doi:10.16112/j.cnki.53-1223/n.202501030004
引用格式:郭金森,于春艳,周永务.资金约束下考虑制造商公平关切的低碳供应链联合减排决策[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2026,51(3):216-230.
Citation:GUO Jinsen,YU Chunyan,ZHOU Yongwu. Joint Emission Reduction Decisions in a Low-Carbon Supply Chain Considering Manufacturer Fairness Concerns under Financial Constraints[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science),2026,51(3):216-230.

资金约束下考虑制造商公平关切的低碳供应链联合减排决策

郭金森[1],于春艳[1],周永务[2]
(1. 河南师范大学 商学院,河南 新乡 453007; 2. 华南理工大学 工商管理学院,广东 广州 510640)

摘要:为探究资金约束及企业公平关切行为对低碳供应链联合减排决策的影响,针对一个低碳供应商与一个存在公平关切行为的低碳制造商组成的供应链,基于博弈理论,分别构建无资金约束以及双边资金约束"链外+链内"组合融资下的联合减排决策模型,研究了不同环境下供应链各主体最优减排决策和收益,并对结果进行比较分析.研究发现,不同资金环境及组合融资模式下,制造商公平关切会降低供应链碳减排水平、产品售价、市场需求以及供应商收益,但可能提高制造商收益.与制造商碳减排水平相比,供应商碳减排水平在无资金约束以及双边资金约束"供应商银行借贷+贸易信贷"组合融资下更高,但在"制造商银行借贷+预付款"组合融资模式下的高低受提前支付批发价敏感系数的影响.与无资金约束情形相比,供应链双边资金约束对供应商收益产生消极影响,但对制造商可能产生积极影响;与"制造商银行借贷+预付款"组合融资模式相比,供应商通常偏爱选择"供应商银行借贷+贸易信贷"组合融资模式,而制造商对两种组合融资模式的选择偏好受推迟/提前支付批发价敏感系数的影响.

关键词:双边资金约束;低碳供应链;公平关切;联合减排;组合融资
中图分类号:X322;F274　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1007-855X(2026)03-0216-15

Joint Emission Reduction Decisions in a Low-Carbon Supply Chain Considering Manufacturer Fairness Concerns under Financial Constraints

GUO Jinsen[1],YU Chunyan[1],ZHOU Yongwu[2]
(1. Business School,Henan Normal University,Xinxiang 453007,Henan,China;
2. School of Business Administration,South China University of Technology,Guangzhou 510640,China)

Abstract:To explore the impact of capital constraints and firms' fairness concerns on joint emission reduction decisions in low-carbon supply chains,based on game theory,we construct the joint emission reduction game models for a low-carbon supply chain consisting of a supplier and a fairness-concerned manufacturer under the financing model with no financial constraints and bilateral financial constraints with external-internal combina-

收稿日期:2025-01-03. **基金项目**:国家社会科学基金重点项目(23AGL006).
作者简介:郭金森(1986-),男,博士,教授,博士生导师.主要研究方向:物流与供应链管理.
E-mail:2015076@htu.edu.cn

tion financing. The optimal emission reduction decisions and benefits of each party under different environments are studied, and the results are compared and analyzed. Research has found that under different environments and combination financing models, the manufacturer's fairness concern can reduce the level of carbon emissions reduction, product prices, market demand, and supplier profits, but may increase the manufacturer's utility. Compared with the carbon reduction level of the manufacturer, the carbon reduction level of the supplier is higher under the combination financing of "supplier bank lending + trade credit" without financial constraints and bilateral financial constraints. However, the level under the combination financing model of "manufacturer bank loan + advance payment" is affected by the sensitivity coefficient of advance payment wholesale price. Compared with the situation without financial constraints, bilateral financial constraints in the supply chain have a negative impact on supplier revenue, but may have a positive impact on the manufacturer. Compared with the combination financing model of "manufacturer bank loan + advance payment", the supplier usually prefers to choose the "supplier bank lending + trade credit" model, and the manufacturer's preference for the two combination financing models is influenced by the sensitivity coefficient of delayed/advance payment wholesale price.

Keywords: bilateral financial constraints; low - carbon supply chain; fairness concern; joint emission reduction; combination financing

0 引 言

"双碳"目标下我国制造企业纷纷进行绿色转型升级,持续加大对低碳产品的投资与开发[1]. 与此同时,在供应链管理环节,制造企业也加大了对其供应商产品的低碳要求,例如长安汽车在其供应商选择上由以往注重成本和质量要求,开始逐步加大对其产品"低碳"的要求;而宝马集团要求其供应商也参与到其低碳产品生产和研发中,力争到 2030 年实现其供应链环节中减排 20%. 因碳减排需要投入大量资金用于设备升级和技术更新,导致进行低碳减排生产的制造商和其上游供应商常常面临资金不足困境. 为解决企业资金困境,激励企业加大绿色减排投资,银行为企业提供了有效的绿色金融借贷支持,根据央行数据显示,截止 2024 年末我国绿色贷款余额已近 36 万亿元. 然而,对部分中小企业来说,"融资难、融资贵"的问题依然突出,此时供应链内部商业信用融资(贸易信贷或预付款)成为其解决资金困境的有效途径. 当上下游企业同时进行减排投资(联合减排)而导致双方均面临资金困境时,若其中一方企业获得链外银行绿色信贷资金,而另一方没有获得时,获得链外银行绿色信贷资金的企业会有足够的动机进一步通过链内商业信用(贸易信贷或预付款)的形式解决对方减排投资资金不足的困境,即此时低碳供应链采用"链外 + 链内"组合融资模式可有效促进上下游企业的联合减排. 行为学研究表明,供应链成员通常具有公平关切行为,会通过调整自身运营决策来提升自身公平感受,并导致低碳供应链联合减排及组合融资决策变得更加复杂,更具挑战性[2]. 因此,低碳供应链存在资金约束,尤其是双边资金约束时,研究不同组合融资模式,且企业存在公平关切行为下低碳供应链最优联合减排决策问题具有极其重要的现实意义.

目前资金约束环境下低碳供应链运营决策问题研究主要基于单边企业存在资金困境来展开. 针对上游企业存在资金困境情形,Qin 等[3]、杨浩雄等[4]以及 Zong 等[5]分别探究了链外银行借贷、链内商业信用(预付款/贸易信贷)融资模式下制造商减排决策和收益. 而与银行借贷方式对比,张川等[6]研究指出提前支付更能提升低碳生产制造商的利润,且制造商在提前支付回购方式下获利最多. An 等[7]、Wang 等[8]探究了碳限额与交易政策对制造商减排和融资模式偏好的影响. 在上述研究基础上,郭志芳等[9]分析了制造商公平关切对其产品定价、减排投入和收益的影响,并指出制造商公平关切会影响预付款融资的占优策略. 而针对银行贷款、零售商预付款和股权融资模式,邹清明等[10]研究了制造商过度自信对低碳供应链运作策略和融资方法选择的影响. 针对存在资金约束的下游企业,黄瑞芬等[11]分析了存在资金约束零售商的低碳供应链优化策略,并通过设计收益共享契约改善了供应链运作绩效. Wu 等[12]和张克勇等[13]探究了零售商资金约束时低碳供应链各主体对链内和链外不同融资模式的选择偏好. 上述研究未考虑低碳供应链双边资金约束情形,曹细玉等[14]和魏洁等[15]进一步研究了当上下游企业同时存在资金约束时,低碳

制造商的最优减排和定价问题.

综上所述,目前相关研究主要探究了仅上游或下游企业存在资金约束时,在单一融资模式下低碳供应链单一主体减排策略问题,较少研究上下游企业同时存在资金约束时,在“链外+链内”组合融资模式下低碳供应链上下游双主体联合减排策略问题,更鲜有探讨制造商公平关切行为对低碳供应链联合减排决策的影响等问题. 因此,本文通过构建无资金约束以及双边资金约束组合融资下的供应链联合减排博弈模型,探究了制造商公平关切、消费者低碳偏好等对供应链运营绩效的影响,并比较分析不同市场条件下供应商和制造商的融资模式选择偏好.

1 基本模型

针对一个低碳供应商与一个存在公平关切行为的低碳制造商构成的供应链,因上下游企业双双进行低碳投资(联合减排)导致其同时存在资金不足的问题,此时低碳供应链考虑运用“链外+链内”组合融资模式来解决其资金困境. 参考 Liu 等[16]、林强等[17]的研究,可得低碳供应链需求函数如式(1):

$$d = a - p + \beta(\tau_s + \tau_m) \tag{1}$$

其中:a 表示潜在的市场规模,p 为制造商低碳产品售价,β 为消费者低碳产品偏好系数,τ_s 和 τ_m 分别为供应商和制造商的碳减排水平,其减排成本分别为$\frac{\eta_s\tau_s^2}{2}$和$\frac{\eta_m\tau_m^2}{2}$,$\eta_s>0$ 和 $\eta_m>0$ 为碳减排成本系数[18-20]. 参考孙嘉轶等[21]的研究,令 $\eta_s=\eta_m=\eta$.

本部分首先构建无资金约束下低碳供应链联合减排决策模型,可得:

供应商利润:

$$\pi_s = (w - c_s)[a - p + \beta(\tau_s + \tau_m)] - \frac{\eta\tau_s^2}{2} \tag{2}$$

制造商利润:

$$\pi_m = (p - w - c_m)[a - p + \beta(\tau_s + \tau_m)] - \frac{\eta\tau_m^2}{2} \tag{3}$$

其中:c_s 和 c_m 分别为供应商和制造商的单位产品生产成本,w 为产品批发价. 参考曹柬等[22]和韩同银等[23]的研究,当制造商存在公平关切行为时,其决策目标是最大化自身效用,效用函数为:$u_m=\pi_m-\lambda(\pi_s-\pi_m)$,其中,$\lambda>0$ 为制造商的公平关切系数.

因此,可得公平关切制造商的效用为:

$$u_m = (p - w - c_m)[a - p + \beta(\tau_s + \tau_m)] - \frac{\eta\tau_m^2}{2} - \lambda(\pi_s - \pi_m) \tag{4}$$

企业决策顺序为:首先,进行碳减排水平决策,供应商和制造商分别决定各自的减排水平 τ_s 和 τ_m. 然后,进行价格决策,供应商先决策批发价 w,而制造商依据观察到的 w 来制定销售价 p. 采用逆向求解法计算.

1.1 制造商产品售价

由式(4)可得,制造商效用函数是关于其产品售价的凹函数,从而可得:

$$p = \frac{(1+\lambda)[a + c_m + \beta(\tau_m + \tau_s)] + w(1+2\lambda) - \lambda c_s}{2(1+\lambda)} \tag{5}$$

1.2 供应商产品批发价

将式(5)代入式(2),可得供应商利润函数是关于其产品批发价的凹函数,从而可得:

$$w = \frac{(1+\lambda)[a - c_m + \beta(\tau_m + \tau_s)] + c_s(1+3\lambda)}{2(1+2\lambda)} \tag{6}$$

参考唐书传等[19]、Ji 等[24]的研究可得,低碳供应链运营实践中企业减排成本因子 η 不能太小,本部分假设 $\eta > \frac{\beta^2(4\lambda+3)}{8(1+2\lambda)}$. 将式(5)和式(6)分别代入式(2)和式(4),可得始终有供应商利润函数和制造商

效用函数分别是关于其碳减排水平的凹函数,从而可得定理 1.

定理 1　无资金约束下,低碳供应链最优决策分别为:

$$\begin{cases}\tau_s^{NN}=\dfrac{2\beta(1+\lambda)(a-c_m-c_s)}{8\eta(1+2\lambda)-\beta^2(3+4\lambda)}, & \tau_m^{NN}=\dfrac{\beta(1+2\lambda)(a-c_m-c_s)}{8\eta(1+2\lambda)-\beta^2(3+4\lambda)}\\ w^{NN}=c_s+\dfrac{4\eta(1+\lambda)(a-c_m-c_s)}{8\eta(1+2\lambda)-\beta^2(3+4\lambda)}, & p^{NN}=c_m+c_s+\dfrac{6\eta(1+2\lambda)(a-c_m-c_s)}{8\eta(1+2\lambda)-\beta^2(3+4\lambda)}\end{cases} \tag{7}$$

供应链需求和各主体收益分别为:

$$\begin{cases}d^{NN}=\dfrac{2\eta(1+2\lambda)(a-c_m-c_s)}{8\eta(1+2\lambda)-\beta^2(3+4\lambda)}, & \pi_s^{NN}=\dfrac{2\eta(1+\lambda)(a-c_m-c_s)^2[4\eta(1+2\lambda)-\beta^2(1+\lambda)]}{[8\eta(1+2\lambda)-\beta^2(3+4\lambda)]^2}\\ u_m^{NN}=\dfrac{\eta(1+\lambda)(a-c_m-c_s)^2[8\eta(1+2\lambda)^2-\beta^2]}{2[8\eta(1+2\lambda)-\beta^2(3+4\lambda)]^2}\end{cases} \tag{8}$$

分析无资金约束下,制造商公平关切对供应链各主体碳减排水平、产品定价、需求以及收益的影响,可得性质 1.

性质 1　$\dfrac{\partial\tau_s^{NN}}{\partial\lambda}<0,\dfrac{\partial\tau_m^{NN}}{\partial\lambda}<0,\dfrac{\partial w^{NN}}{\partial\lambda}<0,\dfrac{\partial p^{NN}}{\partial\lambda}<0,\dfrac{\partial d^{NN}}{\partial\lambda}<0,\dfrac{\partial\pi_s^{NN}}{\partial\lambda}<0$;当 $\eta<\eta_1$ 时,$\dfrac{\partial u_m^{NN}}{\partial\lambda}<0$,否则,$\dfrac{\partial u_m^{NN}}{\partial\lambda}>0$.

其中,$\eta_1=\dfrac{\beta^2[2+8\lambda^3+18\lambda^2+13\lambda+(1+\lambda)\sqrt{64\lambda^4+160\lambda^3+180\lambda^2+68\lambda+9}]}{8(1+2\lambda)^3}$.

由性质 1 易得,在企业资金充足环境下,供应链各主体碳减排水平、产品售价、需求以及供应商利润均与制造商公平关切程度成反比,即随着制造商公平关切程度的增大,将通过降低自身碳减排努力水平的方式减少自身碳减排成本投资,以减弱相对对方来说自身可能投入较多碳减排投资而引起的不公平感受. 伴随着制造商碳减排水平的降低,供应商碳减排水平也不断下降. 碳减排水平降低导致产品绿色度水平下降,消费者对产品价值评价水平降低,供应商和制造商将通过降低产品批发价和销售价的方式来刺激需求. 但产品售价下降引起消费者需求增加的正效应被碳减排水平降低导致消费者需求减少的负效应抵消,消费者需求不断下降. 对供应商来说,碳减排水平下降节约碳减排成本支出,并引起利润增加的正效应被批发价和需求双下降导致利润减少的负效应抵消,供应商利润不断减少. 而对制造商来说,当碳减排成本因子相对较小($\eta<\eta_1$)时,制造商所得效用随着其公平关切程度的增加也不断下降,但当碳减排成本因子相对较大($\eta>\eta_1$)时,随着制造商公平关切程度的增加,其碳减排水平下降节约碳减排成本支出,并引起其效用增大的正效应有效抵消了批发价和需求双下降导致其效用减小的负效应,此时制造商所得效用不断增大.

推论 1　供应链资金充足时,供应商更愿意与无公平关切或低公平关切的制造商进行联合减排.

由推论 1 可得,低碳供应链上下游企业联合减排时,制造商公平关切降低了供应链双方的碳减排水平,导致供应链碳减排价值目标和供应商利润价值目标双“受挫”. 因此,供应商更愿意与无公平关切或低公平关切的制造商进行联合减排.

分析无资金约束下,消费者低碳偏好对供应链各主体减排决策、产品定价、需求以及收益的影响,可得性质 2.

性质 2　$\dfrac{\partial\tau_s^{NN}}{\partial\beta}>0,\dfrac{\partial\tau_m^{NN}}{\partial\beta}>0,\dfrac{\partial w^{NN}}{\partial\beta}>0,\dfrac{\partial p^{NN}}{\partial\beta}>0,\dfrac{\partial d^{NN}}{\partial\beta}>0,\dfrac{\partial\pi_s^{NN}}{\partial\beta}>0,\dfrac{\partial u_m^{NN}}{\partial\beta}>0.$

由性质 2 可得,无资金约束下,消费者低碳偏好对低碳供应链运营绩效产生了积极作用,不仅有效提高了供应链双方的降碳水平,也有效提高了供应链中低碳产品的需求和各方收益. 因此,随着消费者绿色环保理念的提升,低碳供应链企业应进一步加大对产品的低碳开发和绿色宣传,在提升自身产品低碳水平的同时,也进一步提高消费者对低碳产品的敏感度和选择偏好,从而有效促进市场中低碳产品消费的量(数量)质(绿色)齐升,也能更好地实现企业的销售和利润目标.

分析无资金约束下,碳减排成本因子对供应链减排决策、产品定价、需求以及收益的影响,可得性质 3.

性质3 $\frac{\partial \tau_s^{NN}}{\partial \eta}<0,\frac{\partial \tau_m^{NN}}{\partial \eta}<0,\frac{\partial w^{NN}}{\partial \eta}<0,\frac{\partial p^{NN}}{\partial \eta}<0,\frac{\partial d^{NN}}{\partial \eta}<0,\frac{\partial \pi_s^{NN}}{\partial \eta}<0,\frac{\partial u_m^{NN}}{\partial \eta}<0.$

性质3表明,无资金约束下,减排成本因子对低碳供应链运营绩效产生了消极作用,不仅降低了供应链双方的碳减排水平,也削减了供应链中低碳产品的需求和各方收益.因此,进行碳减排投资决策的供应商和制造商,应充分认识到碳减排成本因子对其自身以及整个供应链的不利影响,在减排投资过程中不仅要注重碳减排投资规模,更要注重碳减排投资效率,通过关键减排技术研发、关键减排设备应用、关键减排人员管理等方法,有效提升减排投资效率,降低减排成本因子,从而在一定的减排水平目标下,实现更低的减排成本支出,有效提升各主体及整个供应链的减排绩效.

对比无资金约束下,供应商和制造商的碳减排水平高低,可得命题1.

命题1 无资金约束下低碳供应链联合减排时,相对制造商减排水平,供应商的减排水平更高($\tau_s^{NN}>\tau_m^{NN}$).

由命题1可得,无资金约束下低碳供应链联合减排时,供应链应将管理重点向制造商倾斜,通过供应商分摊制造商减排成本、加大政府对制造商的减排补贴力度等方式刺激制造商减排动机和水平的提高,促进上下游企业减排水平的平衡稳定.

在低碳供应链运营实践中,当上下游企业均进行低碳减排时,可能同时存在资金约束问题,此时考虑低碳供应链运用"链外+链内"组合融资模式来解决其资金困境.因此,下文将分别探究双边资金约束环境下,低碳供应链分别采用"供应商银行借贷+贸易信贷"组合融资模式以及"制造商银行借贷+预付款"组合融资模式时,供应链各主体最优减排决策问题,并对比分析在不同条件下各主体对不同组合融资模式的选择偏好.

2 "供应商银行借贷+贸易信贷"组合融资模式

此情形下,低碳供应链中联合减排的供应商(初始自有资金为B_s)和制造商(初始自有资金为B_m)同时存在资金约束困境.低碳供应商通过向银行借贷(借贷利率为r_{bs})的形式解决其资金不足问题,贷款金额为$L_s=c_sd+\frac{\eta\tau_s^2}{2}-B_s$.而为了促进供应链联合减排,供应商允许制造商部分货款延期支付(贸易信贷),从而一并解决了制造商减排活动中资金不足的问题.考虑到资金的时间价值以及激励制造商用其全部自有资金支付前期的部分货款,延期支付产品的批发价提高到$w_1=we^k$,其中,$k>0$为延期支付批发价敏感系数[25].从而,可得:

供应商利润:

$$\pi_s=B_m+we^k\left[a-p+\beta(\tau_s+\tau_m)-\frac{B_m}{w}\right]-c_s[a-p+\beta(\tau_s+\tau_m)]-\frac{\eta\tau_s^2}{2}-L_sr_{bs} \tag{9}$$

制造商利润:

$$\pi_m=(p-c_m)[a-p+\beta(\tau_s+\tau_m)]-B_m-we^k\left[a-p+\beta(\tau_s+\tau_m)-\frac{B_m}{w}\right]-\frac{\eta\tau_m^2}{2} \tag{10}$$

公平关切制造商的效用:

$$u_m=(p-c_m)[a-p+\beta(\tau_s+\tau_m)]-B_m-we^k\left[a-p+\beta(\tau_s+\tau_m)-\frac{B_m}{w}\right]-\frac{\eta\tau_m^2}{2}-\lambda(\pi_s-\pi_m) \tag{11}$$

企业决策顺序与无资金约束情形下一致,并仍采用逆向求解法进行计算.

2.1 制造商产品售价

由式(11)可得,制造商效用函数是关于其产品售价的凹函数,从而可得:

$$p=\frac{(1+\lambda)[a+c_m+\beta(\tau_m+\tau_s)]-\lambda c_s(1+r_{bs})+we^k(1+2\lambda)}{2(1+\lambda)} \tag{12}$$

2.2 供应商产品批发价

将式(12)代入式(9),可得供应商的利润函数是关于其产品批发价的凹函数,从而可得:

$$w=\frac{(1+\lambda)[a-c_m+\beta(\tau_m+\tau_s)]+c_s(1+r_{bs})(1+3\lambda)}{2e^k(1+2\lambda)} \tag{13}$$

因碳减排成本因子 η 不能太小,本部分假设 $\eta>\dfrac{\beta^2(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})}{8(1+2\lambda)(1+r_{bs})}$. 将式(12)和(13)分别代入式(9)和式(11),可得始终有供应商利润函数和制造商效用函数分别是关于其碳减排水平的凹函数,从而可得定理 2.

定理 2　"供应商银行借贷 + 贸易信贷"组合融资下,低碳供应链最优决策分别为:

$$\begin{cases}\tau_s^{YN}=\dfrac{2\beta(1+\lambda)(a-c_m-c_s-c_sr_{bs})}{8\eta(1+2\lambda)(1+r_{bs})-\beta^2(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})}\\ \tau_m^{YN}=\dfrac{\beta(1+2\lambda)(1+r_{bs})(a-c_m-c_s-c_sr_{bs})}{8\eta(1+2\lambda)(1+r_{bs})-\beta^2(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})}\\ w^{YN}=\dfrac{e^{-k}(1+r_{bs})[4\eta(1+\lambda)(a-c_m)+4c_s\eta(1+r_{bs})(1+3\lambda)-\beta^2c_s(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})]}{8\eta(1+2\lambda)(1+r_{bs})-\beta^2(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})}\\ w_1^{YN}=\dfrac{(1+r_{bs})[4\eta(1+\lambda)(a-c_m)+4c_s\eta(1+r_{bs})(1+3\lambda)-\beta^2c_s(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})]}{8\eta(1+2\lambda)(1+r_{bs})-\beta^2(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})}\\ p^{YN}=\dfrac{2\eta(1+2\lambda)(1+r_{bs})(3a+c_m+c_s+c_sr_{bs})-\beta^2(c_m+c_s+c_sr_{bs})(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})}{8\eta(1+2\lambda)(1+r_{bs})-\beta^2(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})}\end{cases} \tag{14}$$

供应链需求和各主体收益分别为:

$$\begin{cases}d^{YN}=\dfrac{2\eta(1+2\lambda)(1+r_{bs})(a-c_m-c_s-c_sr_{bs})}{8\eta(1+2\lambda)(1+r_{bs})-\beta^2(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})}\\ \pi_s^{YN}=\dfrac{2\eta(1+\lambda)(1+r_{bs})(a-c_m-c_s-c_sr_{bs})^2[4\eta(1+2\lambda)(1+r_{bs})-\beta^2(1+\lambda)]}{[8\eta(1+2\lambda)(1+r_{bs})-\beta^2(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})]^2}-B_m(e^k-1)+B_sr_{bs}\\ u_m^{YN}=\dfrac{\eta(1+\lambda)(1+r_{bs})(a-c_m-c_s-c_sr_{bs})^2\psi}{2[8\eta(1+2\lambda)(1+r_{bs})-\beta^2(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})]^2}+B_m(e^k-1)(1+2\lambda)-\lambda B_sr_{bs}\end{cases} \tag{15}$$

其中,$\psi=(1+2\lambda)^2(1+r_{bs})(8\eta-\beta^2)+4\lambda\beta^2(1+\lambda)$.

分析此模式下,制造商公平关切对低碳供应链的影响,可得性质 4.

性质 4　$\dfrac{\partial\tau_s^{YN}}{\partial\lambda}<0,\dfrac{\partial\tau_m^{YN}}{\partial\lambda}<0,\dfrac{\partial w^{YN}}{\partial\lambda}<0,\dfrac{\partial w_1^{YN}}{\partial\lambda}<0,\dfrac{\partial p^{YN}}{\partial\lambda}<0,\dfrac{\partial d^{YN}}{\partial\lambda}<0,\dfrac{\partial\pi_s^{YN}}{\partial\lambda}<0$. 当 $B_m>B_{m1}$ 时,$\dfrac{\partial u_m^{YN}}{\partial\lambda}>0$,否则,$\dfrac{\partial u_m^{YN}}{\partial\lambda}<0$. 其中,$\Phi_1=\dfrac{\eta(1+r_{bs})(a-c_m-c_s-c_sr_{bs})^2(\xi_0\xi_1-4\xi_2)}{2[8\eta(1+2\lambda)(1+r_{bs})-\beta^2(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})]^3}$,$B_{m1}=\dfrac{B_sr_{bs}-\Phi_1}{2(e^k-1)}$,$\xi_0=(1+2\lambda)(8\eta-\beta^2)(1+r_{bs})(5+6\lambda)+4\beta^2(1+\lambda)(1+3\lambda)$,$\xi_1=8\eta(1+2\lambda)(1+r_{bs})-\beta^2(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})$,$\xi_2=(1+\lambda)[8\eta(1+r_{bs})-\beta^2(2+r_{bs})][(8\eta-\beta^2)(1+r_{bs})(1+2\lambda)^2+4\beta^2\lambda(1+\lambda)]$.

由性质 4 可得,此模式下,制造商公平关切对供应链各主体决策和收益的影响与无资金约束情形下类似,这里就不再赘述.

推论 2　双边资金约束"供应商银行借贷 + 贸易信贷"组合融资模式下,供应商仍然更愿意与无公平关切或低公平关切的制造商进行联合减排.

分析此模式下,消费者低碳偏好和减排成本因子对低碳供应链的影响,可得性质 5.

性质 5　1) $\dfrac{\partial\tau_s^{YN}}{\partial\beta}>0,\dfrac{\partial\tau_m^{YN}}{\partial\beta}>0,\dfrac{\partial w^{YN}}{\partial\beta}>0,\dfrac{\partial w_1^{YN}}{\partial\beta}>0,\dfrac{\partial p^{YN}}{\partial\beta}>0,\dfrac{\partial d^{YN}}{\partial\beta}>0,\dfrac{\partial\pi_s^{YN}}{\partial\beta}>0,\dfrac{\partial u_m^{YN}}{\partial\beta}>0$;

2) $\dfrac{\partial\tau_s^{YN}}{\partial\eta}<0,\dfrac{\partial\tau_m^{YN}}{\partial\eta}<0,\dfrac{\partial w^{YN}}{\partial\eta}<0,\dfrac{\partial w_1^{YN}}{\partial\eta}<0,\dfrac{\partial p^{YN}}{\partial\eta}<0,\dfrac{\partial d^{YN}}{\partial\eta}<0,\dfrac{\partial\pi_s^{YN}}{\partial\eta}<0,\dfrac{\partial u_m^{YN}}{\partial\eta}<0$.

性质5表明,双边资金约束下“供应商银行借贷+贸易信贷”组合融资有效解决了企业资金约束困境,消费者低碳偏好及减排成本因子对供应链的影响与无资金约束情形下类似,这里就不再赘述.因此,双边资金约束环境下,当消费者越来越关注并偏爱选择低碳产品时,供应链企业有足够的动机通过“链外+链内”组合融资模式来解决自身资金不足困境,并通过加大碳减排投资力度,提升碳减排效率等方式,有效提高产品绿色低碳水平以获取更大的市场需求和更高的销售利润.

分析此模式下,企业初始自有资金规模对低碳供应链的影响,可得性质6.

性质6 1) $\frac{\partial \tau_s^{YN}}{\partial B_s}=\frac{\partial \tau_m^{YN}}{\partial B_s}=\frac{\partial w^{YN}}{\partial B_s}=\frac{\partial w_1^{YN}}{\partial B_s}=\frac{\partial p^{YN}}{\partial B_s}=\frac{\partial d^{YN}}{\partial B_s}=0,\frac{\partial \pi_s^{YN}}{\partial B_s}>0,\frac{\partial u_m^{YN}}{\partial B_s}<0;$

2) $\frac{\partial \tau_s^{YN}}{\partial B_m}=\frac{\partial \tau_m^{YN}}{\partial B_m}=\frac{\partial w^{YN}}{\partial B_m}=\frac{\partial w_1^{YN}}{\partial B_m}=\frac{\partial p^{YN}}{\partial B_m}=\frac{\partial d^{YN}}{\partial B_m}=0,\frac{\partial \pi_s^{YN}}{\partial B_m}<0,\frac{\partial u_m^{YN}}{\partial B_m}>0.$

由性质6可得,“供应商银行借贷+贸易信贷”组合融资下,低碳供应链各主体最优运作决策和需求不受自身及对方初始自有资金的影响,但其收益受到不同程度的影响.供应商初始自有资金的增多,减弱了其对银行资金的依赖,借贷资金及其利息支出减少,进而提高了自身收益.但此时具有公平关切的制造商通过对比自身与供应商所得利润的变化,会因自身利润分配比例下降而感到不公平,并导致其所得效用下降.制造商初始资金的增多,减弱了其对供应商贸易信贷契约的依赖,批发产品的整体货款成本支出下降(延期支付产品的批发价较高),在提高制造商收益的同时削弱了供应商借助贸易信贷增利的能力,供应商收益减少.

对比此模式下,供应商和制造商的碳减排水平高低,可得命题2.

命题2 “供应商银行借贷+贸易信贷”组合融资下,相对制造商减排水平,供应商的减排水平更高($\tau_s^{YN}>\tau_m^{YN}$).

由命题2可得,低碳供应链上下游企业借助“供应商银行借贷+贸易信贷”组合融资,能有效的解决供应链双边资金约束问题,促进链条上下游企业的联合减排.此时,低碳供应链与无资金约束情形下的管理侧重点类似,需要加强对下游制造企业补贴或支持力度,激励其以供应商的减排水平为标的来提高自身减排水平,促进整个供应链减排水平的均衡提升.

3 “制造商银行借贷+预付款”组合融资模式

此情形下,同时存在资金约束的联合减排供应商(初始自有资金为B_s)和制造商(初始自有资金为B_m)中,制造商采取向银行贷款(贷款利率为r_{bm})的形式解决其资金不足问题,贷款金额为$L_m=c_sd+\frac{\eta\tau_s^2}{2}-B_s+w\left[d-\frac{c_sd+\frac{\eta\tau_s^2}{2}-B_s}{we^{-k}}\right]+c_md+\frac{\eta\tau_m^2}{2}-B_m$.与此同时,制造商通过预付款形式一并解决了上游供应商减排活动中的资金困境.考虑到资金时间价值,供应商对预付款货物的批发价降低为$w_1=we^{-k}$,其中,$k>0$为提前支付批发价敏感系数[25].从而可得:

供应商利润:

$$\pi_s=c_sd+\frac{\eta\tau_s^2}{2}-B_s+w\left[d-\frac{c_sd+\frac{\eta\tau_s^2}{2}-B_s}{we^{-k}}\right]-c_sd-\frac{\eta\tau_s^2}{2} \tag{16}$$

制造商利润:

$$\pi_m=(p-c_m)[a-p+\beta(\tau_s+\tau_m)]-\left(c_sd+\frac{\eta\tau_s^2}{2}-B_s\right)-w\left[d-\frac{c_sd+\frac{\eta\tau_s^2}{2}-B_s}{we^{-k}}\right]-\frac{\eta\tau_m^2}{2}-L_mr_{bm} \tag{17}$$

公平关切制造商的效用:

$$u_m=(p-c_m)d-\left(c_sd+\frac{\eta\tau_s^2}{2}-B_s\right)-w\left[d-\frac{c_sd+\frac{\eta\tau_s^2}{2}-B_s}{we^{-k}}\right]-\frac{\eta\tau_m^2}{2}-L_mr_{bm}-\lambda(\pi_s-\pi_m)\tag{18}$$

企业决策顺序与无资金约束情形下一致,并仍采用逆向求解法进行计算.

3.1 制造商产品售价

由式(18)可得,制造商的效用函数是关于其产品售价的凹函数,从而可得:

$$p=\frac{(1+\lambda)[a+c_m+c_s+\beta(\tau_m+\tau_s)]+(1+\lambda)r_{bm}[c_m+c_s-(c_se^k-w)]-(1+2\lambda)(c_se^k-w)}{2(1+\lambda)}\tag{19}$$

3.2 供应商产品批发价

将式(19)代入式(16),可得供应商的利润函数是关于其产品批发价的凹函数,从而可得:

$$w=\frac{(1+\lambda)[a+\beta(\tau_m+\tau_s)]+\lambda(c_m+c_s)}{2(2\lambda+r_{bm}+\lambda r_{bm}+1)}-\frac{c_m+c_s}{2}+c_se^k\tag{20}$$

因减排成本因子不能太小,本部分假设 $\eta>\dfrac{2\beta^2(1+r_{bm})(1+\lambda)+\beta^2e^k(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})}{8e^k(1+r_{bm})(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})}$. 将式(19)和式(20)代入式(16)和式(18),可得供应商利润和制造商效用函数分别是关于其碳减排水平的凹函数,可得定理 3.

定理 3　“制造商银行借贷 + 预付款”组合融资下,低碳供应链最优决策分别为:

$$\begin{cases}\tau_s^{MN}=\dfrac{2\beta(1+r_{bm})(1+\lambda)[a-(c_m+c_s)(1+r_{bm})]}{e^k(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})[8\eta(1+r_{bm})-\beta^2]-2\beta^2(1+r_{bm})(1+\lambda)}\\ \tau_m^{MN}=\dfrac{\beta e^k(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})[a-(c_m+c_s)(1+r_{bm})]}{e^k(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})[8\eta(1+r_{bm})-\beta^2]-2\beta^2(1+r_{bm})(1+\lambda)}\\ w^{MN}=\dfrac{4\eta e^k(1+r_{bm})(1+\lambda)[a-(c_m+c_s)(1+r_{bm})]}{e^k(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})[8\eta(1+r_{bm})-\beta^2]-2\beta^2(1+r_{bm})(1+\lambda)}+e^kc_s\\ w_1^{MN}=\dfrac{4\eta(1+r_{bm})(1+\lambda)[a-(c_m+c_s)(1+r_{bm})]}{e^k(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})[8\eta(1+r_{bm})-\beta^2]-2\beta^2(1+r_{bm})(1+\lambda)}+c_s\\ p^{MN}=\dfrac{6\eta e^k(1+r_{bm})(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})[a-(1+r_{bm})(c_s+c_m)]}{e^k(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})[8\eta(1+r_{bm})-\beta^2]-2\beta^2(1+r_{bm})(1+\lambda)}+(1+r_{bm})(c_s+c_m)\end{cases}\tag{21}$$

供应链需求和各主体收益分别为:

$$\begin{cases}d^{MN}=\dfrac{2\eta e^k(1+r_{bm})(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})[a-(1+r_{bm})(c_s+c_m)]}{e^k(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})[8\eta(1+r_{bm})-\beta^2]-2\beta^2(1+r_{bm})(1+\lambda)}\\ \pi_s^{MN}=\dfrac{2\eta e^k\zeta_0(1+\lambda)(1+r_{bm})^2[a-(c_m+c_s)(1+r_{bm})]^2}{[e^k(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})[8\eta(1+r_{bm})-\beta^2]-2\beta^2(1+r_{bm})(1+\lambda)]^2}+(e^k-1)B_s\\ u_m^{MN}=\dfrac{\eta(1+\lambda)(1+r_{bm})[a-(1+r_{bm})(c_s+c_m)]^2\zeta_1}{2[e^k(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})[8\eta(1+r_{bm})-\beta^2]-2\beta^2(1+r_{bm})(1+\lambda)]^2}+B_mr_{bm}(1+\lambda)-B_s\nu\end{cases}\tag{22}$$

其中,$\zeta_0=4\eta e^k(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})-\beta^2(1+\lambda)$,$\nu=(e^k-1)(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})$,$\zeta_1=e^{2k}(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})^2[8\eta(1+r_{bm})-\beta^2]+4\beta^2(1+r_{bm})(1+\lambda)[\lambda e^k+(e^k-1)(1+r_{bm})(1+\lambda)]$.

分析此模式下,制造商公平关切对低碳供应链的影响,可得性质 7.

性质 7　$\dfrac{\partial\tau_s^{MN}}{\partial\lambda}<0,\dfrac{\partial\tau_m^{MN}}{\partial\lambda}<0,\dfrac{\partial w^{MN}}{\partial\lambda}<0,\dfrac{\partial w_1^{MN}}{\partial\lambda}<0,\dfrac{\partial p^{MN}}{\partial\lambda}<0,\dfrac{\partial d^{MN}}{\partial\lambda}<0,\dfrac{\partial\pi_s^{MN}}{\partial\lambda}<0$;当 $B_m>B_{m2}$时,$\dfrac{\partial u_m^{MN}}{\partial\lambda}>0$,否则,$\dfrac{\partial u_m^{MN}}{\partial\lambda}<0$. 其中:

$$B_{m2}=\frac{B_s(e^k-1)(2+r_{bm})-\Phi_2}{r_{bm}},$$

$$\Phi_2=\frac{\eta(1+r_{bm})(a-c_m-c_s-c_m r_{bm}-c_s r_{bm})^2[\nu_1(\xi_3+\xi_4)-2\xi_5\xi_6]}{2\{e^k(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})[8\eta(1+r_{bm})-\beta^2]-2\beta^2(1+r_{bm})(1+\lambda)\}^3},$$

$$\nu_1=e^k(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})(8\eta+8\eta r_{bm}-\beta^2)-2\beta^2(1+r_{bm})(1+\lambda),$$

$$\xi_3=e^{2k}(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})(5+3r_{bm}+6\lambda+3\lambda r_{bm})[8\eta(1+r_{bm})-\beta^2],$$

$$\xi_4=4\beta^2(1+r_{bm})(1+\lambda)[(1+3\lambda)e^k+3(e^k-1)(1+r_{bm})(1+\lambda)],$$

$$\xi_5=e^k(2+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})[8\eta(1+r_{bm})-\beta^2]-2\beta^2(1+r_{bm})(1+\lambda),$$

$$\xi_6=e^{2k}(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})^2[8\eta(1+r_{bm})-\beta^2]+4\beta^2(1+r_{bm})(1+\lambda)[\lambda e^k+(e^k-1)(1+r_{bm})(1+\lambda)].$$

由性质7可得,双边资金约束“制造商银行借贷+预付款”组合融资下,制造商公平关切对低碳供应链中企业碳减排水平、批发价、产品售价、需求以及供应商利润产生负向影响,但制造商所得效用在一定条件下可能会增加.

推论3 双边资金约束“制造商银行借贷+预付款”组合融资下,供应商仍然更愿意与无公平关切或低公平关切的制造商进行联合减排.

分析此模式下,消费者低碳偏好和减排成本因子对低碳供应链的影响,可得性质8.

性质8 1) $\frac{\partial\tau_s^{MN}}{\partial\beta}>0,\frac{\partial\tau_m^{MN}}{\partial\beta}>0,\frac{\partial w^{MN}}{\partial\beta}>0,\frac{\partial w_1^{MN}}{\partial\beta}>0,\frac{\partial p^{MN}}{\partial\beta}>0,\frac{\partial d^{MN}}{\partial\beta}>0,\frac{\partial\pi_s^{MN}}{\partial\beta}>0,\frac{\partial u_m^{MN}}{\partial\beta}>0;$

2) $\frac{\partial\tau_s^{MN}}{\partial\eta}<0,\frac{\partial\tau_m^{MN}}{\partial\eta}<0,\frac{\partial w^{MN}}{\partial\eta}<0,\frac{\partial w_1^{MN}}{\partial\eta}<0,\frac{\partial p^{MN}}{\partial\eta}<0,\frac{\partial d^{MN}}{\partial\eta}<0,\frac{\partial\pi_s^{MN}}{\partial\eta}<0,\frac{\partial u_m^{MN}}{\partial\eta}<0.$

性质8表明,双边资金约束下“制造商银行借贷+预付款”组合融资模式有效解决了企业资金约束困境,消费者低碳偏好以及减排成本因子对供应链减排决策、产品定价、需求和收益的影响与无资金约束以及双边资金约束“供应商银行借贷+贸易信贷”组合融资情形下类似,这里就不再赘述.

分析此模式下,企业初始资金规模对低碳供应链的影响,可得性质9.

性质9 1) $\frac{\partial\tau_s^{MN}}{\partial B_s}=\frac{\partial\tau_m^{MN}}{\partial B_s}=\frac{\partial w^{MN}}{\partial B_s}=\frac{\partial w_1^{MN}}{\partial B_s}=\frac{\partial p^{MN}}{\partial B_s}=\frac{\partial d^{MN}}{\partial B_s}=0,\frac{\partial\pi_s^{MN}}{\partial B_s}>0,\frac{\partial u_m^{MN}}{\partial B_s}<0;$

2) $\frac{\partial\tau_s^{MN}}{\partial B_m}=\frac{\partial\tau_m^{MN}}{\partial B_m}=\frac{\partial w^{MN}}{\partial B_m}=\frac{\partial w_1^{MN}}{\partial B_m}=\frac{\partial p^{MN}}{\partial B_m}=\frac{\partial d^{MN}}{\partial B_m}=0,\frac{\partial\pi_s^{MN}}{\partial B_m}=0,\frac{\partial u_m^{MN}}{\partial B_m}>0.$

由性质9可得,“制造商银行借贷+预付款”组合融资模式下,低碳供应链各主体最优运作决策和需求不受自身及对方初始自有资金的影响,但其收益受到不同程度的影响. 供应商初始自有资金的增多,降低了其对预付款资金的需求,融资成本降低,在提高供应商收益的同时削弱了制造商借助预付款增利的能力,制造商效用下降. 制造商初始资金的增多,减弱了其对银行资金的依赖,利息支出减少,效用提高,而此时供应商所需预付款金额未发生变化,其利润不变.

对比此模式下,供应商和制造商的碳减排水平高低,可得命题3.

命题3 “制造商银行借贷+预付款”组合融资下,相对制造商减排水平,当提前支付批发价敏感系数较小($k<k^*$)时,供应商减排水平较高($\tau_s^{MN}>\tau_m^{MN}$),否则,其减排水平较低($\tau_s^{MN}<\tau_m^{MN}$). 其中,$k^*=\ln\left(\frac{2(1+r_{bm})(1+\lambda)}{1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm}}\right)$.

由命题3可得,此模式下,上下游企业的碳减排水平高低主要受到提前支付批发价敏感系数的影响. 当提前支付批发价敏感系数相对较小时,供应商设定的提前支付批发价格相对较高,优惠力度相对较小,供应商预付款融资成本相对较低,从而能够有更多的资金用于碳减排投资,并实现供应商减排水平高于制造商减排水平. 反之,当供应商预付款融资成本相对较高时,能够用于碳减排投资的资金减少,导致供应商减排水平低于制造商减排水平. 因此,此模式下低碳供应链管理重点应根据供应商提前支付批发价敏感系数的不同而进行权变调整. 例如,当提前支付批发价敏感系数相对较小时,供应链管理的重点应为着力提高下游制造商减排水平,通过加强政府或环保组织对制造商的减排补贴等方式,提升制造商减排动机和水平. 反之,应该加强政府或环保组织对供应商的减排补贴等方式,提升供应商减排动机和水平,从而有效实

现整个供应链减排水平的均衡提升.

4 不同资金环境及组合融资模式对低碳供应链决策的影响

比较无资金约束与双边资金约束两种不同的“链外 + 链内”组合融资模式下,低碳供应链上下游企业的减排水平、产品定价和需求的大小,可得命题 4 和命题 5.

命题 4　1)当 $a>a_1$ 时,$\tau_s^{NN}>\tau_s^{YN}$,否则,$\tau_s^{NN}<\tau_s^{YN}$;当 $a>a_2$ 时,$\tau_m^{NN}>\tau_m^{YN}$,否则,$\tau_m^{NN}<\tau_m^{YN}$;

2)当 $a>a_3$ 时,$w^{NN}>w^{YN}$,否则,$w^{NN}<w^{YN}$;当 $a>a_4$ 时,$p^{NN}>p^{YN}$,否则,$p^{NN}<p^{YN}$;

3)当 $a>a_5$ 时,$d^{NN}>d^{YN}$,否则,$d^{NN}<d^{YN}$.

其中,$a_1=c_m+\dfrac{2\beta^2c_s(1+\lambda)}{(1+2\lambda)(8\eta-\beta^2)}$,$a_2=c_m+\dfrac{\beta^2c_s(5+3r_{bs}+6\lambda+4\lambda r_{bs})-8c_s\eta(1+r_{bs})(1+2\lambda)}{2\beta^2(1+\lambda)}$,

$a_3=c_m+\dfrac{4\eta B(1+\lambda)c_s+Ce^{-k}(1+r_{bs})A-ABc_s}{4\eta(1+\lambda)[B-e^{-k}(1+r_{bs})A]}$,$A=8\eta(1+2\lambda)-\beta^2(3+4\lambda)$,

$a_4=\dfrac{2\eta A(1+2\lambda)(1+r_{bs})(c_m+c_s+c_sr_{bs})+B(c_m+c_s)[6\eta(1+2\lambda)-A]-AD}{6\eta(1+2\lambda)[B-A(1+r_{bs})]}$,

$a_5=\dfrac{(c_m+c_s)B-A(c_m+c_s+c_sr_{bs})(1+r_{bs})}{[B-A(1+r_{bs})]}$,$B=8\eta(1+2\lambda)(1+r_{bs})-\beta^2(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})$,$C=4c_s\eta(1+r_{bs})(1+3\lambda)-\beta^2c_s(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})$,$D=\beta^2(c_m+c_s+c_sr_{bs})(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})$.

命题 5　1)当 $\eta>\eta_1$ 时,如果 $a>a_{11}$,有 $\tau_s^{NN}>\tau_s^{MN}$,否则,$\tau_s^{NN}<\tau_s^{MN}$. 当 $\eta<\eta_1$ 时,如果 $a<a_{11}$,有 $\tau_s^{NN}>\tau_s^{MN}$,否则,$\tau_s^{NN}<\tau_s^{MN}$;当 $\eta>\eta_2$ 时,如果 $a>a_{22}$,有 $\tau_m^{NN}>\tau_m^{MN}$,否则,$\tau_m^{NN}<\tau_m^{MN}$. 当 $\eta<\eta_2$ 时,如果 $a<a_{22}$,有 $\tau_m^{NN}>\tau_m^{MN}$,否则,$\tau_m^{NN}<\tau_m^{MN}$;

2)当 $\eta>\eta_3$ 时,如果 $a>a_{33}$,有 $w^{NN}>w^{MN}$,否则,$w^{NN}<w^{MN}$. 当 $\eta<\eta_3$ 时,如果 $a<a_{33}$,有 $w^{NN}>w^{MN}$,否则,$w^{NN}<w^{MN}$;当 $k>k_1$ 时,如果 $a>a_{44}$,有 $p^{NN}>p^{MN}$,否则,$p^{NN}<p^{MN}$. 当 $k<k_1$ 时,如果 $a<a_{44}$,有 $p^{NN}>p^{MN}$,否则,$p^{NN}<p^{MN}$;

3)当 $k>k_1$ 时,如果 $a>a_{55}$,有 $d^{NN}>d^{MN}$,否则,$d^{NN}<d^{MN}$. 当 $k<k_1$ 时,如果 $a<a_{55}$,有 $d^{NN}>d^{MN}$,否则,$d^{NN}<d^{MN}$.

其中,$a_{11}=\dfrac{(c_m+c_s)[E-A(1+r_{bm})^2]}{[E-A(1+r_{bm})]}$,

$a_{22}=\dfrac{(c_m+c_s)\{(1+2\lambda)[E-Ae^k(1+r_{bm})]-Ae^kr_{bm}(1+r_{bm})(1+\lambda)\}}{(1+2\lambda)(E-Ae^k)-Ae^kr_{bm}(1+\lambda)}$,

$a_{33}=\dfrac{AEc_s(e^k-1)+4\eta(1+\lambda)(c_m+c_s)[E-e^kA(1+r_{bm})^2]}{4\eta(1+\lambda)[E-e^kA(1+r_{bm})]}$,

$a_{44}=\dfrac{E(c_s+c_m)[6\eta(1+2\lambda)+Ar_{bm}]-6\eta e^kA(c_s+c_m)(1+r_{bm})^2(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})}{6\eta[E(1+2\lambda)-e^kA(1+r_{bm})(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})]}$,

$a_{55}=\dfrac{(c_s+c_m)[E(1+2\lambda)-e^kA(1+r_{bm})^2(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})]}{E(1+2\lambda)-e^kA(1+r_{bm})(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})}$,

$\eta_1=\dfrac{\beta^2[(1+2\lambda)(e^k-1-r_{bm})+r_{bm}e^k(1+\lambda)]}{8(1+r_{bm})[(1+2\lambda)(e^k-1)+r_{bm}e^k(1+\lambda)]}$,

$\eta_2=\dfrac{\beta^2(1+\lambda)[2(1+r_{bm})(1+2\lambda)-e^kr_{bm}(3+4\lambda)-e^k(2-r_{bm})(1+2\lambda)]}{8e^kr_{bm}(1+2\lambda)(1+2\lambda+r_{bm}+\lambda r_{bm})}$,

$\eta_3=\dfrac{\lambda\beta^2e^k(2+r_{bm})-2\beta^2(1+r_{bm})(e^k-1+2e^k\lambda-\lambda)}{8e^kr_{bm}(1+r_{bm})(1+\lambda)}$,

$k_1=\ln\left[\dfrac{2(1+r_{bm})(1+2\lambda)(1+\lambda)}{(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})(2+2\lambda+3r_{bm}+4\lambda r_{bm})}\right]$,

$E=e^{k}(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})[8\eta(1+r_{bm})-\beta^{2}]-2\beta^{2}(1+r_{bm})(1+\lambda)$.

由命题4可得,与无资金约束情形相比,双边资金约束"供应商银行借贷+贸易信贷"组合融资时企业碳减排水平、产品售价及需求的高低主要受潜在市场需求规模大小的影响.当潜在市场需求规模相对较高时,双边资金约束"供应商银行借贷+贸易信贷"组合融资下企业碳减排水平、产品售价及需求低于无资金约束下其碳减排水平、产品售价和需求,反之,将高于无资金约束下其碳减排水平、产品售价和需求.

由命题5可得,与无资金约束情形相比,双边资金约束"制造商银行借贷+预付款"组合融资下企业碳减排水平、产品售价及需求的高低不仅受潜在市场需求规模高低的影响,还受碳减排成本因子和提前支付批发价敏感系数的影响.当碳减排成本因子相对较大时,如果潜在市场规模也相对较高,无资金约束下企业碳减排水平、供应商产品批发价格将高于双边资金约束"制造商银行借贷+预付款"组合融资时企业碳减排水平和批发价格,否则,将低于双边资金约束"制造商银行借贷+预付款"组合融资时企业碳减排水平和批发价格.当提前支付批发价敏感系数相对较大时,如果潜在市场规模也相对较高,无资金约束下制造商产品售价和需求将高于双边资金约束"制造商银行借贷+预付款"组合融资时其产品售价和需求,否则,将低于双边资金约束"制造商银行借贷+预付款"组合融资时其产品售价和需求.

对比双边资金约束"制造商银行借贷+贸易信贷"组合融资和"制造商银行借贷+预付款"组合融资情形下,低碳供应链上下游企业的减排水平、产品定价和需求的大小,可得命题6.

命题6 1)当$k>k_2$时,如果$a>a_{111}$,有$\tau_s^{YN}>\tau_s^{MN}$,否则,$\tau_s^{YN}<\tau_s^{MN}$.当$k<k_2$时,如果$a<a_{111}$,有$\tau_s^{YN}>\tau_s^{MN}$,否则,$\tau_s^{YN}<\tau_s^{MN}$;当$k>k_3$时,如果$a>a_{222}$,有$\tau_m^{YN}>\tau_m^{MN}$,否则,$\tau_m^{YN}<\tau_m^{MN}$.当$k<k_3$时,如果$a<a_{222}$,有$\tau_m^{YN}>\tau_m^{MN}$,否则,$\tau_m^{YN}<\tau_m^{MN}$;

2)当$f(k)>k_4$时,如果$a>a_{333}$,有$w^{YN}>w^{MN}$,否则,$w^{YN}<w^{MN}$.当$f(k)<k_4$时,如果$a<a_{333}$,有$w^{YN}>w^{MN}$,否则,$w^{YN}<w^{MN}$;当$k>k_5$时,如果$a>a_{444}$,有$p^{YN}>p^{MN}$,否则,$p^{YN}<p^{MN}$.当$k<k_5$时,如果$a<a_{444}$,有$p^{YN}>p^{MN}$,否则,$p^{YN}<p^{MN}$;

3)当$k>k_5$时,如果$a>a_{555}$,有$d^{YN}>d^{MN}$,否则,$d^{YN}<d^{MN}$.当$k<k_5$时,如果$a<a_{555}$,有$d^{YN}>d^{MN}$,否则,$d^{YN}<d^{MN}$.

其中,$a_{111}=\dfrac{E(c_m+c_s+c_sr_{bs})-B(1+r_{bm})^2(c_m+c_s)}{E-B(1+r_{bm})}$,

$a_{222}=\dfrac{E(1+2\lambda)(1+r_{bs})(c_m+c_s+c_sr_{bs})-e^{k}B(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})(c_m+c_s)(1+r_{bm})}{E(1+2\lambda)(1+r_{bs})-e^{k}B(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})}$,

$a_{333}=\dfrac{Ee^{k}c_s+4\eta(1+\lambda)[c_me^{-k}E(1+r_{bs})-e^{k}B(1+r_{bm})^2(c_m+c_s)]+\Lambda}{4\eta(1+\lambda)[e^{-k}E(1+r_{bs})-e^{k}B(1+r_{bm})]}$,

$a_{444}=\dfrac{B(c_s+c_m)\Lambda_1+E(c_m+c_s+c_sr_{bs})[\beta^2(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})-2\eta(1+2\lambda)(1+r_{bs})]}{6\eta[E(1+2\lambda)(1+r_{bs})-e^{k}B(1+r_{bm})(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})]}$,

$a_{555}=\dfrac{E(1+2\lambda)(1+r_{bs})(c_m+c_s+c_sr_{bs})-e^{k}B(1+r_{bm})^2(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})(c_s+c_m)}{E(1+2\lambda)(1+r_{bs})-e^{k}B(1+r_{bm})(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})}$,

$f(k)=\beta^2e^{k}(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})-8\eta e^{k}(1+2\lambda)(1+r_{bs})-2\beta^2e^{-k}(1+r_{bs})(1+\lambda)$,

$k_2=\ln\left[\dfrac{(1+r_{bm})(1+2\lambda)(1+r_{bs})(8\eta-\beta^2)}{(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})[8\eta(1+r_{bm})-\beta^2]}\right]$,

$k_4=\dfrac{(1+r_{bs})(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})(\beta^2-8\eta-8\eta r_{bm})}{(1+r_{bm})}$,

$k_3=\ln\left[\dfrac{2\beta^2(1+2\lambda)(1+r_{bs})(1+r_{bm})(1+\lambda)}{(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})[8\eta r_{bm}(1+2\lambda)(1+r_{bs})+2\beta^2(1+\lambda)]}\right]$,

$k_5=\ln\left[\dfrac{2(1+2\lambda)(1+r_{bs})(1+r_{bm})(1+\lambda)}{(1+r_{bm}+2\lambda+\lambda r_{bm})[(1+r_{bm})(3+r_{bs}+4\lambda+2\lambda r_{bs})-(1+r_{bs}+2\lambda+2\lambda r_{bs})]}\right]$,

$\Lambda = c_s e^{-k} E(1 + r_{bs})[\beta^2(3 + r_{bs} + 4\lambda + 2\lambda r_{bs}) - 4\eta(1 + r_{bs})(1 + 3\lambda)]$,

$\Lambda_1 = E(1 + r_{bm}) - 6\eta e^{k}(1 + r_{bm})^2(1 + r_{bm} + 2\lambda + \lambda r_{bm})$.

由命题 6 可得,双边资金约束下,与“供应商银行借贷 + 贸易信贷”组合融资相比,“制造商银行借贷 + 预付款”组合融资下供应商和制造商的碳减排水平、产品批发和销售价格、市场需求的高低主要受潜在市场需求规模以及提前/推迟支付批发价敏感系数的影响. 当提前/推迟支付批发价敏感系数相对较大时,如果潜在市场需求规模也相对较高,“供应商银行借贷 + 贸易信贷”组合融资模式下企业碳减排水平、产品批发和销售价格、市场需求等将高于“制造商银行借贷 + 预付款”组合融资下其碳减排水平、产品批发和销售价格、市场需求. 否则,将低于“制造商银行借贷 + 预付款”组合融资下其碳减排水平、产品批发和销售价格、市场需求.

因此,当供应链以碳减排为价值导向时,在不同的市场条件下,供应链对上述两种不同的组合融资模式选择策略应进行权变调整. 例如,当提前/推迟支付批发价敏感系数相对较大时,如果潜在市场需求规模相对较高,供应链选择“供应商银行借贷 + 贸易信贷”组合融资能有效提高全链条的碳减排水平,提高供应链的环保效益. 而当潜在市场需求规模相对较低时,供应链选择“制造商银行借贷 + 预付款”组合融资模式能更好地促进其降碳和环保目标的实现.

5 数值分析

因供应商利润以及制造商效用函数非常复杂,本部分采用数值仿真方法对命题 4 – 6 中各情形下企业收益高低进行比较分析,并探究企业对不同组合融资模式的选择偏好. 结合企业低碳生产中相关实践数据,并参考文献[26]、[27]等对数据进行处理,本部分参数取值如下:$a = 300$,$c_s = 0.02$,$c_m = 0.03$,$\eta = 0.1$,$\beta = 0.05$,$k = 0.5$,$B_s = 30$,$B_m = 100$,$r_{bs} = 0.04$,$r_{bm} = 0.04$,$\lambda = 0.05$. 可得表 1.

表 1　公平关切和推迟/提前支付批发价敏感系数对低碳供应链的影响

Tab. 1　The impact of fairness concern and delayed/advance payment wholesale price sensitivity on low – carbon supply chain

参数及取值		无资金约束(NN)			供应商银行借贷 + 贸易信贷(YN)			制造商银行借贷 + 预付款(MN)		
		π_s^{NN}	u_m^{NN}	π_{sc}^{NN}	π_s^{YN}	u_m^{YN}	π_{sc}^{YN}	π_s^{MN}	u_m^{MN}	π_{sc}^{MN}
λ	0.01	11 276	5 769.3	17 045	11 210	5 832.6	17 042	10 835	5 737.9	16 573
	0.03	11 064	5 883.4	16 948	10 998	5 949.3	16 947	10 640	5 850.5	16 490
	0.05	10 868	5 997.6	16 865	10 801	6 065.9	16 867	10 459	5 963.1	16 422
	0.07	10 685	6 111.7	16 797	10 619	6 182.6	16 801	10 290	6 075.7	16 366
	0.09	10 515	6 225.8	16 741	10 449	6 299.2	16 748	10 132	6 188.4	16 321
k	0.01	10 868	5 997.6	16 866	10 865	5 995.7	16 861	10 463	5 997.7	16 460
	0.31	10 868	5 997.6	16 866	10 830	6 034.6	16 865	10 458	5 979.2	16 437
	0.61	10 868	5 997.6	16 866	10 782	6 087.0	16 869	10 461	5 952.6	16 413
	0.91	10 868	5 997.6	16 866	10 718	6 157.9	16 876	10 471	5 919.9	16 391
	1.21	10 868	5 997.6	16 866	10 631	6 253.5	16 884	10 491	5 880.6	16 372

由表 1 可得,无论公平关切和推迟/提前支付批发价敏感系数怎样变化,供应链双边资金约束对上游供应商收益始终产生消极影响,即相比无资金约束情形,在两种不同的“链外 + 链内”组合融资下,供应商利润均较低. 而相比“制造商银行借贷 + 预付款”组合融资模式,供应商在“供应商银行借贷 + 贸易信贷”组合融资模式下收益更高. 原因主要是在“供应商银行借贷 + 贸易信贷”组合融资模式下,供应商在链内通过贸易信贷契约实现增利,一定程度上弥补了其链外银行借贷融资成本,进而改善了其收益. 因此,双边资金约束下供应商通常偏爱“供应商银行借贷 + 贸易信贷”组合融资模式. 对公平关切的制造商来说,双

边资金约束对其效用并非始终产生消极影响,一定条件下制造商所得效用会高于无资金约束下其所得效用. 当推迟/提前支付批发价敏感系数相对较低时($k<0.01$),制造商在"制造商银行借贷+预付款"组合融资模式下所得效用更高,此时,其将偏爱"制造商银行借贷+预付款"组合融资,否则,其将偏爱"供应商银行借贷+贸易信贷"组合融资.

对整个供应链来说,无资金约束下整个供应链收益通常高于双边资金约束"制造商银行借贷+预付款"组合融资模式下的收益,但却不一定始终高于双边资金约束"供应商银行借贷+贸易信贷"组合融资模式下其所得收益,即当公平关切系数相对较大($\lambda>0.05$)或推迟/提前支付批发价敏感系数相对较高时($k>0.61$),在双边资金约束"供应商银行借贷+贸易信贷"组合融资模式下供应链所得收益将高于无资金约束下其所得收益. 无论公平关切和推迟/提前支付批发价敏感系数如何变化,在"供应商银行借贷+贸易信贷"组合融资模式下供应链所得收益高于其在"制造商银行借贷+预付款"组合融资下所得收益,即双边资金约束下"供应商银行借贷+贸易信贷"组合融资模式对整个供应链来说占优.

6 结 论

本文针对一个低碳供应商与一个存在公平关切行为的低碳制造商构成的供应链,通过构建无资金约束以及双边资金约束"链外+链内"组合融资下的联合减排博弈模型,研究了不同环境下供应链各主体最优减排决策和融资模式选择偏好. 研究结果如下:(1)不同资金环境下,制造商公平关切会降低供应链碳减排水平、产品批发价和销售价以及市场需求,并降低供应商利润,但可能会提高制造商效用. (2)不同资金环境下,消费者低碳偏好对低碳供应链运营决策和收益产生积极影响,而减排成本因子对其产生消极影响. (3)与制造商碳减排水平相比,供应商碳减排水平在无资金约束以及双边资金约束"供应商银行借贷+贸易信贷"组合融资下更高,但在"制造商银行借贷+预付款"组合融资模式下的高低受提前支付批发价敏感系数的影响. (4)与无资金约束情形相比,供应链双边资金约束对上游供应商利润始终产生消极影响,但对制造商可能产生积极影响. (5)与"制造商银行借贷+预付款"组合融资模式相比,供应商偏爱选择"供应商银行借贷+贸易信贷"组合融资模式,而制造商对两种组合融资模式的选择偏好受推迟/提前支付批发价敏感系数的影响.

上述结论可以得到如下政策启示:(1)低碳供应链中制造企业公平关切行为的增强可能会降低链条上下游企业的减排动机和水平,此时供应链管理重点应该是加快推进公平的收益分配制度,例如采用收益共享契约来平衡各方收益,降低制造企业的不公平感受,进而有效推动供应链低碳化发展. (2)低碳供应链企业联合减排时,一方面应加大低碳产品绿色理念的宣传,提高消费者对低碳产品的敏感度和选择偏好,另一方面也要加强对关键减排技术的研发和关键减排人员的管理,有效提升减排投资效率. (3)在无资金约束以及双边资金约束"供应商银行借贷+贸易信贷"组合融资下,政府或金融机构需要加强对下游制造企业的补贴或支持力度,激励其以供应商的减排水平为标的来提高自身减排水平,促进整个供应链减排水平的均衡提升. 而在双边资金约束"供应商银行借贷+预付款"组合融资下,低碳供应链的管理和支持重点应根据供应商提前支付批发价敏感系数的不同而进行权变调整. (4)低碳供应链上下游企业联合减排时,双边资金约束对公平关切的制造商并非一直有害,此时"危"中有"机",一定条件下公平关切的制造商能得到更多收益. (5)双边资金约束下低碳供应链联合减排时,供应商可优先考虑采用"供应商银行借贷+贸易信贷"组合融资模式解决自身资金困境问题,而存在公平关切行为的制造商在选择融资模式时可重点关注推迟/提前支付批发价敏感系数对其收益的影响,并进行权变决策.

本文研究还存在进一步可以拓展的方向. 例如,在低碳供应链运作实践中,上游供应商也可能存在公平关切的情形,并对低碳供应链运营产生影响. 因此,未来进一步探究低碳供应商公平关切行为对供应链的影响也是非常值得研究的. 另外,资金约束下低碳供应链企业还存在碳资产质押融资、股权融资等其他融资方法,未来可以进一步探究其他融资方式对低碳供应链减排决策和收益的影响.

参考文献:

[1] 余萍,魏守道. 研发溢出、消费者低碳偏好与供应链横向研发策略[J]. 系统管理学报,2022,31(4):758-769.

YU P,WEI S D. Research and development spillover,consumer environmental awareness,and horizontal research and development strategy of supply chain[J]. Journal of Systems & Management,2022,31(4):758 – 769.

[2] XIA L,MONROE K B,COX J L. The price is unfair! A conceptual framework of price fairness perceptions[J]. Journal of Marketing,2004,68(4):1 – 15.

[3] QIN J J,ZHAO Y H,XIA L J. Carbon emission reduction with capital constraint under greening financing and cost sharing contract[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2018,15(4):750.

[4] 杨浩雄,段炜钰. 面向制造商资金约束的绿色供应链融资策略研究[J]. 运筹与管理,2019,28(8):126 – 133.
YANG H X,DUAN W Y. Research on financing mode for capital constrainted manufacturer in green supply chain[J]. Operations Research and Management Science,2019,28(8):126 – 133.

[5] ZONG S L,HUANG N. Optimal financing decision with financial constraints for a manufacturer in a low – carbon supply chain[J]. Environmental Science and Pollution Research,2023,30(37):86998 – 87015.

[6] 张川,马慧敏,郭振. 碳限额与交易机制和消费者低碳偏好下的供应链减排及融资策略[J]. 控制与决策,2023,38(11):3271 – 3278.
ZHANG C,MA H M,GUO Z. Carbon emission reduction and financing strategy for a supply chain under cap – and – trade regulation and consumer's low – carbon preference[J]. Control and Decision,2023,38(11):3271 – 3278.

[7] AN S M,LI B,SONG D P,et al. Green credit financing versus trade credit financing in a supply chain with carbon emission limits[J]. European Journal of Operational Research,2021,292(1):125 – 142.

[8] WANG M X,ZHAO R D,LI B. Impact of financing models and carbon allowance allocation rules in a supply chain[J]. Journal of Cleaner Production,2021,302:126794.

[9] 郭志芳,李玉婷,田春英. 考虑公平关切的绿色供应链融资策略研究[J]. 控制工程,2023,30(11):1999 – 2010.
GUO Z F,LI Y T,TIAN C Y. Research on financing strategy of capital constrained green supply chain considering fairness concern[J]. Control Engineering of China,2023,30(11):1999 – 2010.

[10] 邹清明,谢文芳,李玉琼. 制造商过度自信的绿色供应链融资和定价策略[J]. 中国管理科学,2026,34(3):170 – 180.
ZOU Q M,XIE W F,LI Y Q. Financing and pricing decisions for a green supply chain with manufacturer's overconfidence[J]. Chinese Journal of Management Science,2026,34(3):170 – 180.

[11] 黄瑞芬,孙俊凤,王君. 碳限额与交易机制下受资金约束的供应链优化[J]. 运筹与管理,2020,29(6):82 – 89.
HUANG R F,SUN J F,WANG J. Optimization of supply chain with capital constraint under carbon cap – and – trading mechanism[J]. Operations Research and Management Science,2020,29(6):82 – 89.

[12] WU D D,YANG L P,OLSON D L. Green supply chain management under capital constraint[J]. International Journal of Production Economics,2019,215:3 – 10.

[13] 张克勇,李春霞,姚建明,等. 零售商采购资金约束下的低碳供应链融资决策研究[J]. 运筹与管理,2021,30(8):108 – 116.
ZHANG K Y,LI C X,YAO J M,et al. Research on low carbon supply chain financing decision under the purchase capital constraint of the retailer[J]. Operations Research and Management Science,2021,30(8):108 – 116.

[14] 曹细玉,覃艳华,余小艳. 双边资金约束下的双渠道供应链定价与碳减排决策研究[J]. 四川师范大学学报(自然科学版),2024,47(3):384 – 393.
CAO X Y,QIN Y H,YU X Y. Research on pricing and emission reduction decision of dual – channel supply chain under bilateral capital constraints[J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science),2024,47(3):384 – 393.

[15] 魏洁,任科,章凯玥. 考虑双边资金约束的绿色供应链融资组合策略研究[J]. 运筹与管理,2025(5):201 – 208.
WEI J,REN K,ZHANG K Y. Research on green supply chain financing portfolio strategies considering bilateral capital constraints[J]. Operations Research and Management Science,2025(5):201 – 208.

[16] LIU Z L,ANDERSON T D,CRUZ J M. Consumer environmental awareness and competition in two – stage supply chains[J]. European Journal of Operational Research,2012,218(3):602 – 613.

[17] 林强,赵震铮,霍宝锋,等. 考虑碳交易政策的零售商合作减排策略:融资减排或技术减排[J]. 系统工程理论与实践,2024,44(3):986 – 1005.
LIN Q,ZHAO Z Z,HUO B F,et al. Retailers' emissions reduction strategies under carbon trading policy:Financing emissions reduction or technological emissions reduction[J]. Systems Engineering – Theory & Practice,2024,44(3):986 – 1005.

[18] WANG Q P,ZHAO D Z,HE L F. Contracting emission reduction for supply chains considering market low – carbon preference[J].

Journal of Cleaner Production,2016,120:72 - 84.

[19] 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 S Z,LIU Y Z,XIAO T J. Pricing and carbon emission reduction decisions in a socially responsible supply chain[J]. Chinese Journal of Management Science,2020,28(4):99 - 108.

[20] 张令荣,王锋,刘笑言. 碳交易与区块链技术下双产品低碳供应链减排决策研究[J]. 管理工程学报,2025,39(4):239 - 250.
ZHANG L R,WANG F,LIU X Y. Research on emission reduction decision of dual - product low - carbon supply chain under carbon trading and blockchain technology[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management,2025,39(4):239 - 250.

[21] 孙嘉轶,路阳阳,滕春贤. 区块链技术对低碳供应链合作策略的影响研究[J]. 中国管理科学,2025,33(10):293 - 303.
SUN J Y,LU Y Y,TENG C X. A study on the impact of blockchain technology on the cooperative strategy of low carbon supply chain[J]. Chinese Journal of Management Science,2025,33(10):293 - 303.

[22] 曹柬,赵泱,许佳阳,等. 零售商具公平关切的闭环供应链动态决策优化[J]. 计算机集成制造系统,2020,26(11):3142 - 3155.
CAO J,ZHAO Y,XU J Y,et al. Dynamic optimization of closed - loop supply chain with retailer's fairness concerns[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2020,26(11):3142 - 3155.

[23] 韩同银,刘丽,金浩. 考虑政府补贴和公平关切的双渠道绿色供应链决策研究[J]. 中国管理科学,2022,30(4):194 - 204.
HAN T Y,LIU L,JIN H. Research on dual - channel green supply chain decision making considering the government subsidy and fairness concerns[J]. Chinese Journal of Management Science,2022,30(4):194 - 204.

[24] JI J N,ZHANG Z Y,YANG L. Carbon emission reduction decisions in the retail -/dual - channel supply chain with consumers' preference[J]. Journal of Cleaner Production,2017,141:852 - 867.

[25] 郭金森,陈卓,周永务. 基于金融机构借贷与商业信用组合融资的双渠道供应链运作策略[J]. 运筹与管理,2023,32(8):24 - 31.
GUO J S,CHEN Z,ZHOU Y W. Equilibrium financing portfolio strategies for dual - channel supply chain with financial institution lending and commercial credit[J]. Operations Research and Management Science,2023,32(8):24 - 31.

[26] 石平,颜波,石松. 考虑公平的绿色供应链定价与产品绿色度决策[J]. 系统工程理论与实践,2016,36(8):1937 - 1950.
SHI P,YAN B,SHI S. Pricing and product green degree decisions in green supply chains with fairness concerns[J]. Systems Engineering —Theory & Practice,2016,36(8):1937 - 1950.

[27] 贺勇,陈志豪,廖诺. 政府补贴方式对绿色供应链制造商减排决策的影响机制[J]. 中国管理科学,2022,30(6):87 - 98.
HE Y,CHEN Z H,LIAO N. The impact mechanism of government subsidy approach on manufacturer's decision - making in green supply chain[J]. Chinese Journal of Management Science,2022,30(6):87 - 98.

(编 辑:朱银周)