

随机需求下绿色供应链成员的信用 支付策略与激励机制

杨 冉

(江苏科技大学苏州理工学院, 江苏 苏州 215600)

摘要: 在随机需求基础上考虑一个绿色制造商与一个资金约束零售商的两级绿色供应链系统, 研究制造商与第三方银行分别提供信用贷款策略时系统成员的最优决策问题, 并引入惩罚机制作为激励机制, 研究其对该绿色供应链系统运营效率的影响, 最后通过数值算例分析单位惩罚对于最优决策以及利润的影响。结果表明, 资金约束的零售商更加倾向于选择由制造商提供的信用贷款策略, 并且惩罚机制的引入切实有效地提高了系统运营效率。

关键词: 绿色供应链; 资金约束; 惩罚机制; 信用支付

中图分类号: F252.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)22-0121-09

近年来中国政府大力推行绿色制造与低碳可持续发展战略^[1], 构建了覆盖多行业的绿色发展框架, 社会形成绿色发展共识, 人们奉行绿色生活观与消费观, 转变了传统消费观念, 紧跟绿色时代发展步伐。而实现绿色发展的关键在于建立绿色的产业化体系与供应链结构, 因此建立与推行绿色供应链体系, 从供应链层面实现绿色制造与发展尤为重要。目前我国诸多行业都在积极筹划实施绿色发展战略, 其中涉及的绿色供应链管理思想作为实现绿色可持续发展战略的重要思想组成, 已然成为目前学界与社会各界研究的重点与热点^[2-5], 此外有关绿色供应链的生产决策问题、协调优化问题以及政策研究问题亦是相关研究重点。

针对绿色供应链的生产决策问题。在现实中, 绿色供应链中的成员企业中大多是中小型企业, 企业自身规模较小、资金容量不足, 无法拥有足够的资金进行自身的绿色化运营决策操作。此类中小型企业由于受到资金约束限制, 为了保证自身企业的正常运营, 常向外部寻求帮助, 以获取运营所需资金。而由于国家战略与政策影响, 大部分中小型企业选择从银行获得信用贷款, 用以维系自身的绿色投资、生产与销售过程; 除此之外, 中小型企业还可从供应链上下游的成员企业处进行贷款从而获得运营所需资金^[6-8]。其中, 李丽君等^[9]构建了由生产和减排双重资金约束的制造商和零售商组成的

低碳供应链系统, 针对银行借贷和提前支付两种融资模式, 探究碳配额交易下制造商的融资决策问题, 并分析了碳减排成本系数和碳交易价格对融资决策和供应链成员利润的影响。赖雪梅和聂佳佳^[10]建立了由具有资金约束的小微制造商、无资金约束的大型制造商以及可提供贷款服务的电商平台组成的供应链系统, 分析了存在外部竞争下的资金约束制造商的融资策略选择。研究发现, 电商平台会设置低于银行的贷款利率以获取更多的佣金分成; 在一定条件下, 小微制造商会选择贷款利率较高的融资模式以缓和竞争。Chen 等^[11]建立了包含一个供应商与两个竞争零售商的动态博弈模型, 研究了两种金融模式下的决策均衡解。Zhang 等^[12]建立了包含资金约束的制造商与零售商在内的绿色供应链, 研究了供应链内部成员的融资策略与绿色生产投资策略。

针对绿色供应链的协调优化问题。协调优化问题是很多人的关注点^[13-14]。绿色供应链中成员作为独立个体需在供应链运营过程中投入大量资金进行运营决策, 以获得自身的最大收益, 但由于成员之间缺乏合作意识, 往往只关注自身收益与成本支出, 易形成双重边际化效应, 导致自身利润降低。为改善绿色供应链整体绩效, 需建立有效的激励机制^[15], 通过机制设计来促进成员做出更为有效的绿色化运营决策, 从而加深彼此合作深度, 达到

收稿日期: 2024-06-25

基金项目: 2023 年度镇江市社会科学应用研究课题(2023YB091)

作者简介: 杨冉(1995—), 男, 安徽滁州人, 硕士, 助教, 研究方向为绿色供应链管理、供应链金融。

提升供应链中成员利润的目的。其中,Lai等^[16]建立包含供应商、小型制造商与零售商的绿色供应链系统架构,构建三种金融贷款模式,分析了小型制造商的最佳贷款选择。Bai等^[17]通过建立博弈模型,深入探究了在资金约束供应链中不同类型的资金激励对于碳减排限制下供应链内部运作的实际影响。

针对绿色供应链的政策研究问题,张玉豪和张涛^[18]在考虑政府的碳交易管制和绿色补贴政策的前提下,建立了由政府、单个制造商和单个零售商组成的三级低碳供应链,重点分析了消费者绿色偏好、碳交易价格和减排成本系数对低碳供应链最优决策和社会福利的影响;冯章伟等^[19]在碳减排政策下,构建了由单个制造商和零售商组成的绿色供应链,研究绿色供应链的定价和碳减排决策;Xue等^[20]构建了一个结合决策优化和比较分析方法的差异化博弈模型,广泛评估了零售商绿色营销对供应链利润和环境绩效的影响,以及政府生态标签政策对零售商绿色营销的影响。

综上可知,目前学界对资金约束下绿色供应链中信用支付的风险控制及其系统绩效提升机制的研究相对较少,且相关研究主要集中在确定性的市场需求下,少有人研究随机需求下的相关问题,故本文将随机需求引入资金约束的绿色供应链中,研究以下问题:①随机需求前提下,资金约束型的零售商从供应链内部获取信用贷款的最优绿色均衡解;②随机需求前提下,资金约束型的零售商从供应链外部获取信用贷款的最优绿色均衡解;③设置激励机制提升两种资金来源下的绿色供应链整体绩效,并验证该机制的合理性。

为回答以上问题,建立一个绿色供应链系统,其中包含一个绿色制造商、一个资金受限零售商。资金受限的零售商可通过两种方式获得信用贷款即从上游制造商提供信用贷款且不存在惩罚(manufacture provide credit loans and no penalties, MNP)与第三方银行提供信用贷款且不存在惩罚(third-party bank provide credit loans and no penalties, BNP)。MNP模式下,零售商向制造商贷款以获得绿色产品的批发、宣传与销售资金,由于需求随机,绿色产品的销售过程存在缺货与库存风险,该风险由零售商一方承担;而制造商考虑到贷款风险则收取贷款利率。BNP模式下,零售商向银行贷款资金用于运营所需,此时银行为防范风险收取贷款利率。

本文的贡献总结如下:首先,将供应链金融与

绿色供应链结合进行研究,研究结果加强了相关文献基础与丰富性;其次,在现有研究基础上引入了随机需求,确立了随机需求下MNP/BNP两种贷款模式下绿色供应链的最优均衡策略;最后,提出了惩罚机制作为激励机制,提升了绿色供应链整体的绩效表现。

1 模型描述

构建一个绿色供应链金融系统,该系统包括一个绿色制造商、一个资金受限零售商。在该系统中,上游的绿色制造商负责绿色产品的研发与生产,并将产品批发给零售商,然后通过下游零售商销售给终端消费者。供应链成员间绿色产品的转移过程属于推进式批发价合同,上游的绿色制造商占据供应链中的主导地位,下游零售商需面对随机性的市场需求并承担可能存在的需求不匹配所带来的运营风险,而绿色制造商依订单进行生产,不承担库存风险。

终端消费者群体中包括两种消费者即绿色型消费者与普通型消费者,其中绿色型消费者倾向于购买绿色产品,形成绿色产品的固定潜在市场需求,而普通型消费者由于某些因素比如广告、社会影响等也会购买绿色产品,形成部分额外的市场需求。此外,市场需求通常受到产品绿色水平的正向影响以及产品零售价格的负向影响,所以设定该绿色产品的市场需求函数为: $D = a - bp + \tau\theta + \epsilon = D_0 + \epsilon$,其中, θ 为产品的绿色水平, θ 越大表示产品绿色水平越高或者说环境影响因子越小; τ 为消费者的绿色偏好,体现了绿色型消费者对于产品绿色水平变化的敏感程度。此外由于政府实行低碳环保政策,导致绿色产品的需求得到一定程度的正向增长,故随机需求因子 ϵ 为正值,假定随机需求因子 ϵ 是定义在区间 $[0, N]$ 上的随机分布,其连续性分布函数与概率密度函数分别为 $F(x)$ 与 $f(x)$;相应的, ϵ 满足一般失效率函数 $h(x) = f(x)/\bar{F}(x)$,且 $h'(x) > 0$ 。不失一般性,绿色产品残值归一化为0,相关符号与说明如表1所示。

此外,下游零售商存在资金约束的情况,零售商有限的资金容量导致其无法独立自主的完成针对绿色产品的采购、运输以及销售过程,为保证该绿色供应链的稳定长久运行,零售商需进行融资操作以提升自身资金容量,进而保证正常的运营过程。零售商融资过程中的外部资金主要来源于上游制造商或外部第三方银行,故本文针对两种不同的资金来源建立两大基本模型即制造商提供信用贷

表 1 符号说明

符号	符号说明
p	单位零售价
w	单位批发价
c	单位生产成本
D	市场需求
a	潜在市场需求
b	价格对需求的弹性系数
τ	消费者绿色偏好
D_0	确定性市场需求
ϵ	随机需求因子
r_m	制造商提供贷款利率
r_b	银行提供贷款利率
β	绿色水平成本弹性系数
Π_i^M	制造商利润
Π_i^R	零售商利润
θ_i	产品绿色水平
q_i	产品订购量

 注: $i = \text{MNP, BNP, MWP, BWP}$ 。

款且不存在惩罚(MNP)与银行提供信用贷款且不存在惩罚(BNP),然后求解模型得到对应的均衡结果。

2 模型建立与求解

2.1 制造商提供信用贷款且不存在惩罚(MNP 模式)

当绿色供应链中上游制造商提供信用贷款时,此时该供应链系统中只包含制造商、零售商,供应链成员的决策时序如图 1 所示。

该决策时序图建立在推进式批发价合同之上,其中在销售期初始 $t = 0$ 时,作为领导者的上游制造商决定所提供信用贷款的贷款利率 r_m ,然后投入研发成本 $\frac{1}{2}\beta\theta^2$ 进行绿色工艺创新,生产绿色水平为 θ 的产品;作为跟随者的下游零售商在获得信用贷款后,等待市场需求产生,然后依据市场需求进行绿色产品的订购与销售,销售期结束即 $t = T$ 时,零售

商若获得足够收益则偿还制造商贷款,制造商收回贷款本息和,否则零售商破产,制造商获得零售商的销售收益以及相应残值。模型采用逆向归纳法进行求解。

现实运营过程中,下游零售商在观察到绿色产品的实际需求 D 之后,做出订购决策 q ,零售商整个销售期中的产品销量为 $\min(D, q)$,销售期结束零售商支付贷款本息和 $wq(1+r_m)$ 给制造商,故零售商期望利润函数为

$$\Pi_{\text{MNP}}^R = E[p\min(D, q) - wq(1+r_m)] \quad (1)$$

式中: $E\min(D, q) = \int_0^{q-D_0} xf(x)dx + (q-D_0)[1-F(q-D_0)] = q-D_0 - \int_0^{q-D_0} F(x)dx$ 。

故式(1)可以写成

$$\Pi_{\text{MNP}}^R = p\left[q-D_0 - \int_0^{q-D_0} F(x)dx\right] - wq(1+r_m) \quad (2)$$

因为 $\frac{\partial^2 \Pi_{\text{MNP}}^R}{\partial q^2} = -pf(q-D_0) < 0$,存在最优的产品订购量,故将式(2)对 q 求一阶导数并令之为 0,得到反应函数为

$$q_{\text{MNP}} = \bar{F}^{-1}\left[\frac{w(1+r_m)}{p}\right] + D_0$$

上游制造商在接收到下游零售商的绿色产品订单之后,决策所生产产品的绿色水平,故制造商的利润函数为

$$\Pi_{\text{MNP}}^M = wq_{\text{MNP}}(1+r_m) - \frac{1}{2}\beta\theta^2 - cq_{\text{MNP}} \quad (3)$$

因为 $\frac{\partial^2 \Pi_{\text{MNP}}^M}{\partial \theta^2} = -\beta < 0$;所以存在最优的产品绿色水平,求解为

$$\theta_{\text{MNP}}^* = \frac{\tau[w(1+r_m) - c]}{\beta} \quad (4)$$

故产品的最优订购量为

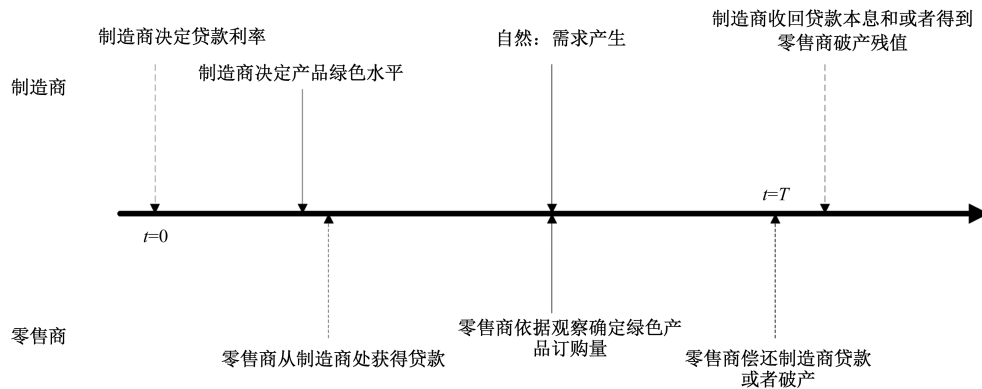


图 1 MNP 模式下的决策时序

$$q_{MNP}^* = \bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_m)}{p} \right] + a - bp + \frac{\tau^2 [w(1+r_m) - c]}{\beta} \quad (5)$$

由此可以得出供应链成员的最优利润分别为

$$\Pi_{MNP}^{M*} = [w(1+r_m) - c] \left\{ \bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_m)}{p} \right] + a - bp + \frac{\tau^2 [w(1+r_m) - c]}{2\beta} \right\} \quad (6)$$

$$\Pi_{MNP}^{R*} = p \left\{ \bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_m)}{p} \right] - \int_0^{\bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_m)}{p} \right]} F(x) dx \right\} - w(1+r_m) \left\{ \bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_m)}{p} \right] + a - bp + \frac{\tau^2 [w(1+r_m) - c]}{\beta} \right\} \quad (7)$$

2.2 银行提供信用贷款且不存在惩罚(BNP模式)

当由银行为供应链中资金受限的零售商提供信用贷款时,此时供应链系统中包含制造商、零售商与银行三方,供应链成员决策时序如图2所示。

此决策时序图2中,在 $t=0$ 的销售期初始,第三方银行首先决定所提供信用贷款的贷款利率 r_b ,然后作为领导者的上游制造商投入研发成本 $\frac{1}{2}\beta\theta^2$ 生产绿色水平为 θ 的产品;作为跟随者的下游零售商在获得信用贷款后,等待市场需求产生,然后依据市场需求进行绿色产品的订购与销售,销售期结束即 $t=T$ 时,零售商偿还银行贷款,银行收回贷款本息和,否则零售商破产,银行获得零售商的销售收益以及相应残值。模型采用逆向归纳法进行求解。

销售过程中,下游零售商在观察到绿色产品的实际需求 D 之后,做出订购决策 q ,零售商整个销售期中的产品销量为 $\min(D, q)$,销售期结束零售商向银行支付贷款本息和 $wq(1+r_b)$,故银行的利润函数为

$$\Pi_{BNP}^B = wqr_b \quad (8)$$

零售商的期望利润函数为

$$\Pi_{BNP}^R = E[p \min(D, q) - wq(1+r_b)] \quad (9)$$

该式可简写为

$$\Pi_{BNP}^R = p \left[q - D_0 - \int_0^{q-D_0} F(x) dx \right] - wq(1+r_b) \quad (10)$$

因为 $\frac{\partial^2 \Pi_{BNP}^R}{\partial q^2} = -pf(q-D_0) < 0$,所以最优绿色产品订购量存在,可求得反应函数为

$$q_{BNP} = \bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_b)}{p} \right] + D_0 \quad (11)$$

上游制造商在接收到下游零售商的绿色产品订单之后,决策所生产产品的绿色水平,故制造商的利润函数为

$$\Pi_{BNP}^M = wq_{BNP} - \frac{1}{2}\beta\theta^2 - cq_{BNP} \quad (12)$$

因为 $\frac{\partial^2 \Pi_{BNP}^M}{\partial \theta^2} = -\beta < 0$,所以最优产品绿色水平存在,可求得为

$$\theta_{BNP}^* = \frac{\tau(w-c)}{\beta} \quad (13)$$

故产品最优订购量为

$$q_{BNP}^* = \bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_b)}{p} \right] + a - bp + \frac{\tau^2(w-c)}{\beta} \quad (14)$$

由此可以得出供应链成员的最优利润分别为

$$\Pi_{BNP}^{M*} = (w-c) \left\{ \bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_b)}{p} \right] + a - bp + \frac{\tau^2(w-c)}{2\beta} \right\} \quad (15)$$

$$\Pi_{BNP}^{R*} = p \left\{ \bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_b)}{p} \right] - \int_0^{\bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_b)}{p} \right]} F(x) dx \right\} - w(1+r_b) \left\{ \bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_b)}{p} \right] + a - bp + \frac{\tau^2(w-c)}{\beta} \right\} \quad (16)$$

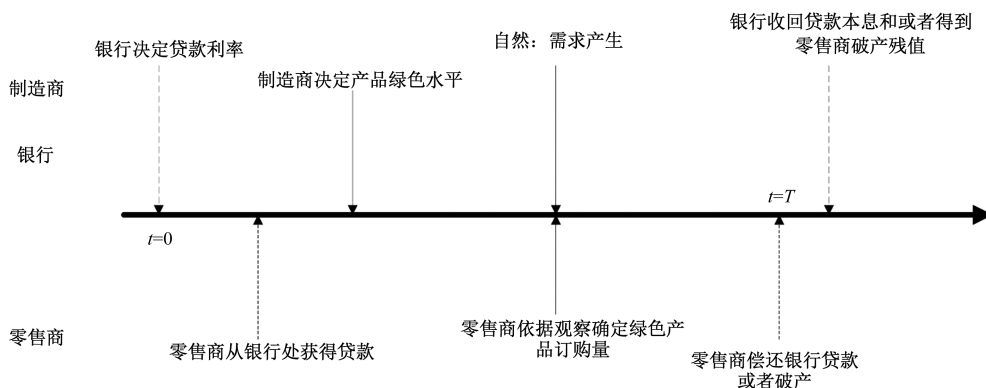


图2 BNP模式下的决策时序

$$\Pi_{\text{BNP}}^{\text{B}*} = w r_b \left\{ \bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_b)}{p} \right] + a - bp + \frac{\tau^2(w-c)}{\beta} \right\} \quad (17)$$

根据 MNP/BNP 两种模式下系统的最优决策以及最优利润的结果表达式可以得到如下性质。

性质 1 $\theta_{\text{BNP}}^* < \theta_{\text{MNP}}^*, q_{\text{BNP}}^* < q_{\text{MNP}}^*; \Pi_{\text{BNP}}^{\text{B}*} < \Pi_{\text{MNP}}^{\text{B}*}, \Pi_{\text{BNP}}^{\text{R}*} < \Pi_{\text{MNP}}^{\text{R}*}$ 。

由性质 1 可知,当资金受限的零售商需要进行贷款融资时,在面临制造商与银行这两种可能的信用贷款提供方,资金受限的零售商会优先选择制造商所提供的信用贷款,此时可以在获得更高系统总利润的同时保证供应链成员利润的最大化;此外还可以获得更高的产品绿色水平以及订购量,更加高效地实现绿色化、低碳化发展。

3 激励机制设计

由于绿色产品的市场需求不确定,存在随机需求因子 ϵ ,因此供应链成员自身的风险规避态度使得各成员都处于观望状态,无法做出最合理有效的决策,导致供应链成员之间的协同合作程度较浅并且严重伤害了彼此乃至系统整体利润。为解决该问题,有效提升供应链绩效与实际运营表现,提出一种激励机制即惩罚机制。

惩罚机制的工作原理为信用贷款的贷款方在提供信用贷款的同时设置单位惩罚 η ,当绿色产品的市场需求高于零售商的产品订购量时,零售商需依据缺货量多少向贷款方支付惩罚金,惩罚金额总量为: $\eta \left\{ \int_{q-D_0}^N f(x) [x - (q - D_0)] dx \right\}$,该式可简写成: $\eta \left\{ N - (q - D_0) - \int_{q-D_0}^N F(x) dx \right\}$ 。后续即研究引入惩罚机制对上述两种信用策略的影响情况。

3.1 制造商提供惩罚机制的信用贷款 (MWP 模式)

该模式下,供应链的系统结构与 MNP 模式相同,决策时序图也相似,不同点在于当销售期初始 $t = 0$ 时,资金充足的上游制造商同时决定贷款利率 r_m 与单位惩罚 η ,然后进行后续产品的生产以及零售商的销售过程,销售期结束即 $t = T$ 时,零售商偿还制造商贷款并支付惩罚金,制造商收回贷款本息和与惩罚金。模型采用逆向归纳法进行求解。

此时零售商的期望利润函数为

$$\Pi_{\text{MWP}}^{\text{R}} = E[p \min(D, q) - wq(1+r_m)] - \eta \left\{ N - (q - D_0) - \int_{q-D_0}^N F(x) dx \right\} \quad (18)$$

该式可写成

$$\Pi_{\text{MWP}}^{\text{R}} = p \left[q - D_0 - \int_0^{q-D_0} F(x) dx \right] - wq(1+r_m) - \eta \left[N - (q - D_0) - \int_{q-D_0}^N F(x) dx \right] \quad (19)$$

因为 $\frac{\partial^2 \Pi_{\text{MWP}}^{\text{R}}}{\partial q^2} = -(p + \eta) f(q - D_0) < 0$,存在最优的产品订购量,故将式(19)对 q 求一阶导数令之为 0,得到如下反应函数:

$$q_{\text{MWP}} = \bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_m)}{p + \eta} \right] + D_0$$

上游制造商在接收到下游零售商的绿色产品订单之后,决策所生产产品的绿色水平,此时制造商的利润函数为

$$\Pi_{\text{MNP}}^{\text{M}} = wq_{\text{MWP}}(1+r_m) - \frac{1}{2}\beta\theta^2 - cq_{\text{MWP}} + \eta \left[N - (q_{\text{MWP}} - D_0) - \int_{q_{\text{MWP}}-D_0}^N F(x) dx \right] \quad (20)$$

因为 $\frac{\partial^2 \Pi_{\text{MNP}}^{\text{M}}}{\partial \theta^2} = -\beta < 0$ 所以存在最优的产品绿色水平,求解为

$$\theta_{\text{MWP}}^* = \frac{\tau[w(1+r_m) - c]}{\beta} \quad (21)$$

故产品的最优订购量为

$$q_{\text{MWP}}^* = \bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_m)}{p + \eta} \right] + a - bp + \frac{\tau^2[w(1+r_m) - c]}{\beta} \quad (22)$$

此时供应链系统以及成员的最优利润分别为

$$\Pi_{\text{MWP}}^{\text{M}*} = [w(1+r_m) - c] \left\{ \bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_m)}{p + \eta} \right] + a - bp + \frac{\tau^2[w(1+r_m) - c]}{2\beta} \right\} + \eta \left\{ N - \bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_m)}{p + \eta} \right] - \int_{\bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_m)}{p + \eta} \right]}^N F(x) dx \right\} \quad (23)$$

$$\Pi_{\text{MWP}}^{\text{R}*} = p \left\{ \bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_m)}{p + \eta} \right] - \int_0^{\bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_m)}{p + \eta} \right]} F(x) dx \right\} - w(1+r_m) \left\{ \bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_m)}{p + \eta} \right] + a - bp + \frac{\tau^2[w(1+r_m) - c]}{\beta} \right\} - \eta \left\{ N - \bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_m)}{p + \eta} \right] - \int_{\bar{F}^{-1} \left[\frac{w(1+r_m)}{p + \eta} \right]}^N F(x) dx \right\} \quad (24)$$

由此可以得到惩罚机制在 MWP 模式下,供应链中成员的最优决策以及各自最优利润,为验证该

机制的合理性,将之与 MNP 模式进行比较,得到如下性质。

性质 2 $\theta_{MNP}^* = \theta_{MWP}^*; q_{MNP}^* < q_{MWP}^*; \Pi_{MNP}^* < \Pi_{MWP}^*; \Pi_{MNP}^{R*} < \Pi_{MWP}^{R*}$ 。

由性质 2 可知,当由上游制造商提供信用贷款时,此时资金约束的零售商在获得信用贷款时,是否选择接受由制造商制订的惩罚机制直接影响供应链的整体绩效表现;当零售商选择接受制造商确定的惩罚机制时,此时可以在保证产品绿色水平不降低的前提下,提高零售商的绿色产品订购量,进而扩大销售,有效地增加制造商、零售商以及供应链整体的利润,证明该惩罚机制作为激励机制的现实有效性。

3.2 银行提供惩罚机制的信用贷款(BWP 模式)

该模式下,供应链的系统结构与 BNP 模式相同,具有相似的决策时序图,不同点在于当销售期初始 $t = 0$ 时,资金充足的银行决定贷款利率 r_b 与单位惩罚 η ,然后制造商生产产品,零售商销售产品,销售期结束即 $t = T$ 时,零售商偿还银行贷款并支付惩罚金,银行收回贷款本息和与惩罚金。模型采用逆向归纳法进行求解。

银行的利润函数为

$$\Pi_{BWP}^B = \omega q r_b + \eta \left\{ N - (q - D_0) - \int_{q-D_0}^N F(x) dx \right\} \quad (25)$$

此时零售商的期望利润函数为

$$\Pi_{BWP}^R = E[p \min(D, q) - \omega q(1 + r_b)] - \eta \left[N - (q - D_0) - \int_{q-D_0}^N F(x) dx \right] \quad (26)$$

该式可写成

$$\Pi_{BWP}^R = p \left[q - D_0 - \int_0^{q-D_0} F(x) dx \right] - \omega q(1 + r_b) - \eta \left[N - (q - D_0) - \int_{q-D_0}^N F(x) dx \right] \quad (27)$$

因为 $\frac{\partial^2 \Pi_{BWP}^R}{\partial q^2} = -(p + \eta) f(q - D_0) < 0$, 存在最优的产品订购量,故将式(27)对 q 求一阶导数令之为 0,得到如下反应函数:

$$q_{BWP} = \bar{F}^{-1} \left[\frac{\omega(1 + r_b)}{p + \eta} \right] + D_0 \quad (28)$$

上游制造商在接收到下游零售商的绿色产品订单之后,决策所生产产品的绿色水平,此时制造商的利润函数为

$$\Pi_{BWP}^M = \omega q_{BWP} - \frac{1}{2} \beta \theta^2 - c q_{BWP} \quad (29)$$

因为 $\frac{\partial^2 \Pi_{BWP}^M}{\partial \theta^2} = -\beta < 0$, 所以存在最优的产品

绿色水平,求解为

$$\theta_{BWP}^* = \frac{\tau(\omega - c)}{\beta}$$

故产品的最优订购量为

$$q_{BWP}^* = \bar{F}^{-1} \left[\frac{\omega(1 + r_b)}{p + \eta} \right] + a - bp + \frac{\tau^2(\omega - c)}{\beta} \quad (30)$$

此时供应链成员的最优利润分别为

$$\Pi_{BWP}^{M*} = (\omega - c) \left\{ \bar{F}^{-1} \left[\frac{\omega(1 + r_b)}{p + \eta} \right] + a - bp + \frac{\tau^2(\omega - c)}{2\beta} \right\} \quad (31)$$

$$\Pi_{BWP}^{B*} = \omega r_b \left\{ \bar{F}^{-1} \left[\frac{\omega(1 + r_b)}{p + \eta} \right] + a - bp + \frac{\tau^2(\omega - c)}{\beta} \right\} + \eta \left\{ N - \bar{F}^{-1} \left[\frac{\omega(1 + r_b)}{p + \eta} \right] - \int_{\bar{F}^{-1} \left[\frac{\omega(1 + r_b)}{p + \eta} \right]}^N F(x) dx \right\} \quad (32)$$

$$\Pi_{BWP}^{R*} = p \left\{ \bar{F}^{-1} \left[\frac{\omega(1 + r_b)}{p + \eta} \right] - \int_0^{\bar{F}^{-1} \left[\frac{\omega(1 + r_b)}{p + \eta} \right]} F(x) dx \right\} - \omega(1 + r_b) \left\{ \bar{F}^{-1} \left[\frac{\omega(1 + r_b)}{p + \eta} \right] + a - bp + \frac{\tau^2(\omega - c)}{\beta} \right\} - \eta \left\{ N - \bar{F}^{-1} \left[\frac{\omega(1 + r_b)}{p + \eta} \right] - \int_{\bar{F}^{-1} \left[\frac{\omega(1 + r_b)}{p + \eta} \right]}^N F(x) dx \right\} \quad (33)$$

由此可以得到惩罚机制在 BWP 模式下,供应链中成员的最优决策以及各自最优利润,为验证该机制的合理性,将之与 BNP 模式进行比较,得到如下性质。

性质 3 $\theta_{BNP}^* = \theta_{BWP}^*; q_{BNP}^* < q_{BWP}^*; \Pi_{BNP}^{M*} < \Pi_{BWP}^{M*}; \Pi_{BNP}^{B*} < \Pi_{BWP}^{B*}; \Pi_{BNP}^{R*} < \Pi_{BWP}^{R*}$ 。

由性质 3 可知,当由外部第三方银行提供信用贷款时,此时资金约束的零售商在获得信用贷款时,是否选择接受由银行制订的惩罚机制对供应链整体绩效影响很大;当零售商选择接受银行确定的惩罚机制时,此时也可以在保证产品绿色水平不降低的前提下,提高零售商的绿色产品订购量,有效地增加制造商、零售商、银行以及供应链整体的利润,同样证明该惩罚机制作为激励机制的现实有效性。

4 数值分析

通过数值仿真实验进行验证分析,具体研究上游绿色制造商作为信用贷款提供方时,其所设置的

单位惩罚 η 对于多种模式下绿色供应链系统模型以及相关最优值决策结果的影响情况,并确定其对系统中成员最优利润的影响。通过验证性的数值分析,得到数值结果与相关仿真图像,从而验证本文所得到的相关性质,并从中获得一些管理学启示。

为便于数值验证分析,假定随机需求因子 ε 是定义在区间 $[0,1]$ 上的均匀分布,其连续性分布函数为 $F(x) = x$, 然后进行相关参数的设定,假定相关参数的取值如下: $a = 1\,500, b = 30, \tau = 1, \beta = 1, p = 30, w = 20, c = 10, r_m = 5\%, r_b = 10\%$, 然后利用 MATLAB 软件进行数值验证,得到数值结果图 3~图 5 所示。

图 3 揭示了制造商提供信用贷款时的单位惩罚 η 与下游零售商的最优产品订购量的 q 关系。由图 3 可知,由于 MNP 模式下系统不存在单位惩罚,故此时产品的最优订购量与单位惩罚 η 无关,曲线呈现水平趋势;但是在 MWP 模式下,产品的最优订购量随着单位惩罚 η 的增加而增大,并且 MWP 模式

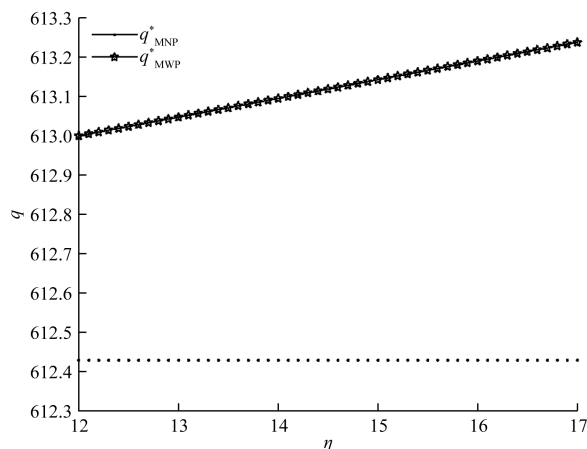


图 3 单位惩罚 η 与最优订购量 q 关系

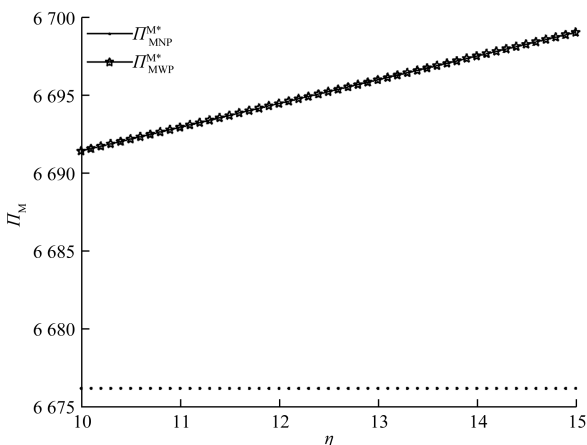


图 4 单位惩罚 η 与制造商利润 Π_M 关系

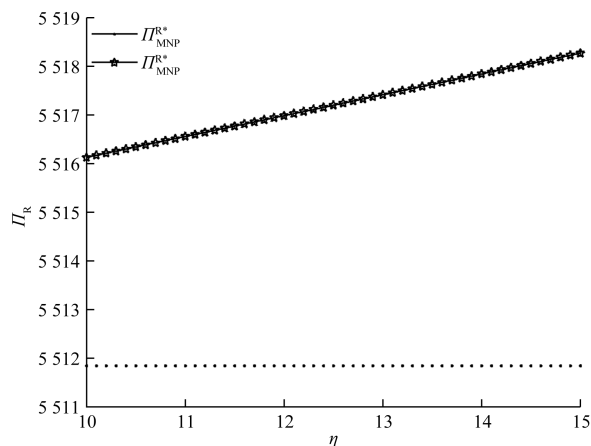


图 5 单位惩罚 η 与零售商利润 Π_R 关系

下的产品最优订购量高于 MNP 模式,这是由于系统存在针对于零售终端产品缺货情况的惩罚,因此下游零售商为了避免由于缺货情况惩罚所带来的损失,都会选择加大产品的订购量。并且在 MWP 模式下系统不允许进行二次订货,零售商只能通过加大首次订货时的订购量来减少缺货所带来的惩罚损失。

图 4 和图 5 具体描述了制造商提供信用贷款时的单位惩罚 η 与供应链中成员利润 Π_M, Π_R 的关系。由图 4 和图 5 可知, MNP 模式下制造商与零售商的最优利润曲线保持水平趋势,即两者的利润与单位惩罚 η 无关,这是由于在该模式下系统不存在单位惩罚,故成员的最优利润与单位惩罚 η 无关。但是在 MWP 模式下,成员的最优利润均随着单位惩罚 η 的增加而增大,且均高于无惩罚情况下各自的最优利润,这说明惩罚机制的引入有效的提高了系统成员的利润,验证了文章前述所得的性质。

5 结论

本文建立了多个不同模式下的 Stackelberg 主从博弈模型,研究了绿色供应链环境中随机需求前提下资金受限零售商的信用支付策略问题以及相应的激励机制设计问题;并通过数值算例分析验证了相关结果对未来的环境保护以及绿色经济发展所具有的重要实际应用意义。相关研究结论与管理学启示如下。

(1)在随机性需求前提下,具体研究资金受限零售商的信用支付策略。结果表明,当系统同时存在两种形式的信用贷款来源时,此时为了获得更多利润并且有效提升产品的绿色水平以及订购量,资金约束的零售商会优先选择由上游制造商所提供的信用贷款,由此实现系统的低碳化、绿色化运营。

(2)不论是由上游制造商还是外部第三方银行提供贷款,资金受限的零售商都会优先选择包括其所设立的惩罚机制在内的信用贷款策略,此时可以在保证产品绿色水平不降低的前提下有效地提高产品订购量以及成员利润。

上述的研究结论为绿色环保行业决策者在实际运营过程中面对不确定的市场需求形式下的信用贷款选择问题时如何做出最佳的决策行为提供了理论指引,本文的模型结果可以帮助决策者在企业的生产销售运营过程中做出最优的决策;本文构建了更加绿色化与可持续化的供应链系统,有助于未来社会的可持续运营发展。

本文还存在诸多局限性,有待未来的进一步深化研究。首先,本文的研究基于单一制造商与单一零售商的简单链式结构之上,未来可以研究包括一个制造商与多个零售商的竞争性市场中的信用策略选择问题以及对应的协调机制设计问题;其次,在随机需求情况下可以考虑制造商或零售商的需求预测以及需求信息共享问题方面的研究;然后,资金受限零售商的初始资金量对于整体供应链系统的影响情况也是一个值得研究的问题。

参考文献

- [1] GAO W F, CHEN F F, YAN W Y, et al. Toward green manufacturing evaluation of light-emitting diodes (LED) production: a case study in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 368: 133149.
- [2] 蔡建湖, 蒋乐, 杨梦园, 等. 不对称信息下考虑风险的绿色供应链决策研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2024, 44(5): 1615-1632.
- [3] 林志炳, 张俊超. 信息不对称下绿色供应链延保服务策略研究[J]. *运筹与管理*, 2024, 33(4): 159-166.
- [4] 梁喜, 胡鑫. 考虑区块链和产品回收的绿色供应链定价决策[J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(11): 3851-3868.
- [5] 卢冰雪, 郭战琴. 绿色金融对企业绿色创新绩效的影响——基于风险承担视角[J]. *科技和产业*, 2024, 24(12): 32-38.
- [6] SUN C Y, ZHANG X, ZHOU Y W, et al. Pricing, financing and channel structure for capital-constrained dual-channel supply chains with product heterogeneity[J]. *International Journal of Production Economics*, 2022, 53: 108591.
- [7] 张冲, 尤明钊. 零售商公平偏好下基于信用支付的供应链协调模型[J]. *工业工程与管理*, 2022, 27(3): 44-53.
- [8] 陈静, 郑朝南. 资金约束下信用支付风险管理:回收率改进,信用保险还是“信用保险+保理”? [J]. *管理评论*, 2024, 36(6): 54-66.
- [9] 李丽君, 杨春雨, 程富. 双重资金约束下考虑碳配额交易的供应链融资决策[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(2): 289-295.
- [10] 赖雪梅, 聂佳佳. 存在外部竞争下的资金约束制造商的最优融资策略[J]. *运筹与管理*, 2023, 32(12): 171-175.
- [11] CHEN J, ZHENG J H, ZHANG T H, et al. Dynamical complexity of pricing and green level for a dyadic supply chain with capital constraint[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2022, 195: 1-21.
- [12] ZHANG Q Y, CHEN K B, WANG S B, et al. Green production investment policy and financing format selection for a capital-constrained manufacturer[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2024, 132: 110349.
- [13] 潘晨, 杨柏, 冯鹤林, 等. 碳交易制度下绿色供应链不同成本分担合同选择[J]. *系统工程学报*, 2023, 38(4): 555-576.
- [14] 李余辉, 徐炳姝, 张发明, 等. 具有企业社会责任偏好的绿色供应链激励研究[J]. *软科学*, 2024, 38(4): 111-117.
- [15] BEHROOZ K, ADEL G, KANNAN G, et al. Pricing strategies in a dual-channel green closed-loop supply chain considering incentivized recycling and circular economy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 423: 138738.
- [16] LAI Z X, LOU G X, MA H C, et al. Optimal green supply chain financing strategy: internal collaborative financing and external investments[J]. *International Journal of Production Economics*, 2022, 253: 108598.
- [17] BAI S Z, WU D X, YAN Z H. Operational decisions of green supply chain under financial incentives with emission constraints [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 389: 136025.
- [18] 张玉豪, 张涛. 碳交易和绿色补贴政策下的低碳供应链最优决策与协调[J]. *技术经济*, 2024, 43(4): 159-176.
- [19] 冯章伟, 李贵萍, 杨会如, 等. 碳减排政策下绿色供应链的区块链溯源技术引入策略[J]. *供应链管理*, 2023, 4(6): 59-71.
- [20] XUE J, HE Y S, PENG G, et al. Under the ecological label policy: supply chain Heterogeneous product innovation strategies for green marketing [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 428: 139370.

Trade Credit Strategy and Incentive Mechanism of Green Supply Chain Member under Random Demand

YANG Ran

(Suzhou Institute of Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Suzhou 215600, Jiangsu, China)

Abstract: A two-echelon green supply chain system with one green manufacturer and one capital-limited retailer was considered on the basis of random demand, then the optimal decision-making problem of the members when the manufacturer and the third-party bank respectively provided the credit loans was studied. Moreover, a punishment mechanism was introduced, and its impact on the operational efficiency of the green supply chain system was studied. Finally, the impact of unit punishment on optimal decisions and profits was analyzed through numerical examples. The research results show that the retailer with capital-limited is more inclined to choose the credit loans that provided by the manufacturer, and the introduction of the punishment mechanism has effectively improved the efficiency of system operation.

Keywords: green supply chain; capital-limited; punishment mechanism; trade credit