碳交易机制下考虑双重信息不对称的激励契约设计

高闰鑫，柳 鑫

（青岛科技大学经济与管理学院，青岛 266061）

摘要：针对碳交易中制造商减排水平与努力程度双重信息不对称问题，构建零售商主导的供应链博弈模型，融合贝叶斯推断与委托代理模型，设计混合激励契约机制。研究发现：激励规律存在差异，低减排水平制造商因激励系数随减排水平提升而递减，仅能通过真实披露信息获得基准收益，而高减排水平制造商可额外获取信息溢价；契约选择不同，高减排制造商与零售商偏好分离契约以实现价值最大化，零售商则通过混同契约提升与低减排制造商的合作效益；动态市场结构下，高减排制造商占比与零售商利润呈显著正相关性，证实供应链协同效应随优质制造商比例增加而强化。

关键词：碳交易；激励机制；双重信息不对称；混同契约；分离契约

中图分类号：F224；X196 **文献标志码**：A **文章编号**：1671－1807(2026)11－0176－12

在向生命周期延伸的过程中，存在碳关税、绿色消费、零售端压力与碳交易政策交织的风险与挑战。当前，全球气候治理与贸易规则加速融合，推动供应链碳管理从生产端向全生命周期延伸。欧盟碳边境调节机制（carbon border adjustment mechanism，CBAM）法规正式生效，要求钢铁、铝等进口产品核算全生命周期碳排放（life cycle assessment，LCA），2025年7月起征收碳关税，推动全球供应链碳数据透明化[1]。在此政策压力下，Zhang和LYU[2]基于中国碳标签产品数据，实证验证消费者低碳偏好系数与企业减排率、利润呈显著正相关，揭示了“绿色溢价-减排投入”的市场驱动循环机制。面对政策与消费端双重压力，零售巨头如沃尔玛通过契约主导供应链碳治理，其“十亿吨减排计划”要求85%供应商签署减排协议，违约者承担订单额1.5%～3%的罚金[3]。然而，Du等[4]发现，制造商常凭借生产端信息优势，隐匿真实减排能力与努力程度，导致逆向选择与道德风险并存，造成高达15%的协同损耗。

据2023年CDP供应链报告显示，全球零售巨头（沃尔玛、亚马逊等）要求83.6%的供应商提供产品碳足迹数据[5]。值得注意的是，在绿色供应链治理中，零售商凭借渠道控制权常处于领导地位，如沃尔玛的“roject Gigaton”计划强制制造商2030年前减排10亿t[6]，而制造商因缺乏直接消费者数据被迫成为追随者。这种权力结构逆转使传统制造商主导的减排模式失效，亟须建立零售商引领的新型协同框架。由此，研究聚焦的核心挑战是：在碳关税、绿色消费、零售端压力与碳交易政策交织的复杂环境下，零售商如何通过契约设计破解制造商“减排水平隐匿”与“减排努力不可验证”的双重信息不对称，实现供应链协同减排增效。

早期研究聚焦单一信息隐匿，主要刻画单一主体利用私有信息优势的决策扭曲。委托代理理论在解决供应链单一信息不对称问题中成果丰硕，大量研究聚焦于解决单一维度的事前信息不对称。Chen等[7]证明当供需错配成本超阈值时，预测契约优于线性契约；Yoo和Cheong[8]揭示了质量激励系数与成本弹性的非线性关系；程呈和范静[9]基于信息不对称视角，实证分析了农业供应链金融对缓解信贷约束的有效作用。另一类研究专注于解决单一维度的事后信息不对称。Holmstrom和Milgrom[10]的经典研究奠定了线性契约在道德风险问题中的理论基础，强调了风险分担与激励强度的权衡；崔健波和罗正英[11]研究了成本控制中的棘轮效应，比较节约分成激励与目标分成激励的优劣。但

收稿日期：2026-01-16

基金项目：山东省社会科学规划研究项目（23CGLJ12）

作者简介：高闰鑫（2001—），女，山东威海人，硕士研究生，研究方向为供应链决策与优化；通信作者柳鑫（1980—），女，山东青岛人，博士，讲师，研究方向为物流与供应链管理。

此两类研究默认信息优势方仅掌握一种私有信息类型,未考虑信源方双重信息隐匿的交互作用。

新兴研究开始整合双重视角,并尝试设计双契约机制,但仍然存在一些局限性。例如,许民利和张佳林[12]在环境服务供应链领域构建多参数激励响应系统,破解污染治理技术私有性与执行强度不可观测并存的治理难题;Pavlov 等[13]证明当零售商的公平偏好参数为私有信息时,最低订购量契约能有效补偿大部分效率损失;李响和刘悦[14]针对新零售业态中线上线下融合场景,构建了包含数字营销投入与动态契约条款的双层博弈框架,解析了决策时序对协同效率的影响;Li 和 Zhang[15]设计了能够排除横向信息溢出的垂直信息共享契约,但对契约执行过程中信息状态的动态演化以及市场结构如何影响契约设计与供应链利润,缺乏深入探讨。

在碳交易和绿色供应链管理领域信息不对称问题也日益受到关注。供应链碳协同是实现"双碳"目标的核心路径,学界已形成 3 类主流范式:①减排成本分摊机制。例如,段忠菲等[16]设计了政府补贴下的物流低碳协作模型,降低配送碳排放 24%;Xu 和 Lee[17]引入消费者环保偏好参数,解析差异化竞争场景下环境绩效契约的优越性,证实该契约类型在减排效能与社会福利层面的普适优势,但需解决供应链成员搭便车问题。②信息共享协同模型。例如,汤春华等[18]构建了配额信息不对称时的供应链协调契约,可缓解信息不对称;Liang 等[19]构建了弹性激励模型,设计单双信息不对称条件下的质量激励合同,为政府设计可持续激励契约以提高公共技术创新质量提供了参考,但未解决减排努力的可观测性问题。③碳配额分配协作。例如,王文宾等[20]通过双信息维度激励机制,揭示再制造产业逆向供应链的闭环优化路径;Xia 和 Niu[21]研究了政企协同的 CFR(成本分摊与收益共享)合同框架,为碳监管政策制定提供非对称信息环境下的决策支持系统;朱庆华等[22]改进了动态碳配额分配法,优化了再制造企业减排决策,但未解析碳交易价格与低碳偏好的交互效应,并且双方面临减排责任推诿风险。

综上所述,现有研究在解决供应链碳协同中的信息不对称问题上取得了重要进展,但仍存在以下局限性:①视角单一化。多数文献聚焦于单一维度的信息不对称(或事前减排能力隐匿引发的逆向选择,或事后减排努力不可观测导致的道德风险),未能系统整合双重信息不对称的交互作用机制(如低减排能力制造商的伪装行为会加剧其签约后的道德风险)[10-12,14]。②外部依赖性强。部分协同机制依赖外部力量(如政府补贴[22]或消费者驱动[17]),缺乏基于供应链核心企业(如零售商)主导的内生性激励方案。③动态适配性不足。对契约执行中信息状态演化、市场结构(如高减排制造商占比)变动如何影响契约选择与供应链利润的深入探讨相对匮乏[13,15,19,21]。

区别于上述研究,现聚焦企业自主协同层面,创新性提出构建"制造商减排水平-减排努力程度"双维私有信息模型,弥补了现有研究对制度-行为交互作用的忽视;提出的混合契约可同时实现分离均衡(甄别高减排能力制造商)与激励相容(确保低能力制造商不伪装),替代政府补贴或消费者驱动等外部依赖机制;实现异质制造商精准激励,不仅仅分析碳价影响,将减排水平、减排努力程度以及碳价波动纳入契约激励相容约束。

1 问题描述与基本假设

1.1 问题描述

以制造商与零售商构成的二级供应链体系为研究对象,采用零售商主导的 Stackelberg 博弈,零售商作为领导者,依据贝叶斯先验信念设计契约,制造商作为追随者,依据自身减排水平选择契约并确定减排努力程度,在委托-代理协作框架下构建新型激励契约模型。在委托代理关系中(委托人:零售商;代理人:制造商),突破完全信息假设,针对制造商减排努力程度的隐蔽性特征,建立双维度治理框架。通过建立贝叶斯博弈分析框架,重点解决以下核心命题,在制造商减排水平呈现连续分布且不可验证的情形下,委托人如何通过契约参数优化实现。①类型甄别:基于贝叶斯推断揭示代理人真实减排能力;②行为调控:设计动态激励函数持续提升代理人的减排努力程度。该模型创新性融合逆向选择治理与道德风险防控,最终实现经济-环境效益的帕累托均衡,基于激励相容理论的约束条件[22],实现经济绩效与环境效益的协同优化。

在碳交易政策框架下,假设政府采用历史排放基准核定企业初始配额。制造商实际碳排放量超出配额时需通过碳市场购买差额,低于配额时可出售剩余排放权。参考文献[23],e 表示产品的初始总排放量,k 表示单位碳配额的交易价格。

将双重信息不对称纳入契约设计,核心依据在

于：①时序不可分割性，减排能力 r_i 的隐匿（逆向选择）发生在签约前，而减排努力 t_{ij} 的投入（道德风险）发生在签约后，二者须系统整合。②低减排水平制造商 r_l 为伪装成高水平者，需承诺高减排目标，但签约后因实际能力不足更倾向“偷懒”t_{hl}，导致道德风险加剧。为了防止类似行为带来的损失，需要建立联合治理框架。

1.2　符号说明

符号说明见表1。

表1　符号说明

符号	含义	符号	含义
p	零售价格	v	根据历史法制定的配额
w	批发价格	u	减排成本系数
a	市场潜在需求	Z	固定报酬
β	低碳偏好系数	f	减排量激励系数
λ	努力程度影响系数	π	各成员的收益
q	产品的需求量	ρ	风险系数
t_{ij}	努力程度	σ^2	离散程度
r_i	减排率（减排水平）	ε	市场随机因素
e	产品的初始总排放量	i/j	制造商真实信息/汇报给零售商的信息
c	碳限额与交易下产品的单位成本		
T	企业的实际减排量	m/r	制造商/零售商
k	单位碳配额的交易价格	$h/l/x$	分离契约下高/低减排/混同契约

1.3　基本假设

针对研究问题，对模型做以下假设。

（1）减排量满足 $T=r_it_{ij}+\varepsilon$，其中 r_i 为制造商的减排水平，t_{ij} 为制造商的真实努力程度为 i，汇报给零售商的努力程度为 j，ε 为市场随机因素对减排量的影响，其分布服从 $N\sim(0,\sigma^2)$[24]。

（2）制造商的真实减排水平 r_i 是私人信息，零售商观察不到，为了聚焦于双重信息不对称的核心机制（逆向选择与道德风险的交互）并清晰地揭示分离均衡与混同契约下的激励结构差异，在主体模型分析中，借鉴经典委托代理文献[15]的处理方式，将制造商的减排水平设定为离散的两种类型，分别为高减排水平和低减排水平，即 r_i 取值为 r_h、r_l，且满足 $r_h>r_l$，零售商知道市场中高减排水平的制造商占的比例为 y，低减排水平的比例为 $1-y$。

（3）借鉴许民利和张佳林[16]、杜建国等[24]对减排成本的假设，制造商的减排努力成本 $c(t_{ij})$ 是关于其努力程度的连续函数，表示为 $c(t_{ij})=\frac{1}{2}ut^2$，其中 $u>0$ 表示努力成本系数。$c(t_{ij})$ 满足 $c'(t_{ij})>0$ 和 $c''(t_{ij})>0$，表示减排成本随着努力程度的增加而加速提高。

（4）参考文献[25]，假定在一个标准化的碳排放权交易市场中，碳排放权可以被自由地购买和出售，其价格是由政府制定的。在未考虑购买与出售之间差异的情况下，单一控排企业的碳配额供求变动对碳贸易定价的影响不大，在一个固定的周期里，其定价被视为一个稳定的区间，即在碳市场上，每一个碳排放企业的配额价格都为常数。使模型更聚焦于剖析信息不对称下零售商与制造商之间的策略互动这一核心博弈关系。

（5）针对快消品的研究[26]显示，当产品碳足迹下降10%，其市场份额平均提升1.5%～3.2%，验证了低碳表现与需求量的近似线性正相关。需求函数可表示为 $q=a-p+\beta r_i+\lambda t_{ij}$，其中，$\lambda$ 为努力程度的影响系数，β 代表市场需求关于减排水平的敏感系数，即消费者的低碳偏好系数。

（6）制造商的减排努力程度构成其私人信息集，零售商仅能观测到经市场干扰的减排量，基于可观测变量并提供给制造商线性报酬，具体表示为 $Z=Z_j+f_jT$，$j\varepsilon(h,l)$，其中 $Z_j\geqslant 0$ 表示制造商减排水平类型为 r_j 时的固定支付项，$f_j\geqslant 0$ 为制造商汇报减排水平为 r_j 时的激励系数，衡量的是零售商对制造商低碳减排的激励强度。该契约是解决道德风险问题的标准且有效的工具，被广泛应用于理论和实证研究。

风险中性零售商作为委托方主导契约设计，旨在通过激励制造商实施低碳生产以增强产品环境竞争力。当与真实减排水平 r_i 的制造商签订契约时，委托方的期望效用函数可表述为 $\pi_r=B(a+\beta r_i+\lambda t_{ij}-p)-f_j(r_it_{ij}+\varepsilon)-Z_j$。其中 $B=p-w$，且 i 表示制造商的真实信息，j 表示制造商汇报给零售商的信息，$i,j\varepsilon(h,l)$。根据风险中性假设，零售商期望效用等价于其期望收益，零售商的期望收益为

$$E(\pi_r)=B(a+\beta r_i+\lambda t_{ij}-p)-f_jr_it_{ij}-Z_j \quad (1)$$

当制造商的真实减排水平为 r_i，汇报给零售商的减排水平为 r_j 时，制造商的收益是 $\pi_{mr_ir_j}=A(a+\beta r_i+\lambda t_{ij}-p)+k(r_it_{ij}-e+v+\varepsilon)-\frac{1}{2}\rho\sigma^2(k+f_j)^2+f_j(r_it_{ij}+\varepsilon)-\frac{u}{2}t_{ij}^2+Z_j$。其中 $A=w-c$，i、j 取值为 h 和 l，通过确定性等价收入方法可将制造商的期望收益 $E(\pi_{mr_ir_j})$ 转化为

$$E(\pi_{mr_ir_j})=A(a+\beta r_i+\lambda t_{ij}-p)+k(r_it_{ij}-e+v+\varepsilon)-\frac{1}{2}\rho\sigma^2(k+f_j)^2+f_jr_it_{ij}-\frac{u}{2}t_{ij}^2+Z_j \quad (2)$$

2 问题分析与激励契约设计

在既定假设框架下,制造商的减排水平与努力程度共同构成私有信息集,形成签约前减排水平隐匿与签约期努力程度隐蔽的双重信息不对称架构。基于此,零售商需设计贝叶斯博弈激励相容机制实现双重治理目标:①减排水平逆向选择防控;②努力程度道德风险规避。契约设计遵循动态时序逻辑如图 1 所示。

可知制造商在签约前已经存在减排水平的信息不对称,签约后又存在减排努力程度的不可验证性。以下将据此构建双层次治理模型:首先建立减排水平信号传递机制破解逆向选择困境,继而设计努力程度动态监控系统缓解道德风险。

2.1 分离激励契约设计

针对供应链环境治理中的双重信息不对称困境,系统构建基于动态激励机制的合作优化模型。根据信息经济学原理,供应链协作中存在两类典型不对称信息:①合作建立前制造商隐匿减排能力引发的逆向选择问题;②协议执行阶段制造商调控努力投入导致的道德风险问题。具体而言:①在合作准备期,制造商真实减排水平 r_i 构成私有信息,零售商无法直接验证,形成阿克洛夫经典理论中的"隐蔽信息"困境;②在协议履行期,制造商基于收益函数动态优化努力程度 t_{ij},而该行为参数具有不可观测性特征,符合霍姆斯特龙道德风险模型的假设条件。针对此双重治理挑战,提出差异化契约菜单设计方法。其核心机理在于构建参数化合约组合$\{(Z_j,f_j)\}$,使具有异质减排水平 r_i 的制造商基于激励相容原则自主选择对应契约组合。该机制具有三阶段动态特征:委托人依据贝叶斯推断设定与制造商类型空间相匹配的契约选项;制造商通过契约选择行为显性披露其减排水平参数;代理人根据契约条款中的减排量激励函数,内生性确定最优努力程度 t_{ij}^*。如图 1 所示的决策时序结构,该过程本质构成具有信息揭示功能的 Stackelberg 序贯博弈,其中合约参数设计需同步满足:①参与约束(IR)。确保各类型制造商保留收益不低于市场机会成本。②激励相容约束(IC)。通过契约参数差异化消除类型伪装动机。

当契约菜单满足交叉条件时,可实现完美信号均衡:高减排水平制造商 r_h 倾向选择高固定报酬+强激励关联的契约组合,而低减排水平制造商 r_l 则偏好低固定报酬+适度激励的方案。这种自选择机制通过合约参数的严格单调性,有效抑制信息租金耗散,同时借助绩效系数 $f(r)$与努力成本函数的关联性,实现减排努力程度的子博弈精炼均衡。研究突破传统单维激励模式,为供应链绿色协同提供信息甄别与行为调控的双重治理工具。该复合契约的均衡解可通过以下优化模型确定:

$$\max_{Z_l,f_l,Z_h,f_h} E(\pi_r)=y[B(a+\beta r_h+\lambda t_{hh}-p)-f_hr_ht_{hh}-Z_h]+(1-y)[B(a+\beta r_l+\lambda t_{ll}-p)-f_lr_lt_{ll}-Z_l] \quad (3)$$

s. t.

$$\max_{t_{ll}}E(\pi_{mll})=A(a+\beta r_l+\lambda t_{ll}-p)+k(r_lt_{ll}-e+v)+f_lr_lt_{ll}-\frac{1}{2}\rho\sigma^2(k+f_l)2-\frac{1}{2}ut_{ll}^2+Z_l\geqslant \max_{t_{lh}}E(\pi_{mlh})=A(a+\beta r_l+\lambda t_{lh}-p)+k(r_lt_{lh}-e+v)+f_hr_lt_{lh}-\frac{1}{2}\rho\sigma^2(k+f_h)2+Z_h-\frac{1}{2}ut_{lh}^2 \quad (4)$$

$$\max_{t_{hh}}E(\pi_{mhh})=A(a+\beta r_h+\lambda t_{hh}-p)+k(r_ht_{hh}-e+v)+f_hr_ht_{hh}-\frac{1}{2}\rho\sigma^2(k+f_h)2-\frac{1}{2}ut_{hh}^2+Z_h\geqslant \max_{t_{hl}}E(\pi_{mhl})=A(a+\beta r_h+\lambda t_{hl}-p)+k(r_ht_{hl}-e+v)+f_lr_ht_{hl}-\frac{1}{2}\rho\sigma^2(k+f_l)2-\frac{1}{2}ut_{hl}^2+Z_l \quad (5)$$

$$\max E(\pi_{mhh})\geqslant\pi_0 \quad (6)$$

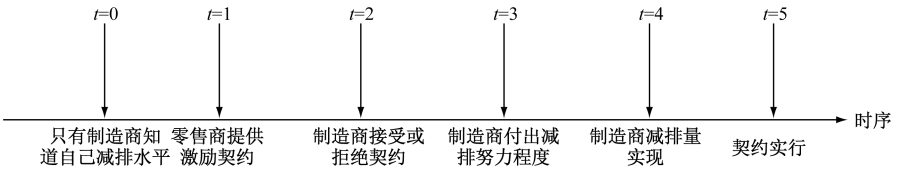


图 1 减排的契约时序

$$\max E(\pi_{mll})\geqslant\pi_0 \tag{7}$$

上述模型中，$E(\pi_{mij})$表示非对称信息下，减排水平为i的制造商报告自己类型为j时的收益，$E(\pi_{mll})$表示低减排水平制造商如实报告自己减排水平时的收益，$E(\pi_{mlh})$表示低减排水平制造商谎报自己为高减排水平时的收益。约束式(4)、式(5)形成激励相容机制，确保制造商真实披露减排水平。式(4)迫使低减排水平制造商选择真实契约(Z_l, f_l)，无法通过虚假陈述契约(Z_h, f_h)获益。同理，式(5)消除高减排水平制造商伪装动机(Z_l, f_l)，如实选择契约(Z_h, f_h)。式(6)、式(7)为制造商的参与约束，要求各类型制造商收益不低于保留收入π_0，否则将触发契约拒绝行为。在上述约束条件下，零售商通过契约(Z_h, f_h)、(Z_l, f_l)的适当配置来维护自己的利益。

求解规划问题(3)，有如下命题。

命题1： 在双重信息不对称下，激励相容契约(Z_h, f_h)、(Z_l, f_l)的均衡特性及存在性条件可表述如下：

$$f_h^*=(B\lambda r_h-k\rho\sigma^2u)/(r_h^2+\rho\sigma^2u) \tag{8}$$

$$f_l^*=\{A\lambda y r_h-r_l[\lambda(Ay-By+B)+kyr_l]+kyr_h^2-k\rho\sigma^2u(y-1)\}/[(2y-1)r_l^2-yr_h^2+\rho\sigma^2u(y-1)] \tag{9}$$

$$Z_h^*=\{f_l^*r_h[2A\lambda+r_h(f_l^*+2k)]-2aAu-A^2\lambda^2+2f_h^*[k\rho\sigma^2u-r_h(A\lambda+kr_h)]-2Ar_l(\lambda f_l^*+k\lambda+\beta u)+2Apu+2eku+f_h^{*2}(\rho\sigma^2u-r_h^2)-r_l^2(f_l^*+k)^2+k^2\rho\sigma^2u-2kuv+2\pi_0u\}/2u \tag{10}$$

$$Z_l^*=[2Apu+2eku-2aAu-A^2\lambda^2-2Ar_l(\lambda f_l^*+k\lambda+\beta u)-r_l^2(f_l^*+k)^2+\rho\sigma^2uf_l^*(f_l^*+2k)+k^2\rho\sigma^2u-2kuv+2\pi_0u]/2u \tag{11}$$

制造商的努力程度分别为

$$t_{ll}^*=\frac{A\lambda+r_l(f_l^*+k)}{u} \tag{12}$$

$$t_{lh}^*=\frac{A\lambda+r_l(f_h^*+k)}{u} \tag{13}$$

$$t_{hh}^*=\frac{A\lambda+r_h(f_h^*+k)}{u} \tag{14}$$

$$t_{hl}^*=\frac{A\lambda+r_h(f_l^*+k)}{u} \tag{15}$$

高和低减排水平制造商的收益分别为

$$E(\pi_{mhh}^*)=\pi_0+((r_h-r_l)\{f_l[2A\lambda+r_h(f_l^*+2k)]+2A(k\lambda+\beta u)+r_l(f_l^*+k)^2+k^2r_h\})/2u \tag{16}$$

$$E(\pi_{mll}^*)=\pi_0 \tag{17}$$

证明：

(1)关于式(12)～式(15)的证明。根据式(3)的约束式(4)、式(5)，令$\frac{dE(\pi_{mll})}{dt_{ll}}=0$、$\frac{dE(\pi_{mlh})}{dt_{lh}}=0$、$\frac{dE(\pi_{mhh})}{dt_{hh}}=0$、$\frac{dE(\pi_{mhl})}{dt_{hl}}=0$，有式(12)～式(15)。

(2)关于式(16)、式(17)的证明。式(3)是典型的二层规划问题，通过求解该式中函数$E(\pi_{mll})$、$E(\pi_{mlh})$、$E(\pi_{mhh})$、$E(\pi_{mhl})$的优化问题，该模型可简化为

$$\max_{Z_l,f_l,Z_h,f_h}E(\pi_r)=y\{B[a+\frac{\lambda(A\lambda+r_hf_h+r_hk)}{u}+\beta r_h-p]-\frac{f_hr_h(A\lambda+r_hf_h+r_hk)}{u}-Z_h\}+(1-y)\{B[a+\frac{\lambda(A\lambda+r_lf_l+r_lk)}{u}+\beta r_l-p]-\frac{f_lr_l(A\lambda+r_lf_l+r_lk)}{u}-Z_l\} \tag{18}$$

s.t.

$$\max E(\pi_{mll})=\frac{1}{2u}[2aAu+A^2\lambda^2+2f_l(A\lambda r_l+kr_l^2-k\rho\sigma^2u)+2Ar_l(k\lambda+\beta u)-2Apu-2eku+f_l^2(r_l^2-\rho\sigma^2u)+k^2r_l^2-k^2\rho\sigma^2u+2kuv+2uZ_l]\geqslant\max E(\pi_{mlh})=\frac{1}{2u}[2aAu+A^2\lambda^2+2f_h(A\lambda r_l+kr_l^2-k\rho\sigma^2u)+2Ar_l(k\lambda+\beta u)-2Apu-2eku+f_h^2(r_l^2-\rho\sigma^2u)+2uZ_h+k^2r_l^2-k^2\rho\sigma^2u+2kuv] \tag{19}$$

$$\max E(\pi_{mhh})=\frac{1}{2u}[2aAu+A^2\lambda^2+2f_h(A\lambda r_h+kr_h^2-k\rho\sigma^2u)+2Ar_h(k\lambda+\beta u)-2Apu-2eku+f_h^2(r_h^2-\rho\sigma^2u)+k^2r_h^2+2uZ_h-k^2\rho\sigma^2u+2kuv]\geqslant\max E(\pi_{mhl})=\frac{1}{2u}[2aAu+A^2\lambda^2+2f_l(A\lambda r_h+kr_h^2-k\rho\sigma^2u)+2Ar_h(k\lambda+\beta u)-2Apu-2eku+f_l^2(r_h^2-\rho\sigma^2u)+k^2r_h^2-k^2\rho\sigma^2u+2kuv+2uZ_l] \tag{20}$$

$$\max E(\pi_{mhh})\geqslant\pi_0 \tag{21}$$

$$\max E(\pi_{mll})\geqslant\pi_0 \tag{22}$$

值得注意的是，式(21)可以忽略。根据式(20)、式(22)，有$E(\pi_{mhh})\geqslant E(\pi_{mhl})=E(\pi_{mll})+\{(r_h-r_l)[f_l^*(2A\lambda+r_hf_l^*+2kr_h)+2A(k\lambda+\beta u)+r_l(f_l^*+k)^2+k^2r_h]\}/2u\geqslant\pi_0$，故式(21)可省略。

记α_1、α_2、α_3分别为激励相容约束条件的拉格

朗日乘子,依据 Kuhn-Tucker 最优性条件可得:

$$\begin{pmatrix}\partial L/\partial f_h\\ \partial L/\partial f_l\\ \partial L/\partial Z_h\\ \partial L/\partial Z_l\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-\dfrac{yr_h[\lambda(A-B)+r_h(2f_h+k)]}{u}\\ \dfrac{(y-1)r_l[\lambda(A-B)+r_l(2f_l+k)]}{u}\\ -y\\ y-1\end{pmatrix}+$$

$$\alpha_1\begin{pmatrix}\dfrac{\rho\sigma^2u(f_h+k)-A\lambda r_l-r_l^2(f_h+k)}{u}\\ \dfrac{A\lambda r_l+r_l^2(f_l+k)-u\rho\sigma^2(f_l+k)}{u}\\ -1\\ 1\end{pmatrix}+$$

$$\alpha_2\begin{pmatrix}\dfrac{A\lambda r_h+r_h^2(f_h+k)-u\rho\sigma^2(f_h+k)}{u}\\ \dfrac{u\rho\sigma^2(k+f_l)-A\lambda r_h-(k+f_l)r_h^2}{u}\\ 1\\ -1\end{pmatrix}+$$

$$\alpha_3\begin{pmatrix}0\\ \dfrac{A\lambda r_l+r_l^2(f_l+k)-u\rho\sigma^2(f_l+k)}{u}\\ 0\\ 1\end{pmatrix}=0。$$

由$\partial L/\partial Z_h=0$,有

$$\alpha_2=y+\alpha_1>0 \tag{23}$$

由$\partial L/\partial Z_l=0$,并结合式(23),有

$$\alpha_3=1>0 \tag{24}$$

进一步,有 $\alpha_1=0$(反证 $\alpha_1>0$,根据 Khun-Tucker 条件,约束式(19)需取等号。同理,根据式(23),$\alpha_2>0$ 表明约束条件式(20)等号成立。联立方程得 $f_h=f_l$。此时,高减排水平和低减排水平的制造商所面临的契约是相同的,而混同契约将引发两类制造商行为扭曲:低减排水平制造商可通过模仿策略获取信息租金;高减排水平制造商因无法获得差异化补偿而退出合作;零售商丧失供应链筛选能力,从而危害零售商的利益。因而 $\alpha_1>0$ 的假设不成立,故 $\alpha_1=0$。

(3)关于式(16)、式(17)的证明。由 $\alpha_2>0$ 知,式(20)的约束性成立,综合式(20)、式(22),有式(16)。由 $\alpha_3>0$ 知,式(22)等号成立,故有式(17)。

(4)关于式(8)~式(11)的证明。由$\partial L/\partial f_h=0$,有式(8)。由 $\partial L/\partial f_l=0$,有式(9)。由 $\max E(\pi_{mhh})=\frac{1}{2u}[2aAu+A^2\lambda^2+2f_h^*(A\lambda r_h+kr_h^2-k\rho\sigma^2u)+2Ar_h(k\lambda+\beta u)-2Apu-2eku+f_h^{*2}(r_h^2-\rho\sigma^2u)+k^2r_h^2+2uZ_h^*-k^2\rho\sigma^2u+2kuv]$并结合式(16),有式(10)。由 $\max E(\pi_{mll})=\frac{1}{2u}[2aAu+A^2\lambda^2+2f_l^*(A\lambda r_l+kr_l^2-k\rho\sigma^2u)+2Ar_l(k\lambda+\beta u)-2Apu-2eku+f_l^{*2}(r_l^2-\rho\sigma^2u)+k^2r_l^2-k^2\rho\sigma^2u+2kuv+2uZ_l^*]$并结合式(17),有式(11)。

2.2 混同激励契约设计

道德风险模型的核心思想,在完全信息情境下,零售商可通过设计强制履约协议实现双重帕累托最优:①基于制造商减排努力程度 t_{ij} 的显性观测,构建风险中性条件下的最优风险分担机制;②通过线性契约 $Z=Z_j+f_jT$ 精确调控努力投入,其中 f_j 表示激励强度系数。此状态下,系统达到激励相容与资源配置效率的联合最优状态[10]。

但是,当信息不对称导致努力程度不可验证时,激励架构面临根本性变革。此时,减排量 $T=r_it_{ij}+\varepsilon$ 成为不完全信息下的唯一可观测变量。由此衍生的道德风险困境呈现两个维度:①制造商存在隐藏行动动机,通过策略性降低努力程度 t_{ij} 来转移履约成本;②零售商被迫构建贝叶斯统计推断机制,通过似然比检验方法从减排量分布中解构努力程度信号。理论分析表明,零售商通过贝叶斯推断建立减排水平与制造商努力程度的统计映射关系[10],但信息不对称性导致制造商仅能在边际成本等于期望边际收益处实现次优努力均衡。

根据上述分析,在单维度代理问题框架下,零售商采用参数同质化混同激励契约(Z_x,f_x)虽能在后契约阶段引导制造商达成努力程度的次优均衡(x 表示混同)。但混同策略将引致新型市场失灵:高能效企业无法通过信号传递获得额外信息租金,导致绿色技术创新激励不足。根据式(2)可得高低减排水平制造商的期望收益分别为

$$E(\pi_{mhx})=A(a+\beta r_h+\lambda t_{hx}-p)+k(r_ht_{hx}-e+v)+f_xr_ht_{hx}-\frac{1}{2}\rho\sigma^2(k+f_x)^2-\frac{ut_{hx}^2}{2}+Z_x \tag{25}$$

$$E(\pi_{mlx})=A(a+\beta r_l+\lambda t_{lx}-p)+k(r_lt_{lx}-e+v)+f_xr_lt_{lx}-\frac{1}{2}\rho\sigma^2(k+f_x)^2-\frac{ut_{lx}^2}{2}+Z_x \tag{26}$$

式中:t_{hx} 和 t_{lx} 分别为给定混同激励契约时 r_h 类型和 r_l 类型制造商在混同契约下的最优努力程度。其混同激励契约的解析解可通过以下规划模型求得:

$$\max_{f_x,Z_x} E(\pi_{rx}) = y[B(a+\beta r_h+\lambda t_{hx}-p)- f_x r_h t_{hx}-Z_x]+(1-y)[B(a+\beta r_l+\lambda t_{lx}-p)-f_x r_l t_{lx}-Z_x] \quad (27)$$

s. t.

$$\max_{t_{hx}} E(\pi_{mhx}) \quad (28)$$

$$\max_{t_{lx}} E(\pi_{mlx}) \quad (29)$$

$$E(\pi_{mhx}) \geqslant \pi_0 \quad (30)$$

$$E(\pi_{mlx}) \geqslant \pi_0 \quad (31)$$

求解规划问题式(27),有如下命题。

命题 2:混同激励契约(f_x,Z_x)配置如下:

$$f_x^* = [\lambda r_l(Ay-By+B)-yr_h(A\lambda-B\lambda+kr_h)+ky r_l^2-k\rho\sigma^2 u]/[2yr_h^2+(1-2y)r_l^2+\rho\sigma^2 u] \quad (32)$$

$$Z_x^* = \frac{1}{2u}[-2aAu-A^2\lambda^2-2Ar_l(\lambda f_x^*+k\lambda+\beta u)+2Apu+2eku-r_l^2(f_x^*+k)^2+\rho\sigma^2 u f_x^*(f_x^*+2k)+k^2\rho\sigma^2 u-2kuv+2\pi_0 u] \quad (33)$$

制造商的努力程度分别为

$$t_{hx}^* = \frac{A\lambda+r_h(f_x^*+k)}{u} \quad (34)$$

$$t_{lx}^* = \frac{A\lambda+r_l(f_x^*+k)}{u} \quad (35)$$

高和低减排水平制造商的收益分别为

$$E(\pi_{mhx}^*) = \pi_0+\{(r_h-r_l)[f_x^*(2A\lambda+r_h f_x^*+2kr_h)+2A(k\lambda+\beta u)+r_l(f_x^*+k)^2+k^2 r_h]\}/2u \quad (36)$$

$$E(\pi_{mlx}^*) = \pi_0 \quad (37)$$

证明过程与分离均衡类似,因此不再赘述。

3　契约分析

分析两种契约的可行性边界,首先分析参数 f,有命题 3。

命题 3:①零售商分离契约的实施要求满足$B>\frac{k\rho\sigma^2 u}{\lambda r_h}$;②零售商提供的混同激励契约可实施的充要条件为

$$B>\frac{y(r_h-r_l)[A\lambda+k(r_h+r_l)]+k\rho\sigma^2 u}{\lambda[yr_h-(y-1)r_l]}。$$

证明:该阈值条件的经济学内涵在于,$f>0$ 必须满足,否则参数同质化契约将因激励不足引发市场崩溃。因此,由 $f_x^*>0$ 可得命题 3①;由 f_h^* 的函数式可知 $f_h^*>0$;由 $f_l^*>0$ 得命题 3②。综上所述,命题 3 由此得证。

命题 4:在分离均衡状态下,契约设计展现出显著的类型筛选功能。如实汇报自己减排水平类型的低水平制造商只能得到保留收益,高减排水平的制造商通过获取信息租金实现自我选择。特别地,信息租金规模随高水平群体占比 y 的增加呈指数衰减趋势。这解释了减排技术扩散过程中"先行者劣势"的形成机理。

证明:减排水平高的制造商如实汇报其减排水平与谎报其低减排水平的收益相同,即 $E(\pi_{mhh}^*)=E(\pi_{mhl}^*)=\pi_0+\{(r_h-r_l)[f_l^*(2A\lambda+r_h f_l^*+2kr_h)+2A(k\lambda+\beta u)+r_l(f_l^*+k)^2+k^2 r_h\}/2u$。

减排水平低的制造商,如实汇报自己的减排水平可以获得保留收益,即 $E(\pi_{mll}^*)=\pi_0$。

减排水平低的制造商若谎报自己是高减排水平,获得的收益将小于保留收益,即 $E(\pi_{mll}^*)=E(\pi_{mlh})=\pi_0+\{2f_h^*[k\rho\sigma^2 u-r_l(A\lambda+kr_l)]+2f_l^*(A\lambda r_l+kr_l^2-k\rho\sigma^2 u)+{f_h^*}^2(\rho\sigma^2 u-r_l^2)+{f_l^*}^2(r_l^2-\rho\sigma^2 u)+2u(Z_l^*-Z_h^*)\}/2u$。

因而,不管制造商是何种减排水平类型,在分离均衡下,通过差异性契约参数设计验证了分离均衡状态下的自我筛选特征。

分析式(8)、式(9)、式(32)有如下结论。

结论 1:零售商边际收益 B 的增加将提高两种契约的减排量激励系数;努力成本系数 u、减排量的不确定性程度 σ^2 在低减排契约下与激励强度呈正比例关系;高减排水平制造商在市场中的比例 y 和单位碳配额的价格 k 的增加,将降低两种契约的减排量激励系数,即减小对制造商的激励强度。

证明:

$$\frac{df_x^*}{dB}>0,\frac{df_x^*}{dk}<0,\frac{df_x^*}{du}<0,\frac{df_x^*}{d\sigma^2}<0,\frac{df_x^*}{dy}<0;$$

$$\frac{df_l^*}{dB}>0,\frac{df_l^*}{dk}<0,\frac{df_l^*}{du}<0,\frac{df_l^*}{d\sigma^2}<0,\frac{df_l^*}{dy}<0;$$

$$\frac{df_h^*}{dB}>0,\frac{df_h^*}{dk}=0,\frac{df_h^*}{du}<0,\frac{df_h^*}{d\sigma^2}<0,\frac{df_h^*}{dy}=0。$$

比较两种契约的激励系数可得 $f_h^*>f_l^*>f_x^*$,据此有如下结论。

结论 2:与混同激励契约相比,分离激励契约展现出更强的减排激励效能。具体而言,零售商对低减排水平的制造商减排激励强度呈现群体规模效应:随着市场占比 y 的增大产生边际衰减,对高减排水平制造商的激励强度保持类型独立性特征。

结论 2 揭示的契约激励结构特性,深刻印证了信息经济学中的低端向下扭曲现象:当高减排能力制造商群体占比提升时,低减排水平契约参数产生

系统性向下扭曲,其激励强度遵循边际递减法则,而高能力类型契约参数始终维持在帕累托有效水平。该现象揭示了绿色转型过程中市场主体异质性引发的非线性激励响应规律。

结论 3:在双重信息不对称下,无论是哪种减排水平类型的制造商,其期望收益都随着 y 的增加而降低。

证明:

$$\frac{dE(\pi_{mhh})}{dy}=\frac{dE(\pi_{mhh})}{df_h^*}\frac{df_h^*}{dy}=\frac{(r_h-r_l)[A\lambda+(k+f_h^*)(r_h+r_l)]}{u}\frac{df_h^*}{dy}<0;$$

$$\frac{dE(\pi_{mhx})}{dy}=\frac{dE(\pi_{mhx})}{df_x^*}\frac{df_x^*}{dy}=\frac{(r_h-r_l)[A\lambda+(k+f_x^*)(r_h+r_l)]}{u}\frac{df_x^*}{dy}<0;$$

$$\frac{dE(\pi_{mll})}{dy}=\frac{dE(\pi_{mll})}{df_l^*}\frac{df_l^*}{dy}=\frac{A\lambda r_l+r_l^2(f_l^*+k)-u\rho\sigma^2(f_l^*+k)}{u}\frac{df_l^*}{dy}<0;$$

$$\frac{dE(\pi_{mlx})}{dy}=\frac{dE(\pi_{mlx})}{df_x^*}\frac{df_x^*}{dy}=\frac{A\lambda r_l+r_l^2(f_x^*+k)-u\rho\sigma^2(f_x^*+k)}{u}\frac{df_x^*}{dy}<0。$$

结论 4:在分离激励契约下,当零售商与高减排水平制造商签订契约后,其期望收益随着 y 的增加而增加。而与低减排水平制造商签订契约后,呈现边际收益递减特性;在混同激励契约下,两类代理均导致委托人收益随 y 提升而衰减,印证信息混同引发的效率耗散。

(1)在分离激励契约下:当零售商与高减排水平的制造商签订契约时,零售商获得的期望收益为

$$E(\pi_{rhh})=B\left[a+\frac{\lambda(A\lambda+r_hf_h^*+r_hk)}{u}+\beta r_h-p\right]-\frac{f_h^*r_h(A\lambda+r_hf_h^*+r_hk)}{u}-Z_h^*。$$

当零售商与低减排水平的制造商签订契约时,零售商获得的期望收益为

$$E(\pi_{rll})=B\left[a+\frac{\lambda(A\lambda+r_lf_l^*+r_lk)}{u}+\beta r_l-p\right]-\frac{f_l^*r_l(A\lambda+r_lf_l^*+r_lk)}{u}-Z_l^*;$$

$$\frac{E(\pi_{rhh})}{y}>0;$$

$$\frac{dE(\pi_{rll})}{y}<0。$$

(2)在混同激励契约下,当零售商与高减排水平的制造商签订契约时,零售商获得的期望收益为

$$E(\pi_{rhx})=B\left[a+\frac{\lambda(A\lambda+r_hf_x^*+r_hk)}{u}+\beta r_h-p\right]-\frac{f_x^*r_h(A\lambda+r_hf_x^*+r_hk)}{u}-Z_x^*。$$

当零售商与低减排水平的制造商签订契约时,零售商获得的期望收益为

$$E(\pi_{rlx})=B\left[a+\frac{\lambda(A\lambda+r_lf_x^*+r_lk)}{u}+\beta r_l-p\right]-\frac{f_x^*r_l(A\lambda+r_lf_x^*+r_lk)}{u}-Z_x^*;$$

$$\frac{E(\pi_{rhx})}{y}<0;$$

$$\frac{dE(\pi_{rlx})}{y}<0。$$

证明:结合式(8)~式(11),对 y 求导,化简可得:

$$\frac{dE(\pi_{rhh})}{dy}=\frac{dE(\pi_{rhh})}{df_h^*}\frac{df_h^*}{dy}=-\frac{(r_h-r_l)[A\lambda+(f_h^*+k)(r_h+r_l)]}{u}\frac{df_h^*}{dy}>0;$$

$$\frac{dE(\pi_{rll})}{dy}=\frac{dE(\pi_{rll})}{df_l^*}\frac{df_l^*}{dy}=\frac{A\lambda r_l+r_l^2(f_l^*+k)-u\rho\sigma^2(f_l^*+k)}{u}\frac{df_l^*}{dy}<0。$$

结论 4:(1)得证,混同契约(2)下关于收益与比例的单调性同理可证。

结论 5:无论减排水平高低,制造商都愿意付出更多努力,若增加减排量激励强度,可以激励制造商付出更多努力程度。

证明:根据式(12)、式(14)、式(34)、式(35),对减排水平和减排量的激励系数进行求导,即

$$\frac{\partial t_{hx}^*}{\partial r_h}=\frac{k+f_x^*}{u}>0,\ \frac{\partial t_{hh}^*}{\partial r_h}=\frac{k+f_h^*}{u}>0;$$

$$\frac{\partial t_{lx}^*}{\partial r_l}=\frac{k+f_x^*}{u}>0,\ \frac{\partial t_{ll}^*}{\partial r_l}=\frac{k+f_l^*}{u}>0;$$

$$\frac{\partial t_{hh}^*}{\partial f_h}=\frac{\partial t_{ll}^*}{\partial f_l}=\frac{\partial t_{hx}^*}{\partial f_x}=\frac{\partial t_{lx}^*}{\partial f_x}=\frac{r_h}{u}>0。$$

结论 6:对于低减排水平类型的制造商,其减排水平越高,则 f_x^*、f_l^* 越高,对于高减排水平制造商则相反。在分离激励契约下,r_l 类型的制造商的减排水平对 r_h 类型的制造商的激励系数 f_h^* 没有影响,但是对 r_h 类型的制造商对 r_l 类型的制造商的激励系数呈现衰减规律,高低减排水平之间的差距越大,f_l^* 越小。

证明:根据式(8)、式(9)、式(32)知 $\frac{\partial f_h^*}{r_h}<0$,

$\frac{\partial f_l^*}{r_l}>0,\frac{\partial f_x^*}{r_h}<0,\frac{\partial f_x^*}{r_l}>0,\frac{\partial f_h^*}{r_l}=0,\frac{\partial f_l^*}{r_h}<0$。

4　数值算例分析

为深化对双重信息不对称下供应链契约性质的理解，构建了包含两类制造商的仿真模型。设定参数如下：将制造商划分为高减排水平与低减排水平，假设低减排水平制造商为 $r_l=1.2$，高减排水平的制造商为 $r_h=1.6$，模型中的其他参数分别假设为 $B=2.5$，$p=4$，$\pi_0=30$，$a=18$，$\rho=1.5$，$\sigma=0.8$，$u=0.7$，$\lambda=0.6$，$k=0.6$，$\beta=0.8$，$v=2$，$e=10$[16,24]。制造商在市场上的减排水平分布，y 作为共享的市场信息，其取值范围为 0～1，用以反映高减排水平制造商在市场中的相对占比。以市场中高水平制造商所占的比例 y 为横轴，以减排量激励系数 f 为纵坐标，可以绘制出减排量激励系数与市场上高、低减排水平制造商比例的关系图，如图 2 所示。在制造商减排能力与努力程度信息双重不对称的条件下，观察到一个关键现象：随着市场上高减排水平制造商比例的上升，这些高能力制造商所获得的激励提成保持稳定，这一发现与经济学中的“高端不扭曲”现象相吻合；而低减排水平制造商所获得的减排量激励比例则随着高水平制造商比例的增加而递减，这一现象揭示了在信息不对称条件下，市场竞争力向高效率生产者集中的趋势，低效率制造商在契约激励机制下面临相对劣势，其市场竞争力随之减弱。

碳交易价格的变动呈现差异化影响：对高减排水平契约参数保持中性，对低水平及混同契约产生负向调节。并且，努力成本系数越高，减排量激励系数越低。图 2～图 4 的走势验证了结论 1 的稳健性。

分别以减排水平激励系数和制造商努力程度为横、纵坐标构建图形，图 5 为分离激励契约下零售

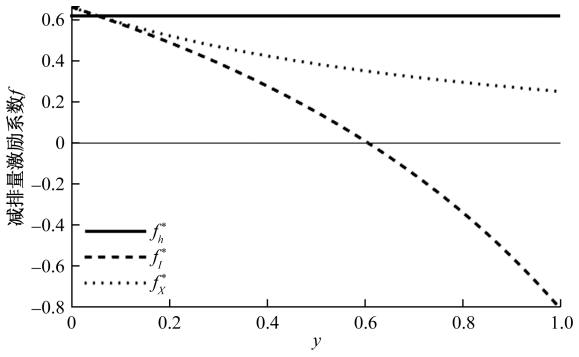


图 2　制造商的减排量激励系数与市场中高减排水平制造商比例的关系

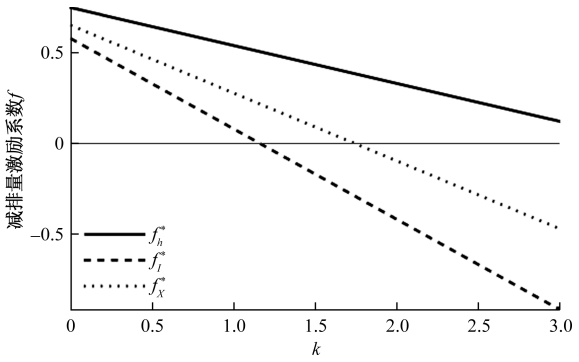


图 3　f 与碳交易价格的关系

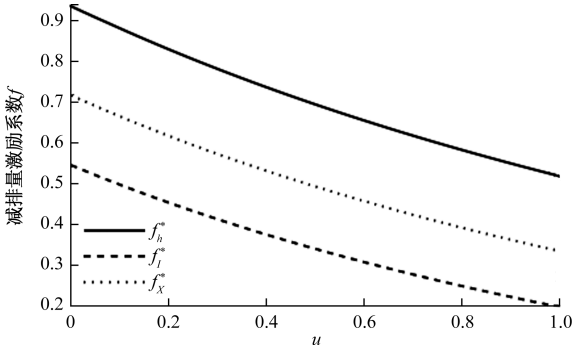


图 4　f 与努力成本系数的关系

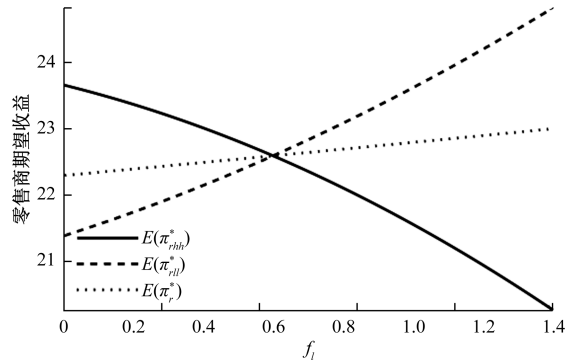


图 5　分离契约下 f_l 与零售商收益的关系

商期望收益与低减排量激励系数的趋势，图 6 为混同激励契约下零售商期望收益与减排量激励系数的关系。

结合图 2，根据图 5 可以观察到，当零售商选择与高减排水平的制造商签约时，其获得的期望收益显著高于与低减排水平制造商签约的情况，随着市场中高水平者比例的增加，零售商获得的期望收益也随之增加，而若签约低水平制造商，随着比例增加，零售商的期望收益将降低。无论零售商选择何种减排水平的制造商，零售商的收益都随着减排量激励系数增长，并与市场中高水平者的比例呈反比例关系。图 5、图 6 验证了结论 4。

基于图 7～图 8 的数据对比分析，结果显示，制

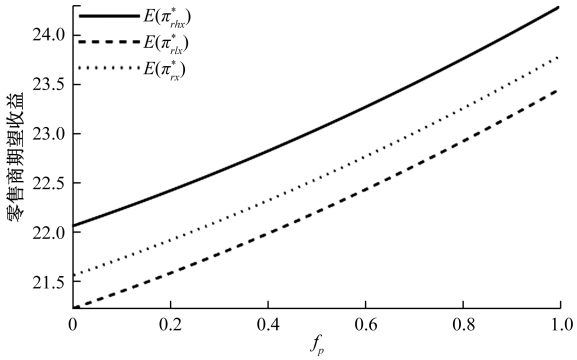


图 6　混同契约下 f_p 与零售商收益的关系

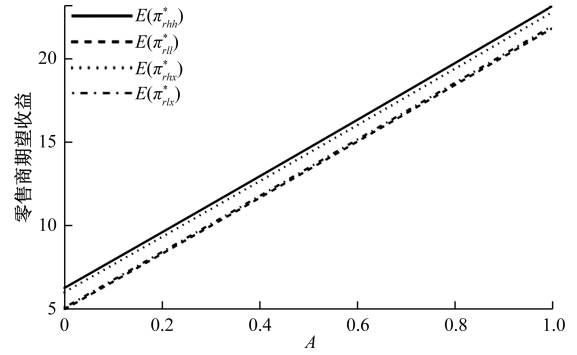


图 7　零售商期望收益与制造商边际收益的关系

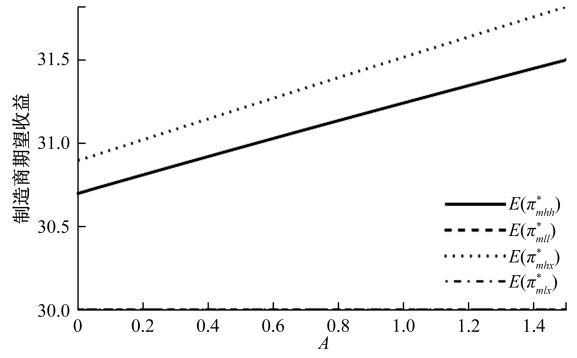


图 8　制造商期望收益与制造商边际收益的关系

造商边际收益与供应链成员的期望收益呈显著正向关联。在减排水平较高的制造商与零售商的合作中,分离激励契约较之混同契约始终展现出更优的收益表现;与之形成鲜明对比的是,当签约对象为低减排水平制造商时,收益格局呈现倒置现象——混同契约下的零售商期望收益更高。这种差异化特征引致了以下战略选择:在低减排合作情境中,零售商具有采用混同契约的绝对动机以实现帕累托改进,而制造商因仅能获取保留利润,其契约选择呈现收益中性特征;反之,在高减排合作框架下,分离契约成为双方共赢的占优策略。所以,在分离契约有效实施的条件下,零售商在选择激励契约类型时应采取审慎态度,必须充分考虑制造商是否有内在动力去研发和升级污染减排技术。

通过式(16)、式(36)的均衡分析可知,激励系数 f 与边际收益 A 在制造商期望收益函数中具有参数互补特性。当制造商的减排战略重视程度大时,即 A 较大,则高减排水平制造商与零售商均能获益。建议采取以下创新性策略组合:①零售商应着力培育消费端的低碳偏好指数 β,通过市场机制形成对契约激励强度的替代效应;②在此条件下,零售商可削减激励成本支出,同时制造商通过绿色溢价获取边际收益增长,最终实现供应链整体收益提升协同优化。这种"市场驱动+契约协同"的新型治理模式,有效破解了传统激励契约中的委托代理困境。

由图 9 可看出,虽然单位碳配额价格的变化会影响收益水平,但分离契约与混同契约的对比关系、激励系数变化趋势等核心发现并未发生质变,从而论证模型核心结论对碳价波动具有一定的稳健性。

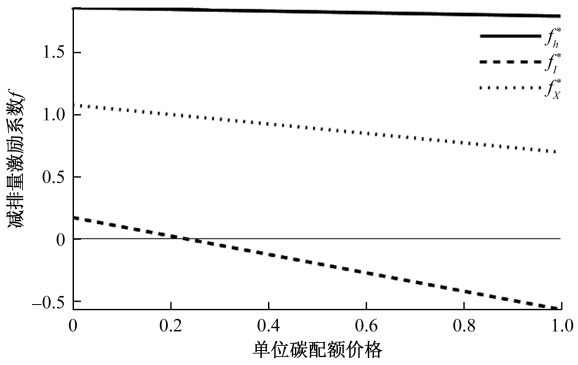


图 9　单位碳配额价格与减排量激励系数的关系

5　结论

通过构建双重信息不对称下的动态激励契约模型,系统分析了碳交易机制中零售商如何设计契约以协同制造商减排。研究发现揭示了分离契约与混同契约的运作机理、激励系数的异质性分配规律以及市场结构的关键作用。

(1)高减排水平制造商在高风险契约中表现出显著的正向激励弹性,其减排量分成比例独立于低减排水平制造商市场比例及能力水平,激励强度与努力程度呈现显著正反馈效应,与单一道德风险模型的激励规律一致;而低水平制造商在低风险契约中,激励分成随高水平竞争者占比增加与技术差距扩大呈现递减规律,该低端向下扭曲现象深化了连续类型模型的理论预期,为离散市场提供实证支撑。研究进一步发现,当市场不确定性参数上升或

努力成本系数提高时，制造商风险边际规避倾向将导致激励衰减。

(2)提出“固定支付分离类型(阶段1)→激励系数调控努力(阶段2)”两阶段契约，首次在离散模型中整合逆向选择(减排水平隐匿)与道德风险(减排努力程度不可验)治理。相较许民利和张佳林[12]的环境服务供应链模型(仅解决技术私有性)，本框架同步实现类型甄别与行为激励。

(3)零售商收益函数与高减排水平制造商的市场占比存在严格单调关系，弥补了Xu和Lee[17]未量化结构参数λ影响的缺陷，其利润增长源于双重驱动——制造商减排水平提升带来的市场价值创造效应，以及努力程度优化引致的供应链运营协同效应。这种双向价值创造机制有效抑制了履约过程中的道德风险。

(4)企业管理启示。零售商应采取混合策略均衡：与低减排水平制造商实施基准契约以压缩信息租金，对高能力类型采用溢价契约获取协同红利，形成收益优化的双重实现路径。制造商需避免王文宾等[20]的模型中低效伪装行为。其次，应培育高减排技术企业(提升λ)，替代段忠菲等[16]的政府补贴依赖，实现市场自驱协同。

未来的研究方向可考虑以下两个方面：①可构建连续型减排水平分布模型，同时纳入多主体竞合博弈、消费者碳偏好异质性等要素；②探索转移支付契约、碳配额期权契约在多重信息不对称中的协调作用，结合区块链智能合约技术构建减排行为可验证机制，实现供应链碳治理的数字化转型。

参考文献

[1] European Commission. Regulation (EU) 2023/956 establishing a carbon border adjustment mechanism[EB/OL]. (2023-05-10)[2026-01-11]. https://www.tid.gov.hk/sc/tradecircular/2023/ci3392023.html.

[2] ZHANG Q, LYU K. Consumer green preference and corporate emission reduction strategies: evidence from China's carbon-labeled products[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2024, 118: 102801.

[3] Walmart Inc. Project Gigaton 2023 Progress Report[R]. Bentonville: Walmart Sustainability Hub, 2023.

[4] DU J, CUI Q, ZHANG J. Incentive contract design for corporate pollution reduction under dual information asymmetry[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278: 123456.

[5] CDP. Global supply chain report 2023: Carbon footprint transparency in retail[R]. London: CDP Worldwide, 2023: 12.

[6] Walmart Inc. Project Gigaton 2023 implementation framework[R]. Bentonville: Walmart Sustainability Hub, 2023: 5.

[7] CHEN F R, LAI G M, XIAO W Q. Provision of incentives for information acquisition: forecast-based contracts vs. menus of linear contracts[J]. Management Science, 2016, 62(7): 1899-1914.

[8] YOO S H, CHEONG T. Quality improvement incentive strategies in a supply chain[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2018, 114: 331-342.

[9] 程呈，范静. 信息不对称视角下农业供应链金融缓解信贷约束的实证分析[J]. 科学决策，2025(7)：49-63.

[10] HOLMSTROM B, MILGROM P. Aggregation and linearity in the provision of inter temporal incentives[J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1987, 55(2): 303-328.

[11] 崔健波，罗正英. 成本控制与棘轮效应：节约分成激励 *vs.* 目标分成激励[J]. 中国管理科学，2023，31(8)：90-99.

[12] 许民利，张佳林. 双重信息不对称下环境服务供应链激励机制研究[J]. 价格理论与实践，2021(10)：117-120，194.

[13] PAVLOV V, KATOK E, ZHANG W. Optimal contract under asymmetric information about fairness[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2022, 24(1): 305-314.

[14] 李响，刘悦. 基于委托代理模型的线上广告时序策略与线下服务激励机制研究[J]. 管理学报，2022，19(11)：1693-1702.

[15] LI T, ZHANG H. Gaining by ceding-bounded wholesale pricing for information sharing in a supply chain[J]. Production and Operations Management, 2023, 32(3): 829-843.

[16] 段忠菲，饶卫振，朱庆华. 物流低碳协作配送的政府补贴激励机制研究[J]. 管理评论，2024，36(4)：247-260.

[17] XU L, LEE S H. Consumers' environmental awareness and endogenous managerial delegation choice between sales and environmental incentives[J]. Energy Economics, 2024, 136: 107766.

[18] 汤春华，曹二保，殷悦. 配额信息不对称时排放依赖型供应链契约[J]. 系统管理学报，2017，26(2)：356-360.

[19] LIANG Y, LIANG X, WEI H. Sustainable quality-incentive contract design of public technology innovation procurement under asymmetry information[J]. Sustainability, 2023, 15(11): 8773.

[20] 王文宾，赵学娟，张鹏，等. 双重信息不对称下闭环供应链的激励机制研究[J]. 中国管理科学，2016，24(10)：69-77.

[21] XIA J, NIU W. Pushing carbon footprint reduction along environment with carbon-reducing information asymmetry[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,

249:119376.
[22] 朱庆华,夏西强,李梦雅,等. 碳配额分配方法对授权再制造影响研究[J]. 管理科学学报,2024,27(5):60-75.
[23] 周艳菊,吴龙健. 碳限额交易机制下碳信息不对称对供应链的影响研究[J]. 工业工程与管理,2017,22(4):68-78.
[24] 杜建国,崔乾坤,张靖泉. 双重信息不对称下企业污染减排激励契约研究[J]. 中国科技论坛,2015(12):87-93.
[25] ZOU Z B, WANG J J, DENG G S, et al. Third-party remanufacturing mode selection: outsourcing or authorization?[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 87: 1-19.
[26] 中国碳标签产业创新联盟. 中国碳标签产品市场影响研究报告(2023)[R]. 北京:中国质检出版社,2023:15-17.

Design of Incentive Contracts Addressing Dual Information Asymmetry in Carbon Trading Mechanisms

GAO Runxin, LIU Xin

(School of Economics and Management, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Addresses the dual information asymmetry concerning manufacturers' emission reduction capability and effort levels in carbon trading systems. A retailer-led supply chain game model integrating Bayesian inference and principal-agent theory was constructed design a hybrid incentive contract mechanism. It is found that heterogeneous incentive patterns: low-capability manufacturers face diminishing incentive coefficients with increased reduction efforts, obtaining only baseline returns through truthful disclosure, whereas high-capability manufacturers secure additional information premiums. Contract selection divergence: high-capability manufacturers and retailers prefer separating contracts for value maximization, while retailers utilize pooling contracts to enhance cooperation benefits with low-capability counterparts. Dynamic synergistic effects: under evolving market structures, the proportion of high-capability manufacturers demonstrates significant positive correlation with retailer profits, confirming strengthened supply chain synergy through increased participation of quality manufacturers.

Keywords: carbon trading; incentive mechanisms; dual information asymmetry; pooling contracts; separating contracts