

文章编号: 1671-9352(2024)01-0085-15 DOI: 10.6040/j.issn.1671-9352.0.2022.412

考虑零售商企业社会责任的低碳供应链政府补贴策略

李凤, 程春龙*, 郭焯锋

(新疆财经大学工商管理学院, 新疆 乌鲁木齐 830012)

摘要: 考虑零售商具有企业社会责任(corporate social responsibility, CSR), 建立由政府、制造商与零售商组成的三方博弈模型, 对比分析了在无政府补贴、研发补贴、产量补贴以及研发补贴与产量补贴相结合的双重补贴策略4种情形下的社会福利、碳减排率、低碳产品需求及环境改善的情况, 研究了政府最优补贴策略问题。结果表明: 消费者低碳偏好及研发效率的提高会促进环境改善并提高产品减排率、低碳产品需求、企业收益及社会福利水平。随着零售商 CSR 水平提升, 政府会减少补贴力度, 然而社会总福利、产品减排率及低碳产品需求并不会降低。4种补贴策略均有利于提高碳减排率、低碳产品需求和社会福利水平并促进环境改善, 从而更好地达成经济、社会与环境目标。制造商更偏好于双重补贴策略, 而零售商在自身 CSR 水平较高时偏好于研发补贴政策, 否则, 更偏好于双重补贴策略。

关键词: 企业社会责任; 低碳供应链; 碳补贴; 博弈模型

中图分类号: F274 **文献标志码:** A

引用格式: 李凤, 程春龙, 郭焯锋. 考虑零售商企业社会责任的低碳供应链政府补贴策略[J]. 山东大学学报(理学版), 2024, 59(1): 85-99.

Government subsidy strategy of low carbon supply chain considering retailer's corporate social responsibility

LI Feng, CHENG Chunlong*, GUO Yefeng

(School of Business Administration, Xinjiang University of Finance & Economics, Urumqi 830012, Xinjiang, China)

Abstract: Considering that retailers have corporate social responsibility (CSR), a tripartite game model consisting of government, manufacturers, and retailers was established to compare and analyze the social welfare, carbon emission reduction rate, demand for low-carbon products, and environmental improvement under four different subsidy strategies: no government subsidy, R&D subsidy, production subsidy, and a dual subsidy which composed of R&D subsidy and production subsidy, the optimal subsidy strategy of the government was studied. The results indicate that the improvement of consumer low-carbon preferences and research and development efficiency will promote environmental improvement and increase product emission reduction rates, demand for low-carbon products, corporate profits, and social welfare levels. As the CSR level of retailers increases, the government will reduce subsidies, but the overall social welfare, product emission reduction rate and demand for low-carbon products will not decrease. All four subsidy strategies are conducive to increasing carbon emission reduction rates, demand for low-carbon products, social welfare levels, and promoting environmental improvement, thereby better achieving economic, social, and environmental goals. Manufacturers prefer the government's dual subsidy strategy, while retailers prefer the R&D subsidy policy when their CSR level is high, otherwise, they prefer the dual subsidy strategy.

Key words: corporate social responsibility; low carbon supply chain; carbon subsidy; game model

0 引言

企业社会责任(corporate social responsibility, CSR)是指企业在创造利润、对股东和员工承担法律责任

收稿日期: 2022-07-23; 网络出版时间: 2023-11-29 16:41:44

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/37.1389.N.20231123.1511.002>

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(20CGL026); 新疆自然科学基金青年项目(2022D01B121); 2022年度新疆维吾尔自治区人文社会科学重点研究基地招标课题一般项目(XJEDU2022P073); 新疆财经大学研究生科研创新项目(XJUFE2022K31)

第一作者简介: 李凤(1988—), 女, 副教授, 博士, 研究方向为物流与供应链管理. E-mail: 464486327@qq.com

* 通信作者简介: 程春龙(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为物流与供应链管理. E-mail: 675753995@qq.com

的同时,还要承担对消费者、社区和环境的责任,企业的社会责任要求企业必须超越把利润作为唯一目标的传统理念,强调要在生产过程中对人的价值的关注,强调对环境、消费者、对社会的贡献^[1]。在现实中,许多知名零售商将 CSR 纳入其复杂的供应链中,并对上游伙伴提出具体要求。例如,沃尔玛百货有限公司启动“10 亿吨减排项目”,携手供应商计划在 2030 年前减少 5 000 万 t 的中国业务价值链中的碳排放。苏宁易购在其 2021 年 CSR 报告中指出,要优先选择绿色供应商,采购绿色低碳产品。可见,零售商对低碳环保的社会责任问题具有很强的关注度;然而,制造商进行低碳产品的研发与生产往往会面临资金压力和技术匮乏的问题,因此,政府补贴作为有效的激励政策,对企业减排有推动作用,同时也有利于提升社会福利^[2]。政府补贴主要包括以减排行为为导向的研发投入补贴和以结果为导向的低碳产品产量补贴^[3-4]。在不同的补贴形式与力度下,供应链减排的效果也不尽相同,政府需要动态调整补贴形式与力度,充分发挥补贴对企业减排的激励作用^[5-6]。基于此,考虑零售商履行 CSR 的背景,本文研究供应链减排决策及政府低碳补贴策略具有现实意义。

现阶段学者关于考虑 CSR 供应链的研究主要分为 2 类。根据供应链成员 CSR 行为不同的刻画方式,第一类把 CSR 刻画为一种成本投入且会影响产品市场需求。例如,Ni 等^[7]通过构建上、下游 2 个供应链节点企业,研究了供应链中 CSR 的交互作用。Ma 等^[8]通过构建两阶段博弈模型,研究了信息不对称情形下制造商 CSR 水平对供应链成员企业利润的影响。这类研究均假设企业的 CSR 活动是追求经济利润最大化的投资行为。基于利益相关者理论的观点,本文参考第二类研究将供应链主体 CSR 行为刻画为对消费者剩余的关心。例如,Panda 等^[9]以外生化的视角研究制造商和零售商分别履行 CSR 下供应链决策及协调问题。在此基础上,Biswas 等^[10]进一步考虑消费者环保偏好,研究 CSR 对绿色供应链绩效的影响。公彦德等^[11]通过构建制造商与零售商共同承担社会责任的二级供应链博弈模型,发现制造商承担 CSR 有助于提高供应链绩效。林欢等^[12]研究了不同 CSR 履行主体下供应链减排策略,并认为零售商承担更多 CSR 有助于低碳减排。Dasanee 等^[13]建立了二级供应链博弈模型,研究了零售商 CSR 对供应链定价及制造商生产策略的影响。唐书传等^[14]探讨了不同权力结构下供应链成员的定价与碳减排决策问题,发现在制造商主导下,零售商 CSR 行为可以实现双赢。以上文献基于不同的视角研究了 CSR 对供应链决策的影响,然而没有考虑政府补贴政策对低碳供应链运作的影响。

在政府补贴策略方面,生延超^[3]基于技术联盟背景,建立合作研发模型,研究了投入补贴与产品补贴下企业的研发生产决策及政府补贴策略问题。Dusanee 等^[14]分析了混合双寡头垄断情形下,研发补贴与产出补贴对社会福利的影响,研究表明当技术溢出效应较低时,产出补贴下社会福利优于技术补贴,否则技术投入补贴下社会福利更优。也有学者认为,只有满足一定的经济条件阈限,才需要进行补贴且存在最优的补贴规模,不同补贴策略有各自的优势区间^[15]。卢亚丽^[16]构建了下游企业进行产品研发情况下的二级供应链博弈模型,研究了不同补贴政策对社会福利和供应链成员企业收益的影响。温兴琦等^[17]通过对比不同政府补贴方式,发现政府补贴均有利于提升供应链产品环保水平,其中研发补贴效果更明显。而研发补贴对企业创新产出呈现出“倒 U 型”影响,非研发补贴则具有显著的积极影响^[18]。张令荣等^[19]将区块链技术引入低碳供应链研究政府补贴策略问题,发现产量补贴政策下更有利于刺激低碳产品需求。陈克兵等^[4]通过建立政府、制造商与零售商组成的三方博弈模型,研究了政府补贴策略及供应链渠道选择问题,并认为当研发成本或环境改善的边际收益低时,单位生产补贴更有利于政府绩效。以上文献从不同的情形下探究了政府最优补贴策略问题,然而未考虑零售商具有 CSR 行为,且仅考虑了单一补贴形式,未考虑不同低碳补贴策略组合的情形。

本文的贡献在于:(1)本文基于零售商履行 CSR 的背景研究低碳供应链中政府补贴策略问题,探究了零售商 CSR 行为与政府补贴策略的关联性。(2)不仅研究了不同补贴政策单独实行的情形,而且进一步考虑了政府不同补贴策略组合情形。

1 问题描述及模型假设

1.1 问题描述

针对一个制造商和一个考虑 CSR 行为的零售商组成的二级供应链。制造商生产低碳产品,并以价格 w

出售给零售商,零售商以价格 p 销售给消费者,消费者低碳偏好程度 β 会影响低碳产品的市场需求量;其次,建立由政府、制造商与零售商组成的三方博弈模型;最后,引入了政府对制造商实施单一研发补贴、单一产量补贴以及两种补贴同时进行的双重补贴情形。

相关符号说明如表 1 所示,供应链结构如图 1 所示。

表 1 模型符号说明
Table 1 Model symbol description

符号	含义	符号	含义
θ	低碳技术研发投入补贴系数, $0 \leq \theta < 1$	a	产品的市场容量, $a > c$
μ	低碳产品单位补贴数额	k	研发投入成本系数, $1/k$ 为研发效率, $k > 0$
r	制造商的单位产品碳减排率, $0 \leq r < 1$	γ	CSR 实施水平, $0 \leq \gamma \leq 1$
w	制造商的批发价格	GS	政府补贴支出
c	制造商的单位产品成本, $c > 0$	π_i^j	各决策者的收益, $i = g, m, r, j = N, T, Q, D$
p	零售商的零售价格	V^j	零售商的效用, $j = N, T, Q, D$
β	消费者低碳偏好程度	SW ^j	社会总福利, $j = N, T, Q, D$
q	产品的市场需求		

注:上标 N、T、Q、D 分别表示无政府补贴、政府低碳技术研发补贴、单位产品产量补贴以及双重补贴情形的供应链模型;下标 g、m、r 分别表示政府、制造商、零售商。

1.2 模型假设

假设 1 制造商和零售商完全理性,双方对于市场信息完全了解,低碳产品产量等于市场需求,且市场能够出清。

假设 2 仅考虑低碳供应链在生产过程中的碳减排。制造商生产低碳产品需要投入一定的研发成本,且符合边际效应递减规律,即研发成本函数为 $C(r) = 1/2kr^2$ ^[20]。为保证制造商进行减排需要投入较高的成本以及不同情形下最优决策的存在,假定 $k > \beta^2 + 2\beta + 1$ 。

假设 3 市场需求由消费者低碳偏好程度 β 、产品碳减排率 r 和价格 p 共同决定^[13,19],即

$$q = a - p + \beta r. \quad (1)$$

假设 4 考虑到消费者低碳意识的改变将会影响消费者剩余,将零售商 CSR 行为看作是对消费者剩余的关注^[9]。具有社会责任感的零售商不仅追求经济利润,还关注消费者剩余 CS,即零售商效用为 $V = \pi_r + \gamma CS$,其中 $\gamma (0 \leq \gamma \leq 1)$ 为零售商的 CSR 水平, γ 越大说明零售商越具有社会责任感。 γ 为 0,意味着零售商不具有社会责任,仅追求经济利润最大化; γ 为 1,说明零售商具有完全社会责任,追求整体效用最大化。在现实中可以参考中国社会科学院官方发布的《中国企业社会责任报告评级标准》,对企业的 CSR 水平进行评级和量化。消费者剩余 CS 是指消费者愿意支付的最高价格与实际支付的价格之差,

$$CS = \int_p^{p_{\max}} q dp = q^2/2, \quad (2)$$

其中 $p_{\max} = a + \beta r$ 表示市场需求为 0 的价格。 p 为商品的实际价格。

假设 5 政府收益为社会总福利,即 $\pi_g = SW$,政府以社会福利最大化为目标制定低碳补贴策略来刺激制造商进行碳减排。综合经济、社会、环境等因素,社会总福利由生产者剩余 ($\pi_m + \pi_r$)、消费者剩余 CS、政府补贴支出 GS 与环境改善 EI 组成,其中 $EI = rq$ 表示环境的改善质量程度^[21-22],即

$$\pi_g = SW = \pi_m + \pi_r + CS + EI - GS.$$

2 模型建立与求解

考虑零售商履行 CSR 及消费者低碳偏好的影响,构建了政府主导、制造商和零售商跟随的三方博弈模型。决策的博弈顺序如下。

步骤 1 政府以社会总福利最大化为目标决定研发投入补贴系数 θ 或者单位低碳产品补贴系数 μ 。

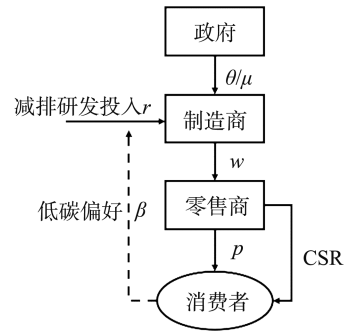


图 1 供应链结构图
Fig.1 Supply chain structure diagram

步骤 2 制造商以自身经济收益最大化为目标,根据政府补贴决定产品的批发价格 w 与碳减排水平 r 。

步骤 3 零售商以自身效用最大化来制定低碳产品的零售价格 p 。

2.1 无政府补贴模型

在无政府补贴模型中,政府不进行补贴,制造商先确定低碳产品减排率 r 与批发价格 w ,零售商再确定低碳产品零售价格 p ,则社会总福利、制造商收益与零售商的效用函数分别为:

$$\pi_g^N = \pi_m^N + \pi_r^N + CS + EI = (p-c)q - \frac{kr^2}{2} + \frac{q^2}{2} + rq, \quad (3)$$

$$\pi_m^N = (w-c)q - \frac{1}{2}kr^2, \quad (4)$$

$$V_r^N = \pi_r^N + \gamma CS = (p-w)q + \gamma \frac{q^2}{2}. \quad (5)$$

命题 1 在无政府补贴下,制造商以经济利润最大化为目标,零售商追求自身效用最大,存在最优的碳减排率 r^{N*} 、批发价格 w^{N*} 和零售价格 p^{N*} 。

证明 采用逆向归纳求解法。首先将(1)式代入(5)式,对零售商效用函数 V_r^N 关于 p 求一阶偏导数,令 $\frac{\partial V_r^N}{\partial p} = 0$ 求得零售商最优零售价格

$$p^N(w, r) = \frac{(a+\beta r)(1-\gamma)+w}{2-\gamma}. \quad (6)$$

将式(1)、(6)代入式(4)中,求 π_m^N 关于 w 和 r 的 Hessian 矩阵

$$H^N = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \pi_m^N}{\partial w^2} & \frac{\partial^2 \pi_m^N}{\partial w \partial r} \\ \frac{\partial^2 \pi_m^N}{\partial w \partial r} & \frac{\partial^2 \pi_m^N}{\partial r^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{\gamma-2} & \beta \\ \beta & -k \end{bmatrix},$$

当 $k > \frac{\beta^2}{2(2-\gamma)}$, 二阶顺序主子 $|H^N| = \frac{2k(2-\gamma)-\beta^2}{(2-\gamma)^2} > 0$, 且 $\frac{2}{\gamma-2} < 0$, 故 Hessian 矩阵负定,目标函数 π_m^N 是关于

w 和 r 的联合凹函数,存在点 (w, r) 使 π_m^N 有极大值。通过对 π_m^N 求关于 w 和 r 的一阶偏导,令 $\frac{\partial \pi_m^N}{\partial w} = 0$,

$\frac{\partial \pi_m^N}{\partial r} = 0$, 联立可得:

$$w^{N*} = \frac{k(a+c)(2-\gamma)-c\beta^2}{2k(2-\gamma)-\beta^2}, \quad (7)$$

$$r^{N*} = \frac{(a-c)\beta}{2k(2-\gamma)-\beta^2}. \quad (8)$$

将式(7)、(8)代入式(6),可得零售商的最优零售价格为

$$p^{N*} = \frac{c(k-\beta^2)+ka(3-2\gamma)}{2k(2-\gamma)-\beta^2}. \quad (9)$$

将式(8)、(9)代入式(1),可得需求 q^{N*} ,

$$q^{N*} = \frac{k(a-c)}{2k(2-\gamma)-\beta^2}. \quad (10)$$

由上式可得最优社会总福利、制造商与零售商最优利润以及最优环境改善为:

$$\pi_g^{N*} = \frac{k(a-c)^2[(2-\beta)\beta+k(7-4\gamma)]}{2[2k(2-\gamma)-\beta^2]^2}, \quad (11)$$

$$\pi_m^{N*} = \frac{k(a-c)^2}{2[2k(2-\gamma)-\beta^2]}, \quad (12)$$

$$\pi_r^{N*} = \frac{k^2(a-c)^2(1-\gamma)}{[2k(2-\gamma)-\beta^2]^2}, \quad (13)$$

$$EI^{N^*} = \frac{k(a-c)^2\beta}{[2k(2-\gamma)-\beta^2]^2} \tag{14}$$

2.2 研发补贴模型

政府对制造商碳减排研发进行补贴,鼓励企业进行低碳技术研发投入以改善碳排放对环境的影响。政府首先确定对制造商的研发投入补贴系数 θ ,此时社会总福利、制造商收益与零售商的效用函数分别为:

$$\pi_g^T = \pi_m^T + \pi_r^T + CS + EI - GS = (p-c)q - \frac{1}{2}(1-\theta)kr^2 + \frac{q^2}{2} + rq - \frac{1}{2}\theta kr^2, \tag{15}$$

$$\pi_m^T = (w-c)q - \frac{1}{2}(1-\theta)kr^2, \tag{16}$$

$$V_r^T = \pi_r^T + \gamma CS = (p-w)q + \gamma \frac{q^2}{2}. \tag{17}$$

命题 2 在研发补贴下,存在最优补贴系数 θ^{T^*} 、碳减排率 r^{T^*} 、批发价格 w^{T^*} 和零售价格 p^{T^*} 使得社会福利、制造商收益与零售商效用最大化。

证明 采用逆向归纳求解法。首先将式(1)代入式(17),对零售商效用函数 V_r^T 关于 p 求一阶偏导数,令 $\frac{\partial V_r^T}{\partial p} = 0$ 求得零售商最优零售价格

$$p^T(w, r) = \frac{(a+\beta r)(1-\gamma)+w}{2-\gamma}. \tag{18}$$

将式(1)、(18)代入式(16)中,求 π_m^T 关于 w 和 r 的 Hessian 矩阵

$$H^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \pi_m^T}{\partial w^2} & \frac{\partial^2 \pi_m^T}{\partial w \partial r} \\ \frac{\partial^2 \pi_m^T}{\partial w \partial r} & \frac{\partial^2 \pi_m^T}{\partial r^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{\gamma-2} & \frac{\beta}{2-\gamma} \\ \frac{\beta}{2-\gamma} & (\theta-1)k \end{bmatrix}.$$

当 $k > \frac{\beta^2}{2(\gamma-2)(\theta-1)}$,二阶顺序主子 $|H^T| = \frac{2k(2-\gamma)(1-\theta)-\beta^2}{(2-\gamma)^2} > 0$,且 $\frac{2}{\gamma-2} < 0$,故 Hessian 矩阵负定,目标函数 π_m^T 是关于 w 和 r 的联合凹函数,存在点 (w, r) 使 π_m^T 有极大值。通过对 π_m^T 求关于 w 和 r 的一阶偏导,令 $\frac{\partial \pi_m^T}{\partial w} = 0, \frac{\partial \pi_m^T}{\partial r} = 0$,联立可得

$$w^{T^*}(\theta) = \frac{(a+c)k(2-\gamma)(1-\theta)-c\beta^2}{2k(2-\gamma)(1-\theta)-\beta^2}, \tag{19}$$

$$r^{T^*}(\theta) = \frac{(a-c)\beta}{2k(2-\gamma)(1-\theta)-\beta^2}. \tag{20}$$

将式(19)、(20)代入式(18),可得零售商的最优零售价格为

$$p^{T^*}(\theta) = \frac{k(1-\theta)(c+3a-2a\gamma)-c\beta^2}{2k(2-\gamma)(1-\theta)-\beta^2}. \tag{21}$$

将式(19)–(21)代入式(15),可得政府收益 π_g^T 为

$$\pi_g^T(\theta) = \frac{k(a-c)^2[k(7-4\gamma)(1-\theta)^2+\beta(2-\beta-2\theta)]}{2[2k(2-\gamma)(1-\theta)-\beta^2]^2}. \tag{22}$$

由于 $\frac{\partial^2 \pi_g^T}{\partial \theta^2} < 0$,因此存在最优技术补贴率 θ^{T^*} 使得社会福利最大。令 $\frac{\partial \pi_g^T}{\partial \theta} = 0$,解得最优政府补贴率 θ^{T^*} 为

$$\theta^{T^*} = \frac{\beta^2+k[\beta(3-2\gamma)+4-2\gamma]}{k[\beta(7-4\gamma)+4-2\gamma]}. \tag{23}$$

将式(23)代入式(19)–(21)得制造商最优减排率、最优批发价格与最优零售价分别为

$$w^{T^*} = \frac{c[2(2-\gamma)^2k-\beta(7\beta-4\beta\gamma+6-3\gamma)]+a(2-\gamma)[2(2-\gamma)k-\beta]}{4(2-\gamma)^2k-\beta(7\beta-4\beta\gamma+8-4\gamma)}, \tag{24}$$

$$p^{T^*} = \frac{c[2(2-\gamma)k - \beta(7\beta - 4\beta\gamma + 5 - 2\gamma)] + a(3-2\gamma)[2(2-\gamma)k - \beta]}{4(2-\gamma)^2k - \beta(7\beta - 4\beta\gamma + 8 - 4\gamma)}, \quad (25)$$

$$r^{T^*} = \frac{(a-c)[7\beta - 4\beta\gamma + 4 - 2\gamma]}{4(2-\gamma)^2k - \beta(7\beta - 4\beta\gamma + 8 - 4\gamma)}. \quad (26)$$

由式(25)、(26)可得市场需求的最优解为

$$q^{T^*} = \frac{(a-c)[2(2-\gamma)k - \beta]}{4(2-\gamma)^2k - \beta(7\beta - 4\beta\gamma + 8 - 4\gamma)}.$$

将 θ^{T^*} 、 w^{T^*} 、 r^{T^*} 、 p^{T^*} 、 q^{T^*} 分别代入相关函数, 可得最优社会福利、企业最优利润、最优环境改善分别为

$$\pi_g^{T^*} = \frac{(a-c)^2[1 + (7-4\gamma)k]}{8k(\gamma-2)^2 - 2\beta(7\beta - 4\beta\gamma + 8 - 4\gamma)},$$

$$\pi_m^{T^*} = \frac{(a-c)^2[2k(2-\gamma) - \beta]}{8k(2-\gamma)^2 - 2\beta(7\beta - 4\beta\gamma + 8 - 4\gamma)},$$

$$\pi_r^{T^*} = \frac{(a-c)^2[2k(2-\gamma) - \beta]^2(1-\gamma)}{[4k(2-\gamma)^2 - \beta(7\beta - 4\beta\gamma + 8 - 4\gamma)]^2},$$

$$EI^{T^*} = \frac{(a-c)^2[2k(2-\gamma) - \beta](7\beta - 4\beta\gamma + 4 - 2\gamma)}{[4k(2-\gamma)^2 - \beta(7\beta - 4\beta\gamma + 8 - 4\gamma)]^2}.$$

2.3 产量补贴模型

政府对制造商进行低碳产品产量补贴, 首先确定低碳产品单位补贴数额 μ 。此时政府、零售商与制造商的收益函数分别为

$$\pi_g^Q = \pi_m^Q + \pi_r^Q + CS + EI - GS = (p-c+\mu)q - \frac{kr^2}{2} + \frac{q^2}{2} + rq - \mu q, \quad (27)$$

$$\pi_m^Q = (w-c+\mu)q - \frac{1}{2}kr^2, \quad (28)$$

$$V_r^Q = \pi_r^Q + \gamma CS = (p-w)q + \gamma \frac{q^2}{2}. \quad (29)$$

命题 3 在产量补贴下, 存在最优单位补贴数额 μ^{Q^*} 、碳减排率 r^{Q^*} 、批发价格 w^{Q^*} 和零售价格 p^{Q^*} 使得社会总福利、制造商收益与零售商效用最大化。

证明 证明过程同命题 2。根据逆向求解法, 令 $\frac{\partial V_r^Q}{\partial p} = 0$, $\frac{\partial \pi_m^Q}{\partial w} = 0$, $\frac{\partial \pi_m^Q}{\partial r} = 0$, $\frac{\partial \pi_g^Q}{\partial \mu} = 0$, 联立方程求得各均衡决策结果:

$$\mu^{Q^*} = \frac{(a-c)[2\beta + k(3-2\gamma)]}{k-\beta(2+\beta)}, \quad w^{Q^*} = \frac{a[(\gamma-1)k - 2\beta] - c[\beta^2 + (\gamma-2)k]}{k-\beta(2+\beta)},$$

$$r^{Q^*} = \frac{(a-c)\beta}{k-\beta(2+\beta)}, \quad p^{Q^*} = \frac{c(k-\beta^2) - 2a\beta}{k-\beta(2+\beta)}, \quad q^{Q^*} = \frac{k(a-c)}{k-\beta(2+\beta)}.$$

由上述最优决策结果可得最优社会福利、制造商与零售商最优利润以及环境绩效分别为:

$$\pi_g^{Q^*} = \frac{k(a-c)^2}{2[k-\beta(2+\beta)]}, \quad \pi_m^{Q^*} = \frac{k(a-c)^2[2k(2-\gamma) - \beta^2]}{2[k-\beta(2+\beta)]^2}, \quad \pi_r^{Q^*} = \frac{k^2(a-c)^2(1-\gamma)}{2[k-\beta(2+\beta)]^2}, \quad EI^{Q^*} = \frac{k(a-c)^2\beta}{(k-\beta(2+\beta))^2}.$$

2.4 双重补贴模型

政府同时对制造商进行研发补贴和产量补贴, 首先确定研发补贴系数 θ 和单位补贴系数 μ 。此时政府、零售商与制造商的收益函数分别为

$$\pi_g^D = \pi_m^D + \pi_r^D + CS + EI - GS = (p-c+\mu)q - (1-\theta)\frac{kr^2}{2} + \frac{q^2}{2} + rq - \frac{\theta kr^2}{2} - \mu q, \quad (30)$$

$$\pi_m^D = (w-c+\mu)q - (1-\theta)\frac{1}{2}kr^2, \quad (31)$$

$$V_r^D = \pi_r^D + \gamma CS = (p-w)q + \gamma \frac{q^2}{2}. \tag{32}$$

命题 4 在双重补贴下,存在最优研发补贴系数 θ^{D*} 、单位补贴数额 μ^{D*} 、碳减排率 r^{D*} 、批发价格 w^{D*} 和零售价格 p^{D*} 使得社会总福利、制造商收益与零售商效用最大化。

证明 证明过程同命题 2。根据逆向求解法,令 $\frac{\partial V_r^D}{\partial p} = 0, \frac{\partial \pi_m^D}{\partial w} = 0, \frac{\partial \pi_m^D}{\partial r} = 0, \frac{\partial \pi_g^D}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial \pi_g^D}{\partial \mu} = 0$ 联立方程求得各均衡决策结果:

$$\theta^{D*} = \frac{1}{1+\beta}, \quad \mu^{D*} = \frac{(a-c)[k(3-2\gamma)+\beta+1]}{k-(1+\beta)^2}, \quad w^{D*} = \frac{c[k(2-\gamma)-\beta(1+\beta)]-a[1+k(1-\gamma)+\beta]}{k-(1+\beta)^2},$$

$$r^{D*} = \frac{(a-c)(1+\beta)}{k-(1+\beta)^2}, \quad p^{D*} = \frac{c(k-\beta(1+\beta))-a(1+\beta)}{k-(1+\beta)^2}, \quad q^{D*} = \frac{k(a-c)}{k-(1+\beta)^2}.$$

由上述最优决策结果可得最优社会福利、制造商与零售商最优利润以及环境绩效分别为:

$$\pi_g^{D*} = \frac{k(a-c)^2}{2[k-(1+\beta)^2]}, \quad \pi_m^{D*} = \frac{k(a-c)^2[2k(2-\gamma)-\beta(1+\beta)]}{2[k-(1+\beta)^2]^2}, \quad \pi_r^{D*} = \frac{k^2(a-c)^2(1-\gamma)}{[k-(1+\beta)^2]^2},$$

$$EI^{D*} = \frac{k(a-c)^2(1+\beta)}{[k-(1+\beta)^2]^2}.$$

2.5 均衡结果对比分析

以上 4 种情形的相关博弈结果如表 2 所示。

表 2 不同情形博弈结果对比分析
Table 2 Comparative analysis of game results in different situations

变量	无政府补贴(N)	技术补贴(T)	产量补贴(Q)	双重补贴(D)
π_g^j	$\frac{kA^2[(2-\beta)\beta+k(7-4\gamma)]}{2[2k(2-\gamma)-\beta^2]^2}$	$\frac{A^2[1+(7-4\gamma)k]}{8k(\gamma-2)^2-2\beta B}$	$\frac{kA^2}{2[k-\beta(2+\beta)]}$	$\frac{kA^2}{2[k-(1+\beta)^2]}$
π_m^j	$\frac{kA^2}{2[2k(2-\gamma)-\beta^2]}$	$\frac{A^2[2k(2-\gamma)-\beta]}{8k(2-\gamma)^2-2\beta B}$	$\frac{kA^2[2k(2-\gamma)-\beta^2]}{2[k-\beta(2+\beta)]^2}$	$\frac{kA^2[2k(2-\gamma)-\beta(1+\beta)]}{2[k-(1+\beta)^2]^2}$
π_r^j	$\frac{k^2A^2(1-\gamma)}{[2k(2-\gamma)-\beta^2]^2}$	$\frac{A^2[2k(2-\gamma)-\beta]^2(1-\gamma)}{[4k(2-\gamma)^2-\beta B]^2}$	$\frac{k^2A^2(1-\gamma)}{2[k-\beta(2+\beta)]^2}$	$\frac{k^2A^2(1-\gamma)}{[k-(1+\beta)^2]^2}$
r^j	$\frac{A\beta}{2k(2-\gamma)-\beta^2}$	$\frac{(7\beta-4\beta\gamma+4-2\gamma)A}{4(2-\gamma)^2k-\beta B}$	$\frac{A\beta}{k-\beta(2+\beta)}$	$\frac{A(1+\beta)}{k-(1+\beta)^2}$
q^j	$\frac{kA}{2k(2-\gamma)-\beta^2}$	$\frac{A[2(2-\gamma)k-\beta]}{4(2-\gamma)^2k-\beta B}$	$\frac{kA}{k-\beta(2+\beta)}$	$\frac{kA}{k-(1+\beta)^2}$
EI^j	$\frac{k^2A^2\beta}{[2k(2-\gamma)-\beta^2]^2}$	$\frac{A^2[2k(2-\gamma)-\beta](B-4+2\gamma)}{[4(2-\gamma)^2k-\beta B]^2}$	$\frac{kA^2\beta}{[k-\beta(2+\beta)]^2}$	$\frac{kA^2(1+\beta)}{[k-(1+\beta)^2]^2}$

注: * 表示不同情形下的最优值,其中 $A = a - c, B = 7\beta - 4\beta\gamma + 8 - 4\gamma$ 。

推论 1 $\frac{\partial \theta^{T*}}{\partial k} < 0, \frac{\partial \mu^{Q*}}{\partial k} < 0, \frac{\partial \theta^{D*}}{\partial k} = 0, \frac{\partial \mu^{D*}}{\partial k} < 0; \frac{\partial r^{N*}}{\partial k} < 0, \frac{\partial r^{T*}}{\partial k} < 0, \frac{\partial r^{Q*}}{\partial k} < 0, \frac{\partial r^{D*}}{\partial k} < 0; \frac{\partial q^{N*}}{\partial k} < 0, \frac{\partial q^{T*}}{\partial k} < 0,$
 $\frac{\partial q^{Q*}}{\partial k} < 0, \frac{\partial q^{D*}}{\partial k} < 0; \frac{\partial EI^{N*}}{\partial k} < 0, \frac{\partial EI^{T*}}{\partial k} < 0, \frac{\partial EI^{Q*}}{\partial k} < 0, \frac{\partial EI^{D*}}{\partial k} < 0, \frac{\partial \pi_g^{N*}}{\partial k} < 0, \frac{\partial \pi_g^{T*}}{\partial k} < 0, \frac{\partial \pi_g^{Q*}}{\partial k} < 0, \frac{\partial \pi_g^{D*}}{\partial k} < 0.$

证明 $\frac{\partial \theta^{T*}}{\partial k} = \frac{\beta^2}{k^2(2\gamma-4+4\beta\gamma-7\beta)} < 0, \frac{\partial \mu^{Q*}}{\partial k} = \frac{(a-c)\beta(4\gamma-8+2\beta\gamma-3\beta)}{(k-\beta(2+\beta))^2} < 0$ 。类似可证产品减排率、需求、社会福利与环境绩效关于研发投入成本系数 k 的函数关系。

推论 1 表明,研发效率对社会福利、碳减排率、低碳产品产量、环境改善、政府单位产量补贴额与技术补贴系数有正向影响。4 种情形下:(1)研发效率降低使得研发投入成本增加,制造商会降低产品减排率,市场需求也随之减少,从而引起环境质量改进程度降低(环境效益降低),最终导致社会福利降低。(2)在研发补贴与产量补贴下,研发效率的降低,意味过多的补贴将会造成财政资源浪费,合理减少补贴才能获得更优的经济与环境效益。在双重补贴下,当低碳产品的研发难度增大时,政府应降低单位产量补贴额,以维持一定的研发补贴水平,鼓励制造商进行低碳技术研发。

$$\text{推论 2 } \frac{\partial \theta^{T^*}}{\partial \beta} < 0, \frac{\partial \mu^{Q^*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial \theta^{D^*}}{\partial \beta} < 0, \frac{\partial \mu^{D^*}}{\partial \beta} > 0; \frac{\partial r^{N^*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial r^{T^*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial r^{Q^*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial r^{D^*}}{\partial \beta} > 0; \frac{\partial q^{N^*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial q^{T^*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial q^{Q^*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial q^{D^*}}{\partial \beta} > 0; \frac{\partial EI^{N^*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial EI^{T^*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial EI^{Q^*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial EI^{D^*}}{\partial \beta} > 0; \frac{\partial \pi_g^{N^*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial \pi_g^{T^*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial \pi_g^{Q^*}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial \pi_g^{D^*}}{\partial \beta} > 0.$$

证明 $\frac{\partial \theta^{T^*}}{\partial \beta} = \frac{\beta(\beta(7-4\gamma)+8-4\gamma)-4k(2-\gamma)^2}{k(4-2\gamma+7\beta-4\beta\gamma)^2} < 0, \frac{\partial \mu^{Q^*}}{\partial \beta} = \frac{2(a-c)(\beta^2+k(\beta(3-2\gamma)+4-2\gamma))}{(k-\beta(2+\beta))^2} > 0$ 。类似可证产品减排率、需求、社会福利与环境绩效关于消费者低碳偏好 β 的函数关系。

推论 2 表明,消费者低碳偏好对社会福利、碳减排率、低碳产品产量、环境改善和政府单位产量补贴额有正向影响,对政府技术补贴系数有负向影响。4 种情形下:(1)消费者低碳偏好程度的增加皆会引起产品减排率与市场需求的增加,从而带来更高的环境效益与社会总福利。(2)消费者低碳偏好程度的增加表现为消费者愿意为低碳产品付出更高的价格,使得低碳产品需求增长。需求的增长业使得制造商获得了更多利润,从而有能力进行自主研发,所需研发补贴减少,所以政府降低研发投入补贴率。为满足大众需求,政府提高了单位产品补贴力度,以鼓励制造商生产更多低碳产品。

$$\text{推论 3 } \frac{\partial \theta^{T^*}}{\partial \gamma} < 0, \frac{\partial \mu^{Q^*}}{\partial \gamma} < 0, \frac{\partial \theta^{D^*}}{\partial \lambda} = 0, \frac{\partial \mu^{D^*}}{\partial \lambda} < 0; \frac{\partial r^{N^*}}{\partial \gamma} > 0, \frac{\partial r^{T^*}}{\partial \gamma} > 0, \frac{\partial r^{Q^*}}{\partial \gamma} = 0, \frac{\partial r^{D^*}}{\partial \gamma} = 0; \frac{\partial q^{N^*}}{\partial \gamma} > 0, \frac{\partial q^{T^*}}{\partial \gamma} > 0, \frac{\partial q^{Q^*}}{\partial \gamma} = 0, \frac{\partial q^{D^*}}{\partial \gamma} = 0; \frac{\partial EI^{N^*}}{\partial \gamma} > 0, \frac{\partial EI^{T^*}}{\partial \gamma} > 0, \frac{\partial EI^{Q^*}}{\partial \gamma} = 0, \frac{\partial EI^{D^*}}{\partial \gamma} = 0; \frac{\partial \pi_g^{N^*}}{\partial \gamma} > 0, \frac{\partial \pi_g^{T^*}}{\partial \gamma} > 0, \frac{\partial \pi_g^{Q^*}}{\partial \gamma} = 0, \frac{\partial \pi_g^{D^*}}{\partial \gamma} = 0.$$

证明 $\frac{\partial \pi_g^{T^*}}{\partial \gamma} = \frac{2(a-c)^2(2(2\gamma^2-7\gamma+6)k^2+k(\beta-2\gamma+4)-\beta(\beta+1))}{(\beta(4\beta\gamma-7\beta+4\gamma-8)+4(\gamma-2)^2k)^2} > 0$ 。令 $f(k) = 2(2\gamma^2-7\gamma+6)k^2+k(\beta-2\gamma+4)-\beta(\beta+1) = 0$, $f(k)$ 是关于 k 的开口向上的一元二次函数,由判别式 $\Delta > 0$,知方程 $f(k) = 0$ 有 2 个不相等的实根 k_1, k_2 ,由 k 的假设范围知 $k > k_{1,2}$,故 $f(k) > 0$ 恒成立,即 $\frac{\partial \pi_g^{T^*}}{\partial \gamma} > 0$ 。类似可证低碳产品减排率、需求、社会福利与环境绩效关于零售商 CSR 水平 γ 的函数关系。

推论 3 表明,在无政府补贴与政府技术投入补贴情形下,零售商企业社会责任履行水平对碳减排率、低碳产品产量、环境改善与社会福利有正向影响。零售商 CSR 对政府研发补贴系数与单位产量补贴额具有负向影响。产量补贴、双重补贴下产品碳减排率、低碳产品产量、环境改善和社会福利的增长表现为零售商社会责任无关。(1)由无政府补贴的基准情形得知,当零售商更加关注 CSR 时,一方面会带来了更多的需求,制造商减排意愿也更大;另一方面也有利于境改善程度与社会福利的提升。(2)在政府双重补贴情形下,碳减排率、低碳产品产量、环境改善和社会福利的表现不受零售商社会责任的影响。这是因为零售商 CSR 增强带来的正向效应会与政府单位产量补贴力度降低带来的负向效应抵消。(3)在政府单一补贴情形下,随着零售商社会水平的增强,政府技术补贴系数与单位产量补贴额均减少,即政府单位补贴成本降低,这表明零售商履行 CSR 可以提高政府补贴效率。虽然政府补贴力度降低,但是碳减排率、市场需求、环境绩效与社会福利却没有减少,说明当企业 CSR 意识逐渐增强时,政府适当减少补贴并不会引起社会福利、环境效益、产品减排率以及市场需求的降低。

推论 4 $\pi_g^{D^*} > \pi_g^{Q^*} > \pi_g^{T^*} > \pi_g^{N^*}$ 。

证明 $\pi_g^{T^*} - \pi_g^{N^*} = \frac{(a-c)^2[\beta^2+k(4+\beta(3-2\gamma)-2\gamma)]^2}{2[2k(2-\gamma)-\beta^2]^2[4k(2-\gamma)^2-\beta(8+7\beta-4\gamma-4\beta\gamma)]} > 0$,故 $\pi_g^{T^*} > \pi_g^{N^*}$ 。 $\pi_g^{Q^*} - \pi_g^{N^*} = \frac{k(a-c)^2[2\beta+k(3-2\gamma)]^2}{2[k-\beta(2+\beta)][\beta^2+2k(-2+\gamma)]^2} > 0$,即 $\pi_g^{Q^*} > \pi_g^{N^*}$ 。类似可证 $\pi_g^{D^*}$ 恒大于 $\pi_g^{T^*}, \pi_g^{Q^*}, \pi_g^{N^*}$ 。

令 $F_g(k) = \pi_g^{Q^*} - \pi_g^{T^*}$,则 $F_g(k) = \frac{[a-c]^2[2\beta+\beta^2+k(+6\beta-4\beta\gamma-1)+k^2(9-12\gamma+4\gamma^2)]}{2(k-2\beta-\beta^2)[4k\beta(2-\gamma)^2(4\gamma+4\beta\gamma-8-7\beta)]}$,由于 $k > \beta^2+2\beta+1$,

故 $\frac{(a-c)^2}{2(k-2\beta-\beta^2)[k(16-16\gamma+4\gamma^2)-\beta(7\beta-4\beta\gamma+8-4\gamma)]} > 0$ 恒成立,令 $f_g(k) = 2\beta+\beta^2+k(+6\beta-4\beta\gamma-1)+k^2(9-12\gamma+4\gamma^2)$,因为 $9-12\gamma+4\gamma^2 > 0$,所以 $f_g(k)$ 为开口向上的关于 k 的二次函数,判别式 $\Delta_g = 1-4\beta(21-26\gamma+8\gamma^2)$,当 $4\beta(21-26\gamma+8\gamma^2) > 1$ 时,判别式 $\Delta_g < 0$,函数 $f_g(k) = 0$ 无解,则 $f_g(k)$ 与 $F_g(k)$ 大于零恒成立,即 $\pi_g^{Q^*} >$

$\pi_g^{T^*}$ 。当 $0 < 4\beta(21 - 26\gamma + 8\gamma^2) < 1$ 时,判别式 $\Delta_g > 0$,方程 $f_g(k) = 0$ 有 2 个不相等的实数根 k_1 和 k_2 ,由 k 的假定条件知 $k > k_{1,2}$,其中 $k_1 = \frac{1 - 2\beta(3 - 2\gamma) - \sqrt{1 - 4\beta(21 - 26\gamma + 8\gamma^2)}}{2(3 - 2\gamma)^2}$, $k_2 = \frac{1 - 2\beta(3 - 2\gamma) + \sqrt{1 - 4\beta(21 - 26\gamma + 8\gamma^2)}}{2(3 - 2\gamma)^2}$,则 $f_g(k) > 0, F_g(k) > 0$,即 $\pi_g^{Q^*} > \pi_g^{T^*}$ 。综上,恒有 $\pi_g^{Q^*} > \pi_g^{T^*}$ 。

推论 4 表明:(1)与无政府补贴的基准情形相比,政府低碳研发投入补贴、低碳产品产量、双重补贴都可以提高社会总福利。(2)政府双重补贴策略下社会总福利总是更优,即政府低碳研发投入补贴与低碳产量补贴结合,可以更好地实现经济、社会、环境的协同发展。

推论 5 当 $\beta > \frac{4 - 2\gamma}{(9 - 12\gamma + 4\gamma^2)}$ 时, $r^{D^*} > r^{Q^*} > r^{T^*} > r^{N^*}$; 当 $0 < \beta < \frac{4 - 2\gamma}{(9 - 12\gamma + 4\gamma^2)}$ 时,若 $k > \frac{4\beta(2 - \gamma) + \beta^2(10 - 6\gamma)}{[4 - 2\gamma - \beta(9 - 12\gamma + 4\gamma^2)]}$, $r^{D^*} > r^{T^*} > r^{Q^*} > r^{N^*}$, 否则 $r^{D^*} > r^{Q^*} > r^{T^*} > r^{N^*}$ 。

证明 $r^{T^*} - r^{N^*} = \frac{2(a - c) \{ \beta^2(2 - \gamma) + k[2(2 - \gamma)^2 + \beta(6 + \gamma(7 - 2\gamma))] \}}{[2k(2 - \gamma) - \beta^2][4k(2 - \gamma)^2 - \beta(8 - 4\gamma) - \beta^2(7 - 4\gamma)]} > 0$, $r^{Q^*} - r^{N^*} = \frac{\beta(a - c) [k(3 - 2\gamma) + 2\beta]}{(k - 2\beta - \beta^2)[2k(2 - \gamma) - \beta^2]} > 0$, 类似可证 r^{D^*} 恒大于 $r^{T^*}, r^{Q^*}, r^{N^*}$ 。令 $F_r(k) = r^{T^*} - r^{Q^*}$, 则 $F_r(k) = \frac{(a - c) \{ k[4 - 2\gamma - \beta(9 - 12\gamma + 4\gamma^2)] - \beta(8 - 4\gamma) - \beta^2(10 - 6\gamma) \}}{(k - 2\beta - \beta^2)[4k(2 - \gamma)^2 - \beta(8 - 4\gamma) - \beta^2(7 - 4\gamma)]}$, 当 $0 < \beta < \frac{4 - 2\gamma}{(9 - 12\gamma + 4\gamma^2)}$ 时,若 $k > \frac{4\beta(2 - \gamma) + \beta^2(10 - 6\gamma)}{[4 - 2\gamma - \beta(9 - 12\gamma + 4\gamma^2)]}$, 则 $F_r(k) > 0$, 即 $r^{T^*} > r^{Q^*}$, 否则 $r^{T^*} < r^{Q^*}$ 。当 $\beta > \frac{4 - 2\gamma}{(9 - 12\gamma + 4\gamma^2)}$ 时, $F_r(k) < 0$, 即 $r^{Q^*} > r^{T^*}$ 。

推论 5 表明:(1)政府通过补贴能够获得更高的碳减排率,减少碳排放,企业的减排意愿更高。其中,政府双重补贴策略下减排率最优。(2)在消费者低碳意识较低的情形下,当研发效率较低时,制造商研发成本较高,政府通过技术补贴更有利于提高产品碳减排率,获得更低碳环保的产品。当低碳投资效率较高时,产量补贴政策更有利于促进减排率的提高。在消费者低碳偏好较高的情形下,与研发补贴相比产量补贴政策对企业提高产品低碳属性的激励作用更强。

推论 6 $q^{D^*} > q^{Q^*} > q^{T^*} > q^{N^*}$ 。当 $k \rightarrow \infty$ 时, $q^{D^*} = q^{Q^*}$, $q^{T^*} = q^{N^*}$, 若 $\gamma = 0$, 则 $q^{D^*} = q^{Q^*} = 4q^{T^*} = 4q^{N^*}$, 若 $\gamma = 1$, 则 $q^{D^*} = q^{Q^*} = 2q^{T^*} = 2q^{N^*}$ 。

证明 令 $F_{q_1}(k) = q^{T^*} / q^{N^*}$, 代入 q^{T^*}, q^{N^*} 计算得 $F_{q_1}(k) = \frac{4k^2(2 - \gamma)^2 - k\beta[(4 - 2\gamma) + (4\beta - 2\gamma\beta)] + \beta^3}{4k^2(2 - \gamma)^2 - k\beta[(8 - 4\gamma) + (7\beta - 4\beta\gamma)]} > \frac{\beta^3 + 4k^2(2 - \gamma)^2 - k\beta[(4 - 2\gamma) + (4\beta - 2\gamma\beta)]}{4k^2(2 - \gamma)^2 - k\beta[(4 - 2\gamma) + (4\beta - 2\gamma\beta)]} > 1$, 即 $q^{T^*} > q^{N^*}$ 。令 $F_{q_2}(k) = \frac{q^{Q^*}}{q^{T^*}} = \frac{k[4k(-2 + \gamma)^2 - \beta^2(7 - 4\gamma) - 4\beta(2 - \gamma)]}{[k - \beta(2 + \beta)][2k(2 - \gamma) - \beta]}$, 由于 $k > \beta^2 + 2\beta + 1$, 所以 $F_{q_2}(k) > \frac{4k(2 - \gamma)^2 - \beta^2(7 - 4\gamma) - 4\beta(2 - \gamma)}{2k(2 - \gamma) - \beta} > 1$, 即 $q^{Q^*} > q^{T^*}$, $F_{q_3}(k) = \frac{q^{D^*}}{q^{Q^*}} = \frac{k - \beta(2 + \beta)}{k - (1 + \beta)^2} > 1$, $q^{D^*} > q^{Q^*}$ 。当 $k \rightarrow \infty$ 时, $\lim_{k \rightarrow \infty} F_{q_1}(k) = 1$, 即 $q^{T^*} = q^{N^*}$ 。 $\lim_{k \rightarrow \infty} F_{q_3}(k) = 1$, 即 $q^{D^*} = q^{Q^*}$ 。 $\lim_{k \rightarrow \infty} F_{q_2}(k) = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{4(2 - \gamma)^2 - [\beta^2(7 - 4\gamma) - 4\beta(2 - \gamma)]/k}{2(2 - \gamma) - \beta/k} = 2(2 - \gamma)$, 当 $\gamma = 0$ 时, $q^{D^*} = q^{Q^*} = 4q^{T^*} = 4q^{N^*}$, 当 $\gamma = 1$, $q^{D^*} = q^{Q^*} = 2q^{T^*} = 2q^{N^*}$ 。

推论 6 表明:(1)与不补贴相比,政府通过补贴政策可以提高低碳产品市场需求。在 3 种补贴策略中,双重补贴下低碳产品需求总是最高的,也就是说研发补贴与产量补贴结合总是更有利于低碳产品市场推广。(2)当 k 趋于无穷大时, $q^{D^*} = q^{Q^*}$, $q^{T^*} = q^{N^*}$, 在零售商无社会责任下 ($\gamma = 0$), 政府通过双重补贴、产量补贴获得的低碳产品产量是技术补贴、无补贴下的 4 倍,在零售商完全社会责任下 ($\gamma = 1$), 双重补贴、产量补贴获得的低碳产品产量是技术补贴、无补贴情形下的 2 倍。进一步表明,零售商 CSR 行为有利于提升消费者需求。

推论 7 结合推论 5、6 可知,当 $\psi(\gamma, k, \beta) > 0$ 时, $EI^{D^*} > EI^{Q^*} > EI^{T^*} > EI^{N^*}$, 否则 $EI^{D^*} > EI^{T^*} > EI^{Q^*} > EI^{N^*}$ 。其中

$$\begin{aligned} \psi(\gamma, k, \beta) = & 2(\gamma-2)k^3\{\beta(2\gamma-3)[2\gamma(2\gamma-9)+19]-2\gamma+4\} + \beta k^2[4\beta^2(\gamma-2)(2\gamma-3)(4\gamma-7) \\ & + \beta(4\gamma-7)[8(\gamma-3)\gamma+15]+2(\gamma-2)(8\gamma-17)] + \beta^2 k\{\beta^3(2\gamma-3)(4\gamma-7) \\ & + \beta^2[4(6-\gamma)\gamma-30]-4\beta[\gamma(8\gamma-35)+37]-8(\gamma-2)(2\gamma-5)\} \\ & - \beta^3(\beta+2)^2(4\beta\gamma-7\beta+2\gamma-4)。 \end{aligned}$$

证明 略。

推论7表明:(1)与无政府补贴相比,政府3种低碳补贴策略均有利于环境改善水平的提升。(2)当 $\psi(k, \beta, \gamma) > 0$ 时,产量补贴政策能够获得更优的环境绩效,否则技术补贴政策下环境改善程度更高。因此,从环境绩效的角度单一补贴策略的选择受低碳研发效率、消费者低碳偏好程度、零售商CSR程度等因素综合影响,然而,技术补贴与产量补贴结合的双重补贴策略总是可以使政府获得更优的环境绩效。

3 数值分析

上述模型主要分析了政府不同补贴政策下的最优决策,为了进一步研究并分析验证相关结论,运用MATLAB 2021b对相关的参数进行数值仿真分析。相关参数设定参考文献[14,16],在满足模型取得均衡解的假设条件下,假设 $c=2, a=5, \beta=0.8, \gamma=0.5, k=6$,分析 k, β 和 γ 取不同值下的社会福利、碳减排率、产品需求、环境改善及企业收益。

3.1 最优社会福利分析

由图2—4可以看出,随着研发效率与消费者低碳偏好的增长,4种情形下社会总福利均会增长,说明研发效率、消费者低碳偏好程度对社会福利的提升具有正向效应,其中双重补贴下消费者低碳偏好程度 β 对 SW^* 的正向效应更显著。 SW^{N^*} 、 SW^{T^*} 均随着 γ 的增长而增长,且 SW^{T^*} 对 γ 更敏感,表明在政府技术补贴下,随着零售商CSR实施水平的提高,补贴对社会福利的提升作用更显著。 SW^{D^*} 、 SW^{Q^*} 表现为对 γ 不敏感,且随着 γ 增加由补贴带来的社会福利增长效应逐步减弱,这是因为零售商社会责任水平的提升,降低了政府补贴力度,社会责任的正向效应与补贴力度降低带来的负向效应抵消,这正是零售商履行CSR的体现。 SW^{D^*} 、 SW^{Q^*} 、 SW^{T^*} 恒大于 SW^{N^*} ,说明与不补贴相比,政府通过补贴可以提升社会福利水平。通过3种补贴策略对比可发现,政府通过双重补贴能够获得更高的社会福利,且可以更好地兼顾经济、社会与环境效益,从而有利于政府可持续目标的实现。

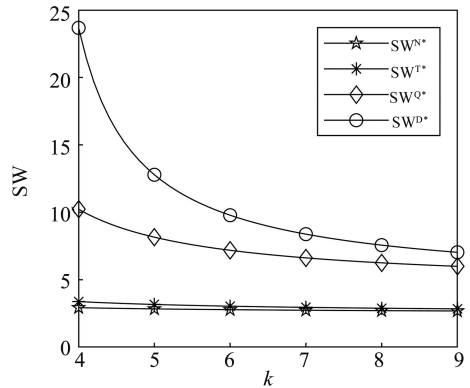


图2 研发投入成本系数k对社会福利的影响
Fig.2 Impact of k on social welfare

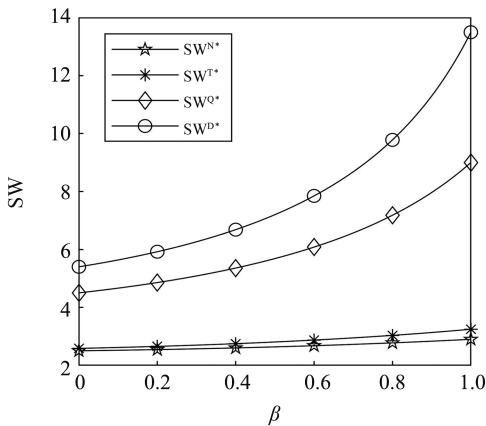


图3 消费者低碳偏好程度beta对社会福利的影响
Fig.3 Impact of beta on social welfare

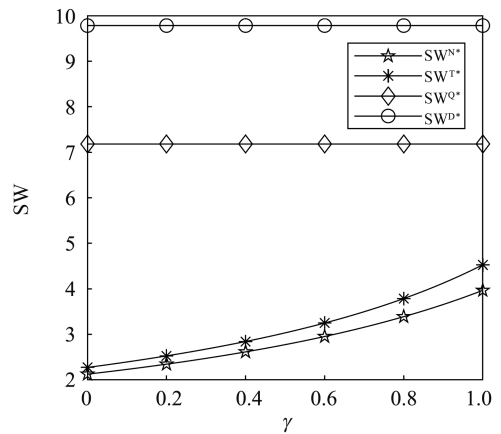


图4 零售商社会责任水平gamma对社会福利的影响
Fig.4 Impact of gamma on social welfare

3.2 最优碳减排率分析

由图 5、6 可知,4 种情形下的碳减排率都随着研发效率的降低而减小,随着消费者低碳偏好程度的增加而增加,并且政府双重补贴时的最优碳减排率对消费者低碳偏好程度更敏感。如图 7 所示,在政府研发补贴与无补贴下碳减排率随着零售商 CSR 水平的增高而增高,而在双重补贴与产量补贴下碳减排率的增长不依赖于零售商 CSR 水平。在双重补贴政策下,随着零售商 CSR 增强,由补贴带来的碳减排率激励效应逐渐减弱,这是因为零售商履行 CSR 刺激了制造商减排,制造商减排积极性增加,政府减少了政府产量补贴力度,而政府补贴减少对减排率的负效应与零售商 CSR 带来的正效应抵消,所以碳减排率表现为与零售商 CSR 无关。 $r^{D^*}, r^{T^*}, r^{Q^*} > r^{N^*}$, 表明政府通过补贴政策能够促进制造商进行低碳减排生产,提高产品碳减排率,而双重补贴下产品减排率总是最高。如图 6 所示,当 $\beta=0$ 时, $r^{Q^*}=0, r^{C^*}=0$, 说明当消费者无低碳偏好时,政府产量补贴政策对制造商减排没有激励作用,虽然研发补贴能激励制造商提高碳减排率,但双重补贴下激励作用更明显。随着消费者低碳偏好程度 β 的增加,当 $\beta > 0.45$ 时, $r^{Q^*} > r^{T^*}$, 意味着在较高的低碳偏好水平下,与研发补贴相比低碳产品产量补贴能够获得更高的碳减排率,制造商更愿意生产对环境更友好的产品。如图 7 所示,当 $\gamma=0$ 时,产量补贴下碳减排率更高,随着零售商 CSR 水平 γ 的提升,技术补贴下产品碳减排率更高。

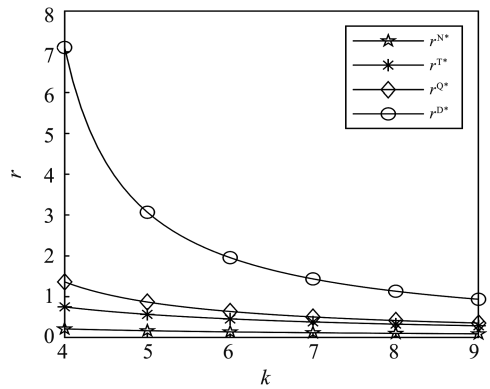


图 5 研发投入成本系数 k 对碳减排率的影响
Fig.5 Effect of k on carbon emission reduction rate

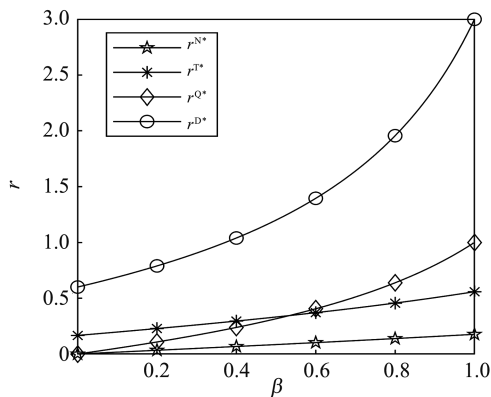


图 6 消费者低碳偏好 β 对碳减排率的影响
Fig.6 Effect of β on carbon emission reduction rate

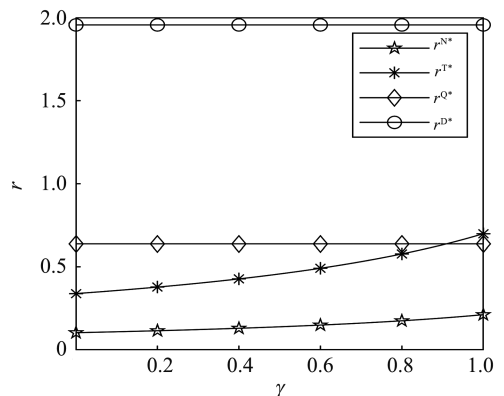


图 7 零售商 CSR 水平 γ 对碳减排率的影响
Fig.7 Effect of γ on carbon emission reduction rate

综上所述,当消费者低碳偏好程度较高时,政府采用产量补贴更能激励制造商进行低碳减排。当研发效率较低时,企业需要投入大量的成本进行研发,采取研发投入补贴有利于提高产品低碳属性。消费者低碳偏好程度较低且零售商 CSR 水平较高时,政府技术补贴有利于提高产品低碳属性。双重补贴最有利于促进制造商减排,政府应注重制定不同导向的补贴政策并结合使用,以充分发挥补贴对制造商减排激励作用。

3.3 最优低碳产品产量分析

由图 8—10 可以看出,4 种情形下低碳产品产量随着研发效率、消费者低碳偏好的增高而增高。当政府采用双重补贴或产量补贴时,低碳产品产量的增长不依赖于零售商 CSR 水平。在政府不补贴时,低碳产品产量随着 CSR 水平的增长而增长,且技术投入补贴下增长效果更明显,说明政府技术投入补贴下,零售

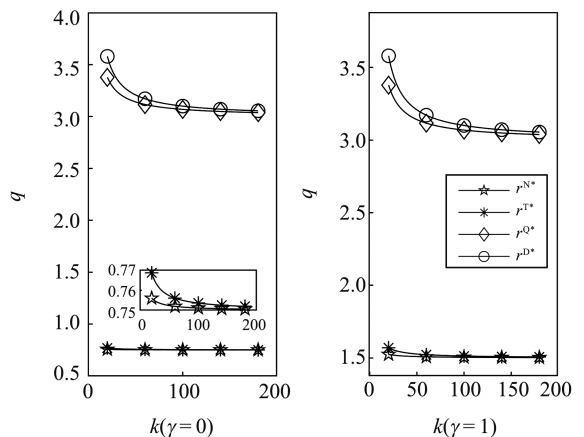


图 8 不同 CSR 水平下研发投入成本系数 k 对需求的影响
Fig.8 Effect of k on demand under different CSR levels

商的 CSR 行为有利于进一步刺激低碳产品的需求,且随着 CSR 履行水平的增高,刺激效应越明显,市场需求增量越大。

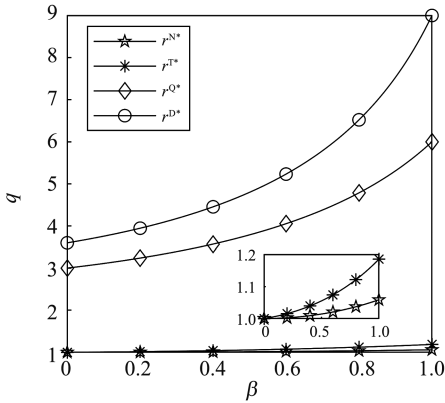


图 9 消费者低碳偏好程度 β 对需求的影响
Fig.9 Effect of β on demand

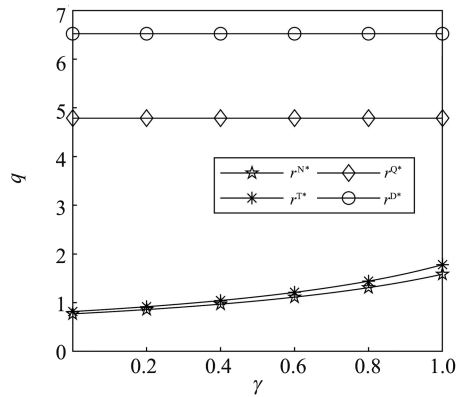


图 10 零售商 CSR 水平 γ 对需求的影响
Fig.10 Effect of γ on demand

由图 8 可以看出,随着研发效率的降低,低碳产品产量均趋于稳定, $q^{D*} = q^{Q*} = 3.09$, $q^{T*} = q^{N*} = 0.76$ 。在无社会责任下 ($\gamma=0$), $q^{Q*}/q^{T*} = q^{Q*}/q^{N*} = 3.09/0.76 \approx 4$;在完全社会责任下 ($\gamma=1$), $q^{Q*}/q^{T*} = q^{Q*}/q^{N*} = 3.09/1.51 \approx 2$,进一步验证了推论 6,也反映出零售商的 CSR 行为有利于提高产品销量。对比不同情形下低碳产品产量,总有 $q^{D*} > q^{Q*} > q^{T*} > q^{N*}$,说明政府通过补贴政策始终能够获得更高的低碳产品产量,在双重补贴策略下低碳产品需求最高。由此可见,不同导向的补贴政策均有利于提升低碳产品需求,但产量补贴与研发补贴结合下的双重补贴更有利于低碳产品的推广,提高低碳产品需求。

3.4 最优环境改善分析

如图 11 所示,低碳研发效率与消费者低碳偏好程度的的增加有益于提升环境改善水平,且在产量补贴政策下研发效率与低碳偏好对环境改善的提升作用更显著。无补贴模式下, EI 随着 γ 的增加而增加,说明零售商履行 CSR 有利于环境质量进一步改善,而这种作用在技术补贴下更为明显。而在双重补贴与产量补贴政策下,由于零售商 CSR 水平的增长促进了环境质量改进,政府会降低产量补贴力度,社会责任的正向效应与补贴力度降低带来的负向效应抵消,环境质量改进表现为对社会责任不敏感。

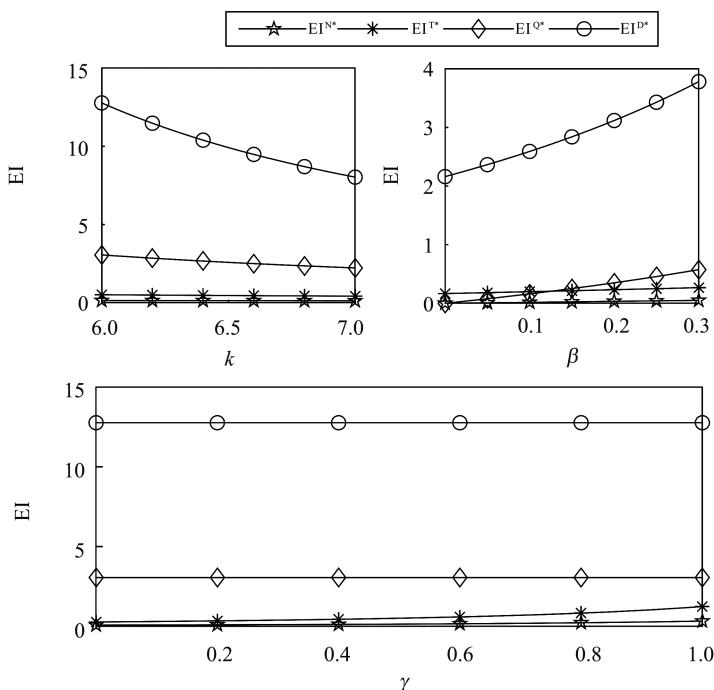


图 11 研发投入成本系数 k 、消费者低碳偏好 β 、零售商 CSR 水平 γ 对环境改善的影响
Fig.11 Impact of k, β, γ on environmental improvement

对比不同情形下的环境改善,可知 EI^{D^*} 、 EI^{T^*} 与 EI^{Q^*} 总是大于 EI^{N^*} , 说明与不补贴相比, 政府补贴有利于环境绩效的提升。当消费者低碳偏好程度较高时, 政府产量补贴能获得更高的环境改善水平。政府产量补贴与技术补贴均有利于环境质量改进, 而 2 种补贴结合下的双重补贴对环境改善的提升作用更高。

3.5 企业最优利润分析

从图 12—17 可以看出, 消费者低碳偏好程度及研发效率对制造商与零售商的经济利润具有正向影响, 双重补贴下企业利润对消费者偏好以及研发效率更敏感。当消费者环保意识较高时, 消费者更愿意购买低碳产品, 从而提升了制造商与零售商的收益。研发效率的增加会降低制造商的研发投入成本, 从而提升自身利润, 零售商的收益也进一步提升。由无政府补贴的基准情形可以看出, 零售商的 CSR 行为在一定程度上有损自身经济利润, 但是, 由于零售商的 CSR 行为赢得了市场消费量的增长, 因此制造商的利润会增长。技术补贴情形下, 零售商的 CSR 行为可以实现零售商与制造商的双赢。

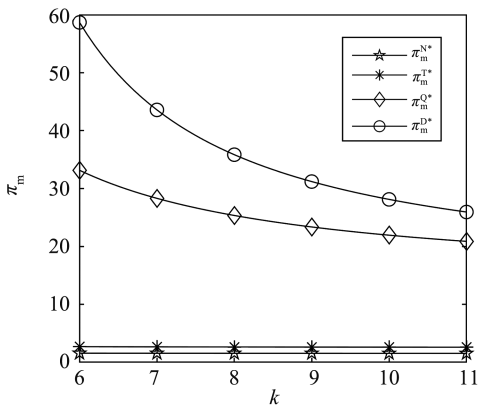


图 12 研发投入成本系数 k 对制造商利润的影响
Fig.12 Impact of k on manufacturer's profit

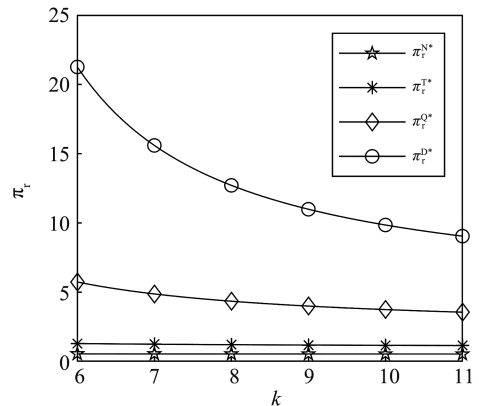


图 13 研发投入成本系数 k 对零售商利润的影响
Fig.13 Impact of k on retailer's profit

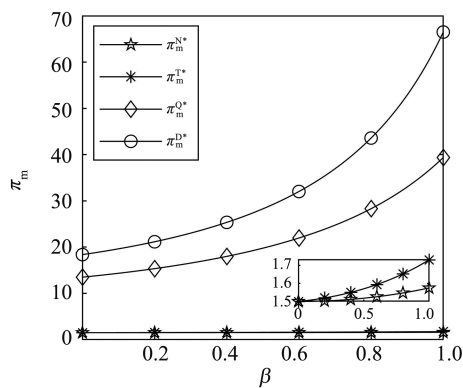


图 14 消费者低碳偏好 β 对制造商利润的影响
Fig.14 Impact of β on manufacturer's profit

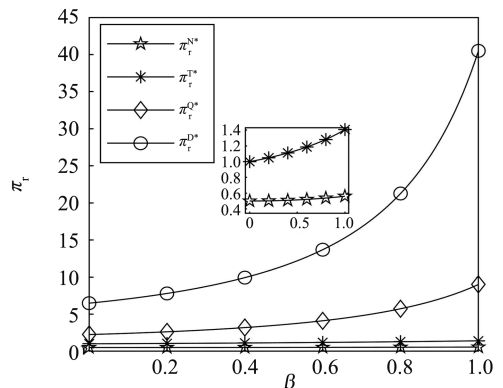


图 15 消费者低碳偏好 β 对零售商利润的影响
Fig.15 Impact of β on retailer's profit

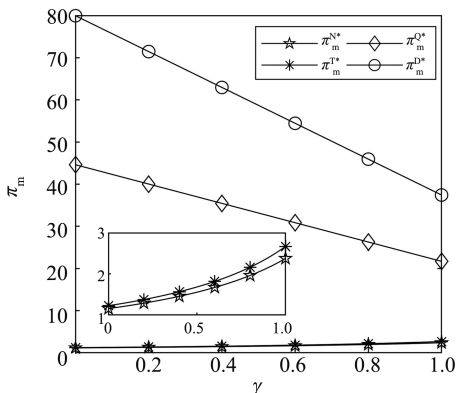


图 16 零售商 CSR 水平 γ 对制造商利润的影响
Fig.16 Impact of γ on manufacturer's profit

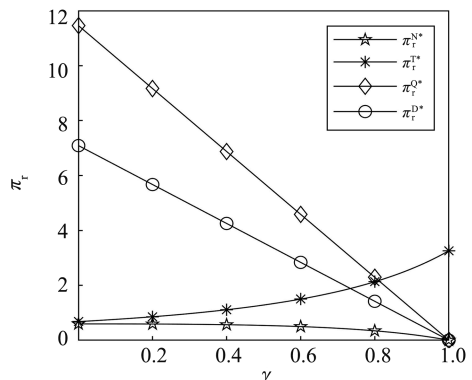


图 17 零售商 CSR 水平 γ 对零售商利润的影响
Fig.17 Impact of γ on retailer's profit

通过对比不同情形可知,政府通过补贴有利于提升企业利润。制造商在双重补贴下的经济利润总是最高,因此,制造商可能更偏好于政府双重补贴策略,希望政府给予多方面的财政支持。而零售商在自身 CSR 水平较低时偏好于双重补贴政策,随着 CSR 水平的提升将偏好于研发补贴策略。虽然政府仅对制造商实施财政补贴,但零售商的利润也会随之增加,出现“搭便车”行为。

4 结论与启示

本文构建了由政府、单个制造商和零售商组成三方博弈的低碳供应链模型。对零售商关注 CSR 的低碳供应链政府补贴策略问题进行探讨,对比分析了政府不同补贴策略下的社会福利、产品减排率、市场需求、环境改善,有以下研究结论与启示。

4.1 主要结论

低碳技术研发成本的增加会降低政府补贴力度、产品减排率、企业收益及环境效益,并最终导致社会福利降低。消费者低碳偏好程度的提高会使政府降低研发补贴率,增加产量补贴力度,并促进产品减排率和需求、环境改善、企业收益及社会福利水平的提升。在无政府补贴下,零售商 CSR 水平的增加有助于提升产品减排率,增加市场需求量,改善环境并提升社会福利。不同补贴策略下,当零售商 CSR 意识逐渐增强时,政府适当减少补贴并不会引起社会福利、环境效益、产品减排率以及市场需求的降低。

政府不同形式的补贴策略均能提升低碳产品需求、减排率、环境绩效与社会福利水平。2 种单一补贴策略相比,当消费者低碳偏好程度大于某一阈值时,产量补贴策略更有利于提升产品减排率与环境改善水平。当消费者低碳偏好程度小于某一阈值,且研发效率较低或零售商 CSR 履行水平较高,技术补贴策略能更好地提升产品低碳属性和改善环境。此外,当研发成本趋近无穷大时,在零售商完全社会责任下,政府通过双重补贴与产量补贴获得的需求是技术补贴时的 2 倍。在零售商无社会责任下,双重补贴与产量补贴的需求是研发补贴时的 4 倍。值得注意的是,研发补贴与产量补贴结合下的双重补贴策略总能够获得更高的产品减排率和需求、环境改善及社会福利,从而更好地兼顾经济、社会与环境效益。进一步,本文通过数值分析发现,政府对制造商实施补贴会增加其利润的同时,零售商利润也会进一步提升。制造商可能更偏好于政府双重补贴策略,而零售商在自身 CSR 水平较低时偏好于双重补贴政策,随着 CSR 水平的提升将偏好于研发补贴策略。

4.2 管理启示

政府补贴力度的确定应综合考虑消费者环保意识、低碳技术研发难度与企业社会责任水平,合理引导配置碳减排投入。政府应注重制定不同导向的补贴政策并结合使用,以充分发挥补贴对制造商减排激励作用,促进政府可持续发展目标的达成。同时,消费者低碳环保理念是促进低碳供应链中经济、社会与环境协同发展的首要因素,政府应注重宣传、教育,大力弘扬低碳消费观念。对制造商而言,应注重增强自主创新能力,进行低碳生产以满足低碳消费者,将有利于拓展新的市场,实现自身经济效益和外部环境效益的协同发展。对零售商而言,合理承担社会责任,不仅能够促进上游企业低碳减排,而且有利于树立良好的声誉,从而提升市场销量。

本文从零售商履行社会责任的角度,探究了低碳供应链政府补贴策略问题,但还存在一些可拓展的方向。本文研究了政府对单个制造商减排进行补贴的情形,未来可以研究多个制造商竞争补贴的情况。此外,现实中存在着信息不对称和消费者低碳偏好程度的差异,今后可以研究非对称信息下的低碳供应链决策问题。

参考文献:

- [1] WERNER Hediger. Welfare and capital-theoretic foundations of corporate social responsibility and corporate sustainability[J]. The Journal of Socio-economics, 2010, 39(4):518-526.
- [2] YI Yuyin, LI Jinxi. The effect of governmental policies of carbon taxes and energy-saving subsidies on enterprise decisions in a two-echelon supply chain[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 181:675-691.
- [3] 生延超. 创新投入补贴还是创新产品补贴: 技术联盟的政府策略选择[J]. 中国管理科学, 2008, 16(6):184-192. SHENG Yanchao. Innovation subsidies or product subsidies: the government strategy choice of technical alliance[J]. Chinese Journal of Management Science, 2008, 16(6):184-192.
- [4] CHEN J Y, DIMITROV S, PUN H. The impact of government subsidy on supply chains sustainability innovation[J]. Omega,

- 2019, 86:42-58.
- [5] BUIGUES P A, SEKKAT K. Public subsidies to business; an international comparison[J]. *Journal of Industry, Competition and Trade*, 2011, 11(1):1-24.
- [6] 毛其淋,许家云. 政府补贴对企业新产品创新的影响:基于补贴强度“适度区间”的视角[J]. *中国工业经济*, 2015(6):94-107.
- MAO Qilin, XU Jiayun. The influence of government subsidies on enterprise's new product innovation; from the perspective of “moderate interval” of subsidy intensity[J]. *China Industrial Economics*, 2015(6):94-107.
- [7] NI Debing, LI W Kevin. A game-theoretic analysis of social responsibility conduct in two-echelon supply chains[J]. *International Journal of Production Economics*, 2012, 138(2):303-313.
- [8] MA Peng, SHANG Jennifer, WANG Haiyan. Enhancing corporate social responsibility: contract design under information asymmetry[J]. *Omega*, 2017, 67:19-30.
- [9] PANDA Shibaji. Coordination of a socially responsible supply chain using revenue sharing contract[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, 67:92-104.
- [10] BISWAS I, RAJ A, SRIVASTAVA S K. Supply chain channel coordination with triple bottom line approach[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2018, 115:213-226.
- [11] 公彦德,陈梦泽. 考虑企业社会责任和公平偏好的绿色供应链决策[J]. *控制与决策*, 2021, 36(7):1743-1753.
- GONG Yandeng, CHEN Mengze. Green supply chain considering fairness preference and corporate social responsibility[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(7):1743-1753.
- [12] 林欢,马骋,孙琦,等. 企业社会责任下碳减排优化策略与协调机制研究[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(1):29-35.
- LIN Huan, MA Cheng, SUN Qi, et al. Research on carbon reduction optimization strategy and coordination mechanism in consideration of corporate social responsibility[J]. *Operations Research and Management Science*, 2021, 30(1):29-35.
- [13] 唐书传,刘云志,肖条军. 考虑社会责任的供应链定价与碳减排决策[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(4):99-108.
- TANG Shuzhuan, LIU Yunzhi, XIAO Tiaojun. Pricing and carbon emission reduction decisions in a socially responsible supply chain[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2020, 28(4):99-108.
- [14] DUSANEE K, VASILEIOS Z. R&D versus output subsidies in mixed markets[J]. *Economics Letters*, 2013, 118(2):293-296.
- [15] 安同良,千慧雄. 中国企业 R&D 补贴策略:补贴阈限、最优规模与模式选择[J]. *经济研究*, 2021, 56(1):122-137.
- AN Tongliang, QIAN Huixiong. Chinese R&D subsidy strategy: threshold, optimal scale and mode choice[J]. *Economic Research Journal*, 2021, 56(1):122-137.
- [16] 卢亚丽. 社会福利视角下的产业链研发政府补贴方式[J]. *系统管理学报*, 2017, 26(6):1055-1060, 1070.
- LU Yali. Government R&D subsidies means in industry chain from the social welfare perspective[J]. *Journal of Systems & Management*, 2017, 26(6):1055-1060, 1070.
- [17] 温兴琦,程海芳,蔡建湖,等. 绿色供应链中政府补贴策略及效果分析[J]. *管理学报*, 2018, 15(4):625-632.
- WEN Xingqi, CHENG Haifang, CAI Jianhu, et al. Government subsidy policies and effect analysis in green supply chain[J]. *Chinese Journal of Management*, 2018, 15(4):625-632.
- [18] 吴伟伟,张天一. 非研发补贴与研发补贴对新创企业创新产出的非对称影响研究[J]. *管理世界*, 2021, 37(3):137-160.
- WU Weiwei, ZHANG Tianyi. Research on asymmetric effects of non-R&D subsidies and R&D subsidies on innovation output of new ventures[J]. *Management World*, 2021, 37(3):137-160.
- [19] 张令荣,彭博,程春琪. 基于区块链技术的低碳供应链政府补贴策略研究[J]. *中国管理科学*, 2023, 31(10):49-60.
- ZHANG Lingrong, PENG Bo, CHENG Chunqi. Research on government subsidy strategy of low-carbon supply chain based on block-chain technology[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2023, 31(10):49-60.
- [20] 王芹鹏,赵道致,何龙飞. 供应链企业碳减排投资策略选择与行为演化研究[J]. *管理工程学报*, 2014, 28(3):181-189.
- WANG Qinpeng, ZHAO Daozhi, HE Longfei. Strategies selection and behavioral evolution of carbon-emission-reduction investment in supply chain firms[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2014, 28(3):181-189.
- [21] HONG Zhaofu, GUO Xiaolong. Green product supply chain contracts considering environmental responsibilities[J]. *Omega*, 2019, 83:155-166.
- [22] 曹裕,李青松,胡韩莉. 不同政府补贴策略对供应链绿色决策的影响研究[J]. *管理学报*, 2019, 16(2):297-305, 316.
- CAO Yu, LI Qingsong, HU Hanli. Research on the influence of different government subsidy strategies on the green decision-making of supply chain[J]. *Chinese Journal of Management*, 2019, 16(2):297-305, 316.