$$

根据利润函数可知, 该情况的结论与完全拍卖分配机制下减排成本分担契约的情况中碳排放量 = 拍卖获得的碳配额量情况结论一致, 故不再讨论。

2、碳排放量 > 免费碳配额量 + 拍卖碳配额量

制造商的利润函数为

$$\begin{aligned} \pi_M^{RM} = & (w_{pro}^{RM} - c_{pro})D^{RM} - [(e_M - e_s^{RM})D^{RM} - E_M^{Free} - nE_{bib}]p_c^{\bar{R}} \\ & - \frac{1}{2}\beta_M(1 - \varphi_5)(e_s^{RM})^2 - \sum_{win_{rw}=1}^{Rw} E_{bib}p_c^{win_{rw}}, \end{aligned} \quad (44)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_R^{RM} = (p_{pro}^{RM} - w_{pro}^{RM})D^{RM} - \frac{1}{2}\beta_M\varphi_5(e_s^{RM})^2. \quad (45)$$

由于该情况的证明过程与完全免费分配的减排成本分担契约情况证明过程相似, 故不再给出证明过程。

定理 7: 在混合碳配额分配的碳交易机制下, 当

$$\beta_M(1-\varphi_1) - \phi p_c^{\bar{R}} - \frac{1}{4}(\phi + p_c^{\bar{R}})^2 > 0$$

时, 供应链内存在减排成本分担契约时的最优均衡解为

$$e_s^{RM} = \frac{(a - c_{pro} - p_c^{\bar{R}}e_M)(\phi + p_c^{\bar{R}})}{4\beta_M(1-\varphi_1) - (\phi + p_c^{\bar{R}})^2}, \quad (46)$$

$$w_{pro}^{RM} = \frac{1}{2}(a + c_{pro} + p_c^{\bar{R}}e_M) + \frac{1}{2} \frac{(a - c_{pro} - p_c^{\bar{R}}e_M)(\phi + p_c^{\bar{R}})(\phi - p_c^{\bar{R}})}{4\beta_M(1-\varphi_1) - (\phi + p_c^{\bar{R}})^2}, \quad (47)$$

$$p_{pro}^{RM} = \frac{1}{4} \left[3a + c_{pro} + e_M p_c^{\bar{R}} + \frac{(a - c_{pro} - p_c^{\bar{R}}e_M)(\phi + p_c^{\bar{R}})(3\phi - p_c^{\bar{R}})}{4\beta_M(1-\varphi_1) - (\phi + p_c^{\bar{R}})^2} \right]. \quad (48)$$

3.3.3. 绿色成本分担契约下供应链决策

假设在绿色成本分担契约中, 零售商帮制造商分担 φ_6 ($0 < \varphi_6 < 1$) 比例的碳减排投资成本和碳排放成本。结合无契约的分类讨论, 本节只讨论第 3 和第 4 两种情况。

1、免费碳配额量 + 拍卖碳配额量 = 碳排放量

制造商的利润函数为

$$\pi_M^{GM} = (w_{pro}^{GM} - c_{pro})D^{GM} - \frac{1}{2}\beta_M(1-\varphi_6)(e_s^{GM})^2 - E_{bib} \sum_{win_{rw}=1}^{Rw} p_c^{win_{rw}}(1-\varphi_6), \quad (49)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_R^{GM} = (p_{pro}^{GM} - w_{pro}^{GM})D^{GM} - \frac{1}{2}\beta_M\varphi_6(e_s^{GM})^2 - \sum_{win_{rw}=1}^{Rw} E_{bib} p_c^{win_{rw}}\varphi_6. \quad (50)$$

根据利润函数可知, 该情况的结论与完全拍卖分配机制下绿色成本分担契约的情况中碳排放量 = 拍卖获得的碳配额量情况结论一致, 故不再讨论。

2、碳排放量 > 免费碳配额量 + 拍卖碳配额量

制造商的利润函数为

$$\begin{aligned} \pi_M^{GM} = & (w_{pro}^{GM} - c_{pro})D^{GM} - \left[(e_M - e_s^{GM})D^{GM} - E_M^{Free} - nE_{bib} \right] p_c^{\bar{R}}(1-\varphi_6) \\ & - \frac{1}{2}\beta_M(1-\varphi_6)(e_s^{GM})^2 - \sum_{win_{rw}=1}^{Rw} E_{bib} p_c^{win_{rw}}(1-\varphi_6), \end{aligned} \quad (51)$$

零售商的利润函数为

$$\begin{aligned} \pi_R^{GM} = & (p_{pro}^{GM} - w_{pro}^{GM})D^{GM} - \left[(e_M - e_s^{GM})D^{GM} - E_M^{Free} - nE_{bib} \right] p_c^{\bar{R}}\varphi_6 \\ & - \frac{1}{2}\beta_M\varphi_6(e_s^{GM})^2 - \sum_{win_{rw}=1}^{Rw} p_c^{win_{rw}} E_{bib}\varphi_6. \end{aligned} \quad (52)$$

由于该情况的证明过程与完全免费分配的绿色成本分担契约情况证明过程相似, 故不再给出证明过程。

定理 8: 在混合碳配额分配的碳交易机制下, 当

$$\beta_M(1-\varphi_2) - p_c^{\bar{R}}(1-\varphi_2)(\phi + 2p_c^{\bar{R}}\varphi_2) - \frac{1}{4}[\phi - p_c^{\bar{R}}(1-2\varphi_2)]^2 > 0$$

时, 供应链内存在绿色成本分担契约时的最优均衡解为

$$e_s^{GM} = \frac{AB - 2c_{pro}(\phi + p_c^{\bar{R}}\varphi_2) - 2D[e_M C - a]}{4CD + 4\beta_M(1-\varphi_2) - A^2}, \quad (53)$$

$$w_{pro}^{GM} = \frac{1}{2} \left[B + A \frac{AB - 2c_{pro}(\phi + p_c^{\bar{R}}\varphi_2) - 2D[e_M C - a]}{4CD + 4\beta_M(1-\varphi_2) - A^2} \right], \quad (54)$$

$$p_{pro}^{GM} = \frac{1}{4} \left[3a + c_{pro} + De_M + (3\phi - D) \frac{AB - 2c_{pro}(\phi + p_c^{\bar{R}}\varphi_2) - 2D[e_M C - a]}{4CD + 4\beta_M(1-\varphi_2) - A^2} \right]. \quad (55)$$

其中

$$A = \phi - p_c^{\bar{R}}(1-2\varphi_2), B = [a + c_{pro} + p_c^{\bar{R}}e_M(1-2\varphi_2)], C = (\phi + p_c^{\bar{R}}\varphi_2), D = p_c^{\bar{R}}(1-\varphi_2).$$

4. 结论

对比分析完全免费分配机制、完全拍卖分配机制和混合碳配额分配机制下, 无契约、减排成本分担契约和绿色成本分担契约时供应链的最优均衡解得到如下结论:

1、从总体来看, 碳配额分配机制和契约对供应链的批发价格、零售价格和单位绿色产品的减排水平有不同程度的影响。混合碳配额分配机制下的很多情形下的结论虽然与完全免费分配机制和完全拍卖机制下的情形相似, 但是仍存在一定的不同, 如契约分担比例和利润。

2、完全免费分配机制下, 对比无契约、减排成本分担契约和绿色成本分担契约供应链的单位绿色产品的减排成本: 绿色成本分担契约 > 减排成本分担契约 > 无契约。完全拍卖分配机制下和混合碳配额分配机制下有一样的结果。由此表明, 供应链内存在契约有利于提高减排水平, 促进实现减排目标, 同时零售商在利润可图的情况下, 分担的绿色成本越多, 供应链的减排水平越高。

3、无契约时, 对比完全免费分配机制、完全拍卖分配机制和混合碳配额分配机制下供应链的最优均衡决策, 完全拍卖分配机制下, 批发价格、零售价格和单位绿色产品的减排成本受到市场规模、单位产品的生产成本、制造商的减排行为对市场需求影响的敏感系数和制造商的减排行为对市场需求影响的敏感系数的影响。完全免费分配机制下, 批发价格、零售价格和单位绿色产品的减排成本除此之外, 还受制造商的碳排放量和碳交易价格的影响, 而混合碳配额分配机制根据碳排放量与获得的碳配额量的情况, 要么与完全免费分配机制下某一情况的结论相似, 要么与完全拍卖分配机制下某一情况的结论一致。混合碳配额分配机制在制造商的碳排放量大于免费分配和拍卖分配的碳配额总量之和时, 与完全免费分配机制下某一情况的结论相似, 区别在于影响混合碳配额分配的碳交易价格是由拍卖最后一轮的出清价格决定的。

基金项目

湖南省教育厅重点项目(23A0254); 湖南省水利厅科技项目(XSKJ2023059-39)。

参考文献

- [1] Duan, H., Mo, J., Fan, Y., *et al.* (2018) Achieving China's Energy and Climate Policy Targets in 2030 under Multiple Uncertainties. *Energy Economics*, **70**, 45-60. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.12.022>
- [2] Huang, W., Wang, Q., Li, H., *et al.* (2022) Review of Recent Progress of Emission Trading Policy in China. *Journal of Cleaner Production*, **349**, Article ID: 131480. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131480>
- [3] Li, P., Rao, C., Goh, M., *et al.* (2021) Pricing Strategies and Profit Coordination under a Double Echelon Green Supply Chain. *Journal of Cleaner Production*, **278**, Article ID: 123694. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123694>
- [4] Wang, B., Ji, F., Zheng, J., *et al.* (2021) Carbon Emission Reduction of Coal-Fired Power Supply Chain Enterprises under the Revenue Sharing Contract: Perspective of Coordination Game. *Energy Economics*, **102**, Article ID: 105467. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105467>
- [5] Wang, Y., Yu, Z., Jin, M., *et al.* (2021) Decisions and Coordination of Retailer-Led Low-Carbon Supply Chain under Altruistic Preference. *European Journal of Operational Research*, **293**, 910-925. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.12.060>
- [6] Ma, X., Ho, W., Ji, P., *et al.* (2018) Contract Design with Information Asymmetry in a Supply Chain under an Emissions Trading Mechanism. *Decision Sciences*, **49**, 121-153. <https://doi.org/10.1111/deci.12265>
- [7] Hong, Z. and Guo, X. (2019) Green Product Supply Chain Contracts Considering Environmental Responsibilities. *Omega*, **83**, 155-166. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.02.010>
- [8] Xia, L., Bai, Y., Ghose, S., *et al.* (2022) Differential Game Analysis of Carbon Emissions Reduction and Promotion in a Sustainable Supply Chain Considering Social Preferences. *Annals of Operations Research*, **310**, 257-292. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03838-8>
- [9] Wang, Y., Yu, T., Wu, Q., *et al.* (2024) Optimal Carbon Quota Allocation for a Capital-Constrained E-Commerce Supply Chain under the Carbon Rights Buyback Policy. *Computers and Industrial Engineering*, **188**, Article ID: 109902. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.109902>
- [10] 夏西强, 路梦圆, 郭磊. 碳交易下碳配额分配方式对制造/再制造影响研究[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(11): 3001-3015. <https://doi.org/10.12011/SETP2022-0150>
- [11] 余敏. 碳配额不同分配机制下供应链碳减排策略及影响研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 暨南大学, 2018.
- [12] Zhang, Y.J, Sun, Y.F. and Huo, B.F. (2023) The Optimal Product Pricing and Carbon Emissions Reduction Profit Allocation of CET-Covered Enterprises in the Cooperative Supply Chain. *Annals of Operations Research*, **329**, 871-899. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04162-5>