考虑再制造服务的闭环供应链政府补贴策略研究

万凤娇[1,2]，秦嘉慧[3]

（1. 江汉大学商学院，武汉 430056；2. 武汉城市圈制造业发展研究中心，武汉 430056；
3. 金发科技股份有限公司，广州 510663）

摘要：为比较政府不同补贴策略对再制造产业的影响，构建由制造商、零售商与第三方回收商组成的闭环供应链，区分环保型消费者与普通消费者的偏好差异，并引入零售商再制造服务，构建 Stackelberg 博弈模型，分别研究无补贴、服务补贴、销售价格补贴及回收价格补贴四种情形下的供应链均衡决策，重点分析服务系数以及不同补贴对闭环供应链的影响。数值分析表明：服务系数提升能有效扩大再制造产品市场份额并提高回收率，当超过特定阈值时，零售商因独自承担服务成本造成利润受损。三类补贴政策对闭环供应链各主体的利润影响存在异质性，销售价格补贴在快速提升市场份额与供应链利润方面效果较好；当消费者服务敏感度较高时，服务补贴成为较优选择；回收价格补贴则需较高额度才能对回收环节产生显著激励作用。研究为企业优化再制造服务策略及政府精准制定补贴政策提供理论依据与管理启示。

关键词：消费者异质性；再制造服务；闭环供应链；政府补贴；供应链决策

中图分类号：F205；F270 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)14－0132－14

为实现可持续发展与生态文明建设目标，通过专业化修复与技术升级，使报废零部件恢复至批量化生产的再制造成为有效途径。《“十四五”循环经济发展规划》明确指出，促进再制造产业高质量发展，构建资源循环型产业体系。据中国物资再生协会相关报告，再制造产业已在汽车零部件、机电产品等多个领域开展试点示范，近百家企业的万余种产品型号通过再制造认定，建成 7 个国家级再制造试点示范基地、园区和集聚区，行业年产值规模超过 1 000 亿元[1]。

与此同时，再制造产品市场渗透率仍不足 5%，产业发展面临瓶颈。在需求侧，消费者对再制造产品的接受度普遍偏低[2]，质量认知偏差成为制约市场拓展的重要因素[3]。Hazen 等[4]认为，消费者对再制造品的质量认知主要体现在使用寿命、产品特征、使用性能和可服务性等方面。可服务性可以通过售后服务体系加以完善，能有效改变消费者对再制造产品的态度，扩大消费规模[5]，如京东和苏宁分别为再制造产品提供为 180 天与 365 天的质保服务[6]。然而，在供给侧，受投资回报周期长、市场不确定性高等因素影响，企业开展增值服务的内生动力不足。为破解供需矛盾，需要外部政策的有效干预，政府补贴是已被广泛采用的有效激励工具。目前，国家已出台多项补贴政策支持再制造产业发展[7-8]，如汽车领域实施的“以旧换再”“以旧换新”等价格补贴措施。

因此，在考虑消费者异质与再制造服务水平的情形下，重点研究政府如何选择补贴对象以更有效地提升闭环供应链整体绩效，显得尤为重要。基于此，本文构建了一个由制造商、零售商和第三方回收商组成的闭环供应链 Stackelberg 博弈模型，在考虑消费者异质性与零售商服务投入的基础上，对比分析三种政府补贴策略的差异化效果。研究结论可为政府优化补贴政策设计、企业制定协同运营策略提供决策参考。

1 文献综述

再制造闭环供应链管理的决策优化受回收模式、消费者行为及政府政策多因素影响。回收渠道选择是闭环供应链运作的基础。Savaskan 等[9]最早比较了制造商回收、零售商回收及第三方回收三

收稿日期：2026-03-09

基金项目：湖北省科技厅软科学项目(2018ADC131)；湖北省人文社会科学重点研究基地——武汉城市圈制造业发展研究中心项目(W2021Z01)

作者简介：万凤娇(1981—)，女，黑龙江七台河人，博士，教授，硕士研究生导师，研究方向为供应链系统分析与优化、可持续供应链管理；秦嘉慧(1997—)，女，山西晋城人，硕士研究生，研究方向为物流与供应链管理。

种模式的效率,为后续研究奠定了基础。此后,学者从不同角度进行拓展。例如,Taleizadeh 等[10]分析两种再制造模式下碳减排与质量改进对闭环供应链的影响;Shekarian 等[11]进一步引入了消费者碳足迹敏感性,探讨了其在正向产品竞争与逆向回收竞争双重情境下的作用;曹柬等[12]在考虑再制造成本差异的基础上,从企业利润、消费者剩余和回收率三个维度评估回收渠道的选择问题。以上研究主要聚焦于企业层面的生产与渠道策略,为理解供应链结构决策提供参考。

随着市场导向的深化,消费者行为成为驱动供应链决策的关键力量。现实中消费者掌握更多的主动权[13],且受经济、环保意识等因素影响表现出异质偏好。部分研究通过消费者细分来刻画这种异质性。例如,郭春香等[2]将消费者分为普通和绿色两类,并研究了政府基于此的差别化补贴效果;Xu 等[14]将消费者细分为初代型消费者与更换型消费者,证实政府补贴对提升消费者福利的积极作用;程红亚等[15]从消费者视角出发,研究了其对再制造授权模式的选择偏好。此外,众多研究指出,消费者对再制造产品普遍存在损失厌恶与质量担忧等心理[16-17],这是制约其市场接受度的核心障碍。上述研究明确了消费者异质性是分析再制造市场不可忽略的前提,但多将消费者偏好视为外生变量,较少探讨企业如何通过自身策略主动影响和改变这种偏好。

为克服消费者信任障碍,提供增值服务已成为企业推广再制造产品的重要手段[6]。学术界也展开了深入研究,Jena 和 Sarmah[18]分析了不同回收渠道下零售商之间价格与服务竞争的均衡问题,并设计了相应的协调契约;Hong 等[5]证实,提供增值服务不仅能提升供应链整体绩效,还能在供应链关系中发挥调节作用。聚焦于具体服务形式,Zhu 等[3]、陈伟达和倪方君[19]探讨了延保服务的影响,而 Deng 等[20]对比了不同的服务提供模式。研究普遍将服务作为提升产品价值、获取竞争优势的内生决策变量。

政府补贴是推动再制造产业发展的另一关键政策工具。现有研究主要探讨价格类补贴的影响,如"以旧换新""以旧换再"等销售或回收价格补贴,并证实了其对于刺激需求、提高回收率的有效性[2,15]。高举红等[21]验证了直接补贴再制造服务成本的有效性,分析了"以旧换新"与"以旧换再"并行的双重补贴策略。王建等[22]进一步将营销投入水平作为影响再制造品市场认可度的关键变量,探讨了其与政府补贴的交互作用。Chu 等[23]通过分析动力电池闭环供应链,指出财政补贴能有效破解回收难题,协调制造商、回收商与再利用企业之间的利益。Liu 等[24]构建"再制造-保险"组合系统,分析了不同政府补贴策略对供应链优化的影响。

综上所述,现有研究主要是将消费者异质性作为外生参数,未能深入分析企业策略如何与内生化的消费者选择行为产生交互影响。同时,研究多集中于传统的价格补贴,而对服务补贴的探讨还不够,缺乏对不同补贴工具的系统性比较与效果评估。基于此,将再制造服务作为零售商的内生决策变量,引入包含异质消费者的市场需求函数,构建闭环供应链博弈模型,重点解决在消费者异质服务影响其效应的背景下,政府如何选择补贴对象,才能最有效地激励供应链并提升系统绩效。本研究旨在通过对比分析,揭示不同补贴策略的作用机理与适用条件。

2 问题描述与决策模型构建

2.1 问题描述

制造企业运营中,多专注于正向生产,常将产品回收、再制造业务外包给专业第三方企业。因此,构建一个由制造商、零售商、第三方回收商组成的闭环供应链模型(图 1)。三者构成 Stackelberg 博弈关系,制造商负责新产品与再制造产品的生产,并以 w_n、w_r 批发给零售商;零售商则以 p_n、p_r 销售,并为再制造产品提供配套服务 s;第三方回收商以回收率 τ 回收废旧产品,并将其移交给制造商再制造以获取单位回收利润 A。消费者购买产品时存在异质性,可分为环保型和普通消费者两类。环保型消费者兼具实用需求与环保责任感,更倾向于选择再制造产品;普通消费者则对再制造产品存在质量认知偏差,认为其质量不及全新产品。因此,两类消费者的购买决策行为存在明显差异。

再制造业前景广阔,但当前发展规模未达到预

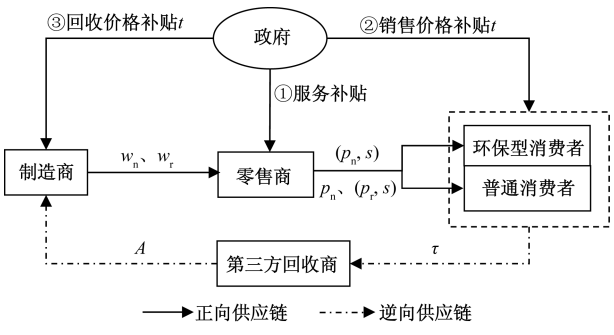


图 1 消费者异质下的再制造闭环供应链

期，补贴政策可助其实现规模效应。当前，政府对再制造市场的干预以价格补贴为主。现有研究指出，服务补贴[21]和回收补贴[25]能提升系统利润并引导产业发展。为比较不同政府补贴策略的效果，分别构建并分析了三种补贴模式：模式 S（服务补贴）、模式 P（销售价格补贴）和模式 R（回收价格补贴），并以模式 N（无政府补贴）作为基准情形进行对比。在每种补贴模式下，仅针对特定对象提供单位补贴 t，系统分析各补贴对供应链整体利润及各主体最优决策的影响。

2.2　假设与变量说明

为了构建理论模型，结合再制造产品市场特征，提出以下假设。

假设 1：考虑由单一制造商（M）、单一零售商（R）及单一第三方回收商（3P）构成的三级闭环供应链。各成员均为独立的决策主体，在信息完全对称的条件下，以自身利润最大化为决策目标。

假设 2：制造商作为渠道主导者，首先决定新产品与再制造产品的批发价格；零售商与第三方回收商作为跟随者，分别决定零售价格与回收价格。

假设 3：市场需求总量标准化为 1，其中环保型消费者占比为 $\delta(0<\delta<1)$，普通消费者占比为 $1-\delta$，两类消费者的支付意愿服从均匀分布 $v\sim U[0,1]$。

假设 4：零售商可通过提供增值服务来提升再制造产品的市场吸引力。设服务水平为 $s(s\geqslant 0)$，其会对消费者的支付意愿产生影响，对应的服务影响系数为 θ。

假设 5：消费决策基于效用函数，环保型消费者认为再制造产品和新产品的质量无差异，支付意愿一致，均为 v；普通消费者则对再制造产品存在质量偏见，认为其质量仅为新产品的 ε 倍，其中 $\varepsilon\in(0,1)$。

相关变量及参数说明如表 1 所示。

表 1　变量及参数

变量类型	变量符号	变量说明
制造商变量	w_n	制造商向零售商供应新产品的单位批发价格
	w_r	制造商向零售商供应再制造品的单位批发价格
零售商变量	p_n	零售商向消费者销售新产品的单位零售价格
	p_r	零售商向消费者销售再制造品的单位零售价格
	s	零售商为再制造品提供的增值服务水平
第三方回收商变量	τ	第三方回收商对废旧产品的回收比例
其他参数	c_n	制造商生产单位新产品的总成本
	c_r	制造商进行产品再制造的单位成本
	Q_n	消费者对新产品的市场需求量
	Q_r	消费者对再制造产品的市场需求量
	A	制造商支付给第三方回收商的回收价格
	f	服务成本系数
	k	回收率成本系数
	v	消费者支付意愿
	θ	再制造服务水平对消费者支付意愿影响系数
	ε	普通消费者对再制造品的质量认可程度
	U_{g1}/U_{o1}	环保/普通消费者购买单位新产品的效用
	U_{g2}/U_{o2}	环保/普通消费者购买单位再制造品的效用
	π_i	制造商、零售商、第三方回收商利润 $i=M,R,3P$

2.3　模型的构建与求解

2.3.1　模式 N：无政府补贴

基于上述假设，可构建如下消费者效用函数。

环保型消费者：

$$\begin{cases}U_{g1}=v-p_n\\U_{g2}=v-p_r+\theta s\end{cases}\tag{1}$$

普通消费者：

$$\begin{cases}U_{o1}=v-p_n\\U_{o2}=\varepsilon v-p_r+\theta s\end{cases}\tag{2}$$

对于环保型消费者，由于始终满足 $p_n>p_r-\theta s$，即 $U_{g2}>U_{g1}$，因此其总是倾向于选择再制造产品。令 $U_{g2}=0$，其购买再制造产品的临界点为 $v_1=p_r-\theta s$。当 $v\in(0,v_1)$ 时，选择不购买；$v\in(v_1,1)$ 时，选择购买。

对于普通消费者，当 $U_{o1}=U_{o2}$ 且 $U_{o1}>0$、$U_{o2}>0$ 时，其购买新产品和再制造产品的临界点为 $v_2=\dfrac{p_n-p_r+\theta s}{1-\varepsilon}$，当 $v\in(v_2,1)$ 时，则会选择购买新产品；当 $U_{o2}=0$ 时，其购买再制造产品和不购买任何产品的临界点为 $v_3=\dfrac{p_r-\theta s}{\varepsilon}$，当 $v\in(v_3,v_2)$ 时，会选择购买再制造产品；当 $v\in(0,v_3)$ 时，选择不购买任何产品。两种消费者决策行为如图 2 所示。

基于上述分析，推导出新产品的市场需求 Q_n 与再制造产品的市场需求 Q_r 如下。

$$\begin{aligned}Q_n&=(1-\delta)\int_{\frac{p_n-p_r+\theta s}{1-\varepsilon}}^{1}1\mathrm{d}v\\&=(1-\delta)\left(1-\frac{p_n-p_r+\theta s}{1-\varepsilon}\right)\end{aligned}\tag{3}$$

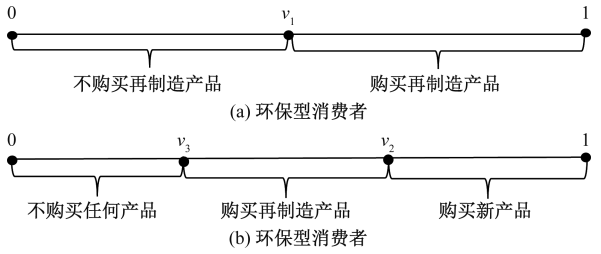


图 2　两种消费者决策行为

$$Q_r=\delta\int_{p_r-\theta s}^{1}1\mathrm{d}v+(1-\delta)\int_{\frac{p_r-\theta s}{\varepsilon}}^{\frac{p_n-p_r+\theta s}{1-\varepsilon}}1\mathrm{d}v$$
$$=\delta(1-p_r+\theta s)+(1-\delta)\times\left(\frac{p_n-p_r+\theta s}{1-\varepsilon}-\frac{p_r-\theta s}{\varepsilon}\right)\tag{4}$$

同时构建制造商、零售商、第三方回收商的利润函数,分别为

$$\pi_M=(w_n-c_n)Q_n+(w_r-c_r)Q_r-A\tau(Q_n+Q_r)\tag{5}$$

$$\pi_R=(p_n-w_n)Q_n+(p_r-w_r)Q_r-\frac{1}{2}fs^2\tag{6}$$

$$\pi_{3P}=A\tau(Q_n+Q_r)-\frac{1}{2}k\tau^2\tag{7}$$

将式(3)和式(4)代入式(5)中求得制造商利润为

$$\pi_M=(w_n-c_n)(1-\delta)\left(1-\frac{p_n-p_r+\theta s}{1-\varepsilon}\right)+(w_r-c_r)\left[\delta(1-p_r+\theta s)+(1-\delta)\times\left(\frac{p_n-p_r+\theta s}{1-\varepsilon}-\frac{p_r-\theta s}{\varepsilon}\right)\right]-A\tau\left[(1-\delta)\times\left(1-\frac{p_r-\theta s}{1-\varepsilon}\right)+\delta(1-p_r+\theta s)\right]\tag{8}$$

将式(3)、式(4)代入式(6)中可得零售商利润为

$$\pi_R=(p_n-w_n)(1-\delta)\left(1-\frac{p_n-p_r+\theta s}{1-\varepsilon}\right)+(p_r-w_r)\left[\delta(1-p_r+\theta s)+(1-\delta)\times\left(\frac{p_n-p_r+\theta s}{1-\varepsilon}-\frac{p_r-\theta s}{\varepsilon}\right)\right]-\frac{1}{2}fs^2\tag{9}$$

同理,将式(3)、式(4)代入式(7)中,得到第三方回收商利润为

$$\pi_{3P}=A\tau\left[(1-\delta)\left(1-\frac{p_r-\theta s}{1-\varepsilon}\right)+\delta(1-p_r+\theta s)\right]-\frac{1}{2}k\tau^2\tag{10}$$

根据制造商主导 Stackelberg 博弈顺序,运用逆向求解法进行求解。

命题 1: 当满足条件$\frac{2(1-\delta)[2\varepsilon(1-\varepsilon)\delta+2(1-\delta)]}{\varepsilon(1-\varepsilon)}>\frac{4(1-\delta)^2}{(1-\varepsilon)^2}$,且$\frac{2(1-\delta)}{1-\varepsilon}\left[2\delta+\frac{2(1-\delta)}{\varepsilon(1-\varepsilon)}\right](-f)+2\left[-\frac{\theta(1-\delta)}{1-\varepsilon}\right]\frac{2(1-\delta)}{1-\varepsilon}\theta\left[\delta+\frac{1-\delta}{\varepsilon(1-\varepsilon)}\right]-\left[\frac{\theta(1-\delta)}{1-\varepsilon}\right]^2\times\left[-2\delta-\frac{2(1-\delta)}{\varepsilon(1-\varepsilon)}\right]-\left[\frac{2(1-\delta)}{1-\varepsilon}\right]^2(-f)+\frac{2(1-\delta)}{1-\varepsilon}\theta^2\times\left[\delta+\frac{1-\delta}{\varepsilon(1-\varepsilon)}\right]^2<0$时,零售商利润 π_R 是关于 p_n、p_r、s 的凹函数。

证明:根据逆向求解原则,对零售商利润的决策变量求一阶导,得到

$$\frac{\partial\pi_R}{\partial p_n}=(1-\delta)\left(1-\frac{p_n-p_r+\theta s}{1-\varepsilon}\right)-\frac{1-\delta}{1-\varepsilon}(p_n-w_n)+\frac{1-\delta}{1-\varepsilon}(p_r-w_r)\tag{11}$$

$$\frac{\partial\pi_R}{\partial p_r}=\frac{1-\delta}{1-\varepsilon}(p_n-w_n)+\left[\delta(1-p_r+\theta s)+(1-\delta)\times\left(\frac{p_n-p_r+\theta s}{1-\varepsilon}-\frac{p_r-\theta s}{\varepsilon}\right)\right]+(p_r-w_r)\times\left[-\delta+(1-\delta)\left(-\frac{1}{1-\varepsilon}-\frac{1}{\varepsilon}\right)\right]\tag{12}$$

$$\frac{\partial\pi_R}{\partial s}=-\frac{\theta(1-\delta)}{1-\varepsilon}(p_n-w_n)+(p_r-w_r)\times\left[\theta\delta+(1-\delta)\left(\frac{\theta}{1-\varepsilon}+\frac{\theta}{\varepsilon}\right)\right]-fs\tag{13}$$

再根据一阶导求解二阶导,求得零售商利润函数的 Hessian 矩阵为

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}\frac{\partial^2\pi_R}{\partial p_n^2} & \frac{\partial^2\pi_R}{\partial p_n\partial p_r} & \frac{\partial^2\pi_R}{\partial p_n\partial s}\\ \frac{\partial^2\pi_R}{\partial p_r\partial p_n} & \frac{\partial^2\pi_R}{\partial p_r^2} & \frac{\partial^2\pi_R}{\partial p_r\partial s}\\ \frac{\partial^2\pi_R}{\partial s\partial p_n} & \frac{\partial^2\pi_R}{\partial s\partial p_r} & \frac{\partial^2\pi_R}{\partial s^2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{-2(1-\delta)}{1-\varepsilon} & \frac{2(1-\delta)}{1-\varepsilon} & -\frac{\theta(1-\delta)}{1-\varepsilon}\\ \frac{2(1-\delta)}{1-\varepsilon} & -2\delta-\frac{2(1-\delta)}{1-\varepsilon} & \theta\delta+\frac{\theta(1-\delta)}{\varepsilon(1-\varepsilon)}\\ -\frac{\theta(1-\delta)}{1-\varepsilon} & \theta\delta+\frac{\theta(1-\delta)}{\varepsilon(1-\varepsilon)} & -f\end{bmatrix}\tag{14}$$

为验证目标函数(9)存在唯一最优解,需证明其 Hessian 矩阵负定。根据矩阵负定的必要条件:奇数阶顺序主子式小于 0,偶数阶顺序主子式大于 0,推导如下:一阶顺序主子式为 $H_1=\frac{-2(1-\delta)}{1-\varepsilon}$,由模型参数变量可知:$0<\delta<1$,$0<\varepsilon<1$,故 $H_1<0$;二阶顺序主子式 $H_2=\frac{2(1-\delta)[2\varepsilon(1-\varepsilon)\delta+2(1-\delta)]}{\varepsilon(1-\varepsilon)}-$

$\frac{4(1-\delta)^2}{(1-\varepsilon)^2}$，也验证 $H_2>0$；三阶顺序主子式为 $H_3=\frac{2(1-\delta)}{1-\varepsilon}\left[2\delta+\frac{2(1-\delta)}{\varepsilon(1-\varepsilon)}\right](-f)+2\left[-\frac{\theta(1-\delta)}{1-\varepsilon}\right]\times\frac{2(1-\delta)}{1-\varepsilon}\theta\left[\delta+\frac{1-\delta}{\varepsilon(1-\varepsilon)}\right]-\left[\frac{\theta(1-\delta)}{1-\varepsilon}\right]^2\left[-2\delta-\frac{2(1-\delta)}{\varepsilon(1-\varepsilon)}\right]-\left[\frac{2(1-\delta)}{1-\varepsilon}\right]^2(-f)+\frac{2(1-\delta)}{1-\varepsilon}\theta^2\left[\delta+\frac{1-\delta}{\varepsilon(1-\varepsilon)}\right]^2$，其中 $f>0,\theta>0$，可验证 $H_3<0$。

命题 2：新产品和再制造产品的最优批发价格、销售价格，再制造服务及回收率为

$$\begin{cases} w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}=\dfrac{\left[-\left(G^{\mathrm{D}}-J^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{n}}-N^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{r}}-\frac{2A^2}{k}L^{\mathrm{D}}I^{\mathrm{D}}\right)\right]\left(K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\frac{2A^2}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}}\right)-\left[-(H^{\mathrm{D}}-K^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{n}}-O^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{r}}-\frac{2A^2}{k}M^{\mathrm{D}}I^{\mathrm{D}})\right]\left[2J^{\mathrm{D}}-\frac{2A^2}{k}(L^{\mathrm{D}})^2\right]}{\left(K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\frac{2A^2}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}}\right)^2-\left[2J^{\mathrm{D}}-\frac{2A^2}{k}(L^{\mathrm{D}})^2\right]\left[2O^{\mathrm{D}}-\frac{2A^2}{k}(M^{\mathrm{D}})^2\right]} \\ w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}=\dfrac{-\left(H^{\mathrm{D}}-K^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{n}}-O^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{r}}-\frac{2A^2}{k}M^{\mathrm{D}}I^{\mathrm{D}}\right)}{K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\frac{2A^2}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}}}-\dfrac{2O^{\mathrm{D}}-\frac{2A^2}{k}(M^{\mathrm{D}})^2}{K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\frac{2A^2}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}} \\ p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}=\dfrac{1-\varepsilon}{2}\left(1+\dfrac{\varepsilon}{B^{\mathrm{D}}}\right)+\dfrac{w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}}{2} \\ p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}=\dfrac{\varepsilon(1-\varepsilon)}{2B^{\mathrm{D}}}+D^{\mathrm{D}}+E^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}+\left(\dfrac{1}{2}+F^{\mathrm{D}}\right)w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}} \\ s^{\mathrm{NS}}=\dfrac{2}{\theta}(D^{\mathrm{D}}+E^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}+F^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}) \\ \tau^{\mathrm{NS}}=\dfrac{A}{k}[I^{\mathrm{D}}+L^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}+M^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}] \end{cases} \tag{15}$$

式中：$B^{\mathrm{D}}=\varepsilon(1-\varepsilon)\delta+(1-\delta)-\varepsilon(1-\delta)$，$C^{\mathrm{D}}=\varepsilon(1-\varepsilon)\delta+(1-\delta)$，$D^{\mathrm{D}}=\frac{-\theta^2C^{\mathrm{D}}+\theta^2(1-\delta)}{2\theta^2C^{\mathrm{D}}-4\varepsilon(1-\varepsilon)f}$，$E^{\mathrm{D}}=\frac{-\varepsilon(1-\delta)\theta^2}{2\theta^2C^{\mathrm{D}}-4\varepsilon(1-\varepsilon)f}$，$F^{\mathrm{D}}=\frac{\theta^2}{2\theta^2C^{\mathrm{D}}-4\varepsilon(1-\varepsilon)f}$，$G^{\mathrm{D}}=(1-\delta)\left(\frac{1}{2}-\frac{D^{\mathrm{D}}}{1-\varepsilon}\right)$，$I^{\mathrm{D}}=1-\frac{1-\varepsilon}{2B^{\mathrm{D}}}[(1-\delta)+\varepsilon-\varepsilon(1-\delta)]+\frac{(1-\delta)+\varepsilon-\varepsilon(1-\delta)}{\varepsilon}D^{\mathrm{D}}$，$H^{\mathrm{D}}=\delta\left[1-\frac{\varepsilon(1-\varepsilon)}{2B^{\mathrm{D}}}\right]+\frac{1-\delta}{2}+\left[\delta+\frac{1-\delta}{\varepsilon(1-\varepsilon)}\right]D^{\mathrm{D}}-\frac{(1-\delta)(1-\varepsilon)}{2B^{\mathrm{D}}}$，$J^{\mathrm{D}}=-\frac{1-\delta}{1-\varepsilon}\left(\frac{1}{2}+E^{\mathrm{D}}\right)$，$K^{\mathrm{D}}=-\frac{1-\delta}{1-\varepsilon}\times\left(-\frac{1}{2}+F^{\mathrm{D}}\right)$，$L^{\mathrm{D}}=\frac{(1-\delta)+\varepsilon\delta}{\varepsilon}E^{\mathrm{D}}$，$M^{\mathrm{D}}=\frac{(1-\delta)+\varepsilon\delta}{\varepsilon}\times\left(-\frac{1}{2}+F^{\mathrm{D}}\right)$，$N^{\mathrm{D}}=\frac{1-\delta}{2(1-\varepsilon)}+\left(\delta+\frac{1-\delta}{\varepsilon(1-\varepsilon)}\right)E^{\mathrm{D}}$，$O^{\mathrm{D}}=\left[\delta+\frac{1-\delta}{\varepsilon(1-\varepsilon)}\right]\left(-\frac{1}{2}+F^{\mathrm{D}}\right)$。

证明：令式(11)～式(13)为 0 并联立求解，可求得零售商决策变量($p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}$，$p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}$，$s^{\mathrm{NS}}$)关于汽车制造商决策变量函数为

$$p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}(w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}},w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}})=\frac{1-\varepsilon}{2}\left(1+\frac{\varepsilon}{B^{\mathrm{D}}}\right)+\frac{w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}}{2} \tag{16}$$

$$p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}(w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}},w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}})=\frac{\varepsilon(1-\varepsilon)}{2B^{\mathrm{D}}}+D^{\mathrm{D}}+E^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}+\left(\frac{1}{2}+F^{\mathrm{D}}\right)w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}} \tag{17}$$

$$s^{\mathrm{NS}}(w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}},w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}})=\frac{2}{\theta}(D^{\mathrm{D}}+E^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}+F^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}) \tag{18}$$

将式(16)～式(18)代入式(10)，并对决策变量 τ 求一阶导并使其为 0，得到

$$\tau^{\mathrm{NS}}(w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}},w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}})=\frac{A}{k}(I^{\mathrm{D}}+L^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}+M^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}) \tag{19}$$

将式(16)～式(19)代入式(8)，然后对其求一阶偏导数，并令 $\frac{\partial\pi_{\mathrm{M}}}{\partial w_{\mathrm{n}}}=0$，$\frac{\partial\pi_{\mathrm{M}}}{\partial w_{\mathrm{r}}}=0$，最终推导出制造商的最优批发价格为

$$\begin{cases} w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}=\dfrac{\left[-\left(G^{\mathrm{D}}-J^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{n}}-N^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{r}}-\frac{2A^2}{k}L^{\mathrm{D}}I^{\mathrm{D}}\right)\right]\left(K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\frac{2A^2}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}}\right)-\left[-\left(H^{\mathrm{D}}-K^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{n}}-O^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{r}}-\frac{2A^2}{2}M^{\mathrm{D}}I^{\mathrm{D}}\right)\right]\left[2J^{\mathrm{D}}-\frac{2A^2}{k}(L^{\mathrm{D}})^2\right]}{\left(K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\frac{2A^2}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}}\right)^2-\left[2J^{\mathrm{D}}-\frac{2A^2}{k}(L^{\mathrm{D}})^2\right]\left[2O^{\mathrm{D}}-\frac{2A^2}{k}(M^{\mathrm{D}})^2\right]} \\ w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}=\dfrac{-\left(H^{\mathrm{D}}-K^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{n}}-O^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{r}}-\frac{2A^2}{k}M^{\mathrm{D}}I^{\mathrm{D}}\right)}{K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\frac{2A^2}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}}}-\dfrac{2O^{\mathrm{D}}-\frac{2A^2}{k}(M^{\mathrm{D}})^2}{K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\frac{2A^2}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}} \end{cases} \tag{20}$$

再将式(20)代回式(8)～式(11)，可进一步求解出零售商的最优销售价格、最优服务水平及再制造产品的最优回收率为

$$\begin{cases} p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}=\dfrac{1-\varepsilon}{2}\left(1+\dfrac{\varepsilon}{B^{\mathrm{D}}}\right)+\dfrac{w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}}{2} \\ p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}=\dfrac{\varepsilon(1-\varepsilon)}{2B^{\mathrm{D}}}+D^{\mathrm{D}}+E^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}+\left(\dfrac{1}{2}+F^{\mathrm{D}}\right)w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}} \\ S^{\mathrm{NS}}=\dfrac{2}{\theta}(D^{\mathrm{D}}+E^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}+F^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}) \\ \tau^{\mathrm{NS}}=\dfrac{A}{k}(I^{\mathrm{D}}+L^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{NS}}+M^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{NS}}) \end{cases} \tag{21}$$

最后,将式(20)和式(21)代入市场需求函数式(3)和式(4),可求得两种产品的最优市场需求,在此基础上,进一步将最优决策变量、最优市场需求代入式(5)~式(7)得到各主体的最优利润。

2.3.2 模式S:服务补贴

为促进再制造产品的市场推广,政府对再制造产品提供单位补贴政策。参考Deng等[20]将再制造服务作为补贴对象,并向提供该服务的零售商发放单位补贴t,在此情形下,服务补贴通过影响消费者对再制造产品的感知价值,使其效用函数发生改变。

环保型消费者:

$$\begin{cases} U_{\mathrm{g1}}=v-p_{\mathrm{n}} \\ U_{\mathrm{g2}}=v-p_{\mathrm{r}}+\theta(s+t) \end{cases} \tag{22}$$

普通消费者:

$$\begin{cases} U_{\mathrm{o1}}=v-p_{\mathrm{n}} \\ U_{\mathrm{o2}}=\varepsilon v-p_{\mathrm{r}}+\theta(s+t) \end{cases} \tag{23}$$

基于上述效用函数,可推导出新产品与再制造产品的市场需求函数分别为

$$Q_{\mathrm{n}}=(1-\delta)\left[1-\frac{p_{\mathrm{n}}-p_{\mathrm{r}}+\theta(s+t)}{1-\varepsilon}\right] \tag{24}$$

$$Q_{\mathrm{r}}=\delta(1-p_{\mathrm{r}}+\theta(s+t))+(1-\delta)\times\left[\frac{p_{\mathrm{n}}-p_{\mathrm{r}}+\theta(s+t)}{1-\varepsilon}-\frac{p_{\mathrm{r}}-\theta(s+t)}{\varepsilon}\right] \tag{25}$$

在服务补贴模式下,由于补贴主要作用于市场需求激励,制造商、零售商与第三方回收商的利润函数形式保持不变,仍分别为式(5)~式(7)。将新的市场需求函数式(24)和式(25)代入各主体利润函数式(5)~式(7),得到制造商、零售商和第三方回收商的利润表达式为

$$\begin{aligned}\pi_{\mathrm{M}}=&(w_{\mathrm{n}}-c_{\mathrm{n}})(1-\delta)\left[1-\frac{p_{\mathrm{n}}-p_{\mathrm{r}}+\theta(s+t)}{1-\varepsilon}\right]+\\&(w_{\mathrm{r}}-c_{\mathrm{r}})\left\{\delta(1-p_{\mathrm{r}}+\theta(s+t))+(1-\delta)\times\left[\frac{p_{\mathrm{n}}-p_{\mathrm{r}}+\theta(s+t)}{1-\varepsilon}-\frac{p_{\mathrm{r}}-\theta(s+t)}{\varepsilon}\right]\right\}-A\tau\times\\&\left\{(1-\delta)\left[1-\frac{p_{\mathrm{n}}-p_{\mathrm{r}}+\theta(s+t)}{1-\varepsilon}\right]+\delta[1-p_{\mathrm{r}}+\theta(s+t)]+(1-\delta)\left[\frac{p_{\mathrm{n}}-p_{\mathrm{r}}+\theta(s+t)}{1-\varepsilon}-\frac{p_{\mathrm{r}}-\theta(s+t)}{\varepsilon}\right]\right\}\end{aligned} \tag{26}$$

$$\begin{aligned}\pi_{\mathrm{R}}=&(p_{\mathrm{n}}-w_{\mathrm{n}})(1-\delta)\left[1-\frac{p_{\mathrm{n}}-p_{\mathrm{r}}+\theta(s+t)}{1-\varepsilon}\right]+\\&(p_{\mathrm{r}}-w_{\mathrm{r}})\left\{\delta[1-p_{\mathrm{r}}+\theta(s+t)]+(1-\delta)\times\left[\frac{p_{\mathrm{n}}-p_{\mathrm{r}}+\theta(s+t)}{1-\varepsilon}-\frac{p_{\mathrm{r}}-\theta(s+t)}{\varepsilon}\right]\right\}-\frac{1}{2}fs^{2}\end{aligned} \tag{27}$$

$$\begin{aligned}\pi_{\mathrm{3P}}=&A\tau\left\{(1-\delta)\left[1-\frac{p_{\mathrm{n}}-p_{\mathrm{r}}+\theta(s+t)}{1-\varepsilon}\right]+\delta[1-p_{\mathrm{r}}+\theta(s+t)]+(1-\delta)\times\left[\frac{p_{\mathrm{n}}-p_{\mathrm{r}}+\theta(s+t)}{1-\varepsilon}-\frac{p_{\mathrm{r}}-\theta(s+t)}{\varepsilon}\right]\right\}-\\&\frac{1}{2}k\tau^{2}\end{aligned} \tag{28}$$

同模式N,汽车制造商为领导者,零售商为跟随者,运用逆向求解法求出最优决策。

命题3:新产品和再制造产品的最优批发价格、销售价格,再制造服务及回收率为

$$\begin{cases} w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{SS}}=\dfrac{-\left[G^{\mathrm{D}}-J^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{n}}-N^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{r}}-K^{\mathrm{D}}\theta t-\frac{2A^{2}}{k}L^{\mathrm{D}}(I^{\mathrm{D}}-M^{\mathrm{D}}\theta t)\right]\left(K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\frac{2A^{2}}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}}\right)-\left\{-\left[H^{\mathrm{D}}-K^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{n}}-O^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{r}}-O^{\mathrm{D}}\theta t-\frac{2A^{2}}{2}M^{\mathrm{D}}(I^{\mathrm{D}}-M^{\mathrm{D}}\theta t)\right]\right\}\left[2J^{\mathrm{D}}-\frac{2A^{2}}{k}(L^{\mathrm{D}})^{2}\right]}{\left(K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\frac{2A^{2}}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}}\right)^{2}-\left[2J^{\mathrm{D}}-\frac{2A^{2}}{k}(L^{\mathrm{D}})^{2}\right]\left[2O^{\mathrm{D}}-\frac{2A^{2}}{k}(M^{\mathrm{D}})^{2}\right]} \\ w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{SS}}=\dfrac{-\left[H^{\mathrm{D}}-K^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{n}}-O^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{r}}-O^{\mathrm{D}}\theta t-\frac{2A^{2}}{k}M^{\mathrm{D}}(I^{\mathrm{D}}-M^{\mathrm{D}}\theta t)\right]}{K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\frac{2A^{2}}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}}}-\dfrac{2O^{\mathrm{D}}-\frac{2A^{2}}{k}(M^{\mathrm{D}})^{2}}{K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\frac{2A^{2}}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{SS}} \\ p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{SS}}=\dfrac{1-\varepsilon}{2}\left(1+\dfrac{\varepsilon}{B^{\mathrm{D}}}\right)+\dfrac{w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{SS}}}{2} \\ p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{SS}}=\dfrac{\varepsilon(1-\varepsilon)}{2B^{\mathrm{D}}}+D^{\mathrm{D}}+E^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{SS}}+\left(\dfrac{1}{2}+F^{\mathrm{D}}\right)w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{SS}}+\left(\dfrac{1}{2}-F^{\mathrm{D}}\right)\theta t \\ s^{\mathrm{SS}}=\dfrac{2}{\theta}(D^{\mathrm{D}}+E^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{SS}}+F^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{SS}}-F^{\mathrm{D}}\theta t) \\ \tau^{\mathrm{SS}}=\dfrac{A}{k}(I^{\mathrm{D}}+L^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{SS}}+M^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{SS}}-M^{\mathrm{D}}\theta t) \end{cases} \tag{29}$$

证明：根据逆向求解原则，零售商首先对决策变量求解一阶导并令一阶导为 0，得到

$$\frac{\partial \pi_R}{\partial p_n}=(1-\delta)\left[1-\frac{p_n-p_r+\theta(s+t)}{1-\varepsilon}\right]-\frac{1-\delta}{1-\varepsilon}(p_n-w_n)+\frac{1-\delta}{1-\varepsilon}(p_r-w_r) \tag{30}$$

$$\frac{\partial \pi_R}{\partial p_r}=\frac{1-\delta}{1-\varepsilon}(p_n-w_n)+\left\{\delta(1-p_r+\theta(s+t))+(1-\delta)\left[\frac{p_n-p_r+\theta(s+t)}{1-\varepsilon}-\frac{p_r-\theta(s+t)}{\varepsilon}\right]\right\}+(p_r-w_r)\left[-\delta+(1-\delta)\times\left(-\frac{1}{1-\varepsilon}-\frac{1}{\varepsilon}\right)\right] \tag{31}$$

$$\frac{\partial \pi_R}{\partial s}=-\frac{\theta(1-\delta)}{1-\varepsilon}(p_n-w_n)+(p_r-w_r)\times\left[\theta\delta+(1-\delta)\left(\frac{\theta}{1-\varepsilon}+\frac{\theta}{\varepsilon}\right)\right]-fs \tag{32}$$

令式(30)～式(32)均为 0，联立求解后得到零售商决策变量$(p_n^{NS},p_r^{NS},s^{NS})$关于汽车制造商决策变量函数为

$$p_n^{SS}(w_n^{SS},w_r^{SS})=\frac{1-\varepsilon}{2}\left(1+\frac{\varepsilon}{B^D}\right)+\frac{w_n^{SS}}{2} \tag{33}$$

$$p_r^{SS}(w_n^{SS},w_r^{SS})=\frac{\varepsilon(1-\varepsilon)}{2B^D}+D^D+E^Dw_n^{SS}+\left(\frac{1}{2}+F^D\right)w_r^{SS}+\left(\frac{1}{2}\theta-F^D\theta\right)t \tag{34}$$

$$s^{SS}(w_n^{SS},w_r^{SS})=\frac{2}{\theta}(D^D+E^Dw_n+F^Dw_r-F^D\theta t) \tag{35}$$

将式(33)～式(35)代入式(28)，对决策变量求解一阶导，令一阶导为 0，得到相关决策变量函数为

$$\tau^{SS}(w_n^{SS},w_r^{SS})=\frac{A}{k}(I^D+L^Dw_n^{SS}+M^Dw_r^{SS}-M^D\theta t) \tag{36}$$

将式(33)～式(36)代入式(28)，可求得汽车制造商最优决策变量，将其代回式(33)～式(36)中可得到零售商和第三方回收商的最优决策，即式(29)。证毕。

2.3.3　模式 P：销售价格补贴

为进一步激励再制造产品市场需求、引导绿色消费，政府也可对购买再制造产品的消费者实施直接销售价格补贴政策。在该补贴模式下，消费者购买再制造产品时的实际支付价格降低，基于消费者效用最大化，对其再制造产品的效用函数进行相应调整。

环保型消费者：

$$\begin{cases}U_{g1}=v-p_n\\U_{g2}=v-(p_r-t)+\theta s\end{cases} \tag{37}$$

普通消费者：

$$\begin{cases}U_{o1}=v-p_n\\U_{o2}=\varepsilon v-(p_r-t)+\theta s\end{cases} \tag{38}$$

基于上述效用函数，新产品与再制造产品的市场需求函数分别为

$$Q_n=(1-\delta)\left(1-\frac{p_n-(p_r-t)+\theta s}{1-\varepsilon}\right) \tag{39}$$

$$Q_r=\delta[1-(p_r-t)+\theta s]+(1-\delta)\times\left[\frac{p_n-(p_r-t)+\theta s}{1-\varepsilon}-\frac{(p_r-t)-\theta s}{\varepsilon}\right] \tag{40}$$

各主体的利润函数形式保持不变，仍为式(5)～式(7)。将新的需求函数式(39)与式(40)代入后，得到

$$\pi_M=(w_n-c_n)(1-\delta)\left[1-\frac{p_n-(p_r-t)+\theta s}{1-\varepsilon}\right]+(w_r-c_r)\left\{\delta[1-(p_r-t)+\theta s]+(1-\delta)\times\left[\frac{p_n-(p_r-t)+\theta s}{1-\varepsilon}-\frac{(p_r-t)-\theta s}{\varepsilon}\right]\right\}-A\tau\left\{(1-\delta)\left[1-\frac{p_n-(p_r-t)+\theta s}{1-\varepsilon}\right]+\delta[1-(p_r-t)+\theta s]+(1-\delta)\times\left[\frac{p_n-(p_r-t)+\theta s}{1-\varepsilon}-\frac{(p_r-t)-\theta s}{\varepsilon}\right]\right\} \tag{41}$$

$$\pi_R=(p_n-w_n)(1-\delta)\left[1-\frac{p_n-(p_r-t)+\theta s}{1-\varepsilon}\right]+(p_r-w_r)\left\{\delta[1-(p_r-t)+\theta s]+(1-\delta)\times\left[\frac{p_n-(p_r-t)+\theta s}{1-\varepsilon}-\frac{(p_r-t)-\theta s}{\varepsilon}\right]\right\}-\frac{1}{2}fs^2 \tag{42}$$

$$\pi_{3P}=A\tau\left\{(1-\delta)\left[1-\frac{p_n-(p_r-t)+\theta s}{1-\varepsilon}\right]+\delta[1-(p_r-t)+\theta s]+(1-\delta)\times\left[\frac{p_n-(p_r-t)+\theta s}{1-\varepsilon}-\frac{(p_r-t)-\theta s}{\varepsilon}\right]\right\}-\frac{1}{2}k\tau^2 \tag{43}$$

命题 4：销售价格补贴模式下的系统最优决策为

$$\begin{cases} w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{PS}}=\dfrac{-\left[G^{\mathrm{D}}-J^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{n}}-N^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{r}}-K^{\mathrm{D}}t-\dfrac{2A^2}{k}L^{\mathrm{D}}(I^{\mathrm{D}}-M^{\mathrm{D}}t)\right]\left(K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\dfrac{2A^2}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}}\right)-\left\{-\left[H^{\mathrm{D}}-K^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{n}}-O^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{r}}-O^{\mathrm{D}}t-\dfrac{2A^2}{2}M^{\mathrm{D}}(I^{\mathrm{D}}-M^{\mathrm{D}}t)\right]\right\}\left[2J^{\mathrm{D}}-\dfrac{2A^2}{k}(L^{\mathrm{D}})^2\right]}{(K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\dfrac{2A^2}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}})^2-\left[2J^{\mathrm{D}}-\dfrac{2A^2}{k}(L^{\mathrm{D}})^2\right]\left[2O^{\mathrm{D}}-\dfrac{2A^2}{k}(M^{\mathrm{D}})^2\right]} \\ w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{PS}}=\dfrac{-\left[H^{\mathrm{D}}-K^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{n}}-O^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{r}}-O^{\mathrm{D}}t-\dfrac{2A^2}{k}M^{\mathrm{D}}(I^{\mathrm{D}}-M^{\mathrm{D}}t)\right]}{K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\dfrac{2A^2}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}}}-\dfrac{2O^{\mathrm{D}}-\dfrac{2A^2}{k}(M^{\mathrm{D}})^2}{K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\dfrac{2A^2}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{PS}} \\ p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{PS}}=\dfrac{1-\varepsilon}{2}\left(1+\dfrac{\varepsilon}{B^{\mathrm{D}}}\right)+\dfrac{w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{PS}}}{2} \\ p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{PS}}=\dfrac{\varepsilon(1-\varepsilon)}{2B^{\mathrm{D}}}+D^{\mathrm{D}}+E^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{PS}}+\left(\dfrac{1}{2}+F^{\mathrm{D}}\right)w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{PS}}-\left(-\dfrac{1}{2}+F^{\mathrm{D}}\right)t \\ s^{\mathrm{PS}}=\dfrac{2}{\theta}(D^{\mathrm{D}}+E^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{PS}}+F^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{PS}}-F^{\mathrm{D}}t) \\ \tau^{\mathrm{PS}}=\dfrac{A}{k}(I^{\mathrm{D}}+L^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{PS}}+M^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{PS}}-M^{\mathrm{D}}t) \end{cases} \tag{44}$$

证明:根据逆向求解法,首先对零售商利润的决策变量求解一阶导,得到

$$\frac{\partial\pi_{\mathrm{R}}}{\partial p_{\mathrm{n}}}=(1-\delta)\left[1-\frac{p_{\mathrm{n}}-(p_{\mathrm{r}}-t)+\theta s}{1-\varepsilon}\right]-\frac{1-\delta}{1-\varepsilon}(p_{\mathrm{n}}-w_{\mathrm{n}})+\frac{1-\delta}{1-\varepsilon}(p_{\mathrm{r}}-w_{\mathrm{r}}) \tag{45}$$

$$\frac{\partial\pi_{\mathrm{R}}}{\partial p_{\mathrm{r}}}=\frac{1-\delta}{1-\varepsilon}(p_{\mathrm{n}}-w_{\mathrm{n}})+\left\{\delta[1-(p_{\mathrm{r}}-t)+\theta s]+(1-\delta)\left[\frac{p_{\mathrm{n}}-(p_{\mathrm{r}}-t)+\theta s}{1-\varepsilon}-\frac{(p_{\mathrm{r}}-t)-\theta s}{\varepsilon}\right]\right\}+(p_{\mathrm{r}}-w_{\mathrm{r}})\left[-\delta+(1-\delta)\times\left(-\frac{1}{1-\varepsilon}-\frac{1}{\varepsilon}\right)\right] \tag{46}$$

$$\frac{\partial\pi_{\mathrm{R}}}{\partial s}=-\frac{\theta(1-\delta)}{1-\varepsilon}(p_{\mathrm{n}}-w_{\mathrm{n}})+(p_{\mathrm{r}}-w_{\mathrm{r}})\times\left[\theta\delta+(1-\delta)\left(\frac{\theta}{1-\varepsilon}+\frac{\theta}{\varepsilon}\right)\right]-fs \tag{47}$$

令式(45)~式(47)为0,联立求解得到

$$p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{PS}}(w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{PS}},w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{PS}})=\frac{1-\varepsilon}{2}\left(1+\frac{\varepsilon}{B^{\mathrm{D}}}\right)+\frac{w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{PS}}}{2} \tag{48}$$

$$p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{PS}}(w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{PS}},w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{PS}})=\frac{\varepsilon(1-\varepsilon)}{2B^{\mathrm{D}}}+D^{\mathrm{D}}+E^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{PS}}+\left(\frac{1}{2}+F^{\mathrm{D}}\right)w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{PS}}+\left(\frac{1}{2}-F^{\mathrm{D}}\right)t \tag{49}$$

$$s^{\mathrm{PS}}(w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{PS}},w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{PS}})=\frac{2}{\theta}(D^{\mathrm{D}}+E^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{PS}}+F^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{PS}}-F^{\mathrm{D}}t) \tag{50}$$

将式(48)~式(50)代入式(43),对其决策变量求解得到

$$\tau^{\mathrm{PS}}(w_{\mathrm{n}},w_{\mathrm{r}})=\frac{A}{k}(I^{\mathrm{D}}+L^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{PS}}+M^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{PS}}-M^{\mathrm{D}}t) \tag{51}$$

将式(48)~式(51)代入式(41),可求得汽车制造商最优决策变量,将其代回式(48)~式(51)中可得到式(44)。证毕。

2.3.4 模式R:回收价格补贴

为激励回收商提升回收率,政府可对其回收行为提供单位补贴t。在此模式下,消费者效用函数与"无政府补贴"情形相同,零售商和第三方回收商的利润不受补贴影响,制造商的利润函数调整为

$$\pi_{\mathrm{M}}=(w_{\mathrm{n}}-c_{\mathrm{n}})Q_{\mathrm{n}}+(w_{\mathrm{r}}-c_{\mathrm{r}})Q_{\mathrm{r}}-(A-t)\tau(Q_{\mathrm{n}}+Q_{\mathrm{r}}) \tag{52}$$

将无补贴下的需求函数式(3)与式(4)代入利润函数式(6)和式(7)及式(52)中,得到

$$\pi_{\mathrm{M}}=(w_{\mathrm{n}}-c_{\mathrm{n}})(1-\delta)\left(1-\frac{p_{\mathrm{n}}-p_{\mathrm{r}}+\theta s}{1-\varepsilon}\right)+(w_{\mathrm{r}}-c_{\mathrm{r}})\left[\delta(1-p_{\mathrm{r}}+\theta s)+(1-\delta)\left(\frac{p_{\mathrm{n}}-p_{\mathrm{r}}+\theta s}{1-\varepsilon}-\frac{p_{\mathrm{r}}-\theta s}{\varepsilon}\right)\right]-(A-t)\tau\left\{(1-\delta)\left(1-\frac{p_{\mathrm{n}}-p_{\mathrm{r}}+\theta s}{1-\varepsilon}\right)+\delta(1-p_{\mathrm{r}}+\theta s)+(1-\delta)\left[\frac{p_{\mathrm{n}}-p_{\mathrm{r}}+\theta s}{1-\varepsilon}-\frac{p_{\mathrm{r}}-\theta s}{\varepsilon}\right]\right\} \tag{53}$$

$$\pi_{\mathrm{R}}=(p_{\mathrm{n}}-w_{\mathrm{n}})(1-\delta)\left(1-\frac{p_{\mathrm{n}}-p_{\mathrm{r}}+\theta s}{1-\varepsilon}\right)+(p_{\mathrm{r}}-w_{\mathrm{r}})\left[\delta(1-p_{\mathrm{r}}+\theta s)+(1-\delta)\times\left(\frac{p_{\mathrm{n}}-p_{\mathrm{r}}+\theta s}{1-\varepsilon}-\frac{p_{\mathrm{r}}-\theta s}{\varepsilon}\right)\right]-\frac{1}{2}fs^2 \tag{54}$$

$$\pi_{3\mathrm{P}}=A\tau\left\{(1-\delta)\left(1-\frac{p_{\mathrm{n}}-p_{\mathrm{r}}+\theta s}{1-\varepsilon}\right)+\delta(1-p_{\mathrm{r}}+\theta s)+(1-\delta)\left[\frac{p_{\mathrm{n}}-p_{\mathrm{r}}+\theta s}{1-\varepsilon}-\frac{p_{\mathrm{r}}-\theta s}{\varepsilon}\right]\right\}-\frac{1}{2}k\tau^2 \tag{55}$$

命题5:回收价格补贴下的系统最优决策为

$$\begin{cases} w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{RS}}=\dfrac{-\left[G^{\mathrm{D}}-J^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{n}}-N^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{r}}-\dfrac{2A(A-t)}{k}L^{\mathrm{D}}I^{\mathrm{D}}\right]\left[K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\dfrac{2A(A-t)}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}}\right]-\left\{-\left[H^{\mathrm{D}}-K^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{n}}-O^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{r}}-\dfrac{2A(A-t)}{k}M^{\mathrm{D}}I^{\mathrm{D}}\right]\right\}\left[2J^{\mathrm{D}}-\dfrac{2A(A-t)}{k}(L^{\mathrm{D}})^{2}\right]}{\left(K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\dfrac{2A^{2}}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}}\right)^{2}-\left[2J^{\mathrm{D}}-\dfrac{2A^{2}}{k}(L^{\mathrm{D}})^{2}\right]\left[2O^{\mathrm{D}}-\dfrac{2A^{2}}{k}(M^{\mathrm{D}})^{2}\right]} \\ w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{RS}}=\dfrac{-\left[H^{\mathrm{D}}-K^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{n}}-O^{\mathrm{D}}c_{\mathrm{r}}-\dfrac{2A(A-t)}{k}M^{\mathrm{D}}I^{\mathrm{D}}\right]}{K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\dfrac{2A(A-t)}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}}}-\dfrac{2O^{\mathrm{D}}-\dfrac{2A(A-t)}{k}(M^{\mathrm{D}})^{2}}{K^{\mathrm{D}}+N^{\mathrm{D}}-\dfrac{2A(A-t)}{k}L^{\mathrm{D}}M^{\mathrm{D}}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{RS}} \\ p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{RS}}=\dfrac{1-\varepsilon}{2}\left(1+\dfrac{\varepsilon}{B^{\mathrm{D}}}\right)+\dfrac{w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{RS}}}{2} \\ p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{RS}}=\dfrac{\varepsilon(1-\varepsilon)}{2B^{\mathrm{D}}}+D^{\mathrm{D}}+E^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{RS}}+\left(\dfrac{1}{2}+F^{\mathrm{D}}\right)w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{RS}} \\ s^{\mathrm{RS}}=\dfrac{2}{\theta}(D^{\mathrm{D}}+E^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{RS}}+F^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{RS}}) \\ \tau^{\mathrm{RS}}=\dfrac{A}{k}(I^{\mathrm{D}}+L^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{RS}}+M^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{RS}}) \end{cases} \tag{56}$$

证明：根据逆向求解法，对零售商决策变量进行一阶求导，得到

$$p_{\mathrm{n}}^{\mathrm{RS}}(w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{RS}},w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{RS}})=\frac{1-\varepsilon}{2}\left(1+\frac{\varepsilon}{B^{\mathrm{D}}}\right)+\frac{w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{RS}}}{2} \tag{57}$$

$$p_{\mathrm{r}}^{\mathrm{RS}}(w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{RS}},w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{RS}})=\frac{\varepsilon(1-\varepsilon)}{2B^{\mathrm{D}}}+D^{\mathrm{D}}+E^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{RS}}+\left(\frac{1}{2}+F^{\mathrm{D}}\right)w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{RS}} \tag{58}$$

$$s^{\mathrm{RS}}(w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{RS}},w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{RS}})=\frac{2}{\theta}(D^{\mathrm{D}}+E^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{RS}}+F^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{RS}}) \tag{59}$$

$$\tau^{\mathrm{RS}}(w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{RS}},w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{RS}})=\frac{A}{k}(I^{\mathrm{D}}+L^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{RS}}+M^{\mathrm{D}}w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{RS}}) \tag{60}$$

将式(57)～式(60)代入式(53)，对 $w_{\mathrm{n}}^{\mathrm{RS}}$、$w_{\mathrm{r}}^{\mathrm{RS}}$ 求一阶导，令其为 0 并联立，可得到最优解，即式(56)。证毕。

3　模型数值分析与讨论

为揭示合理参数范围内关键参数(服务系数和政府补贴)对各决策变量的影响，并重点分析关键参数的阈值效应，运用 MATLAB 进行数值分析。参数设置主要参考文献[6,26]及行业实际情况，具体取值如下：$A=0.5$，$\varepsilon=0.7$，$\delta=0.55$，$c_{\mathrm{n}}=0.3$，$c_{\mathrm{r}}=0.25$，$f=1$，$k=0.3$。

3.1　服务系数 θ 的影响

在闭环供应链中，零售商设定的再制造产品服务系数 θ，会直接作用于消费者对再制造产品的质量感知与支付意愿，进而影响再制造产品的市场需求规模和供应链上下游企业的最优决策。

3.1.1　对服务水平 s 的影响

如图 3 所示，服务系数 θ 与服务水平 s 呈正相关。θ 越大，消费者对再制造产品服务的敏感度与重视程度越高，直接促使零售商增加服务投入，进而提高再制造产品的服务水平。值得注意的是，随着 θ 的不断增大，s 的增长速度也加快，表明零售商的服务投入对服务水平的产出效率随着 θ 的增大而提升。

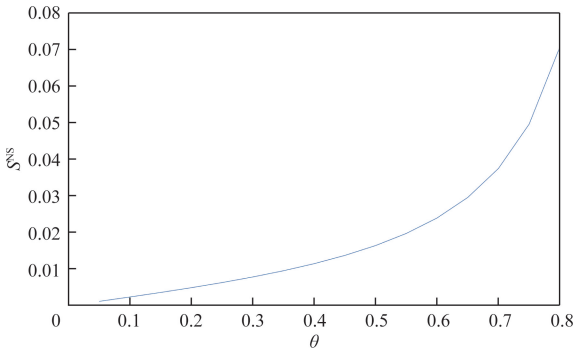


图 3　服务系数 θ 对服务水平的影响

3.1.2　对市场需求(Q_{n}，Q_{r})的影响

如图 4 所示，服务系数 θ 对新产品和再制造产品的市场需求存在差异化调节效应。其中，再制造产品的市场需求 Q_{r} 与 θ 呈正相关，而新产品需求 Q_{n} 与 θ 呈负相关。随着 θ 增大，零售商将主动提升再制造产品服务水平，消费者对再制造产品质量会更加信任，更倾向于购买再制造产品，从而带动市场总需求增长。当服务系数增大到临界值($\theta>0.75$)时，再制造产品市场销量将超过新产品，可见，零售商通过提升再制造产品服务水平可有效扩大其市场份额。

3.1.3　对产品定价(p_{n}，p_{r}，w_{n}，w_{r})影响

如图 5 所示，服务系数 θ 对产品定价的影响存在差异，$\theta\in(0,0.6)$时，两类产品定价基本稳定。当 $\theta>0.6$ 时，两类产品的定价均随 θ 的增大而上升，

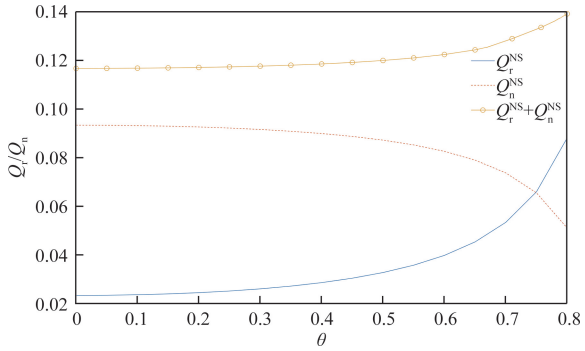


图 4　服务系数 θ 对市场需求的影响

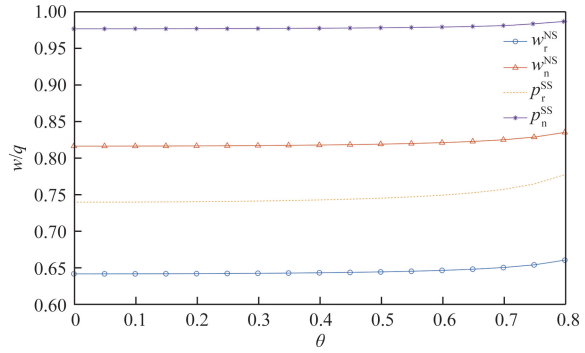


图 5　服务系数 θ 对定价的影响

且再制造产品价格增幅更显著。结合图 3 和图 4 可知,在 $\theta<0.6$ 时,服务水平提升有限,再制造产品需求拉动不足;当 $\theta>0.6$ 时,服务水平的快速增长带动再制造产品需求激增,零售商为弥补高额服务成本,会提高再制造产品售价。同时,制造商因再制造产品市场份额扩大同步上调批发价格。

3.1.4　对回收率 τ 的影响

如图 6 所示,服务系数 θ 的提升会促进回收率 τ 的增加。零售商为再制造产品提供的售后服务,会有效激励消费者参与回收。同时,结合图 4,再制造产品市场份额的扩大直接提升可回收品的基数,两者共同推动整体回收率的提高。

3.1.5　对主体利润(π_M,π_R,π_{3P})影响

如图 7 所示,当 $\theta\in(0,0.6)$ 时,各主体利润和

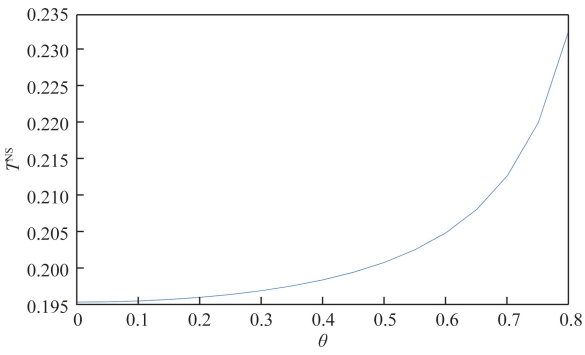


图 6　服务系数 θ 对回收率的影响

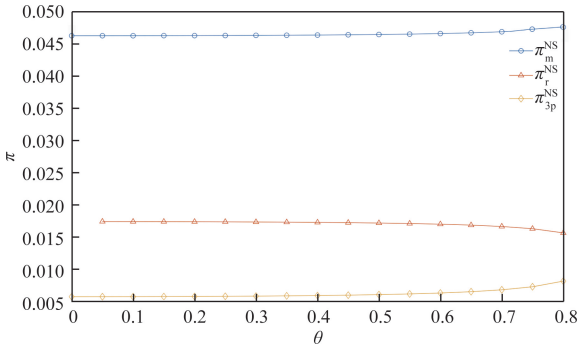


图 7　服务系数 θ 对利润的影响

定价无显著变化。结合图 3～图 6 可知,当 $\theta>0.6$ 时,θ 增大带动总销售量、回收率提升,进而提高制造商和第三方回收商利润,但零售商需独自承担服务水平提升带来的高额成本,导致其利润下降。

综上分析可知,服务系数 θ 对闭环供应链的定价、需求及回收率均有正向影响,且能提升制造商与第三方回收商的利润。但零售商需独自承担服务成本,当服务水平过高时,其利润易出现下滑。因此,在推行通过提升服务水平来扩大再制造市场份额的策略时,需设计合理的成本分摊或收益共享机制以保障零售商的利润。

3.2　不同补贴对闭环供应链的影响

由此可知,零售商独自承担服务成本可能导致其利润受损。政府补贴是弥补其成本的有效政策。接下来比较销售价格补贴、服务补贴与回收价格补贴三类政策的实施效果。参数设定为 $\varepsilon=0.5$,$\theta=0.5$,并重点分析补贴额度 $t\in(0,0.5)$ 的影响。

3.2.1　补贴对市场需求(Q_n,Q_r)的影响

图 8 呈现不同补贴对两类产品市场需求的影响。所有补贴均能提升再制造产品需求,在 $t\in(0,0.15)$ 时,销售价格补贴下的 Q_r 超过 Q_n;在 $t>0.25$ 时,服务补贴下的 Q_r 会超过 Q_n;当政府提供回收价格补贴,仅在 $t>0.5$ 时,$Q_r>Q_n$。表明补贴提升再

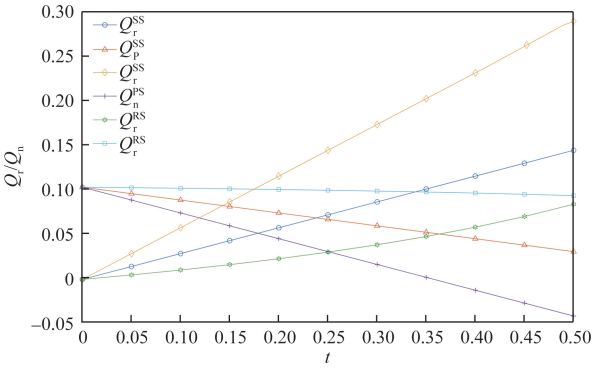


图 8　补贴对市场需求的影响

制造产品市场份额的政策效果排序为：销售价格补贴＞服务补贴＞回收价格补贴。

3.2.2　补贴对产品定价的影响

图 9 和图 10 分别为不同补贴对两类产品的批发价格和销售价格的影响。服务补贴与销售价格补贴均能提高两类产品的价格，其中，销售价格补贴的价格涨幅最大；回收价格补贴则导致产品价格小幅下降。

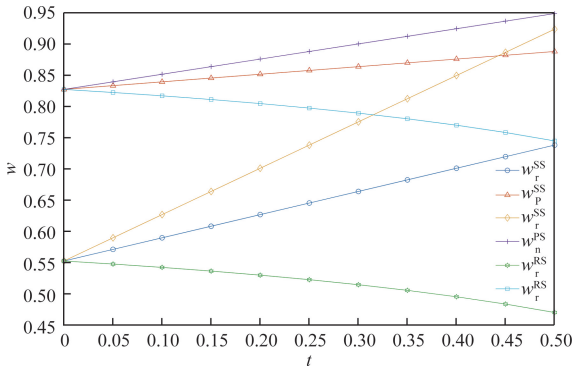


图 9　补贴对批发价格的影响

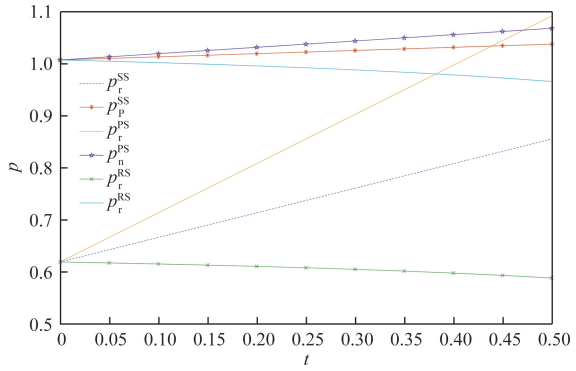


图 10　补贴对销售价格的影响

3.2.3　对服务水平 s 与回收率 τ 的影响

如图 11 所示，所有补贴均能提升服务水平，消费者对再制造服务水平的敏感度越高，服务补贴与回收价格补贴的拉动效果越显著。图 12 表明，回收率 τ 主要取决于两类产品总需求。销售价格补贴因带动需求最大，回收率最高；服务补贴与回收价格补贴较低时，其回收率接近，后者超阈值后非线性加速增长，最终反超服务补贴。

3.2.4　补贴对各主体利润的影响

图 13(a)显示不同补贴对制造商利润的影响。销售价格补贴效果最优；在 $t\in(0,0.33)$ 内，回收价格补贴优于服务补贴；当 $t>0.33$ 时则反之。制造商补贴效果排序随补贴的增大，由“销售价格补贴＞回收价格补贴＞服务补贴”转为“销售价格补贴＞服务补贴＞回收价格补贴”。图 13(b)和

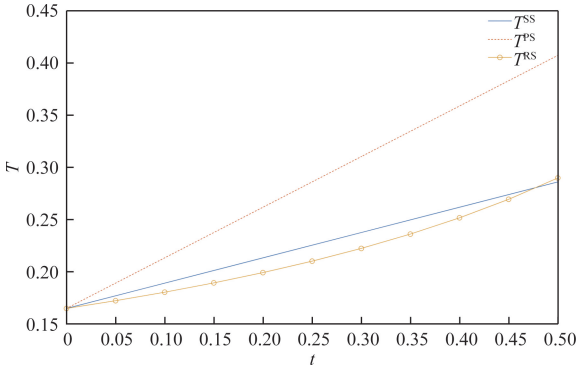


图 11　补贴对服务水平 s 的影响

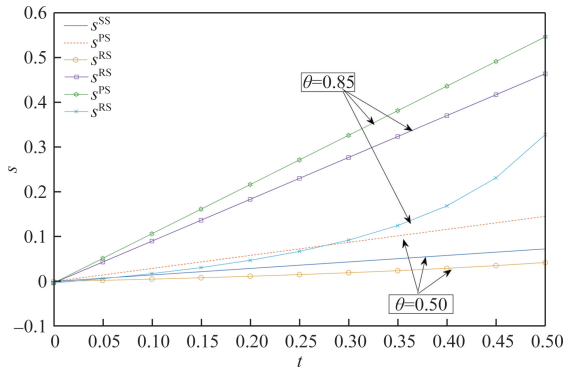


图 12　补贴对回收率 τ 的影响

图 13(c)显示，补贴对零售商利润影响呈现 U 形，销售价格补贴与服务补贴下零售商利润均先降后升；当 $\theta=0.85$ 时，服务补贴对零售商利润的促进作用显著增强，与销售价格补贴效果趋于接近。图 13(d)显示，前期销售价格补贴对第三方回收商利润影响最优，服务补贴次之，回收价格补贴最差。当 $t>0.48$ 后，回收价格补贴反超服务补贴。

3.2.5　补贴对供应链整体利润的影响

图 14 显示政府补贴对闭环供应链整体利润的影响，当 $\theta=0.5$ 时，效果排序为销售价格补贴＞回收价格补贴＞服务补贴；当 $\theta=0.85$（消费者服务敏感度高）时，转为销售价格补贴＞服务补贴＞回收价格补贴。

综上分析可知，不同类型政府补贴对闭环供应链各主体以及系统整体利润的影响各不相同。想要快速提升再制造产品市场份额和供应链整体利润，销售价格补贴是直接且有效的政策工具；当市场中消费者对服务质量较为敏感时，服务补贴则显示出更大的潜力和长效性；而在回收体系尚不完善、回收率亟待提升的情形下，回收价格补贴可以作为辅助工具，尤其是在补贴额度较高时，对回收环节的激励效果更为显著。因此，政府在制定相关

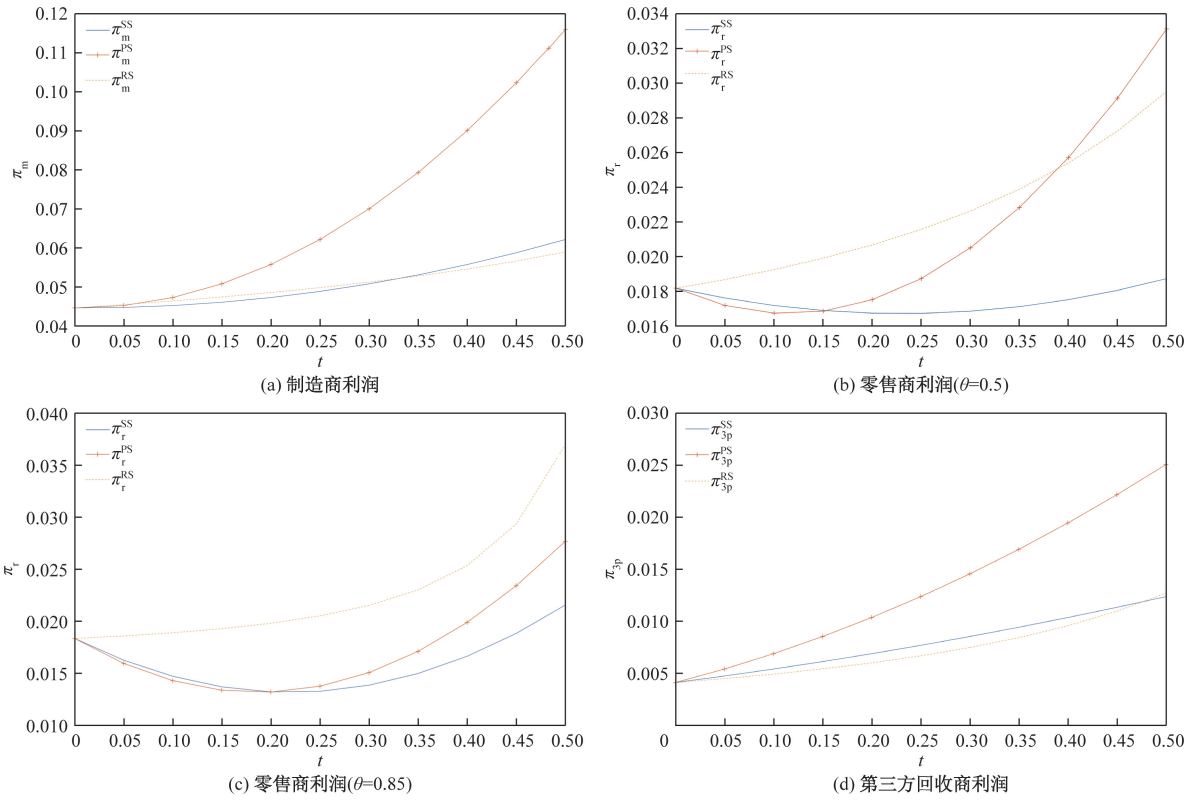


图 13　补贴对各主体利润的影响

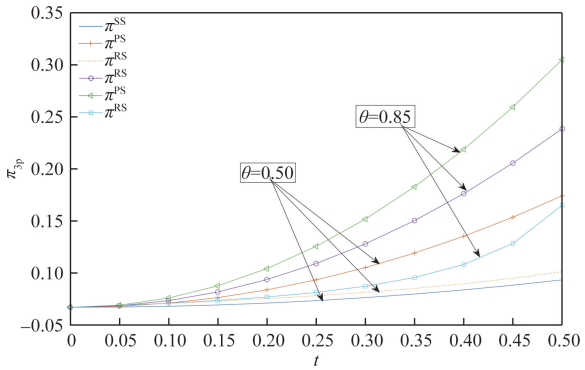


图 14　补贴对供应链整体利润的影响

补贴政策时，需要结合具体政策目标及市场特征，科学合理地选择并组合各类补贴工具。

4　结论与展望

综合考虑消费者异质性与再制造服务的影响，构建含制造商、零售商和第三方回收商的闭环供应链模型，分析服务系数对供应链各环节决策及利润的作用，探讨不同政府补贴政策的影响，并通过数值仿真明确参数变化规律，为产业高质量发展提供理论与管理支撑。得出以下研究结论。

(1)服务系数 θ 是闭环供应链定价、市场需求与利润分配的关键调控因素。当 θ 超过临界值时，零售商为满足市场需求会增加再制造产品服务投入，进而扩大再制造产品市场份额，带动制造商和第三方回收商利润提升；但因服务成本由零售商独自承担，其利润在 θ 超过一定阈值后会出现下滑。建议制造商建立协同机制，通过成本共担缓解零售商压力，配套收益共享协议，激励零售商优化服务，实现供应链协同增效。

(2)政府补贴策略的选择是一个动态匹配的过程。销售价格补贴、服务补贴、回收价格补贴及不同补贴额度的设置，都会对闭环供应链各主体利润、产品定价、市场需求及回收率产生不同影响。从整体实施效果来看，在一般市场条件下，销售价格补贴能够直接降低消费者的购买成本，可有效拉动市场需求，进而推动各主体利润增长，其综合效益最为显著；当消费者对再制造服务的敏感度达到某一阈值($\theta=0.85$)时，服务补贴的长期激励作用会更加突出，有助于激励零售商提升服务水平、增强消费者认可度，从而稳步扩大市场份额；而在回收环节存在明显短板、需要重点突破回收端瓶颈时，加大回收价格补贴力度往往能够取得更为直接的效果。因此，政府应结合市场特征与政策目标，实施差异化或组合式补贴策略，并根据市场变化动态调整，以提升政策实施的效果，促进闭环供应链各方协同发展，实现产业的可持续发展。

仅探讨政府补贴对再制造产品市场的直接影响，未涉及供应链内部价格契约、服务成本分担契约等协调机制，未来将重点研究政府参与下的多主体协同优化策略。

参考文献

[1] 中国物资再生协会. 我国再制造产业异军突起站上风口[EB/OL]. [2026-05-27]. http://www.crra.com.cn/detail/11951.

[2] 郭春香，万科，黄海珍. 消费者细分下考虑差别权重补贴的闭环供应链定价研究[J]. 工业工程，2022，25(3)：28-38.

[3] ZHU X D，DING L，GUO Y J，et al. Decision and coordination analysis of extended warranty service in a remanufacturing closed-loop supply chain with dual price sensitivity under different channel power structures[J]. Rairo-Operations Research，2022，56：1149-1166.

[4] HAZEN B T，BOONE C A，WANG Y，et al. Perceived quality of remanufactured products：construct and measure development[J]. Journal of Cleaner Production，2016，40 (2)：33-40.

[5] HONG X P，WANG L，GONG Y M，et al. What is the role of value-added service in a remanufacturing closed-loop supply chain? [J]. International Journal of Production Research，2020，58(11)：3342-3361.

[6] 谢佳铮，牟立峰，郑斌，等. 考虑提供基础质保服务的供应链再制造定价策略研究[J]. 数学的实践与认识，2019，49(14)：23-35.

[7] 夏西强，朱庆华，路梦圆. 基于三种再制造模式政府补贴对再制造影响研究[J]. 运筹与管理，2023，32(6)：159-165.

[8] 楼振凯，楼旭明，侯福均. 考虑政府补贴的新产品与再制造产品定价模型[J]. 控制与决策，2022，37(1)：196-204.

[9] SAVASKAN R C，BHATTACHARYA S，VAN WASSENHOVE L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing[J]. Management Science，2004，50(2)：239-252.

[10] TALEIZADEH A A，ALIZADEH-BASBAN N，NIAKI S T A. A closed-loop supply chain considering carbon reduction，quality improvement effort and return policy under two remanufacturing scenarios[J]. Journal of Cleaner Production，2019，232：1230-1250.

[11] SHEKARIAN E，MARANDI A，MAJAVA J. Dual-channel remanufacturing closed-loop supply chains under carbon footprint and collection competition[J]. Sustainable Production and Consumption，2021，28：1050-1075.

[12] 曹柬，杨晓丽，吴思思，等. 考虑再制造成本的闭环供应链回收渠道决策[J]. 工业工程与管理，2020，25(1)：152-160.

[13] 刘新民，蔺康康，王垒. 异质性消费者满意度对绿色产品定价决策的影响分析[J]. 工业技术经济，2018，37(5)：145-152.

[14] XU L，PENG Q Y，CHEN J H，et al. Government subsidies in manufacturing and remanufacturing with consumer segment and heterogeneous demand[J]. Transactions E：Industrial Engineering，2021，28 (3)：1817-1829.

[15] 程红亚，孟丽君，扈裕晴，等. 基于消费者异质性需求的闭环供应链再制造授权模式研究[J]. 工业工程，2021，24(6)：140-149.

[16] 高鹏，杜建国，聂佳佳，等. 消费者后悔预期对再制造供应链运作模式的影响[J]. 计算机集成制造系统，2020，26(5)：1434-1444.

[17] 王道平，丁婧一，周玉. 不同权力结构下考虑消费者后悔预期的再制造供应链定价研究[J]. 系统科学与数学，2023，43(1)：114-128.

[18] JENA S K，SARMAH S P. Price and service co-opetiton under uncertain demand and condition of used items in a remanufacturing system[J]. International Journal of Production Economics，2016，173：1-21.

[19] 陈伟达，倪方君. 碳限额下基于再制造品服务模式的混合制造/再制造生产决策研究[J]. 工业工程与管理，2018，23(3)：9-15.

[20] DENG L R，LI W，LIU Z L. Different subsidies' impact on equilibrium decision-making of closed-loop supply chain[J]. Journal of Industrial Engineering and Management，2014，7(5)：1061-1075.

[21] 高举红，邱小文，刘潇. 再制造供应链政府双重补贴的策略研究及影响因素分析[J]. 运筹与管理，2025，34(4)：34-41.

[22] 王建，邵晓峰，刘冠美，等. 考虑营销投入水平的再制造决策与政府补贴研究[J/OL]. 中国管理科学，1-19[2026-05-27]. https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2025.0461.

[23] CHU H，ZHANG W，ZHU L. The impact of government policies on the coordination of power battery closed-loop supply chain[J]. Journal of Cleaner Production，2025，519：145961.

[24] LIU B，LIU X，ZHOU T，et al. Research on supply chain optimization under different government subsidy strategies in the remanufacturing-insurance combination system[J]. Expert Systems with Applications，2026，304：130726.

[25] 黄辉，周祥，张娟. 政府补贴下的新能源车双向双渠道闭环供应链的定价[J]. 系统工程，2020，38(4)：69-77.

[26] 寇军. 制造商与零售商同时提供延保服务的协调策略--基于产品服务供应链背景[J]. 华东经济管理，2016，30(7)：140-145.

Research on Government Subsidy Strategies for Closed-loop Supply Chain Considering Remanufacturing Service

WAN Fengjiao[1,2], QIN Jiahui[3]

(1. School of Business, Jianghan University, Wuhan 430056, China; 2. Manufacturing Industry Development Research Center on Wuhan City Circle, Wuhan 430056, China; 3. Kingfa Technology Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: To compare the impact of different government subsidy strategies on the remanufacturing industry, a closed-loop supply chain model was constructed, consisting of a manufacturer, a retailer and a third-party recycler to distinguish between environmentally conscious consumers and ordinary consumers, and incorporate retailer-provided remanufacturing services. Based on a Stackelberg game model, equilibrium decisions were analyzed under four scenarios such as no subsidy, service subsidy, sales price subsidy and recycling price subsidy. focusing on the effects of the service coefficient and different subsidy types on the closed-loop supply chain. Numerical analysis shows that increasing the service coefficient can effectively expand the market share of remanufactured products and improve the recycling rate. However, when the service coefficient exceeds a certain threshold, the retailer suffers profit losses due to bearing the service cost alone. The three subsidy policies exert heterogeneous impacts on the profits of different supply chain members. Sales price subsidy demonstrates stronger effectiveness in rapidly enhancing market share and overall supply chain profit. When consumers exhibit high service sensitivity, service subsidy becomes a more favorable option. Recycling price subsidy requires a higher subsidy intensity to generate a significant incentive effect on the recycling process. A theoretical basis and managerial insights are provided for enterprises to optimize remanufacturing service strategies and for the government to formulate precise subsidy policies.

Keywords: consumer heterogeneity; remanufacturing services; closed-loop supply chain; government subsidy; supply chain decision