

动态碳配额交易政策下高耗能企业减排方式选择研究

陈彬嘉, 季春艺, 谭子恺
江南大学商学院, 江苏 无锡

收稿日期: 2024年2月14日; 录用日期: 2024年3月5日; 发布日期: 2024年4月19日

摘要

构建了一条由制造商和零售商组成的供应链基础模型, 将动态碳配额交易政策分为两个阶段, 建立了动态碳配额交易政策第一阶段与第二阶段下的自主减排和合作减排的四种模型, 对供应链成员的碳减排率和利润进行分析比较, 得到了高耗能企业减排方式的最优选择。结果表明: 在同一动态碳配额交易政策阶段下, 企业减排方式的选择取决于节能服务公司的减排水平; 在动态碳配额交易政策第二阶段时, 企业无论选择何种减排方式都可以通过提升减排水平来保证利润; 在动态碳配额政策第一阶段适当的增加初始碳配额, 在政策第二阶段适当的提高碳配额约束系数可以有效提高企业的碳减排率, 侧面证明了该政策的有效性。

关键词

碳配额交易政策, 减排方式选择, Stackelberg博弈, 节能服务公司

Study on the Selection of Emission Reduction Methods for Energy-Intensive Enterprises under the Dynamic Carbon Quota Trading Policy

Binjia Chen, Chunyi Ji, Zikai Tan

School of Business, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu

Received: Feb. 14th, 2024; accepted: Mar. 5th, 2024; published: Apr. 19th, 2024

Abstract

A basic model of supply chain composed of a single manufacturer and a single retailer is constructed, and the dynamic carbon quota trading policy is divided into two stages. Four models of self saving and shared savings under the first and second stages of dynamic carbon quota trading policy are established, and supply chain members' carbon emission reduction rates and profits are analyzed and compared, and the optimal choice of emission reduction methods for high energy-consuming enterprises is obtained. The results show that: 1) Under the same dynamic carbon quota trading policy stage, the choice of emission reduction methods of enterprise depends on the emission reduction level of energy service company. 2) In the second stage of the dynamic carbon quota trading policy, enterprise can ensure profits by raising the level of emission reduction no matter what emission reduction method they choose. 3) Increasing the initial carbon quota in the first stage of the dynamic carbon quota policy and increasing the constraint coefficient of carbon quota in the second stage of the policy can effectively improve the carbon emission reduction rate of enterprise, which proves the effectiveness of the policy.

Keywords

Carbon Quota Trading Policy, Selection of Emission Reduction Methods, Stackelberg Game, Energy Service Company

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. 研究背景

温室气体大量的排放对人类的生态环境以及可持续发展带来了巨大的威胁和挑战,为此,多国开始加入公约组织并签订环境保护条约。碳交易作为一种运用市场机制调控二氧化碳排放量的政策工具被越来越多的国家认可并实践[1] [2] [3]。为了达成“双碳”目标,中国从2011年开始在上海、北京、广东等7个省市开展碳排放权交易试点,到2021年7月16日全国碳市场上线交易,中国碳市场初步取得了低成本降碳的实施效果。中国碳交易市场能够兼顾经济的情况下提高碳减排率[4] [5]。然而中国的碳配额交易市场也存在着碳价低迷[6]、过于宽松的碳配额分配[7]等问题,这导致了企业减排积极性降低。欧盟碳交易市场已成为低成本减排的典范[8],在碳配额分配方面,由前期固定的碳配额总量到后期每年按照2%左右比例不断减少,有效的解决了碳价低迷的问题。本文也将此作为基本的碳配额分配方式。

在政府实施碳交易政策后,电力行业、钢铁行业等高耗能行业迫于巨大的减排压力选择自主减排或者与节能服务公司(ESCO)进行合作减排。目前,我国使用最广泛的能源合同模式是节能效益分享型合同[9]。在初期,ESCO与能源用户协商并商定节能基准和效率水平。在合同期内,双方按照事先约定的比例共享节能效益。合同期满后,能源用户拥有设备并享有设备的全部效益。

碳配额交易政策下供应链的生产决策得到了许多学者的关注。Wang W [10]等研究了碳配额递减对供应链成员生产决策和碳减排率的影响,发现碳配额递减能够促进碳减排率的提升。夏西强[11]等比较分析了无碳交易政策和基于历史排放法以及基准法下碳交易政策对再制造供应链生产决策的影响。Zhang Y J [12]等研究了在三种不同碳配额分配规则下(基准线法、历史强度法、拍卖法)供应链减排合作的问题,得

到供应链最优的产品定价以及减排利润的分配。Ji J [13]等研究了三种碳配额情况下(无碳配额限制、历史排放法、基准线法)对于线上零售商减排决策和生产决策的影响。发现在线零售商更喜欢基准线法的碳配额分配方式,而政府实施基于历史排放法碳配额政策对于高排放企业减排更有效。

低碳背景下企业自主减排也得到了许多学者的关注。Benjaafar [14]等在碳约束机制下首次将碳排放量作为企业决策考虑的因素,研究发现企业运营决策对碳排放量的影响以及投资减排新技术的重要性。Du Shaofu [15]等研究了在碳配额交易政策下,碳配额对于供应链各个成员以及整体利润的影响。李细枚和周建波[16]在碳配额和交易背景下研究两个制造商的职业经理人和单个零售商对于供应链减排的战略选择问题,认为研发合作和分摊有较大可能成为最优选择。Xia Q [17]等研究了在不同权力结构下交叉持股对于供应链中的制造商和零售商的定价策略、碳减排率和利润的影响。

近年来,企业与节能服务公司达成合作减排也得到了许多学者的关注。廖诺[18]等研究了在碳交易机制下比较分析了供应链自主减排和与节能服务公司签订能源费用托管型合同两种模式,得出了供应链与节能服务公司合作的条件以及供应链最优减排决策的结论。Ouyang J and Fu J [19]研究了高耗能制造企业的三种节能方式(自我节能、收益分享型合同和节能量保证型合同)的最优选择问题,对于实际减排量不确定的节能量保证型合同做了进一步拓展。廖诺[20]等研究了碳交易机制下节能服务公司采用节能效益分享型合同与供应链减排合作的条件,将供应链自主减排和与节能服务公司合作进行了比较分析。贺勇[21]研究了制造商自主研发减排和外包减排两种减排方式,政府的研发补贴和减排量补贴两种补贴方式,分别从制造商和政府角度来研究制造商的减排决策和政府的补贴决策。郭雨[22]研究了在碳交易机制下,利用 Stackelberg 博弈和讨价还价模型分析节能服务公司参与供应链合作减排的合同选择问题。

从上述研究可以发现,大多数学者考虑了碳配额交易政策对于企业生产决策影响以及减排方式的选择问题,但是大多数都在静态的碳配额分配设定层面。本文将碳配额交易政策分为两个阶段,第一个阶段碳配额以基准线法分配,为等量设定。第二阶段碳配额在第一阶段基础上由于碳配额约束系数而降低,如果企业不采取减排措施,碳配额将无法分配给企业;相反,如果企业采取了减排措施,碳配额会根据碳减排率进行相应的分配。

本文将动态碳配额政策作为基本分配方式,探讨了以下问题:在同一阶段碳配额交易政策下,供应链成员最优生产决策以及制造商最优减排方式是什么?动态碳配额交易政策第二阶段与第一阶段相比是否提高了制造商的碳减排率?碳配额分配差异是如何影响供应链成员的生产决策以及制造商减排方式的选择?

2. 问题描述与模型假设

2.1. 问题描述

建立包含一个制造商和零售商组成的二级供应链模型,只有制造商产生碳排放且作为 Stackelberg 博弈中的领导者来选择减排方式。如果制造商选择自主减排,他将独自承担减排成本;如果制造商选择合作减排,制造商通过与节能服务公司签订节能效益分享合同进行合作减排。

根据前言所描述的碳配额分配方式,将碳配额分配分为两个阶段。第一个阶段为碳配额分配总量不变,第二个阶段为碳配额分配总量减少,动态碳配额交易政策下制造商减排方式选择见图 1,通过建立两阶段碳配额交易政策下自主减排和合作减排的四种模型,对于制造商的生产决策和减排方式选择的问题进行了综合分析。

2.2. 模型假设

假设 1: 构建了一条由制造商和零售商组成的二级供应链,双方之间的信息完全对称。其中制造商

作为领导者决定产品的批发价格和减排方式，零售商作为追随者决定产品的订单量。碳配额交易政策第一阶段下的自主减排和合作减排分别用上标“1A”、“1E”表示，碳配额交易政策第二阶段下的自主减排和合作减排分别用上标“2A”、“2E”表示，其他具体符号及其说明见表1。

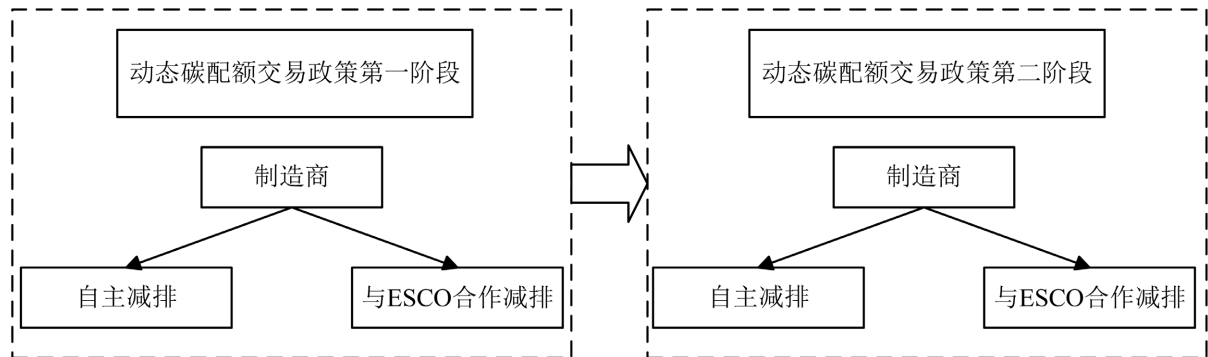


Figure 1. Manufacturers' emission reduction options under dynamic carbon quota trading policy

图1. 动态碳配额交易政策下制造商减排方式选择

Table 1. Model symbols and their definitions

表1. 模型符号及其定义

符号	说明	符号	说明
a	市场总容量	e_m	单位生产碳排放
b	需求的价格弹性	k	制造商减排成本投资系数
c	制造商生产成本	λ	节能服务公司减排水平
q	产品订单量	G	单位产品碳配额
w	批发价格	μ	减排效益分享比例
p	市场价格	γ	碳配额约束系数
p_c	碳交易市场的单位碳价	π_m	制造商利润
r_m	制造商碳减排率	π_r	零售商利润
r_e	节能服务公司碳减排率	π_e	节能服务公司利润

假设2：假设市场价格是产量的线性函数[22]，则 $p = a - bq$ ，其中 $a(a > 0)$ 为市场总容量， $b(b > 0)$ 为需求的价格弹性。

假设3：假设制造商自主减排成本为 $\frac{1}{2}kr_m^2$ ，其中 r_m 为制造商碳减排率， $k(k > 0)$ 为制造商减排投资成本系数，反映了制造商的减排水平，减排投资成本系数越小，表明达到同一减排率所投入的成本越低，说明制造商减排水平越高。由于节能服务公司在减排技术专业上优于供应链上的其他企业，所以节能服务公司的减排成本为 $\frac{1}{2}\lambda kr_e^2$ ，其中 r_e 为节能服务公司的碳减排率， $\lambda(0 < \lambda < 1)$ 为节能服务公司的减排水平， λ 越小则节能服务公司减排水平越高[19]。

假设4：制造商在不同减排策略下超出或不足的碳排放量将在碳交易市场进行出售或购买， p_c 是碳交易市场的单位碳价。在动态碳配额交易政策的第一阶段，企业分配到的碳配额为 Gq ， G 是以行业基准线分配的单位产品生产碳配额[21]；在动态碳配额交易政策的第二阶段，企业分配到的碳配额为

$(1-\gamma)r_iGq$, $\gamma(0 < \gamma < 1)$ 为碳配额约束系数[10], 随着碳配额约束系数的上升, 碳配额将逐渐下降。与第一阶段相比, 第二阶段的碳配额分配受到碳配额约束系数和碳减排率的影响而降低。

3. 不同碳配额政策下模型的建立与求解

3.1. 动态碳配额政策第一阶段自主减排

在动态碳配额交易政策的第一阶段, 企业分配到的碳配额为 Gq 。自主减排策略下, 制造商自主研发减排技术, 减排成本全部由制造商承担。供应链成员的决策顺序如下: 首先, 制造商决定产品的批发价格和碳减排率; 其次, 零售商根据产品的批发价格决定产品的订单量。双方的决策函数分别为

$$\pi_m^{1A} = (w-c)q - \frac{1}{2}kr_m^2 - e_m(1-r_m)qp_c + Gqp_c \quad (1)$$

$$\pi_r^{1A} = (a-bq-w)q \quad (2)$$

采用逆向归纳法求解, 零售商以自身利益最大化为目标确定产品的订单量, 可得

$$q^{1A} = \frac{a-w}{2b} \quad (3)$$

将(3)式代入(1)式, 经验证, 当满足 $4bk - e_m^2 p_c^2 > 0$ 时, 式(1)的海塞矩阵负定, 极大值存在。令 $\frac{\pi_m^{1A}}{w} = 0, \frac{\pi_m^{1A}}{r_m} = 0$, 联立可得

$$r_m^{1A*} = \frac{p_c e_m [a-c+p_c(G-e_m)]}{4bk - e_m^2 p_c^2} \quad (4)$$

$$w^{1A*} = \frac{2bk[a+c-p_c(G-e_m)] - ae_m^2 p_c^2}{4bk - e_m^2 p_c^2} \quad (5)$$

将(5)式代入(3)式中, 可得

$$q^{1A*} = \frac{k[a-c+p_c(G-e_m)]}{4bk - e_m^2 p_c^2} \quad (6)$$

将(4)~(5)式代入(1)~(2)式中, 可得最优制造商利润和最优零售商利润

$$\pi_m^{1A*} = \frac{k[a-c+p_c(G-e_m)]^2}{2(4bk - e_m^2 p_c^2)} \quad (7)$$

$$\pi_r^{1A*} = \frac{bk^2[a-c+p_c(G-e_m)]^2}{(4bk - e_m^2 p_c^2)^2} \quad (8)$$

3.2. 动态碳配额政策第一阶段合作减排

在动态碳配额交易政策的第一阶段, 企业分配到的碳配额为 Gq 。效益分享型合同下, 制造商与节能服务公司签订效益分享合同达成减排合作, 双方按照约定分享减排效益。决策顺序为: 首先, 制造商决定产品的批发价格和减排效益分享比例; 其次, 零售商根据产品的批发价格决定产品的订单量; 最后, 节能服务公司根据订单量与减排效益分享比例决定碳减排率。三者的决策函数分别为

$$\pi_m^{1E} = (w - c)q - e_m(1 - \mu r_e)qp_c + Gqp_c \quad (9)$$

$$\pi_r^{1E} = (a - bq - w)q \quad (10)$$

$$\pi_e^{1E} = (1 - \mu)e_m r_e qp_c - \frac{1}{2}\lambda k r_e^2 \quad (11)$$

采用逆向归纳法求解，节能服务公司以自身利益最大化为目标确定碳减排率，可得

$$r_e^{1E} = \frac{(1 - u)qp_c e_m}{\lambda k} \quad (12)$$

令 $\frac{\partial \pi_r^{1E}}{\partial q} = 0$ ，并与式(12)联立可得

$$q^{1E} = \frac{a - w}{2b} \quad (13)$$

将(13)式和(14)式代入(9)式，当 $2\lambda bk - (3\mu^2 - 3\mu + 1)e_m^2 p_c^2 > 0$ 时，式(9)的海塞矩阵负定，极大值存在。

令 $\frac{\pi_m^{1E}}{w} = 0, \frac{\pi_m^{1E}}{u} = 0$ ，联立可得最优批发价格和减排效益分享比例

$$\mu^{1E*} = \frac{1}{2} \quad (15)$$

$$w^{1E*} = \frac{4bk[a + c - p_c(G - e_m)] - ae_m^2 p_c^2}{8\lambda bk - e_m^2 p_c^2} \quad (16)$$

将(15)式和(16)式代入(13)式和(14)式，可得最优订单量和碳减排率

$$r_e^{1E*} = \frac{p_c e_m [a - c + p_c(G - e_m)]}{8\lambda bk - e_m^2 p_c^2} \quad (17)$$

$$q^{1A*} = \frac{2\lambda k [a - c + p_c(G - e_m)]}{8\lambda bk - e_m^2 p_c^2} \quad (18)$$

将(15)~(18)式代入(9)~(11)式，可得最优制造商利润、零售商利润和节能服务公司利润

$$\pi_m^{1E*} = \frac{\lambda k [a - c + p_c(G - e_m)]^2}{8\lambda bk - e_m^2 p_c^2} \quad (19)$$

$$\pi_r^{1E*} = \frac{4b\lambda^2 k^2 [a - c + p_c(G - e_m)]^2}{(8\lambda bk - e_m^2 p_c^2)^2} \quad (20)$$

$$\pi_e^{1E*} = \frac{\lambda k e_m^2 p_c^2 [a - c + p_c(G - e_m)]^2}{2(8\lambda bk - e_m^2 p_c^2)^2} \quad (21)$$

3.3. 动态碳配额政策第二阶段自主减排

在动态碳配额交易政策的第二阶段，企业分配到的碳配额为 $(1 - \gamma)r_i Gq$ ，决策顺序与动态碳配额交易政策第一阶段下的自主减排决策顺序一样。双方的决策函数分别为

$$\pi_m^{2A} = (w-c)q - \frac{1}{2}kr_m^2 - e_m(1-r_m)qp_c + (1-\gamma)r_mGqp_c \quad (22)$$

$$\pi_r^{2A} = (a-bq-w)q \quad (23)$$

采用逆向归纳法进行求解，零售商以自身利益最大化为目标确定产品的订单量，可得

$$q^{2A} = \frac{a-w}{2b} \quad (24)$$

将(24)式代入(22)式，经验证，当满足 $4bk - p_c^2 [e_m + (1-\gamma)G]^2 > 0$ 时，式(22)的海塞矩阵负定，极大值存在。令 $\frac{\pi_m^{2A}}{w} = 0, \frac{\pi_m^{2A}}{r_m} = 0$ ，联立可得

$$w^{2A*} = \frac{2bk(a+c+e_m p_c) - ap_c^2 [e_m + (1-\gamma)G]^2}{4bk - p_c^2 [e_m + (1-\gamma)G]^2} \quad (25)$$

$$r_m^{2A*} = \frac{p_c(a-c-e_m p_c)[e_m + (1-\gamma)G]}{4bk - p_c^2 [e_m + (1-\gamma)G]^2} \quad (26)$$

将(25)式代入(24)式，可得最优订单量

$$q^{2A*} = \frac{k(a-c-e_m p_c)}{4bk - p_c^2 [e_m + (1-\gamma)G]^2} \quad (27)$$

将(25)~(27)式代入(22)~(23)式，可得最优制造商利润和零售商利润

$$\pi_m^{2A*} = \frac{k(a-c-e_m p_c)^2}{8bk - 2p_c^2 [e_m + (1-\gamma)G]^2} \quad (28)$$

$$\pi_r^{2A*} = \frac{bk^2(a-c-e_m p_c)^2}{\{4bk - p_c^2 [e_m + (1-\gamma)G]^2\}^2} \quad (29)$$

3.4. 动态碳配额政策第二阶段合作减排

在动态碳配额交易政策的第二阶段，企业分配到的碳配额为 $(1-\gamma)r_e Gq$ ，决策顺序与动态碳配额交易政策第一阶段下的合作减排决策顺序一样。三者的决策函数分别为

$$\pi_m^{2E} = (w-c)q - e_m(1-\mu r_e)qp_c + (1-\gamma)r_e Gqp_c \quad (30)$$

$$\pi_r^{2E} = (a-bq-w)q \quad (31)$$

$$\pi_e^{2E} = (1-\mu)e_m r_e qp_c - \frac{1}{2}\lambda k r_e^2 \quad (32)$$

采用逆向归纳法求解，节能服务公司以自身利益最大化为目标确定碳减排率，可得

$$r_e^{2E} = \frac{(1-\mu)qp_c e_m}{\lambda k} \quad (33)$$

令 $\frac{\partial \pi_r^{2E}}{q} = 0$ ，并与式(33)联立可得

$$q^{1E} = \frac{a-w}{2b} \quad (34)$$

$$r_e^{1E} = \frac{(1-u)(a-w)p_c e_m}{2\lambda bk} \quad (35)$$

将(34)式和(35)式代入(30)式，当 $2\lambda bk - (3\mu^2 - 3\mu + 1)e_m^2 p_c^2 > 0$ 时，式(30)的海塞矩阵负定，极大值存在。令 $\frac{\pi_m^{2E}}{w} = 0, \frac{\pi_m^{2E}}{u} = 0$ ，联立可得最优批发价格和减排效益分享比例

$$w^{2E*} = \frac{4\lambda bk(a+c+e_m p_c) - ap_c^2 [e_m + (1-\gamma)G]^2}{8\lambda bk - p_c^2 [e_m + (1-\gamma)G]^2} \quad (36)$$

$$\mu^{2E*} = \frac{G(\gamma-1) + e_m}{2e_m} \quad (37)$$

将(36)式和(37)式代入(34)式和(35)式，可得最优订单量和碳减排率

$$r_e^{2E*} = \frac{p_c(a-c-e_m p_c)[e_m + (1-\gamma)G]}{8\lambda bk - p_c^2 [e_m + (1-\gamma)G]^2} \quad (38)$$

$$q^{2E*} = \frac{2\lambda k(a-c-e_m p_c)}{8\lambda bk - p_c^2 [e_m + (1-\gamma)G]^2} \quad (39)$$

将(36)~(39)式代入(30)~(32)式，可得最优制造商利润、零售商利润和节能服务公司利润

$$\pi_m^{2E*} = \frac{\lambda k(a-c-e_m p_c)^2}{8\lambda bk - p_c^2 [e_m + (1-\gamma)G]^2} \quad (40)$$

$$\pi_r^{2E*} = \frac{4\lambda^2 bk^2 (a-c-e_m p_c)^2}{\{8\lambda bk - p_c^2 [e_m + (1-\gamma)G]^2\}^2} \quad (41)$$

$$\pi_e^{2E*} = \frac{\lambda k p_c^2 (a-c-e_m p_c)^2 [e_m + (1-\gamma)G]^2}{2\{8\lambda bk - p_c^2 [e_m + (1-\gamma)G]^2\}^2} \quad (42)$$

4. 分析与讨论

推论 1: 比较同一阶段碳配额交易政策下的碳减排率

- 1) 当 $\lambda < \frac{1}{2}$ ， $r_e^{1E*} > r_m^{1A*}$ ；当 $\lambda \geq \frac{1}{2}$ ， $r_e^{1E*} \leq r_m^{1A*}$
- 2) 当 $\lambda < \frac{1}{2}$ ， $r_e^{2E*} > r_m^{2A*}$ ；当 $\lambda \geq \frac{1}{2}$ ， $r_e^{2E*} \leq r_m^{2A*}$

在动态碳配额交易政策第一个阶段下，只有当节能服务公司的减排水平比制造商自主减排提高一倍水平以上时，合作减排时的碳减排率才会比自主减排时的碳减排率高，这是因为节能服务公司的减排水

平能够大幅降低减排成本，所以节能服务公司会提高减排水平来获取减排收益。否则，制造商会进行自主减排。有趣的是，在动态碳配额交易政策第二个阶段下，节能服务公司的减排水平仍然需要比制造商提高一倍水平以上，这样合作减排的碳减排率才会高于自主减排的碳减排率。也就是说，动态碳配额交易政策下节能服务公司的减排水平决定了碳减排率。

推论 2：比较同一阶段碳配额交易政策下的制造商利润

- 1) 当 $\lambda < \frac{1}{2}$, $\pi_m^{1E^*} > \pi_m^{1A^*}$; 当 $\lambda \geq \frac{1}{2}$, $\pi_m^{1E^*} \leq \pi_m^{1A^*}$
- 2) 当 $\lambda < \frac{1}{2}$, $\pi_m^{2E^*} > \pi_m^{2A^*}$; 当 $\lambda \geq \frac{1}{2}$, $\pi_m^{2E^*} \leq \pi_m^{2A^*}$

在碳配额交易政策第一个阶段下，“理性经济人”制造商在面临减排方式选择的时候，只有当节能服务公司的减排水平高出自主减排水平一倍时，他才会选择与节能公司合作减排。节能服务公司大大缓解了制造商的减排压力，制造商通过决策既获得了销售利润，又获得了减排收益。否则，制造商出于自身利益考虑会选择自主减排。在动态碳配额交易政策第二个阶段下，此结论仍然成立。可以发现，在动态碳配额交易政策下，制造商既想要提升碳减排率又想要保证自己的收益，这是完全可以实现的目标，两者并不冲突。所以，节能服务公司要充分发挥减排优势，提升减排技术，降低减排成本，这样才有可能与高耗能企业达成减排合作。

推论 3：比较同一阶段碳配额交易政策下的零售商利润

- 1) 当 $\lambda < \frac{1}{2}$, $\pi_r^{1E^*} > \pi_r^{1A^*}$; 当 $\lambda \geq \frac{1}{2}$, $\pi_r^{1E^*} \leq \pi_r^{1A^*}$
- 2) 当 $\lambda < \frac{1}{2}$, $\pi_r^{2E^*} > \pi_r^{2A^*}$; 当 $\lambda \geq \frac{1}{2}$, $\pi_r^{1E^*} \leq \pi_r^{1A^*}$

在动态碳配额交易政策第一个阶段下，当节能服务公司的减排水平高出制造商一倍时，零售商的利润才会优于自主减排。同样，在动态碳配额交易政策第二个阶段下，此结论仍然成立。这一结果反映了当制造商的减排压力得到大幅缓解，制造商愿意大量生产，零售商因此拿到更多的订单量，从而获得更多的利润。结合推论 2 可知，在动态碳配额交易政策下，制造商减排方式的选择与零售商的利润是一致的，都与节能服务公司的减排水平有关，制造商减排方式的选择能够使供应链各个成员都受益。

推论 4：比较不同阶段碳配额交易政策下的制造商利润

- 1) 当 $k < \frac{p_c \{ [(1-\gamma)G + e_m\gamma] p_c + (a-c)(1-\gamma) \} \{ [(1-\gamma)G^2 + G\gamma e_m - 2e_m^2] p_c + (a-c)[(1-\gamma)G + 2e_m] \}}{4b[2(a-c) + p_c(G - 2e_m)]}$,
 $\pi_m^{2A^*} > \pi_m^{1A^*}$; 当
 $k \geq \frac{p_c \{ [(1-\gamma)G + e_m\gamma] p_c + (a-c)(1-\gamma) \} \{ [(1-\gamma)G^2 + G\gamma e_m - 2e_m^2] p_c + (a-c)[(1-\gamma)G + 2e_m] \}}{4b[2(a-c) + p_c(G - 2e_m)]}$,
 $\pi_m^{2A^*} \leq \pi_m^{1A^*}$
- 2) 当 $\lambda < \frac{p_c \{ [(1-\gamma)G^2 + G\gamma e_m - 2e_m^2] p_c + (a-c)[(1-\gamma)G + 2e_m] \} \{ [(1-\gamma)G + e_m\gamma] p_c + (a-c)(1-\gamma) \}}{8bk[2(a-c) + p_c(G - 2e_m)]}$,
 $\pi_m^{2E^*} > \pi_m^{1E^*}$; 当
 $\lambda \geq \frac{p_c \{ [(1-\gamma)G^2 + G\gamma e_m - 2e_m^2] p_c + (a-c)[(1-\gamma)G + 2e_m] \} \{ [(1-\gamma)G + e_m\gamma] p_c + (a-c)(1-\gamma) \}}{8bk[2(a-c) + p_c(G - 2e_m)]}$,

$$\pi_m^{2E^*} \leq \pi_m^{1E^*}$$

当制造商的减排水平满足一定条件

$$(k < \frac{p_c \{[(1-\gamma)G + e_m\gamma] p_c + (a-c)(1-\gamma)\} \{[(1-\gamma)G^2 + G\gamma e_m - 2e_m^2] p_c + (a-c)[(1-\gamma)G + 2e_m]\}}{4b[2(a-c) + p_c(G - 2e_m)]}), \text{ 那么动}$$

态碳配额交易政策第二阶段下制造商选择自主减排时的利润高于第一阶段时的利润。结合推论 2，当节能服务公司的减排水平 $\lambda > \frac{1}{2}$ 时，制造商会选择自主减排，由于制造商自主减排水平有绝对优势，即使面对更为严格的碳配额政策，制造商利润也能有一定的提升。否则，制造商的利润由于减排成本而下降。**说明当制造商自主减排水平较高且市场上节能服务公司没有较大的减排优势时，制造商在动态碳配额政策第二阶段时能够保证利润。**

当节能服务公司的减排水平满足一定条件

$$(\lambda < \frac{p_c \{[(1-\gamma)G^2 + G\gamma e_m - 2e_m^2] p_c + (a-c)[(1-\gamma)G + 2e_m]\} \{[(1-\gamma)G + e_m\gamma] p_c + (a-c)(1-\gamma)\}}{8bk[2(a-c) + p_c(G - 2e_m)]}) \text{ 时, 那么}$$

动态碳配额交易政策第二阶段下制造商选择合作减排时的利润高于第一阶段时的利润。结合推论 2，当节能服务公司 $\lambda < \frac{1}{2}$ ，制造商会选择合作减排，由于节能服务公司减排水平有绝对优势，即使面对更为严格的碳配额政策，制造商利润也能有一定的提升。否则，制造商的利润由于节能服务公司无法大幅降低减排成本而导致收益下降。

推论 5: 碳配额对于碳减排率和制造商利润的影响

$$\begin{aligned} 1) & \frac{\partial r_m^{1A^*}}{\partial G} > 0, \frac{\partial r_e^{1E^*}}{\partial G} > 0, \frac{\partial r_m^{2A^*}}{\partial \gamma} < 0, \frac{\partial r_e^{2E^*}}{\partial \gamma} < 0 \\ 2) & \frac{\partial \pi_m^{1A^*}}{\partial G} > 0, \frac{\partial \pi_m^{1E^*}}{\partial G} > 0, \frac{\partial \pi_m^{2A^*}}{\partial \gamma} < 0, \frac{\partial \pi_m^{2E^*}}{\partial \gamma} < 0 \end{aligned}$$

在碳配额政策实施的第一个阶段，碳减排率随着碳配额的增加而增加，那么在碳配额政策初期阶段，政府应该适当的增加碳配额来提高制造商和节能服务公司的减排积极性，为动态碳配额交易政策第二个阶段做好准备。在碳配额政策实施的第二个阶段，碳减排率随着碳配额约束参数的增加(碳配额逐渐减少)而减少，面对逐渐减少的碳配额，制造商要在动态碳配额交易政策第一个阶段提升自身的减排水平或者挑选出较强减排水平的节能服务公司进行合作。

在动态碳配额交易政策第一个阶段下，制造商利润随着碳配额增加而增加，充分说明碳配额可以作为企业的资产，因此政府需要在碳配额初期适当增加碳配额以保证其减排率和制造商的利润。在碳配额政策实施的第二个阶段，碳减排率随着碳配额约束参数的增加(碳配额逐渐减少)而减少，制造商面对更加严峻的减排压力，需要选择合适的减排方式来保证自己的利润。

5. 算例分析

本节将通过数值仿真，模拟动态碳配额交易政策下碳交易价格、碳配额及减排水平对于制造商最优决策的影响，并进一步分析制造商最优减排方式。根据相关文献[15]，我们假设市场总容量 $a = 100$ ，需求价格弹性 $b = 6$ ，制造商生产成本 $c = 10$ 。

5.1. 碳交易价格对于碳减排率和制造商利润的影响

假设 $k = 250, \lambda = 2/5, \gamma = 1/5, e_m = 6, G = 3$ 。 p_c 在满足最优解存在条件 $(0, 11/2)$ 取值范围内，其结果如图 2 和图 3 所示。

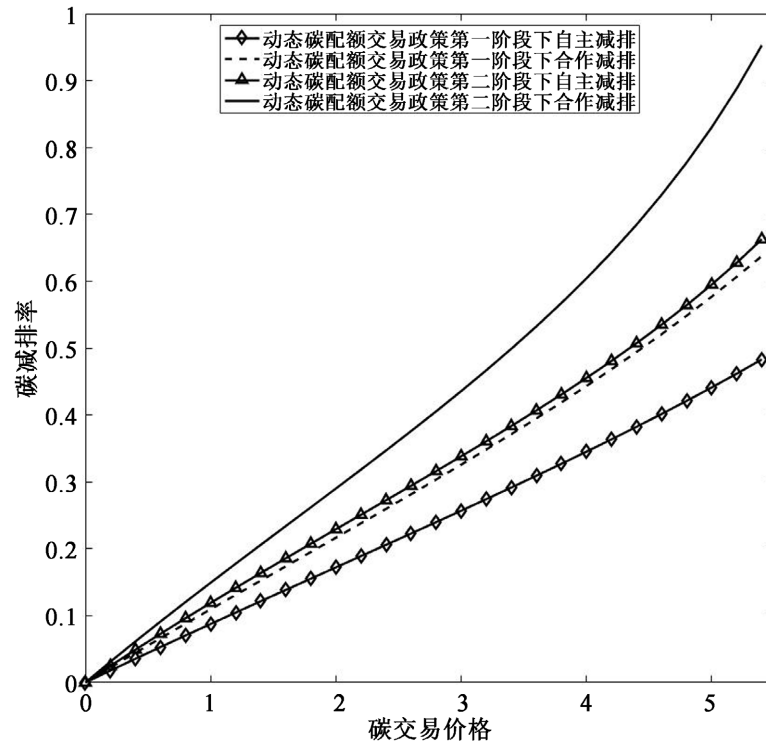


Figure 2. Impact of p_c on carbon reduction rates

图 2. p_c 对碳减排率的影响

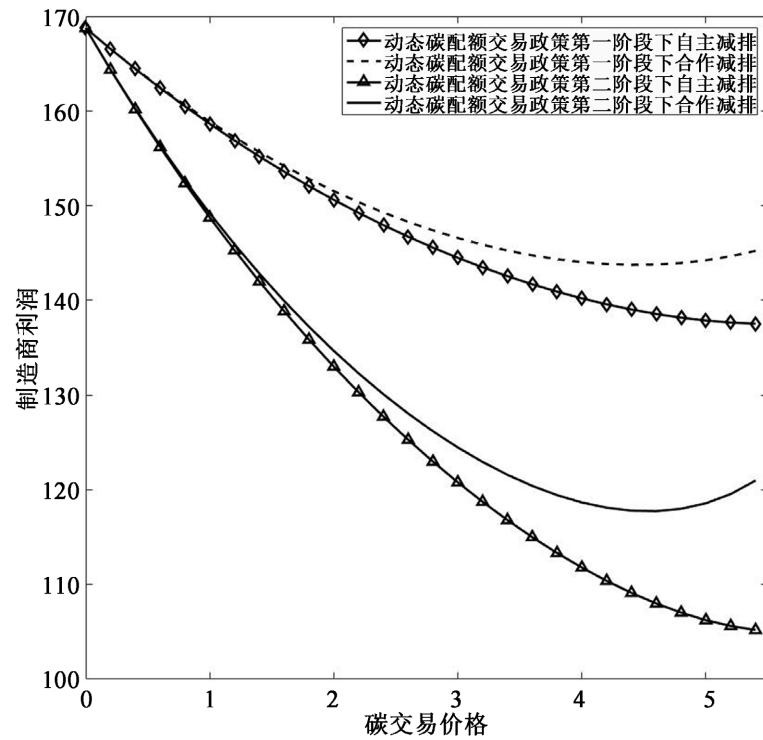


Figure 3. Impact of p_c on manufacturers' profits

图 3. p_c 对制造商利润的影响

从图 2 可以看出，碳交易价格的提升有助于碳减排率的提升，这说明碳配额交易市场的开放有利于企业进行碳减排。由于节能服务公司的减排水平高出自主减排水平一倍以上($\lambda = 2/5$)，合作减排的碳减排率对于碳交易价格更加敏感，那么适当的提高碳价有助于促进节能服务公司的碳减排率，这是因为当节能服务公司拥有减排能力的绝对优势时，制造商更加愿意与其合作，碳价的提高给了节能服务公司大幅减排的“信号”，因此节能服务公司大幅提升碳减排率来换取更多的减排收益。

从图 3 可以看出，制造商的利润随着碳交易价格的上升先下降后上升，那么合理的碳交易价格区间有助于保证制造商的利润。由于节能服务公司的减排水平高出自主减排一倍以上($\lambda = 2/5$)，制造商出于自身利益的考虑都会选择合作减排。结合图 1 可知，当碳交易价格处于较低的范围时，节能服务公司减排意愿较低，制造商面临巨大的减排成本无法得到充分的缓解，所以制造商的利润不断减少；当碳交易价格处于某一区间时(4.54~5.5)，节能服务公司愿意大幅提高碳减排率，制造商获得的减排收益大幅缓解了减排成本，利润不断地增加。

结合图 2 和图 3 可以看出，合理的碳交易价格即可以保证企业较高的碳减排率，又可以保证一定的企业利润。

5.2. 碳配额约束系数对于碳减排率和制造商利润的影响

假设 $k = 250, G = 3, e_m = 6, \lambda = 2/5, p_c = 4$ 。 γ 在(0, 1)取值范围内，其结果如图 4 和图 5 所示。

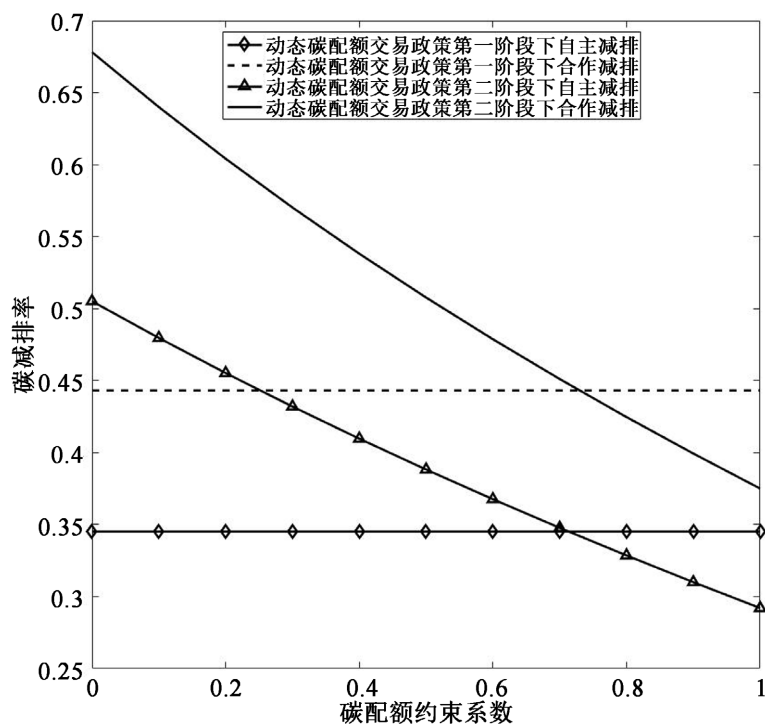


Figure 4. Impact of γ on carbon reduction rate

图 4. γ 对碳减排率的影响

从图 4 可以看出：虽然动态碳配额交易政策第二阶段下碳减排率会随着碳配额约束系数的增加而降低，但是在一定范围内第二阶段的碳减排率仍可以高于第一阶段的碳减排率。碳配额约束系数的增加会导致免费碳配额的减少，使得减排压力增加导致碳减排率降低。在自主减排情况下，碳配额约束系数在

0~0.713 时，第二阶段的碳减排率会高于第一阶段的减排率。在与节能服务公司合作的情况下，碳配额约束系数在 0~0.730 时，第二阶段的碳减排率会高于第一阶段的碳减排率，政府可以通过适当调节碳配额约束系数来提高碳减排率。

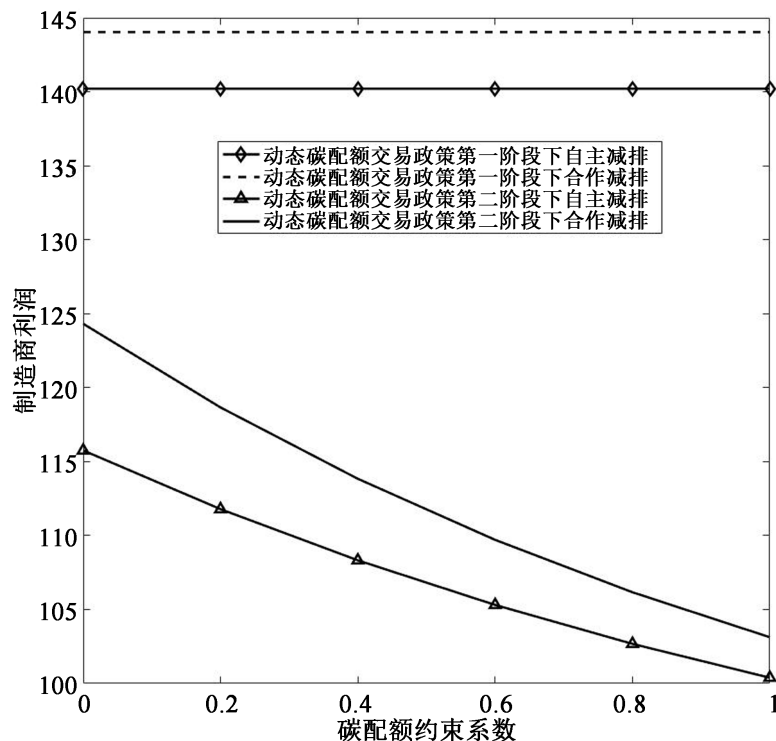


Figure 5. Impact of γ on manufacturers' profits
图 5. γ 对制造商利润的影响

从图 5 可以看出：碳配额约束系数的增加会导致制造商利润的降低。碳配额约束系数的增加会导致减排成本的增加，导致了制造商利润的降低。在此种情况下，我们发现第二阶段的制造商利润都低于第一阶段制造商的利润。那么企业想要在第二个阶段继续保持利润，需要提升自己的减排水平或者挑选一家减排能力较强的节能服务公司。

5.3. ESCO 减排水平对于碳减排率和供应链成员利润的影响

假设 $k = 250, \gamma = \frac{1}{5}, e_m = 6, G = 3, p_c = 4$ 。 λ 在满足最优存在条件 $(7/25, 1)$ 取值范围内，其结果如图 6~图 8 所示。

从图 6 可以看出，在动态碳配额交易政策下只有当节能服务公司的减排水平高于自主减排一倍时，合作减排的碳减排率才会高于自主减排。说明，节能服务公司的减排水平决定了碳减排率的高低。从图中也能看到：随着节能服务公司减排水平的提高，碳减排也随之上升。

从图 7 可以看出，碳配额交易政策阶段性的变化并不影响“理性人”制造商减排方式的选择。在动态碳配额交易政策下只有当节能服务公司的减排水平高于自主减排一倍时，制造商才会选择与节能服务公司合作。结合图 8 可以得知，在动态碳配额交易政策下，企业在进行减排方式的选择时，既可以保证利润又可以保证碳减排率。

结合图 7 和图 8 可以看出，制造商减排方式的选择与零售商利润是一致的。在动态碳配额交易政策

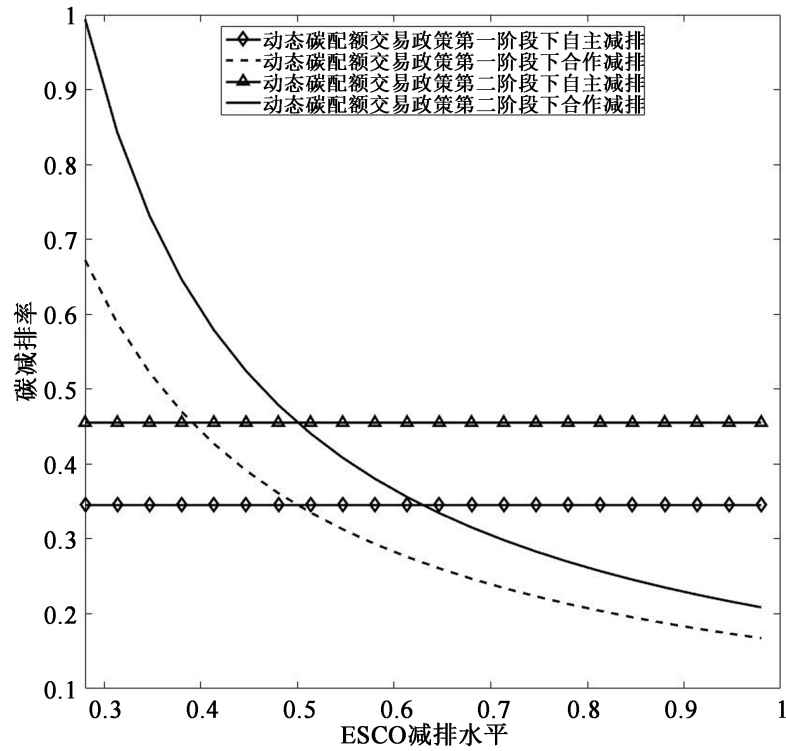


Figure 6. Impact of λ on carbon reduction rate

图 6. λ 对碳减排率的影响

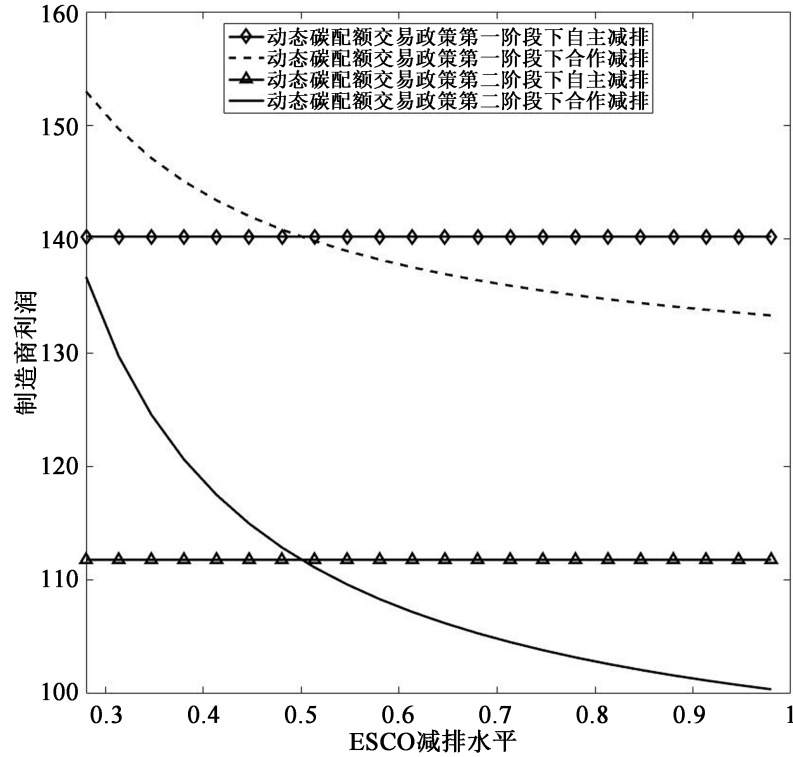


Figure 7. Impact of λ on manufacturers' profits

图 7. λ 对制造商利润的影响

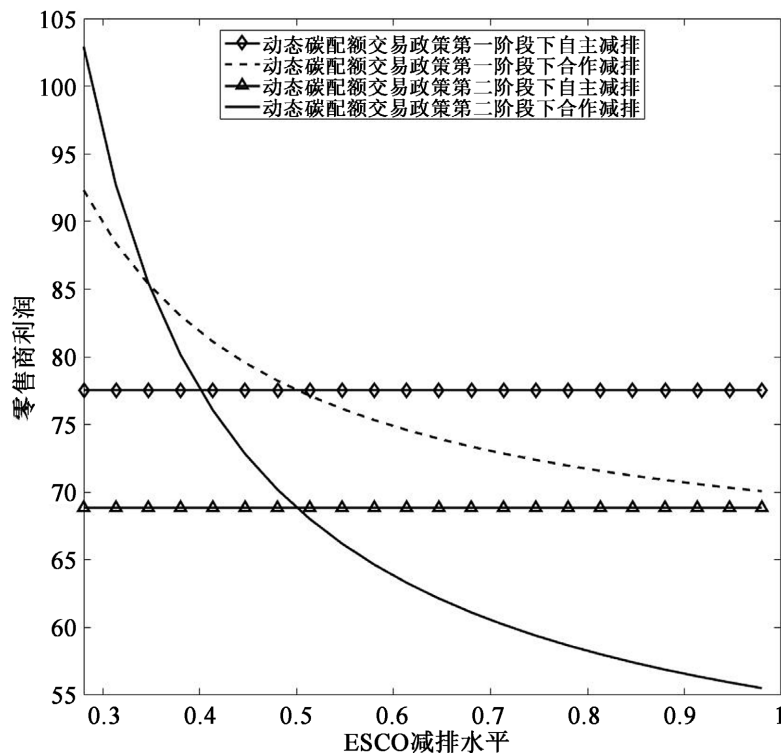


Figure 8. Impact of λ on retailers' profits
图 8. λ 对零售商利润的影响

下，只有当节能服务公司的减排水平高于自主减排一倍时，合作减排下的零售商利润高于自主减排下的利润。

5.4. 减排水平对于制造商利润的影响

假设 $\gamma = 1/5, G = 3, e_m = 6, \lambda = 3/5, p_c = 4$ 。k 在满足最优解存在条件(48, 110)取值范围内，其结果如图 9 所示。

从图 10 可以看出：面对碳配额交易政策第二阶段，当节能服务公司的减排水平较低($\lambda > 1/2$)且制造商减排水平较高时($48 < k < 105.12$)，制造商利润能够高于动态碳配额交易政策第一阶段时的利润。也就是说，面对更为严格的碳配额交易政策，制造商自主减排水平较高且市场上没有更好的节能服务公司合作，制造商能够保证自己的收益。

假设 $\gamma = 1/5, G = 3, e_m = 6, k = 250, p_c = 4$ 。λ 在满足最优解存在条件(17/100, 1)取值范围内，其结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出：面对碳配额交易政策第二阶段，当节能服务公司的减排水平达到一定水平($0.17 < \lambda < 0.21$)，制造商利润高于动态碳配额交易政策第一阶段时的利润。也就是说：如果节能服务公司的减排水平拥有绝对优势时，制造商合作减排时的利润反而在严格的碳配额交易政策下有一定的提升。结合图 8，说明碳配额交易第二阶段政策鼓励碳减排效率高的企业，并且高减排水平的企业能够获得额外的减排收益。

6. 结论与启示

针对动态碳配额交易政策下，高耗能企业减排方式选择的问题，本文将碳配额交易政策分为了两个

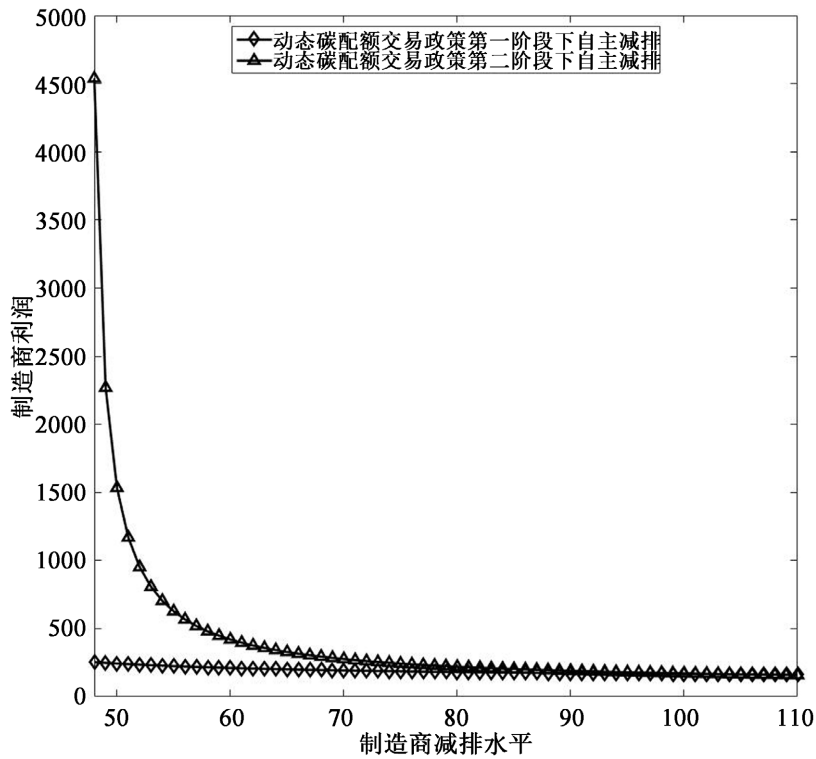


Figure 9. Effect of k on manufacturer's profit
图 9. k 对制造商利润的影响

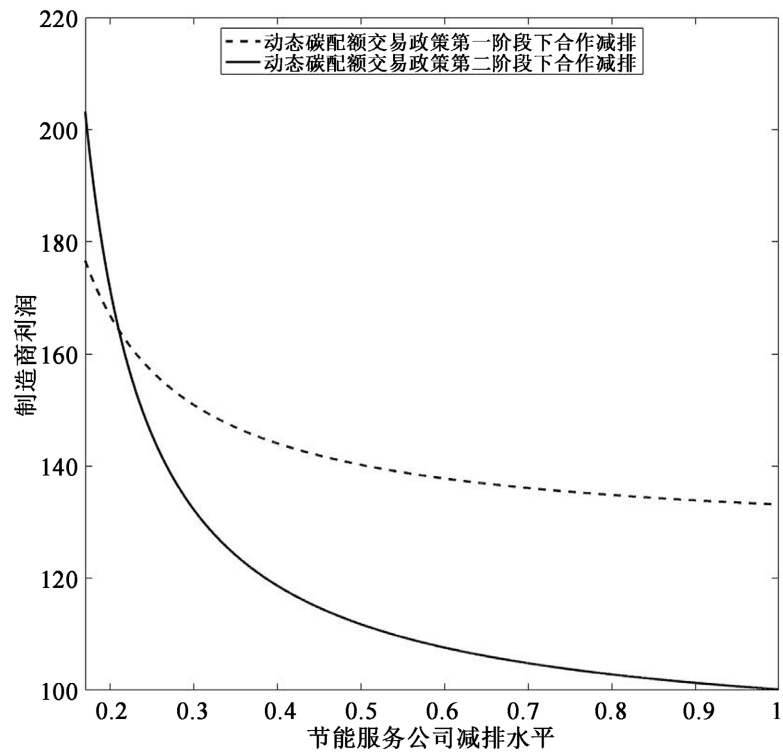


Figure 10. Effect of λ on manufacturer's profit
图 10. λ 对制造商利润的影响

阶段，第一阶段政府分配碳配额是以基准线法设定为定值，而第二阶段是根据第一阶段企业的碳减排率和碳配额约束系数减少了碳配额的分配。本文构建四种情形下的模型，分别是碳配额交易政策第一阶段下的自主减排和合作减排模型，碳配额交易政策第二阶段下的自主减排和合作减排模型。探究了减排水平、碳交易价格等参数对于供应链成员最优决策、收益与碳减排率的影响，进而分析了制造商面对动态碳配额政策最优的减排方式选择问题。

通过比较分析，得到了以下结论：

1) 碳交易价格的提升有助于碳减排率的提升，但是制造商利润随着碳交易价格的提升先下降后上升。说明碳配额交易市场的开放有利于制造商进行碳减排，合理的碳交易价格还可以保证制造商利润。

2) 在同一阶段碳配额交易政策下，节能服务公司的减排水平高于制造商减排水平一倍时，合作减排下的减排率、制造商利润和零售商利润都高于自主减排。说明制造商减排方式的选择只与节能服务公司的减排水平有关，且减排方式的选择与碳减排率和零售商利润是一致的。

3) 面对碳配额交易政策第二阶段时，制造商通过提升自身减排水平或者与减排水平较强的节能服务公司合作，制造商能够保持甚至超过第一阶段时的利润。动态碳配额交易政策对于减排水平较高的制造商是有利的，能够促进制造商提升减排率。

相应的管理启示：对于高耗能企业来说，选择减排方式存在着诸多风险。而对于不同类型的企业而言，应采取的措施也不尽相同。对于资金短缺的中小型企业，可以与具有减排优势的节能服务公司合作减排，最大限度降低减排风险。如果选择自主减排，企业可以选择纵向或横向的合作研发模式，进行研发成本共担来降低风险[16]；对于资金充足的大企业，可以进行自主研发，在产品设计的初就将减排作为考虑因素，最大限度降低减排成本。如果自主研发的水平达到较高水平，企业可以作为第三方节能服务公司为其他企业提供减排服务并获取减排收益。大企业也可以将减排外包给节能服务公司，把更多的精力专注于产品的核心优势。

对于政府来说，要合理控制碳交易价格和初始碳配额的分配。在短时间内，提升碳交易价格确实能够大幅提升碳减排率，但是会给企业造成巨大的减排成本。所以政府要有“谋略”地提升碳交易价格，不可操之过急。同样的道理，动态碳配额交易政策进入第二阶段时，也不能迅速提升碳配额约束系数，应该给企业留有提升减排水平的窗口期。长远来看，碳交易价格最终定在高位上，初始免费碳配额会逐渐消失，企业整体的减排率会在高水平之上。

对于环境改善而言，高耗能企业面对减排更为严格的碳配额交易政策，不得不提升减排水平来适应政策的变化。由于政策的干预，市场倾向于具有减排优势的企业，所以企业必须采取更有效率的清洁生产技术来提升自己的减排水平，这样越来越多的企业能够降低碳排放，对环境改善有巨大的推动作用。

本文研究的对象是单个制造商和零售商，且只考虑了合作减排的合同期和设备的生命周期均为单周期，而在现实生活中，供应链运作常常较为复杂。本文考虑在供应链中信息是完全对称的，而在现实生活中，供应链中常常存在着信息不对称导致信息成本的问题，未来的研究中应考虑。

参考文献

- [1] Turki, S., Sauvey, C. and Rezg, N. (2018) Modelling and Optimization of a Manufacturing/Remanufacturing System with Storage Facility under Carbon Cap and Trade Policy. *Journal of Cleaner Production*, **193**, 441-458. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.057>
- [2] Xu, X., He, P. and Zhang, S. (2021) Channel Addition from Marketplace or Reselling under Regional Carbon Cap-and-Trade Regulation. *International Journal of Production Economics*, **236**, Article ID: 108130. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108130>
- [3] International Carbon Action Partnership (2022) Emissions Trading Worldwide: Status Report 2022. ICAP, Berlin.

- [4] Qi, S., Cheng, S. and Cui, J. (2021) Environmental and Economic Effects of China's Carbon Market Pilots: Empirical Evidence Based on a DID Model. *Journal of Cleaner Production*, **279**, Article ID: 123720. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123720>
- [5] Wu, L. and Gong, Z. (2021) Can National Carbon Emission Trading Policy Effectively Recover GDP Losses? A New Linear Programming-Based Three-Step Estimation Approach. *Journal of Cleaner Production*, **287**, Article ID: 125052. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125052>
- [6] Ji, C.J., Hu, Y.J., Tang, B.J., et al. (2021) Price Drivers in the Carbon Emissions Trading Scheme: Evidence from Chinese Emissions Trading Scheme Pilots. *Journal of Cleaner Production*, **278**, Article ID: 123469. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123469>
- [7] Fang, S. and Cao, G. (2021) Modelling Extreme Risks for Carbon Emission Allowances—Evidence from European and Chinese Carbon Markets. *Journal of Cleaner Production*, **316**, Article ID: 128023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128023>
- [8] 张希良, 张达, 余润心. 中国特色全国碳市场设计理论与实践[J]. 管理世界, 2021, 37(8): 80-94.
- [9] Qin, Q., Liang, F., Li, L., et al. (2017) Selection of Energy Performance Contracting Business Models: A Behavioral Decision-Making Approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **72**, 422-433. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.058>
- [10] Wang, W., Zhou, C. and Li, X. (2019) Carbon Reduction in a Supply Chain via Dynamic Carbon Emission Quotas. *Journal of Cleaner Production*, **240**, Article ID: 118244. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118244>
- [11] 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.
- [12] Zhang, Y.J., Sun, Y.F. and Huo, B.F. (2021) 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>
- [13] Ji, J., Zhang, Z. and Yang, L. (2017) Comparisons of Initial Carbon Allowance Allocation Rules in an O2O Retail Supply Chain with the Cap-and-Trade Regulation. *International Journal of Production Economics*, **187**, 68-84. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.02.011>
- [14] Benjaafar, S., Li, Y. and Daskin, M. (2012) Carbon Footprint and the Management of Supply Chains: Insights from Simple Models. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **10**, 99-116. <https://doi.org/10.1109/TASE.2012.2203304>
- [15] Du, S., Zhu, L., Liang, L., et al. (2013) Emission-Dependent Supply Chain and Environment-Policy-Making in the "Cap-and-Trade" System. *Energy Policy*, **57**, 61-67. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.042>
- [16] 李细枚, 周建波. 职业经理人激励与两级供应链减排研发的战略选择[J]. 管理学报, 2022, 19(7): 1071-1081.
- [17] Xia, Q., Zhi, B. and Wang, X. (2021) The Role of Cross-Shareholding in the Green Supply Chain: Green Contribution, Power Structure and Coordination. *International Journal of Production Economics*, **234**, Article ID: 108037. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108037>
- [18] 廖诺, 梁佩仪, 贺勇, 罗雪韵. 能源费用托管型合同下嵌入视角的供应链合作减排决策研究[J]. 中国管理科学, 2022: 1-13.
- [19] Ouyang, J. and Fu, J. (2020) Optimal Strategies of Improving Energy Efficiency for an Energy-Intensive Manufacturer Considering Consumer Environmental Awareness. *International Journal of Production Research*, **58**, 1017-1033. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1607977>
- [20] 廖诺, 卢晨, 贺勇. 碳交易政策下节能服务公司参与供应链合作减排策略研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(2): 160-167.
- [21] 贺勇, 陈志豪, 廖诺. 政府补贴方式对绿色供应链制造商减排决策的影响机制[J]. 中国管理科学, 2022, 30(6): 87-98.
- [22] 郭雨, 白春光, 张璐, 郑月龙. 碳交易政策下节能服务公司参与减排的合同选择[J]. 工程管理科技前沿, 2022, 41(2): 17-25.