

基于 Stackelberg 博弈理论下风险偏好对 可持续供应链风险协调策略

郝 丽, 刘九强, 陈胜利, 卢曼杰

(西安财经大学 管理学院, 西安 710100)

摘要:针对中美贸易摩擦下供需双方需求波动现状,考虑顾客风险型偏好因素对可持续供应链利润分配的影响,采用 Stackelberg 博弈理论,建立可持续供应链协同的集中决策模型和分散决策模型,通过数值模拟,对比分析风险偏好对绿色供应链和非绿色供应链的影响,使利润决策达到帕累托最优。结果表明:顾客风险型偏好有助于在环境动荡下选择信息共享机制远远超过了信息不共享策略所带来的利润;在动荡的社会背景下,风险偏好型决策者更愿意选择绿色供应链产品来满足自己的需求。该研究为可持续供应链风险韧性机理和演化过程提供理论支撑与方法借鉴。

关键词:可持续供应链风险管理;顾客风险型偏好;Stackelberg 博弈模型;协调策略

中图分类号:C93 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)04-0019-10

21 世纪初,中美贸易摩擦备受世界关注,直接影响中美两国正常的经济外交往来和历史进程,贸易大战一直持续到现在而且摩擦强度不断升级,中美两国进入了前所未有的贸易摩擦期。2019 年中美贸易摩擦不断升级,跨国企业的供应链风险安全问题迫在眉睫。中美贸易摩擦对中国企业既是机遇又是挑战,跨国企业如何在供应链中克服风险是智慧供应链发展的保障,可持续供应链又是中国制造 2025 重要的战略指标。王瑞峰等^[1]、黎峰等^[2]、Li 等^[3]研究了中美贸易摩擦背景下对中国制造供应链的评价和应对措施,从地理和商品结构维度来测量中美贸易商品对国际贸易和工业动态的影响。谢泗薪等^[4]、Lisa 等^[5]、Zhou 等^[6]、蔡超^[7]从战略全球价值链的高度、战略的高度、物流服务供应链视角研究了中美贸易摩擦下跨境电商物流联盟风险预判与战略突围方式。曹晓刚等^[8]从渠道偏好、再制造成本节约等参数来协调线上线下闭环供应链中的成员定价和利润决策问题。从研究方法来看,

Yang 等^[9]、Li 等^[10]研究了从 1997 年到 2011 年,中美贸易中的隐含能量计算能力,并通过统计分析法、运筹学方法来提升经济能力。以上国内外中美贸易摩擦研究中都是针对经济、环境、政治等方面的研究,很少对绿色供应链风险机制进行研究。

可持续供应链风险机制研究方面,Zhao 等、Huang 等、Chandra 等、张国兴等^[11-14]采用大数据、博弈论的方法对绿色供应链管理构建多目标优化模型来减少有害物质所带来的固有风险、相关的碳排放和经济成本,考虑多顾客主体、多层次周期、单个生产厂的综合生产与运输问题相融合的非协调和协调模型对比分析,解决供应链运输风险问题。Gunasekaran 等、Donghyun 等^[15-16]对绿色供应链的协同管理和激励机制的现状发展和未来趋势进行研究。Charble 等^[17]研究绿色人力资源管理与绿色供应链管理的关系,把这两个新兴的领域连接起来。朱庆华、赵静等^[18-19]探讨了可持续供应链创新模式如何在供应链各节点风险协同、传统线上销售

收稿日期:2021-07-26

基金项目:国家级重点自然科学基金(71973103);教育部人文社科规划基金(20YJAZH011);陕西省自然科学基金研究计划项目(2020JM-584);陕西省教育厅人文社科项目(20JK0147);西安财经大学人文社科项目(21FCJH002)。

作者简介:郝丽(1988—),女,陕西延安人,西安财经大学管理学院,讲师,博士,硕士研究生导师,中国物流采购联合会青年工作组成员,研究方向为供应链管理、物流管理;刘九强(1963—),男,江苏扬州人,西安财经大学管理学院,教授,博士,美国东密歇根大学数学系终身教授,研究方向为博弈论、图论、组合等;陈胜利(1974—),男,湖北襄阳人,西安财经大学管理学院,副教授,硕士研究生导师,研究方向为供应链管理、决策优化分析;卢曼杰(1999—),女,河南周口人,西安财经大学管理学院,硕士研究生,研究方向为物流管理。

渠道和线下网络直销渠道之间协调,确定双渠道闭环供应链中成员的定价决策问题。徐朗等^[20]引入渠道偏好系数和产品替代系数构建双渠道供应链多元契约决策模型,为提高再制造商的减排水平提出有效的激励契约来鼓励制造企业有序发展。

综上所述,大多学者都关注贸易摩擦下经济体制、对供应链高质量发展的评价等问题,针对可持续供应链的研究相对较少,供应商应对风险策略研究是学术界研究的热点话题。本文以贸易摩擦为

背景,以可持续供应链的二级市场为研究对象,如图 1 所示,图中 S_g 、 S_n 分别代表销售商销售的绿色产品和非绿色产品价格; W_g 、 W_n 分别代表制造商制造的绿色产品和非绿色产品的批发价格。采用斯坦克伯格博弈理论建立可持续供应链协同的集中决策模型和分散决策模型的信息共享契约机制,并用数值模拟对比出风险偏好因素下顾客对绿色供应链和非绿色供应链利润的不同影响,从而实现供应链的利润协调。

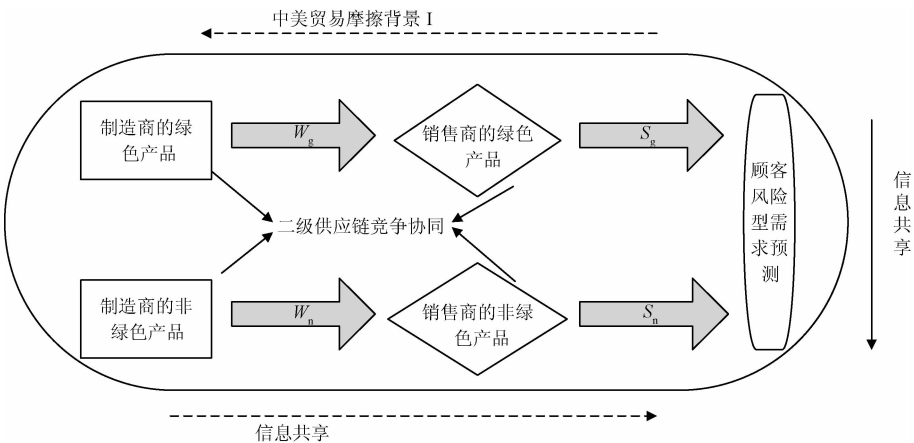


图 1 多种因素下二级供应链竞争协同

1 建模与求解方法

1.1 问题描述

考虑顾客风险型偏好下信息共享的契约机制来协调可持续供应链的定价决策问题。选择一个制造商和一个零售商的二级供应链市场为研究对象,认为在贸易摩擦背景下不一定越保守对企业越有利,当双方仅从自身利益角度决策时双方之前的合作不一定是共赢的,企业也不会因为外界环境的变化而放弃可持续供应链的发展前景。该模型前提条件是制造商批发产品给零售商,零售商销售制造商的产品给消费者,且绿色供应链和非绿色供应链之间竞争激烈,其中绿色供应链生产绿色产品,非绿色供应链生产非绿色产品。顾客根据自己的喜好和对绿色产品的忠诚度选择产品^[19-20]。

本文以汽车供应链整车协同为对象,体现可持续供应链以顾客需要为拉动的供应链管理模式,因此考虑顾客风险型偏好有助于决策者从整体利益出发做出决策。以汽车整车生产为例,在原有 MRPⅡ和 JIT 生产模式的基础上^[19],融入核心的拉式生产体系信息共享的 T-JIT 管理理论和绿色生产相结合(图 2),能达到汽车供应链整体的价值增值。

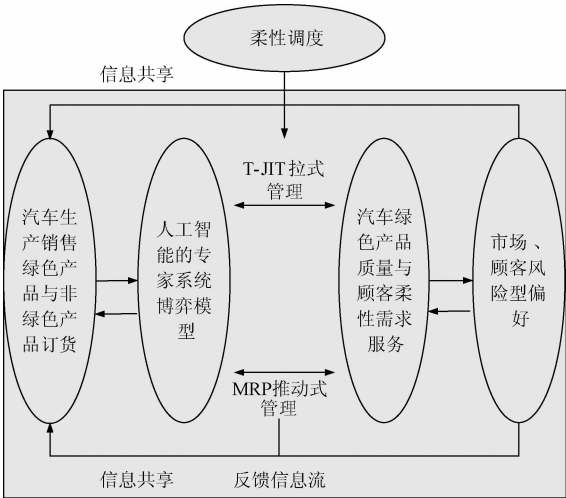


图 2 可持续供应链风险管理模式

1.2 模型假设和参数

对该模型提出如下假设:①每个供应链的需求应是非负的;②供应链中的每个成员都应至少获得最小的预定利润^[21-23];③限制了二级供应链保持同等利润且为非负;需求函数为线性价格需求;二级供应链信息共享。本文以最大限度提高可持续供应链整体利润为目标,采用集中决策和分散决策模

型讨论顾客风险型偏好对供应链利润的影响,同时提出信息共享的契约机制来协调可持续供应链的整体利润。表 1 提供了该问题中决策变量和参数的解释。

表 1 决策变量和参数解释

决策变量	A_g, A_n	可持续供应链和非可持续供应链的需求
	B_g, B_n	销售商销售的绿色产品和非绿色产品
	V_g, V_n	制造商制造的绿色产品批发价格和制造商非绿色产品的批发价格
	M_g, M_n	绿色产品制造成本和非绿色产品制造成本
	Z_{rg}, Z_{rn}	零售商绿色产品的利润和零售商非绿色产品的利润
	Z_{mg}, Z_{mn}	制造商绿色产品的利润和制造商非绿色产品的利润
	Z_{adv}	顾客风险型偏好下对整个供应链的利润收入
参数	t_s	单位绿色产品对绿色度的补贴率
	t_t	非绿色产品的风险偏好效率
	S_1	边际供应链需求的最终价格
	S_2	代表交叉价格敏感度
	λ	消费者对绿色供应链风险型偏好程度 $0 \leq \lambda \leq 1$
	h	二级供应链中制造商的单位生产成本指数
	l	二级供应链市场中零售商的单位销售成本指数
	δ	二级供应链中每单位绿色产品的绿色度成本系数
	τ	二级供应链市场中顾客的风险型偏好系数
	ξ	二级供应链中绿色供应链对每单位绿色偏好的绿色度需求的扩张性系数
	π	二级供应链市场中潜在的价格需求

1) 风险型偏好需求函数。 M_g 表示制造商生产绿色产品时比普通产品额外增加的制造成本,且认为该绿色度成本对制造商的传统边际成本没有影响,因此,可以认为风险型偏好成本函数为一个二次函数^[20]为

$$M_g(\tau) = \delta \tau^2 \tag{1}$$

2) 需求函数。包括直接需求函数和间接需求函数,且该函数可以表示为 $A=f(P)$ 、 $P=f(A)$,而且对每个二级供应链来说绿色产品和非绿色产品最终的价格、产品的绿色度和消费者对绿色供应链风险型的忠诚度都呈现一种线性函数关系。以文献[23-25]中的需求假设为参考,得出以下需求函数:

$$A_g = \lambda \pi - S_1(B_g - t_s \tau) + S_2(B_n + t_t) + \xi \tau \tag{2}$$

$$A_n = (1 - \lambda) \pi - S_1(B_n + t_t) + S_2(B_g - t_s \tau) \tag{3}$$

式中: $S_1 \geq S_2$ 表示供应链自身价格比其他价格影响大。商家对绿色产品投入 $t_s \tau$,则顾客承担 $B_g - t_s \tau$ 的费用来购买绿色产品。为了对非绿色产品进行补偿,顾客必须承担 $B_n + t_t$ 的费用。

3) 风险型偏好的利润函数。顾客风险型偏好直接决定了绿色供应链管理的利润分布,顾客风险型偏好可以当机立断,选择当下有利于自己利润的决策方案,同时呼吁顾客不要退缩,勇于冒险以找到自己在竞争中的战略地位。顾客风险型偏好所带来的利润函数为

$$Z_{adv} = [-\kappa(\tau_s - \tau) - t_s \tau] A_g + (-\tau_s \kappa + t_t) A_n \tag{4}$$

式中: τ_s 为单位产品的标准化绿色度水平,比每个单位产品的绿色度要低; κ 指单位产品的 τ_s 和 τ 之间不同的成本/收入系数,风险型成本包括绿色产品成本和非绿色产品绿色投入,包括更多的可持续产品宣传和资源环境的安全和回收利用程度。

1.3 模型构建

构建在集中决策和分散决策下,决策者如何做出以利润最大化为目标协调绿色供应链。制造商、零售商的利润函数表示为

$$Z_{rg} = (B_g - V_g) A_g \tag{5}$$

$$Z_{rn} = (B_n - V_n) A_n \tag{6}$$

$$Z_{mg} = (V_g - M_g) A_g - \delta \tau^2 \tag{7}$$

$$Z_{mn} = (V_n - M_n) A_n \tag{8}$$

式(5)~式(8)分别表示绿色供应链零售商、非绿色供应链零售商、绿色供应链制造商、非绿色供应链制造商的利润函数。

1.3.1 集中决策模型

在该模型中,制造商和零售商是高度集中的系统,并且可以为供应链的最大化利润同时合作做出决策,因此得出绿色供应链和非绿色供应链的总利润为

$$Z_g = Z_{mg} + Z_{rg} = (B_g - M_g) A_g - \delta \tau^2 \tag{9}$$

$$Z_n = Z_{mn} + Z_{rn} = (B_n - M_n) A_n \tag{10}$$

对以上模型优化决策变量进行计算,通过 B_g 、 B_n 和 τ 求偏导,即 $\partial Z_n / \partial B_n = 0, \partial Z_g / \partial B_g = 0, \partial Z_g / \partial \tau = 0$,可得出如下定理。

定理 1:供应链协同管理是一个高度整合的系统,要求集体利益高于个体利益,在集中决策模型中的优化参数决策为

$$B_g = [M_g(S_1 t_s + \xi)(2S_1^2 t_s + 2S_1 \xi)] - 2\delta\{S_1[2S_1 M_g + S_2(M_n + t_t)] + \pi(S_1 + 2S_1 \lambda - S_2 \lambda)\} / \omega;$$

$$B_n = (S_1^3 t_s^2 (M_n - t_t) + S_1[S_2^2 t_s^2 t_t + (M_n - t_t)\xi^2 + S_2 M_g(t_s \xi - 2\delta)] + S_2[M_g \xi^2 + S_2 t_t(t_s \xi - 2\delta)] + 2S_1^2 (M_n - t_t)(t_s \xi - 2\delta) + \pi\{\xi^2 - S_1^2 t_s^2 (-1 + \lambda) + S_2 t_s \xi \lambda - \xi^2 \lambda - 2b_2 \delta \lambda + S_1[-2t_s \xi(-1 + \lambda) + 4\delta(-1 + \lambda) + S_2 t_s^2 \lambda]\}) / \omega;$$

$$\tau = \{- (S_1 t_s + \xi)[-2S_1^2 M_g + S_2^2 M_g + S_1 S_2 (M_n + t_t) + \pi(S_2 + 2S_1 \lambda - S_2 \lambda)]\} / \omega。$$

式中， $\omega = 2S_1^3 t_s^2 + S_1(-S_2^2 t_s^2 + 2\xi^2) + (4S_1^2 - S_2^2)(t_s \xi - 2\delta)。$

1.3.2 分散决策模型

采用 Stackelberg 博弈，零售商为主导者，供应商为跟随者，这两者考虑的主要决策目标不是成本最小、整体利益最大，而是以各自利润最大为目标进行决策。可持续供应链中的产品批发价格和绿色度成本是由制造商决定的，考虑自己利润最大化是零售商常会选择的最优价格，因此需要通过调整批发价格和绿色产品的绿色度来建立零售商的反应函数。

定理 2:净价的最优反应函数为

$$B_g = -S_2^2 t_s \tau + 2S_1^2 (V_g + t_s \tau) + S_1[S_2(t_t + V_n) + 2\xi \tau] + \pi(S_2 + 2S_1 \lambda - S_2 \lambda) / 4S_1^2 - S_2^2;$$
$$B_n = -2S_1^2 (t_t - V_n) + S_1 S_2 (V_g - t_s \tau) + S_2(S_2 t_t + \xi \tau) + \pi[-2S_1(-1 + \lambda) + S_2 \lambda] / 4S_1^2 - S_2^2。$$

根据分散决策中每个函数的联合凹凸性^[26]，通过计算 $\partial Z_{rg} / \partial B_g = 0, \partial Z_{rn} / \partial B_n = 0$ 来推导出最优的净价反应函数。同理制造商的决策变量也通过对 $\partial Z_{mg} / \partial V_g = 0, \partial Z_{mn} / \partial Z_n = 0, \partial Z_{mg} / \partial \tau = 0$ 计算来得到，从制造商利润函数的净价来替代，净价的最优价值也通过零售商的最优价值反应函数来替代。

考虑绿色度供应链 ρ 和 θ 的变化率， ρ 和 θ 是反映绿色度供应链的重要指标，对供应链的利润和净价都有重要的影响^[23]，分别对以上相关指标求关于 ρ 和 θ 的偏导得出表 2，表 2 给出了这两个因素的变化对供应链管理的影响，其中 CM 代表风险偏好程度的变化率；DM 代表供应链绿色度因素的变化率。

λ 和 τ 是反应绿色度供应链的重要指标，对供应链的利润和净价都有重要的影响^[23]，表 2 给出了这两个因素的变化对供应链管理的影响。

表 2 顾客供应链风险型的偏好程度和绿色度变化的影响效率

变化率	CM	DM
$\partial B_g / \partial \lambda$	$\delta > H$	$\delta > G$
$\partial B_n / \partial \lambda$	$(t_s < \xi / S_1 \& H < \delta < F)$ 或 $(t_s > \xi / S_1 \& F < \delta < H)$	$(t_s < J \& G < \eta < H)$ 或 $(t_s > J \& H < \eta < G)$
$\partial \theta / \partial \lambda$	$\delta > H$	$\delta > G$
$\partial (A_g + A_n) / \partial \lambda$	$\delta > H$	$\delta > G$
$\partial (B_g - B_n) / \partial \lambda$	$F < \delta < H$	$H < \delta < G$
$\partial Z_g / \partial \tau$	$\tau < (B_g - M_g)(S_1 t_s + \xi) / 2\delta$	$\tau < L$
$\partial Z_n / \partial \tau$	never	never

表 2 中， $G、J、H、F、L$ 可以表示为

$$G = [S_1(2S_1^2 t_s - S_2^2 t_s + 2S_1 \xi)(8S_1^4 t_s - 9S_1^2 S_2^2 t_s + 2S_2^4 t_s + 8S_1^3 \xi - 3S_1 S_2^2 \xi)] / [2(64S_1^6 - 84S_1^4 S_2^2 + 33S_1^2 S_4^2 - 4S_2^6)];$$
$$J = \xi(6S_1^2 - 2S_2^2) / (2S_1^3 - S_1 S_2^2);$$
$$H = (S_1 t_s + \xi)(2S_1^2 t_s - S_2^2 t_s + 2S_1 \xi) / (8S_1^4 - 2S_2^4);$$
$$F = (S_1 t_s + \xi)(S_1 t_s - S_2 t_s + \xi) / (4S_1 - 2S_2);$$
$$L = (V_g - M_g)(S_1 t_s + \xi) / 2\delta。$$

2 信息共享契约协调机制

供应链最优化要求供应链上每一个成员都能整体协调达到利益最大化。目前，可持续供应链出现的问题并不是每个供应链上的企业都注重顾客绿色度需求投入，而且也不是每个企业都有整体利益最大化的构想，而这些部分只看眼前利益的企业者的行为往往是造成整体利益下降的原因。该模型前提考虑制造商和零售商都以自身利益最大化为决策目标，因此在分散决策下，不管供应链企业考虑顾客风险型偏好与否，从整体利益的视角观察，可持续供应链分散决策利润永远低于集中决策情况，这就说明可持续供应链处在一种非正常状态。在信息共享契约机制下，假设由于信息共享给制造商带来 ω 的销售收入，则销售商拥有 $1 - \omega$ 的份额，依此为条件，则制造商和零售商的利润函数分别为

$$Z_g = Z_{mg} + Z_{rg} = [\omega B_g - (1 - \omega)M_g]A_g - \delta \tau^2 \tag{11}$$

$$Z_n = Z_{mn} + Z_{rn} = [\omega B_n - (1 - \omega)M_n]A_n \tag{12}$$

$$A_g = \kappa \pi - S_1(\omega B_g - t_s \tau) + S_2(\omega B_n + t_t) + \xi \tau \tag{13}$$

$$A_n = (1 - \lambda)\pi - S_1[(1 - \omega)B_n + t_t] + S_2[(1 - \omega)B_g - t_s \tau] \tag{14}$$

定理 3:信息完全共享条件下，顾客风险型偏好对制造商和零售商的收益共享有影响。在收益共

享契约 (V^{ω^*}, ω^*) 机制下, 可持续供应链能够使制造商和零售商相互协调, γ 代表在顾客风险型偏好下, 制造商占比销售商的效用函数比例, 且当 $\gamma \geq 1/2$ 时, 制造商和销售商的利润均能实现帕累托最优改进。

$$B_g^{\omega^*} = \frac{M_g[\omega(1+4\gamma)(S_1 t_s + \xi)(2S_1^2 t_s + 2S_1 \xi) + \gamma(4\omega - 1)] - 2\delta\omega\{S_1[2S_1 M_g + S_2(M_n + t_t)] + \pi(S_1 + 2S_1 \lambda - S_2 \lambda)\}}{(1+2\kappa)[1+\omega(1+2\kappa)]};$$

$$B_n^{\omega^*} = \left(S_1^3 t_s^2 (M_n - t_t) + S_1[S_2^2 t_s^2 t_t + (M_n - t_t)\xi^2 + S_2 M_g(t_s \xi - 2\delta)] + S_2[M_g \xi^2 + S_2 t_t(t_s \xi - 2\delta)] + 2S_1^2 (M_n - t_t)(t_s \xi - 2\delta)\omega + \pi\{\xi^2 - S_1^2 t_s^2(-1+\lambda)\omega + S_2 t_s \xi - \xi^2 \lambda - 2S_2 \delta \lambda + \omega S_1[-2t_s \xi(-1+\lambda) + 4\delta(-1+\lambda) + S_2 t_s^2 \lambda]\} \right) / 2[1+\omega(1+2\kappa)].$$

令: $B_g^{\omega^*} = B_g$, 可以得出 $\omega^* = \frac{\gamma}{1+2\gamma}$, 容易看出在收益共享契约机制影响下, 制造商和零售商最优价格、自身利润以及供应链上整体利润是否最优

$$B_g^{\omega^*} = \frac{\gamma M_g(1+4\gamma)(S_1 t_s + \xi)(2S_1^2 t_s + 2S_1 \xi) - 4(1-\gamma)\delta[S_1^2 M_g + S_2(M_n + t_t) + \pi(S_1 + 2S_1 \lambda - S_2 \lambda)]}{1+2\gamma};$$

$$Z_{mg}^{\omega^*} = \frac{(1+\gamma)(S_1 t_s + \xi)(M_n + t_t) + 4\gamma[M_g S_1^2 + \pi(S_1 + 2S_1 \lambda - S_2 \lambda)]}{4\gamma(1+2\gamma)};$$

$$Z_{rg}^{\omega^*} = \frac{\gamma(2S_1^2 t_s + 4S_1 \xi)(M_g + t_t) + (1+\gamma)(M_n + t_t)}{4\gamma(1+2\gamma)};$$

$$Z_g^{\omega^*} = \frac{(M_g + M_n - t_t S_1)[\pi(S_1 + 2S_1 \lambda - S_2 \lambda)]}{4\gamma}.$$

式中, $B_g^{\omega^*}$ 、 $Z_{rg}^{\omega^*}$ 、 $Z_{mg}^{\omega^*}$ 、 $Z_g^{\omega^*}$ 分别代表考虑信息共享契约机制下绿色供应链制造商的价格、绿色供应链的制造商利润、销售商利润和整体供应链的总利润。完美的供应链契约协调结果应该保证分散、集中两种决策情况下整体利润最优化一致, 同时各自利润分别需要保障和改进; 或者在保障双方利益不受损的前提下, 最起码改进其中任何一方的利益, 这时协调可实现帕累托最优。

由

$$Z_g^{\omega^*} - Z_g = \frac{[S_1^2 t_s + S_2 \xi + \pi(S_1 + 2S_1 \lambda - S_2 \lambda)]^2}{8\gamma(1+2\gamma)} > 0$$

可知, 假如风险型偏好倾向于制造商, 契约协调以后无绿色供应链制造商利润远远小于绿色度偏好强时分散决策下自身利润的增长; 令

$$Z_g^{\omega^*} - Z_g = \frac{(2\gamma - 1)(S_1 + S_2 - M_g t_s)^2}{16\gamma(1+2\gamma)} \geq 0$$

可知, 当 $\gamma \geq \frac{1}{2}$ 时, 采用契约协同机制下无公平偏好情形下分散决策时的利润小于等于制造商的最优利润。即当 $\gamma \geq \frac{1}{2}$ 时, 考虑信息共享因素的契约 (V^{ω^*}, ω^*) 机制下, 可持续供应链中制造商和零售商的最优利润均能够实现帕累托改进。

证明: 制造商的效用函数为

$$Z_r^* = Z_g - \gamma(Z_g - Z_n) = (1+\gamma)[\omega(B_g - B_n) - (1-\omega)(M_g - M_n)](A_g - A_n) - \delta\tau^2 \quad (15)$$

结合定理 1、2 可知分散决策前提下, 考虑最优利润决策下制造商和零售商的最优价格分别为

化, 在完美供应链契约协调下要求制造商、零售商以及整个供应链利益都要最大化, 或者仅仅是供应链整体利益最大化, 即协调能够实现帕累托最优。

定理 4: 在二级供应链结构中, 假设制造商偏向风险型偏好, 在信息共享契约 (V^{ω^*}, ω^*) 机制下, 制造商分配给零售商的批发价格和保留收入份额 ω 均随着制造商绿色度偏好程度的增加而减小, 制造商最优利润随自身绿色度偏好程度的增大而增加。

证明: 求 $\partial\omega_2^*/\partial\gamma > 0$ 、 $\partial V_2^*/\partial\gamma > 0$ 、 $\partial Z_{mg}^{\omega^*}/\partial\gamma > 0$ 、 $\partial Z_{rg}^{\omega^*}/\partial\gamma > 0$ 。定理 4 得证。

推论 1: 假设制造商是风险偏好型投资者, 在信息共享契约 (V^{ω^*}, ω^*) 机制约束下, 制造商分配给销售商的保留收入份额不低于制造商全额利润的一半。

证明: 由 $\lim_{\gamma \rightarrow \infty} \frac{\gamma}{1+2\gamma} = \frac{1}{2}$, 可知, ω^* 满足 $0 < \omega^* < 1/2$ 。推论 1 得证。

3 数值模拟

3.1 数值假设

为了最大化供应链各节点企业的期望利润, 使每个成员的供应商和销售商实现共赢, 所以 t_s 和 t_t 的边际效应首先明确, 最优取值选取有效值。下面用数值模拟来验证在集中决策和分散决策模型下考虑顾客风险型偏好对各节点企业期望利润决策

的影响。参考文献[24-26]原始数据见表 3、表 4。算,采用 MATLAB 对以上模型进行编程计算,如
根据以上参数,首先输入参数的默认值进行计 图 3 所示。

表 3 在集中决策中不同参数的优化值

参数	t_s^*	t_t^*	Z_{adv}^*	Z_g^*	Z_n^*	B_g^*	B_n^*	τ^*
系统默认值	0.69	20.69	730.713	59.525	10	251.79	52.86	238.64
$\pi=2\ 400$	0.44	129.73	421.841	156.093	10	260.48	52.86	207.67
$S_1=5$	0.50	88.77	423.642	52.473	10	241.07	52.86	227.73
$S_2=4$	0.60	65.4	749.191	99.482	10	260.79	52.86	233.79
$\xi=4$	0.98	0.89	605.152	54.502	10	250.04	52.86	238.49
$M_g=25$	0.69	20.36	1\ 036.84	67.373	10	260.97	52.86	253.88
$M_n=20$	0.80	15.87	1\ 507.52	68.113	10	283.68	52.86	276.47
$\delta=10$	1.35	1.70	-349.35	57.303	10	259.76	52.86	179.71
$\lambda=0.6$	0.67	6.28	880.046	72.494	10	260.91	52.86	245.22
$\kappa=15$	0.69	20.70	1\ 219.26	59.526	10	251.79	52.86	238.65
$\tau_s=200$	0.69	20.71	-177.483	59.27	10	250.53	52.86	238.64
$t_s=0$	0	18.32	-820.848	13.615	100.93	81.27	52.86	30.79
$t_t=0$	0.73	0	443.749	548.83	160.02	242.874	62.91	229.15
$t_s=0$ & $t_t=0$	0	0	-906.286	126.85	152.73	79.47	61.84	29.73

表 4 在分散决策中不同参数的优化值

参数	t_s^*	t_t^*	Z_{adv}^*	Z_g^*	Z_n^*	B_g^*	B_n^*	τ^*
系统默认值	1.41	27.25	-153.502	133.822	10	390.91	81.03	174.17
$\pi=2\ 400$	0.97	139.82	-271.276	189.723	10	399.37	52.81	157.59
$S_1=5$	1.26	108.15	-148.472	159.049	10	467.96	52.81	227.73
$S_2=4$	1.17	111.49	-160.499	166.376	10	410.76	52.81	173.93
$\xi=8$	1.06	43.93	-77.046	139.447	10	398.03	52.81	185.65
$M_g=25$	1.41	27.95	-65.477	150.273	10	407.58	52.81	193.14
$M_n=20$	1.43	23.87	397.72	157.361	10	426.02	52.81	201.74
$\delta=2.5$	0.76	46.69	496.172	132.421	10	386.96	52.81	253.61
$\lambda=0.55$	1.31	20.76	-109.924	144.733	10	403.37	52.81	187.63
$\kappa=15$	1.41	27.25	-134.051	133.721	10	390.91	52.81	182.11
$\tau_s=200$	1.42	27.25	-644.397	133.721	10	390.91	52.81	182.11
$t_s=0$	—	12.13	-448.231	10.662	10	101.51	53.05	14.81
$t_t=0$	1.41	—	-258.747	127.312	16.911	382.17	62.91	177.78
$t_s=0$ & $t_t=0$	—	—	-478.484	10.432	12.904	100.73	61.82	14.63

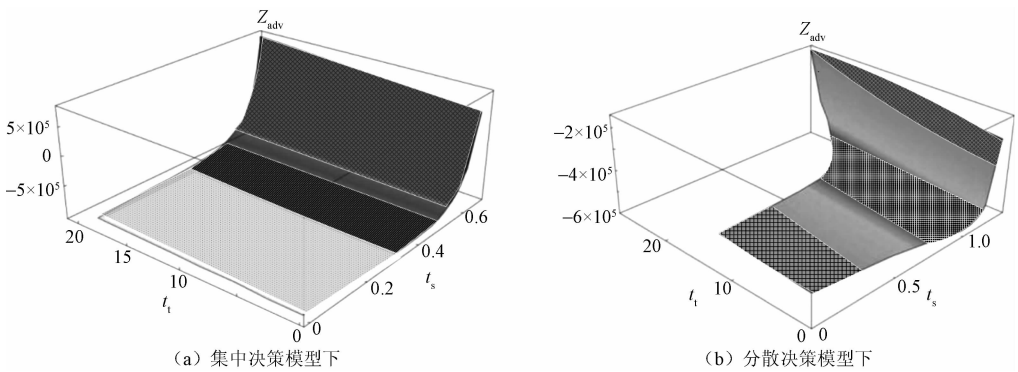


图 3 顾客风险型偏好影响下利润的变化趋势

3.2 数值敏感性分析

讨论顾客风险型偏好投入变化对利润、价格、需求的影响。首先所有的参数不变设为默认值,把 t_t 的值设为 10。在分散模型中,为确保企业的竞争

性需保证每个供应链节点企业获取最低的利润,该值设为 10 000。图 4、图 5 显示了绿色供应链和非绿色供应链企业利润随着顾客风险型偏好的变化而变化的情况。图中 Z_{mg}^d 、 Z_{rg}^d 、 Z_{mn}^d 、 Z_{rn}^d 、 Z_n^d 、 Z_g^d 分别表示分散决策模型下绿色供应链的制造商和零售商的总利润、非绿色供应链制造商和零售商的总利润、非绿色产品的利润、绿色产品的利润; Z_n^c 、 Z_g^c 分别表示集中决策模型下非绿色产品和绿色产品的利润。 A_g^c 、 A_n^c 、 A_g^d 、 A_n^d 、 A^c 、 A^d 、 τ^c 、 τ^d 分别表示在集中决策下绿色产品的需要、非绿色产品需求、分散决策下绿色产品的需求、非绿色产品的需求、集中决策下供应链企业需求、分散决策下供应链需求。

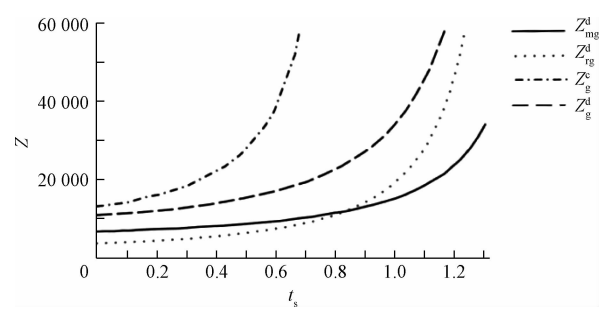


图 4 绿色供应链的利润变化率

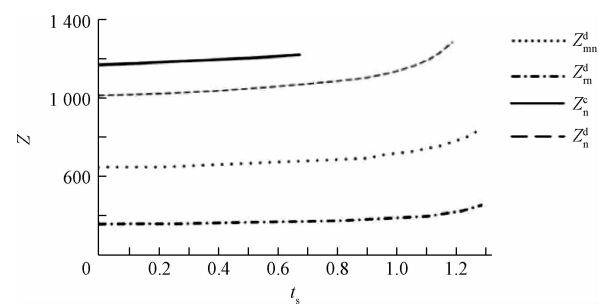


图 5 非绿色供应链的利润变化率

图 4、图 5 显示了在集中决策模型和分散决策模型下总利润以及绿色供应链的制造商和零售商在分散决策模型下的利润随着风险型偏好的变化曲线,可以看出所有的利润都随着风险型偏好的增加而增加,其中可持续供应链总利润增幅最大的还是集中决策模型,同时零售商利润总小于制造商总利润。此外可以看出,在集中决策模型中供应链的总利润比在分散决策模型的利润大,综上企业更倾向于风险偏好的程度高的顾客参与供应链定价决策,同时加强内部风险型项目优化合作可以提高整体供应链的总利润。

讨论风险型偏好对净价和批发价格的影响,对数据进行模拟,结果如图 6、图 7、图 8 所示。图中

S_g^c 、 S_n^c 、 S_g^d 、 S_n^d 分别代表集中决策模型下绿色产品和非绿色产品的净价、分散决策模型下绿色产品和非绿色产品的净价; V_g 、 V_n 、 $V_g - V_n$ 分别表示绿色产品和非绿色产品的批发价格,绿色产品和非绿色产品批发的不同差值, $S_g^d - V_g$ 、 $S_n^d - V_n$ 分别代表绿色产品和非绿色产品的毛利润的不同变化。

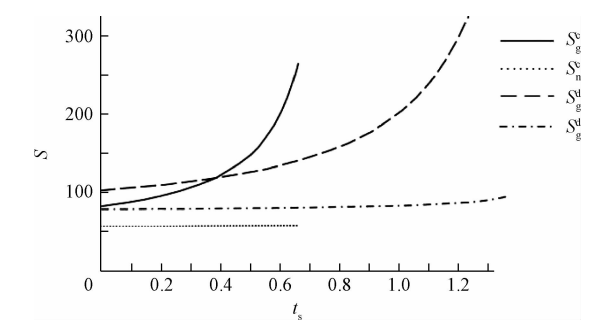


图 6 净价的变化率曲线

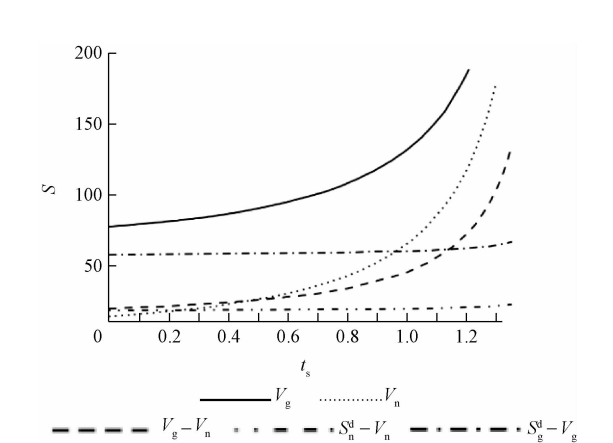


图 7 批发价格的变化率曲线

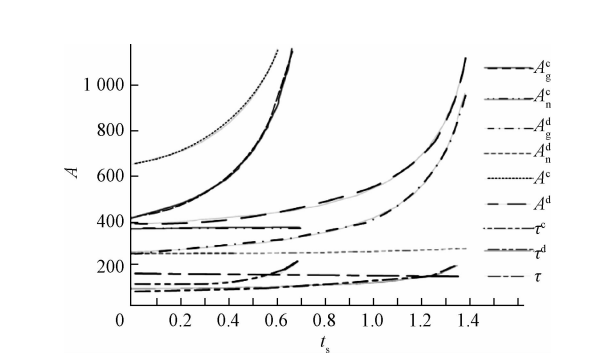


图 8 顾客绿色度偏好和市场需求的变化率曲线

图 6 说明了绿色和非绿色产品的净价随着 t_s 的变化趋势。在集中和分散模型中,绿色产品净价的曲线变化幅度比非绿色产品大;当 $t_s > 0.4$ 时, $P_g^c > P_g^d > P_n^d > P_n^c$; $t_s < 0.4$ 时, $P_g^d > P_g^c > P_n^d > P_n^c$, 可以得出在非绿色产品供应链中,分散决策模型的净价高于集中决策模型;只有当 t_s 足够大时,绿色供应链产

品集中决策模型的净价才大于分散决策模型。

图 7 说明非绿色产品的批发价格随着产品风险型偏好的增加而增长缓慢,绿色产品供应链的批发价格随着产品风险型偏好的增加而快速增长,而绿色产品和非绿色产品的净利润随着顾客风险型偏好的增加在快速增长。因此,随着风险型偏好的增加,绿色产品的价值比非绿色产品的价值增加速度快。

从图 8 可以看出,在分散和集中模型中,风险型偏好都是随着 t_s 的增加而增加,而 $t_s > 0.6$ 或者 1.2

时, τ 的值就大于 τ_s ,且集中模型中需要选择的风险型偏好少于分散模型,在 t_s 不变时,集中模型也需要更多的绿色产品。从风险型需求来看,分散模型和集中模型都对绿色产品有极高的需求,可知随着风险型偏好的增加,为了维持企业利润最大利润,同时扩充绿色产品市场规模,企业更加愿意选择风险偏好决策方式来影响利润分配。

当制造商具有风险型偏好且在信息共享契约机制下,从表 5 中可以看到,在考虑契约机制协调前后可持续供应链各决策变量及利润情况分配。

表 5 绿色度偏好下信息共享契约机制下利润变化率

γ	P^*	w^*	Z_g^*	Z_n^*	ω^*	w^{ω^*}	p^{ω^*}	$Z_g^{\omega^*}$	$Z_n^{\omega^*}$
0	4.2	3.6	0.15	0.18	0	-1	3.8	0.45	0
0.2	4.2	2.98	0.14	0.18	0.15	-0.56	3.8	0.38	0.028
0.4	4.2	2.84	0.12	0.18	0.23	-0.35	3.8	0.36	0.048
0.5	4.2	2.78	0.10	0.18	0.26	-0.23	3.8	0.29	0.074
0.6	4.2	2.75	0.089	0.18	0.31	-0.15	3.8	0.24	0.087
0.8	4.2	2.68	0.072	0.18	0.36	-0.06	3.8	0.21	0.098
1.0	4.2	2.62	0.063	0.18	0.42	0.00	3.8	0.189	1.01
2.0	4.2	2.60	0.052	0.18	0.47	0.25	3.8	0.158	1.04
3.0	4.2	2.56	0.047	0.18	0.49	0.35	3.8	0.146	1.06
5.0	4.2	2.51	0.033	0.18	0.51	0.40	3.8	0.124	1.09

表 5 表明,在没有任何机制协调下,制造商风险型偏好是影响零售商价格决策的主要因素,但是与自身价格决策没有影响。制造商的批发价格随着零售商风险型偏好的缓慢增大反而价格会减小;反之,零售商的最优利润函数与风险型偏好程度成正比,与制造商利润则相反比;制造商的公平偏好因素与整体绿色供应链利润没有太大联系,即制造商的风险型偏好可以相应地调节分配机制,缓解问题的发展,但是不能根治问题的发生,比如改善供应链整体绩效水平等。相反,使用契约机制后,集中决策下供应链整体利润水平达到帕累托最优。当制造商的绿色度 $\gamma \geq \frac{1}{2}$ 时,制造商和零售商都可以实现帕累托最优;制造商的最优利润与风险型偏好成正比,零售商的最优利益与其成反比,但制造商和零售商的利润都能获得比分散决策下更多的利润总额。

3.3 结果分析

通过对集中决策和分散决策模型的对比分析,同时对模型中的不同参数进行数值模拟的敏感度分析,得出以下结论:

1)为了维护长远利益,企业会选择绿色供应链的产品作为决策依据;顾客风险型偏好对可持续供

应链协同管理有重要影响,顾客风险型偏好越高,可导致供应链企业对产品绿色度的需求越高,同时制造商和零售商所获得的利润越大,企业之间合作的机会越大。

2)信息共享契约机制下,制造商能够实现整个供应链决策主体利润帕累托最优。一方面,当制造商的最优利润随风险型偏好的增大而减小,但仍然严格大于分散决策下其自身的最高利润水平,说明风险型偏好的制造商采取决策时不一定会损害自身利益,反而特殊情况下,风险偏好可以改善分散决策的某些利益分配结果;再者,当制造商的绿色度偏好满足以下条件 $\gamma \geq \frac{1}{2}$ 时,制造商的最优利润一般都比分散决策下自身利润水平大。此外,制造商和零售商双方要想都获得利润,都得以合作激励为前提。

4 结论

中美贸易摩擦对中国乃至世界经济产生了重要的影响,企业管理层为了维护自己稳定的市场竞争地位,一般会采用保守的方式作出谨慎的战略决策。本文选择一个制造商和一个零售商的二级供应链市场为研究对象,认为在贸易摩擦背景

下不一定越保守对企业越有利,当双方仅从自身利益角度决策时双方之前的合作不一定是共赢的,企业也不会因为外界环境的变化而放弃可持续发展供应链的发展前景。因此,引入顾客风险型偏好对绿色和非绿色供应链利润策略影响是重要突破口,采用分散决策模型和集中决策模型并用数值模拟可以看出顾客风险型偏好在一定程度上对供应链协同起到促进作用;在信息共享契约机制下,当绿色风险型偏好下对绿色度有一定条件的要求和倾向,制造商和零售商通过收益共享契约机制来协调各自主体利润,使其整体供应链利润实现帕累托改进后的最优状态;此外,契约机制协调后的产品价格相比协调前能低,来实现整体利润函数效应的最优化结果。在未来的研究中可以考虑逆向需求函数来代替直接需求函数来建立模型,同时研究信息不对称条件下的可持续供应链的协同管理更有实际意义,可为可持续供应链协同发展提供理论支持。

参考文献

- [1] 王瑞峰,李爽.中美贸易摩擦背景下中国外贸高质量发展的评价[J].中国流通经济,2019,33(12):16-24.
- [2] 黎峰,曹晓蕾,陈思萌.中美贸易摩擦对中国制造供应链的影响及应对[J].经济学家,2019(9):104-112.
- [3] LI L, DUNFORD M, YEUNG G. International trade and industrial dynamics: Geographical and structural dimensions of Chinese and Sino-EU merchandise trade[J]. Applied Geography, 2012, 32(1): 130-142.
- [4] 谢泗薪,尹冰洁.中美贸易摩擦下跨境电商物流联盟风险预判与战略突围[J].中国流通经济,2019,33(2):73-82.
- [5] LISA B, SASCHA A. Effective logistics alliance design and management[J]. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2016, 46(2): 212-240.
- [6] ZHOU Y, CHEN S M, MEI C. Global value chain, regional trade networks and Sino-EU FTA [J]. Structural Change and Economic Dynamics, 2019, 50(C): 26-38.
- [7] 蔡超.考虑可靠性的物流服务供应链的契约设计[D].沈阳:沈阳工业大学,2019.
- [8] 曹晓刚,郑本荣,闻卉.考虑顾客偏好的双渠道闭环供应链定价与协调决策[J].中国管理科学,2015,23(6):107-118.
- [9] YANG R R, LONG R Y, YUE T, et al. Calculation of embodied energy in Sino-USA trade: 1997—2011[J]. Energy Policy, 2014, 72: 110-119.
- [10] LI H L, CREUTZIG F, YUN F Y. Environmental and economic impacts of trade barriers: The example of China-US trade friction[J]. Resource and Energy Economics, 2020, 59(3): 101-144.
- [11] ZHAO R, LIU Y Y, ZHANG N, et al. An optimization model for green supply chain management by using a big data analytic approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 1085-1097.
- [12] HUANG Y, WANG K, ZHANG T, et al. Green supply chain coordination with greenhouse gases emissions management: A game-theoretic approach [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112(3): 2004-2014.
- [13] CHANDRA P, FISHER M L. Coordination of production and distribution planning[J]. European Journal of Operational Research, 1994, 72(3): 503-515.
- [14] 张国兴,方帅,汪应洛.不同权力结构下的双渠道供应链博弈分析[J].系统工程,2015,33(3):52-59.
- [15] GUNASEKARAN A, SUBRAMANIAN N, RAHMAN S. Green supply chain collaboration and incentives: Current trends and future directions[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2015, 74: 1-10.
- [16] DONGHYUN C, TAEWON H. The impact of green supply chain management practices on firm performance: The role of collaborative capability[J]. Operations Management Research, 2015, 8: 69-83.
- [17] CHARBLE J C J, ANA B L D S J. Green human resource management and green supply chain management: linking two emerging agendas[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112(3): 1824-1833.
- [18] 朱庆华.可持续供应链协同管理与创新研究[J].管理学报,2017,14(5):775-780.
- [19] 赵静,肖亚倩.不同渠道偏好和运营成本下双渠道闭环供应链定价决策研究[J].运筹与管理,2018,27(12):108-114.
- [20] 徐朗,汪传旭,施陈玲.不同契约机制下考虑再制造的双渠道供应链决策[J].控制与决策,2017,32(11):2005-2012.
- [21] SEYED R M, MORTEZA R B. Sustainable supply chain management with pricing, greening and governmental tariffs determining strategies: A game-theoretic approach [J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 105: 287-298.
- [22] HAFEZLKOTOB A, ALAVI A, MAKUI A. Government financial intervention in green and regular supply chains: Multi-level game theory approach [J]. International Journal of Management Science and Engineering Management, 2016, 11(3): 167-177.
- [23] JAFAR C, MORTEZA R B. Cooperative advertising and pricing in a manufacturer-retailer supply chain with a general demand function: A game-theoretic approach[J]. Computer & Industrial Engineering, 2016, 99: 112-123.
- [24] TSAY A A, AGRAWAL N. Channel dynamics under price and service competition[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2000, 2: 372-391.
- [25] XIAO Y J, YANG S, ZHANG L M, et al. Supply chain

cooperation with price-sensitive demand and environmental impacts[J]. Sustainability,2016,8(8):716.

[26] 张婷婷. O2O 模式下考虑促销努力的双渠道供应链决策与协调研究[D]. 成都:电子科技大学,2016.

Risk Coordination Strategy on Risk Preference of Sustainable Supply Chain Based on Stackelberg Game Theory

HAO Li, LIU Jiuqiang, CHEN Shengli, LU Manjie

(School of Management,Xi'an University of Finance and Economics,Xi'an 710100,China)

Abstract: According to the current situation of demand fluctuation between supply and demand under Sino-US trade friction, the influence of customer risk preference factors on profit distribution of sustainable supply chain is considered carefully, then the centralized decision-making model and decentralized decision-making model of sustainable supply chain coordination are established by using Stackelberg game theory. Through numerical simulation, the influence of risk preference on green supply chain and non-green supply chain is compared and analyzed, so that the profit decision-making could reach Pareto optimum. The results show that customer risk preference is helpful to choose information which sharing mechanism under the turbulent environment, far exceeding the profit brought by information non-sharing strategy. Under the turbulent social background, risk preference decision makers are more willing to choose green supply chain products to meet their own needs. It could provides theoretical support, method reference and evolution process of risk resilience mechanism of sustainable supply chain.

Keywords: sustainable supply chain risk management;customer risk preference;Stackelberg game model;coordination strategy