

考虑碳排放与定价的云制造供应链协调机制研究

杨欣 曾珍香 张舜 魏津瑜

【摘 要】面向制造型企业低碳发展的现实需求,基于云制造平台运营商主导的 Stackelberg 博弈,引入价格与碳减排量共同影响的需求函数,综合对比了集中决策与分散决策下云制造供应链最优碳减排量、最优定价及供应链总利润,提出了云制造模式下供应链环境治理的协调机制。主要结论包括:①为实现分散决策的帕累托改进,基于决策主体有限理性的假设,设计了旁支付自执行契约对分散决策的云制造供应链系统进行环境协调优化。②通过算例验证了该契约的有效性,实现了对云制造供应链系统利润增加值的公平分配。③在灵敏度分析中还发现,云制造供应链利润与碳减排成本及消费者的价格敏感系数负相关,与消费者的低碳偏好正相关,且消费者的低碳偏好程度对云制造供应链的总利润的影响最大。本研究为我国云制造服务提供商和云服务平台运营商的运营及低碳发展提供了理论指导和决策参考。

【关键词】云制造;供应链环境治理;协调机制;旁支付自执行契约

【作者简介】杨欣(1984-),女,辽宁沈阳人,河北工业大学经济管理学院,副教授,博士(天津 300401),天津理工大学中环信息学院,主要研究方向为低碳供应链,E-mail:wing_lps@163.com(天津 300380);曾珍香(通讯作者),河北工业大学经济管理学院教授,E-mail:xzeng@hebut.edu.cn(天津 300401);张舜,天津理工大学中环信息学院(天津 300380);魏津瑜,天津理工大学管理学院(天津 300384)。

【原文出处】《工业工程与管理》(沪),2019.1.159~166

【基金项目】国家社科基金资助项目(17BGL009)。

1 引言

云制造作为一种新的基于信息和通信技术的制造范式^[1],具有服务与制造相融合的特征。云制造模式下的供应链融合了产品供应链和服务供应链,主要表现为同时存在产品和服务的流动,以顾客需求为核心,主体之间信息共享、不考虑库存问题^[2]且为顾客提供实时满足需求的综合解决方案^[3],是一类由顾客、云制造服务提供商及云服务平台运营商组成的供应链。这种基于云制造模式的供应链本文简称云制造供应链。

现阶段,国内外陆续出现一些云制造平台,如美国的制造能力交易平台 MFG 网、我国航天科工集团开发的集团企业云制造服务平台以及猪八戒网推出的八戒智造平台等,近年来国家工信部也确定在北京、天津等 16 个省市建设工业云平台,然而通过对国内外关于云制造供应链的研究梳理不难发现,作为新生事物,目前关于云制造实现技术^[4-5]的研究成果相对较多也较为成熟,但针对云制造供应链运作模式,特别是针对云制造供应链协调问题的研究则鲜有涉猎。与此同时,环境污染的加剧也促使越来越多的消费者开始关注商品本身对环境的影响。因此,如何通过契约设计在实现云制造供应链整体绩效改进的同时达到对碳排放量的良好控制,即供应链经济与环境的共同协调,是我国云制造供应链实现“低碳”与“可持续发展”的重要前提与基础,也是应对我国经济新旧动能转化与结构优化升级的有效路径之一。

在过去的二十多年里,国内外诸多学者就供应链的 Pareto 改进与可持续发展等问题进行了深入研究,设

计了一系列的契约应对不同环境下的供应链协调优化,如批发价契约^[6-8]、收益共享契约^[9-11]、回购契约^[12-14]、数量弹性契约^[15-17]等。但由于云制造供应链中产品的服务化,使得其在营运过程中不存在批发及仓储环节,因此,以往产品供应链的协调机制(如批发价契约、回购契约等)无法直接应用于云制造供应链的协调与优化。此外,现阶段关于供应链协调机制的研究多以决策主体自愿接受为前提,过分夸大了系统内成员的个人理性,且缺乏对系统总收益增加值如何分配的深入分析。何龙飞等^[18]和夏良杰等^[19]通过设计新的旁支付契约对供应链序贯博弈的协调进行了研究,解决以往旁支付契约供应链协调过于强调博弈参与方自发参与而未能有效考虑系统利润增量分配合理性及公平性的问题。但上述研究均是以产品供应链为研究对象,并未涉及云制造供应链的相关分析。

鉴于以往研究的不足,本文在考虑个体理性有限性的基础上,放宽了对云制造供应链决策主体自愿接受契约的假设,针对一个云制造服务提供商与一个云服务平台运营商组成的二级供应链系统,构建了市场需求受消费者低碳偏好与价格共同影响的定价与碳减排联合决策模型,引入旁支付自执行契约对云制造供应链进行环境协调,在分散决策下达到集中决策的效果以期丰富云制造供应链协调机制的理论研究,并为我国云制造服务提供商和云服务平台运营商实施低碳化发展与供应链绩效改善提供有效的决策参考。

2 问题描述与模型假设

2.1 问题描述

本文以只有一个云制造服务提供商和一个云制造平台运营商的二级供应链作为研究对象。其中,云制造平台运营商具有较强的讨价还价能力,处于供应链的主导地位,云制造服务提供商则处于服从地位,双方均基于自身利益最大化来进行最优决策。系统的决策顺序如下,首先,云制造平台运营商决策收益分成比例 ϕ 。从“八戒制造平台”的实际运作可见,该收益分成比例是随着云制造服务提供商销售收入的变化而变化的动态比例。随后,云制造服务提供商观测到云制造平台运营商确定的收益分成比例 ϕ 后,选择自身利益最大化的云制造服务租用价格 P 和碳减排量 e 。此外,模型假设云平台用户具有低碳偏好,在进行购买决策时会对产品或服务的碳减排程度进行评价,以确保是否购买以及需求量大小。

2.2 模型假设

模型假设如下:

(1) 整个博弈过程只考虑单一产品或服务种类单销售周期内的情形,假定在单位销售周期内,云制造平台运营商的服务能力为一个固定参量 q ,本文只考虑需求在 $0 \sim q$ 之间,即市场需求总是能够得到满足。

(2) 在云制造供应链的碳排放量优化控制中不考虑流通环节的碳排放量,即假设流通环节的碳排放量不变;

(3) 根据 Savaskan^[20]的研究,可以假设云制造服务提供商的单位生产成本取值为0,此简化既不改变本文结论,又便于计算;

(4) 云制造服务提供商通过一定的技术投入来实现制造环节的碳减排,根据 D'Asprement^[21]的研究,本文假设云制造服务提供商碳减排成本与碳减排量的二次方成正比;

(5) 云制造平台运营商通过广告方式来实现销售环节的碳减排,根据肖人彬等人^[22]的研究,广告支出成本为广告支出变量的平方,并进一步考虑到碳减排量的影响,参照江世英等人^[23]的研究,本文假设云制造平台运营商的碳减排成本与碳减排量成正比;

(6) 由于云平台用户具有低碳偏好,对产品或服务的需求除了受价格影响外,还受碳减排量影响,即产品碳减排量越大,价格越低,则云平台用户越喜欢购买此类产品,即市场需求越旺盛;

(7) 决策主体均为有限理性,即决策双方依靠个人理性的分散决策取得集体理性的集中决策效果。

为便于区分,模型用下标 s 和下标 p 分别表示云制造服务提供商与云制造平台运营商的参数,用上标 DC 、 C 和 DT 分别表示分散决策、集中决策以及应用旁支付自执行契约时的利润参数,其中,对应决策方式下的系统最优值决策变量分别用上标 os, c, cs 表示。

模型涉及基本符号含义如表1所示。

表 1 模型中涉及的符号含义

符号	含义	符号	含义
ϕ	收益分成比例(即云平台用户所支付费用的 ϕ 部分归云制造平台运营商所有), $0 < \phi < 1$ (决策变量)	α_1	支付函数中云制造服务租用价格的常系数
p	云制造服务租用价格(决策变量)	α_2	支付函数中产品碳减排量的常系数
e	产品碳减排量(决策变量)	α_3	支付函数中收益分成比例的常系数
Q_0	市场最大需求量	g	支付函数中的常数项
h	产品碳减排成本系数	θ_1	云制造平台运营商谈判收益值的贴现因子
α	需求对云制造服务租用价格的敏感系数	θ_2	云制造服务提供商谈判收益值的贴现因子
β	消费者的低碳偏好水平	δ^*	云制造平台运营商收益份额的占比
v	云服务平台的广告支出变量	$\overline{\delta^*}$	云制造服务提供商收益份额的占比
$D(p, e)$	云平台用户对于云制造服务的市场需求, 它受价格和产品碳减排量的共同作用即 $D(p, e) = Q_0 - \alpha p + \beta e$	Π	利润函数
$\tilde{T}(p, e, \psi)$	旁支付自执行契约的支付函数	$\Delta \Pi$	利润差额

3 模型建立

3.1 以云制造平台运营商为主的 Stackelberg 博弈模型(分散决策 DC)

在以云制造平台运营商为主的 Stackelberg 博弈模型中, 云制造平台运营商以收益分成比例为决策变量, 云制造服务提供商以云制造服务租用价格和产品碳减排量为决策变量。根据模型假设可知, 云制造平台运营商和云制造服务提供商均只考虑碳减排成本。因此, 云制造服务提供商的利润函数为

$$\prod_{(p,e)}^{DC}(p,e) = (1-\phi)p(Q_0 - \alpha p + \beta e) - \frac{1}{2}he^2 \tag{1}$$

其中, $\frac{1}{22}he^2$ 表示碳减排量为 e 时的碳减排成本投入量。

云制造平台运营商的利润函数为

$$\prod_{(p,e)}^{DC}(\phi) = \phi p(Q_0 - \alpha p + \beta e) - v^2e \tag{2}$$

其中, v^2e 表示碳减排量为 e 时云服务平台的广告宣传费用, v^2 为营销费用。

对式(1)分别求关于 p 和 e 的一阶偏导, 其海森矩阵为

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \prod_{(p,e)}^{DC}(p,e)}{\partial p^2} & \frac{\partial^2 \prod_{(p,e)}^{DC}(p,e)}{\partial p \partial e} \\ \frac{\partial^2 \prod_{(p,e)}^{DC}(p,e)}{\partial e \partial p} & \frac{\partial^2 \prod_{(p,e)}^{DC}(p,e)}{\partial e^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\alpha(1-\phi)\beta(1-\phi) \\ \beta(1-\phi) - h \end{bmatrix}$$

当且仅当

$$\begin{cases} -2\alpha(1-\phi) < 0 \\ 2\alpha h - (1-\phi)\beta^2 > 0 \end{cases} \text{ 矩阵负定, 为凹函数, 存在极大值。因此, 令 } \frac{\partial \prod_{(p,e)}^{DC}(p,e)}{\partial p} = 0, \frac{\partial \prod_{(p,e)}^{DC}(p,e)}{\partial e} = 0,$$

求解可得

$$p^{os} = \frac{hQ_0}{2\alpha h - (1-\phi)\beta^2}, e^{os} = \frac{(1-\phi)\beta Q_0}{2\alpha h - (1-\phi)\beta^2}$$

将 p^{os} 和 e^{os} 带入式(2)中, 并对 ϕ 求导可得最佳的收益分成比例为

$$\phi^{os} = \frac{2Q_0\alpha h^2 - Q_0h\beta^2 + 4\alpha h\beta v^2 - 2\beta^3 v^2}{\beta^2(Q_0h - 2\beta v^2)}$$

最终, 通过等式代换可得 Stackelberg 博弈时系统最佳的定价 p^{os} 与碳减排量 e^{os} 分别为: $p^{os} = \frac{hQ_0 - 2\beta v^2}{2(2\alpha h - \beta^2)}$,

$$e^{os} = \frac{\beta^2 Q_0 - Q_0 \alpha h - 2\alpha \beta v^2}{\beta(2\alpha h - \beta^2)}$$

因此,将最优决策变量 φ^{os} , p^{os} 和 e^{os} 代入到式(1)与式(2)中,可求出云制造服务提供商与云平台各自的利润为

$$\Pi_s^{DC} = \frac{3Q_0 \alpha h^2 \beta^2 + 2Q_0 \alpha h \beta^3 v^2 - 2Q_0^2 \alpha^2 h^3 - Q_0^2 h \beta^4 - 4Q_0 \alpha^2 h^2 \beta v^2}{2\beta^2(2\alpha h - \beta^2)^2}$$

$$\Pi_p^{DC} = \frac{2Q_0^2 \alpha^2 h^3 - Q_0^2 \alpha h^2 \beta^2 - 4\alpha \beta^4 v^4 - 12Q_0 \alpha h v^2 \beta^3 + 4Q_0 v^2 \beta^5 + 8Q_0 \alpha^2 h^2 v^2 \beta + 8\alpha^2 h v^4 \beta^2}{4\beta^2(2\alpha h - \beta^2)^2}$$

3.2 集中控制式博弈模型(集中决策 C)

本部分针对决策主体双方同时具有集体理性的假设,仅处于求解 Pareto 均衡点的考虑。此时,系统的决策变量也由三个退化至两个,并将集中决策时系统最优的碳排放量、最优定价以及系统利润作为后续协调优化的标杆。因此,供应链整体利润函数为

$$\Pi_{(p,e)}^{DC}(p,e) = P(Q_0 - \alpha p + \beta e) - \frac{1}{2} h e^2 - v^2 e \quad (3)$$

对式(3)分别求关于 p 和 e 的一阶偏导,其海森矩阵为

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_{(p,e)}^c(p,e)}{\partial p^2} & \frac{\partial^2 \Pi_{(p,e)}^c(p,e)}{\partial p \partial e} \\ \frac{\partial^2 \Pi_{(p,e)}^c(p,e)}{\partial e \partial p} & \frac{\partial^2 \Pi_{(p,e)}^c(p,e)}{\partial e^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\alpha\beta \\ \beta - h \end{bmatrix}$$

当且仅当 $\begin{cases} -2\alpha < 0 \\ 2\alpha h - \beta^2 > 0 \end{cases}$ 矩阵负定,为凹函数,存在极大值。

因此,令 $\frac{\partial \Pi_{(p,e)}^c(p,e)}{\partial p} = 0$, $\frac{\partial \Pi_{(p,e)}^c(p,e)}{\partial e} = 0$, 求解可得集中决策时系统最优的定价 p^c 与最优碳减排量 e^c 分别为

$$p^c = \frac{hQ_0 - \beta v^2}{2\alpha h - \beta^2}, e^c = \frac{\beta Q_0 - 2\alpha v^2}{2\alpha h - \beta^2}$$

此时,集中控制式博弈时供应链总利润为

$$\Pi^c = \frac{2Q_0^2 \alpha h^2 - 4\alpha Q_0 h \beta v^2 - 2\alpha \beta^2 v^4 - h Q_0^2 \beta^2 + 4h \alpha^2 v^4 + 2Q_0 v^2 \beta^3}{2(2\alpha h - \beta^2)^2}$$

3.3 自执行契约下的供应链协调(DC)

本文通过改变双方支付函数,使得博弈仍在分散决策下进行,但系统优化的最终结果可达到集中决策时的效果。换言之,系统在云制造供应链决策主体双方仍为个人有限理性的基础上,利用旁支付契约完成双方利润的自我有效协调。令 p^{cs} , e^{cs} 和 φ^{cs} 分别表示应用旁支付自执行契约后云制造供应链的最优定价、最优碳减排量和分成比例,其各自对应的最优云制造服务提供商利润与云制造平台运营商利润分别为: $\Pi_s^{DT}(p^{cs}, e^{cs}, \varphi^{cs})$ 和 $\Pi_p^{DT}(p^{cs}, e^{cs}, \varphi^{cs})$, 则应用契约协调后的系统利润需满足同时参与约束和激励相容两条件^[18]。

定理1(参与约束): $\Pi_s^{DT}(p^{cs}, e^{cs}, \varphi^{cs}) \geq \Pi_s^{DC}(p^{os}, e^{os}, \varphi^{os})$, $\Pi_p^{DT}(p^{cs}, e^{cs}, \varphi^{cs}) \geq \Pi_p^{DC}(p^{os}, e^{os}, \varphi^{os})$, 即在旁支付自执行契约下的双方利润均大于分散决策下的利润,实现 Pareto 改进。

定理2(激励相容): $(p^{cs}, e^{cs}, \varphi^{cs}) = (p^c, e^c, \varphi^c)$, 即旁支付自执行契约下求得的最优解与集中决策求得的最优解相同。

假定双方之间的旁支付函数为 $T(p, e, \phi) = T(p, e, \phi) + g$, 其中 g 为常数项, $T(p, e, \phi)$ 为不含常数项的关于 p, e, ϕ 的函数, 记为 $T(p, e, \phi) = \alpha_1 p + \alpha_2 e + \alpha_3 \phi$ 。则云制造供应链双方相应的支付函数分别为

云制造平台运营商:

$$\Pi_p^{DT}(p, e, \varphi) = \Pi_p^{DC}(p, e, \varphi) + T(p, e, \varphi) \quad (4)$$

云制造服务提供商:

$$\Pi_s^{DT}(p, e, \varphi) = \Pi_s^{DC}(p, e, \varphi) - T(p, e, \varphi) \quad (5)$$

根据定理 2 计算可得: $\alpha_1 = -\varphi^c(Q_0 - 2\alpha p^c + \beta e^c) = 0$, $\alpha_2 = -\beta\varphi^c p^c + v^2$ 。由此说明租用价格 p 并不参与转移支付对供应链内部利润的调节,在本文所研究的问题中,只需通过调节碳减排量 e 和收益分成比例 φ 两个变量便可达到契约协调的目的。其中, $\varphi^c \in \left(\frac{v^2 e^c}{p^c(Q_1 - \alpha_1 p^c + \beta_1 e^c)}, 1 - \frac{he^c \& 2}{2p^c(Q_1 - \alpha_1 p^c + \beta_1 e^c)} \right)$ 的任意实数,表示的是在集中决策下未能在决策变量中体现的收益分成比例这一中间变量。

$$\text{令 } \frac{\partial \Pi_s^{DT}(p, e, \varphi)}{\partial \varphi} = 0, \text{ 求得}$$

$$\alpha_3 = \frac{AQ_0^2 + BQ_0 + CQ_0\alpha^2 + DQ_0\alpha + E\alpha^2\alpha^2 + F\alpha_2^2\alpha + G\alpha_2\alpha^2 + H\alpha_2\alpha}{I\alpha^3 h^3 + J\alpha^2 h^2 t^2 + K\alpha h t^4 + 1t^6}$$

其中:

$$A = 2\alpha^2 \varphi^3 h^3 - 6\alpha^2 \varphi^2 h^3 + 6\alpha^2 \varphi^c h^3 - 2\alpha^2 h^3 - \alpha\varphi^4 h^3 t^2 + 2\alpha\varphi^3 h^2 t^2 - 2\alpha\varphi^c h^2 t^2 + \alpha h^2 t^2$$

$$B = 8\alpha^2 \varphi^3 h^2 t - 24\alpha^2 \varphi^2 h^2 t + 24\alpha^2 \varphi^c h^2 t - 8\alpha^2 h^2 t^2 - 4\alpha\varphi^3 h t^3 + 12\alpha\varphi^2 h t^3 - 12\alpha\varphi^c h t^3 + 4\alpha h t^3$$

$$C = 4\varphi^3 h^2 t v^2 - 12\varphi^2 h^2 t v^2 + 12\varphi^c h^2 t v^2 - 4h^2 t v^2$$

$$D = 2\varphi^4 h t^3 v^2 - 8\varphi^3 h t^3 v^2 + 12\varphi^2 h t^3 v^2 - 8\varphi^c h t^3 v^2 + 2h t^3 v^2$$

$$E = 6\varphi^3 h t^2 - 18\varphi^2 h t^2 + 18\varphi^c h t^2 - 6h t^2$$

$$F = \varphi^4 t^4 - 6\varphi^3 t^4 + 12\varphi^2 t^4 - 10\varphi^c t^4 + 3t^4$$

$$G = 4\varphi^3 h t^2 v^2 - 12\varphi^2 h t^2 v^2 + 12\varphi^c h t^2 v^2 - 4$$

$$H = 2\varphi^4 t^4 v^2 - 8\varphi^3 t^4 v^2 + 12\varphi^c t^4 v^2 + 2t^4 v^2$$

$$I = 8\varphi^3 - 24\varphi^2 + 24\varphi^c - 8$$

$$J = 12\varphi^4 - 48\varphi^3 + 72\varphi^2 - 48\varphi^c + 12$$

$$K = 6\varphi^5 - 30\varphi^4 + 60\varphi^3 - 60\varphi^2 + 30\varphi^c - 6$$

$L = \varphi^6 - 6\varphi^5 + 15\varphi^4 - 20\varphi^3 + 15\varphi^2 - 6\varphi^c + 1$ 由此,可以求出 $T(p, e, \phi) = T(p, e, \phi) + g$ 中三个参数 α_1 , α_2 , α_3 的值。此时,云制造平台运营商利益增量为 $\Delta \Pi_p = \Pi_p^C(p^c, e^c, \phi^c) + T(p^c, e^c, \phi^c) + g - \Pi_p^{DC}(p^{os}, e^{os}, \phi^{os})$; 云制造服务提供商利益增量为 $\Delta \Pi_s = \Pi_s^C(p^c, e^c, \phi^c) - T(p^c, e^c, \phi^c) - g - \Pi_s^{DC}(p^{os}, e^{os}, \phi^{os})$ 。

本文将云制造平台运营商和云制造服务提供商在一个周期内的讨价还价过程近似为一个无限期的 Rubinstein 讨价还价模型,最终的纳什均衡为 $(\delta^*, \bar{\delta}^*)$, 其中 $\delta^* = (1 - \theta_1)/(1 - \theta_1 \theta_2)$, $\bar{\delta}^* = (\theta_1 - \theta_1 \theta_2)/(1 - \theta_1 \theta_2)$, 并且可得: $\Delta \Pi_p = \delta^* \Delta \Pi$, $\Delta \Pi_s = \bar{\delta}^* \Delta \Pi$ 。联立得

$$g = \delta^* [\Pi_s^C(p^c, e^c, \varphi^c) - T(P^{cs}, e^{cs}, \varphi^{cs}) - \Pi_2^{DC}(p^{os}, e^{os}, \varphi^{os})] - \bar{\delta}^* [\Pi_p^C(p^c, e^c, \varphi^c) + T(p^{cs}, e^{cs}, \varphi^{cs}) - \Pi_1^{DC}(p^{os}, e^{os}, \varphi^{os})]$$

此时,旁支付 $T(p, e, \phi) = T(p, e, \phi) + g$ 中各个参数均可确定,且满足定理 1 和定理 2 的要求。

4 算例与灵敏度分析

4.1 算例及其结果

为验证模型的有效性,在借鉴江世英^[23]研究中的部分数据,即 α, β 以及 v 的值。由于该研究主要研究绿色供应链的博弈模型问题,与本研究有一定的相似性且其数据取值合理,所以借鉴其部分数据。因此,本模型相应参数为: $Q_0 = 100, \alpha = 2, \beta = 1, h = 0.4, v = 1, \varphi^c = 0.3$ 且 $0.02 < \varphi^c < 0.39$, 分别代入分散决策,集中决策时的利润函数,计算后的两种决策方式下系统的最优决策变量及利润如表 2 所示。

表 2 分散决策与集中决策的最优结果

	p^{os}	e^{os}	φ^{os}	Π_p^{DC}	Π_s^{DC}	Π^{DC}
分散决策	31.7	26.7	0.66	1303.3	533.3	1836.6
	p^c	e^c	φ^c			Π^C
集中决策	65.0	160.0	0.3	—	—	3170.0

对比表 2 数据发现,集中决策下的最优碳减排量明显大于分散决策下的碳减排量,其服务租用价格也明

显高于分散决策时的服务租用价格。由于云制造供应链的自身特点,即云制造平台运营商不需要支付任何费用给云制造服务提供商,决策主体之间以云制造平台运营商向云制造服务提供商提供渠道服务而构成合作关系,避免了传统产品供应链中的双重加价现象,这也是集中决策的服务租用价格高于分散决策服务租用价格的主要原因。随后,对比两种决策方式下的系统总利润可知,在云制造供应链的盈利性方面,集中决策也具备明显的优越性。假设云制造平台运营商与云制造服务提供商的收益占比分别为 $\delta^* = 0.5, \overline{\delta^*} = 0.5$; 整理可得旁支付自执行契约的相关参数为 $a_1 = 0, a_2 = -18.5, a_3 = 1477.6, g = 2111.7$; 旁支付函数为 $\tilde{T}(p^c, e^c, \varphi^c) = -18.5e^c + 1477.6\varphi^c + 2111.7$ 。

4.2 灵敏度分析

在实际的云制造供应链运行过程中,云制造服务提供商碳减排技术及其外部环境参数的变化均可能引发云制造供应链整体绩效的波动,因此选取模型中的消费者的低碳偏好 β 、碳减排成本 h 和消费者的价格敏感系数 α 三个参数进行灵敏度分析。

(1) 消费者的低碳偏好波动的影响

消费者的低碳偏好波动在一定程度上反映了消费者对低碳产品的认可程度。表 3 展示了消费者的低碳偏好在 $[1.00, 1.06]$ 范围内波动时分散决策与集中决策下系统的最优碳减排量、最优定价及供应链总利润的变化情况。

表 3 消费者的低碳偏好 β 的灵敏度分析结果

β	p^{os}	e^{os}	φ^{os}	p^c	e^c	Π_p^{DC}	Π_s^{DC}
1.00	31.7	26.7	0.66	65.0	160.0	1303.3	533.3
1.02	33.9	35.0	0.60	69.7	175.1	1335.5	685.7
1.04	36.6	44.5	0.53	75.2	192.9	1378.4	856.1
1.06	39.8	55.7	0.47	81.7	214.1	1434.7	1050.7
β	Π^{DC}	Π_p^C	Π_s^C	Π^C	$\tilde{T}$	Π_p^{DT}	Π_s^{DT}
1.00	1836.7	—	—	3170.0	-405.0	1970.0	1200.0
1.02	2021.2	—	—	3395.3	-713.6	2022.6	1372.7
1.04	2234.5	—	—	3661.3	-1104.2	2091.8	1569.5
1.06	2485.3	—	—	3979.8	-1612.7	2181.9	1797.9

综合对比发现,无论在何种决策方式下,云制造供应链的最优碳减排量、最优定价及供应链总利润均会随着消费者低碳偏好的增加而增加,且集中决策较分散决策在供应链碳减排以及盈利性方面的优越性依然存在。观察表 3 的数据可发现,低碳偏好同幅度波动对集中决策下最优碳减排量的影响要大于对分散决策时最优碳减排量的影响,随着 β 的上升, e^{os} 上升的速度逐步放缓,增速从 31% 下降至 25%; 然而,随着 β 的上升, e^c 的上升速度逐渐加快,增速从 9.4% 增加到 11%, 由此可见,随着消费者环保倾向的逐渐加深,集中决策在供应链环保性方面的优越性日趋显著,即更加有利于环境治理效果的提升。当然,消费者低碳偏好的提升也意味着市场对商品环保性的关注度逐渐增强,对价格的敏感性相对减弱,这也解释为什么系统最优定价会随着 β 的增加而略有提升。此外, β 的增加会引发分散决策下系统利润和集中决策下系统利润的上升,但集中决策下系统利润上升的幅度要明显高于分散决策时系统利润上升的幅度。因此,当消费者低碳偏好上升时,集中决策在提升系统整体收益方面也具有较大优势,这种优势也将被保留在含旁支付自执行契约的云制造供应链中。

(2) 碳减排成本波动的影响

云制造服务提供商的碳减排成本波动在一定程度上反映了云制造服务提供商运用的碳减排技术的先进程度。表 4 展示了云制造服务提供商碳排放成本在 $[0.37, 0.40]$ 波动时对应决策方式下系统最优定价、碳减排量及系统利润。

表 4 碳减排成本 h 的灵敏度分析结果

h	p^{os}	e^{os}	φ^{os}	p^c	e^c	Π_p^{DC}	Π_s^{DC}
0.40	31.7	26.7	0.66	65.0	160.0	1303.3	533.3
0.39	33.0	32.1	0.62	67.9	171.4	1322.3	626.8
0.38	34.6	38.5	0.58	71.2	184.6	1346.2	730.8
0.37	36.5	45.8	0.53	75.0	200.0	1376.0	847.9
h	Π^{DC}	Π_p^c	Π_s^c	Π^c	$\tilde{T}$	Π_p^{DT}	Π_s^{DT}
0.40	1836.7	—	—	3170.0	-405.0	1970.0	1200.0
0.39	1949.1	—	—	3307.1	-590.0	2001.3	1350.8
0.38	2076.9	—	—	3465.4	-812.7	2040.4	1425.0
0.37	2223.9	—	—	3650.0	-1085.9	2089.1	1560.9

观察表 4 可知,不同决策方式下系统的最优定价、碳减排量及总利润均会随着碳排成本的降低而呈上升趋势,且 h 的波动对集中决策的碳减排量影响更为显著。随着 h 的下降, e^{os} 上升的速度逐步放缓,增速从 20.2% 下降至 19.1%;然而,随着 h 的下降, e^c 的上升速度却不断加速,增速从 7.1% 增加到 8.3%。此外,云制造服务提供商碳减排成本的下降对集中决策系统总利润的贡献度明显高于分散决策时的系统总利润,即集中决策下总利润的提升比分散决策下总利润的提升多 92.8。因此,随着制造型企业碳减排技术的不断革新,当减排成本下降至一定程度时,集中决策较分散决策的优越性会逐渐突显,这就意味着,在集中决策下,碳减排技术成熟的云制造服务供应商的碳减排力度越大其收益越多,对云制造供应链整体环境绩效的提升越有利。

(3) 价格敏感系数波动的影响

不同的消费群体对价格的敏感性也存在差异,为了进一步分析消费群体的价格敏感差异对云制造供应链的影响,此处分析价格敏感系数 α 在 [1.94, 2.00] 范围内波动时分散决策与集中决策下系统的最优碳减排量、最优定价及供应链总利润的变化情况,如表 5。

表 5 价格敏感系数 α 的灵敏度分析结果

α	p^{os}	e^{os}	φ^{os}	p^c	e^c	Π_p^{DC}	Π_s^{DC}
2.00	31.7	26.7	0.66	65.0	160.0	1303.3	533.3
1.98	32.5	28.8	0.65	66.7	164.5	1323.9	576.7
1.96	33.5	31.1	0.63	68.7	169.2	1345.7	622.5
1.94	34.4	33.6	0.61	70.7	174.1	1368.7	671.0
α	Π^{DC}	Π_p^c	Π_s^c	Π^c	$\tilde{T}$	Π_p^{DT}	Π_s^{DT}
2.00	1836.7	—	—	3170.0	-405.0	1970.0	1200.0
1.98	1900.7	—	—	3256.8	-482.6	2002.0	1254.8
1.96	1968.2	—	—	3348.5	-567.1	2035.8	1312.7
1.94	2039.7	—	—	3445.5	-659.4	2071.6	1373.9

如表 5 所示,随着消费者价格敏感系数的降低,两种决策方式下系统的最优定价、最优碳减排量以及总利润均呈上升趋势。消费者价格敏感性的降低意味着产品价格的提升对市场需求的影响减小,因此,基于供应链整体收益最大化视角,云制造服务提供商适当地提价更有利于系统利润的增加。与此同时,为了弥补价格提升造成的消费者流失,供应链系统会用增加碳减排量的方式赢得市场需求,而当消费者价格敏感系数从 2.00 下降到 1.94 时,集中决策时的最优碳减排增加量是分散决策下碳减排增加量的 2 倍多,这也充分体现了集中决策方式在应对消费者价格敏感性波动时的良好环境绩效。

综合对比上述三个参数的灵敏度分析结果如表 6 所示,相较于价格敏感性和减排成本,消费者的低碳偏好程度对云制造供应链总利润和碳减排程度的影响较大。因此,在云制造供应链的实践营运中应更加注重消费者低碳偏好的提升,云平台与政府以及相关环保团体可通过合作的方式加大对低碳环保的宣传力度,增强消费者对低碳环保型产品的倾向,以便实现云制造供应链经济效益与环境效益的共同提升。此外,政府对于云制造服务提供商在生产过程中碳减排技术的投资补贴也是促进碳减排和提升总利润的途径之一。

表 6 各参数对系统利润的影响程度

	β	h	α
参数变化率	60.0%	81.0%	31.0%
利润变化率	25.5%	15.1%	8.7%
利润变化率/参数变化率	42.5%	18.16%	28.1%
碳减排量变化率	33.8%	25.0%	8.8%
碳减排量变化率/参数变化率	56.3%	30.9%	28.4%

5 结论

本文针对一个云制造服务提供商与一个云服务平台运营商组成的云制造供应链的环境治理协调机制问题进行研究,构建了碳减排量与价格共同影响的云制造产品需求函数,分别对比了集中决策与分散决策下云制造供应链的最优定价、碳减排量及总利润情况。研究表明,无论是在最优定价、碳减排量及总利润方面,集中决策均优越于分散决策。为了实现分散系统的帕累托改进,激励供应链增加碳减排量从而实现整个供应链的环境绩效的提升,文章引入自执行契约对分散决策下的云制造供应链进行协调,实现了决策主体双方在分散决策情况下实现集中决策的效果。最后,模型通过算例验证了该契约的有效性,并通过灵敏度分析发现,云制造供应链整体利润与碳减排成本及消费者的价格敏感系数负相关,与消费者的低碳偏好正相关,其中消费者的低碳偏好程度对云制造供应链的总利润的影响最大。

参考文献:

[1]胡艳娟,武理哲,张霖,等. 云制造服务评价理论与方法研究综述[J]. 计算机集成制造系统,2017,23(03): 640-649.

[2]吴成霞,赵道致,潘新宇. 云服务平台预测信息共享对制造商渠道策略的影响[J]. 软科学,2016,30(04):105-110.

[3]王薇薇,洪跃,张在房,服务型制造混合供应链的稳定性及弹性评估[J]. 计算机集成制造系统,2018,24(01): 203-212.

[4]李伯虎,张霖,任磊,等. 云制造典型特征、关键技术与应用[J]. 计算机集成制造系统,2012,18(07):1345-1356.

[5]Liu X F, Shahriar M R, Sunny S, et al. Cyber-physical manufacturing cloud: Architecture, virtualization, communication, and testbed[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017, 43: 352-364.

[6]Wang X, Wang X, Su Y. Wholesale-price contract of supply chain with information gathering[J]. Applied Mathematical Modeling, 2013, 37(6): 3848-3860.

[7]Cao E, Ma Y, Wan C, et al. Contracting with asymmetric cost information in a dual-channel supply chain[J]. Operations Research Letters, 2013, 41(4): 410-414.

[8]毕功兵,瞿安民,梁樑,不公平厌恶下供应链的批发价格契约与协调[J]. 系统工程理论与实践,2013,33(1): 134-140.

[9]Palsule-Desai O D. Supply chain coordination using revenue-dependent revenue sharing contracts[J]. Omega, 2013, 41(4): 780-796.

[10]Arani H V, Rabbani M, Rafiei H. A revenue-sharing option contract toward coordination of supply chains[J]. International Journal of Production Economics, 2016, 178: 42-56.

[11]刘志云,樊治平. 考虑损失规避与质量水平的供应链协调契约模型[J]. 系统工程学报,2017,32(1):89-102.

- [12] Hou J, Zeng A Z, Zhao L. Coordination with a backup supplier through buy – back contract under supply disruption[J]. Transportation Research Part E, 2010, 46(6): 881 – 895.
- [13] 刘浪, 石岩. 回购契约应对非常规突发事件的三级供应链协调[J]. 系统管理学报, 2015, 24(2): 296 – 303.
- [14] 蹇明, 方新, 靳留乾, 等. 基于期望准则和分布自由的回购契约协调模型[J]. 管理科学学报, 2016, 19(9): 67 – 78.
- [15] Kim J S, Park S I, Shin K Y. A quantity flexibility contract model for a system with heterogeneous suppliers [J]. Computers & Operations Research, 2014, 41(1): 98 – 108.
- [16] Li X, Lian Z, Choong K K, et al. A quantity – flexibility contract with coordination[J]. International Journal of Production Economics, 2016, 179: 273 – 284.
- [17] 吴双胜, 刘浪, 穆昌兵. 价格随机条件下参与者均风险厌恶的应急数量弹性契约研究[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(4): 75 – 83.
- [18] 何龙飞, 赵道致, 刘阳. 基于自执行契约设计的供应链动态博弈协调[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(10): 1864 – 1878.
- [19] 夏良杰, 赵道致, 何龙飞, 等. 基于自执行旁支付契约的供应商与制造商减排博弈与协调[J]. 管理学报, 2014, 11(05): 750 – 757.
- [20] Savaskan R C, Wassenhove L N. Reverse Channel Design: The Case of Competing Retailers[J]. Management Science, 2006, 52(1): 1 – 14.
- [21] D'Aspremont C, Jacquemin A Cooperative and non – cooperative R & D in duopoly with spillovers[J]. American Economic Review, 1988, 78(5): 1133 – 1137.
- [22] 肖人彬, 余睿武. 成本扰动与广告协同下的供应链协调[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(10): 2248 – 2255.
- [23] 江世英, 李随成. 考虑产品绿色度的绿色供应链博弈模型及收益共享契约[J]. 中国管理科学, 2015, 23(06): 169 – 176.

A Study on the Coordination Mechanism of Cloud Manufacturing Supply Chain Considering Carbon Emissions and Pricing

Yang Xin Zeng Zhenxiang Zhang Shun Wei Jinyu

Abstract: Based on the realistic demand of low carbon development in manufacturing enterprises, this paper led into the demand function for the cloud manufacturing platform operators – dominated Stackelberg game, which was affected by both the price and the carbon reduction. The optimal carbon reduction, price and system profit of the supply chain in the process of the centralized decision and the decentralized decision were compared comprehensively, and the environmental governance coordination mechanism for cloud manufacturing supply chain was proposed. The main conclusions are as follows: (1) In order to improve Pareto's improvement of the decentralized decision, the self enforcing contract was designed to realize the environment coordination of the cloud manufacturing supply chain system of the decentralized decision based on the assumption of the cold chain members' bounded rationality. (2) The validity of the contract was verified through an example, and it realized the fair distribution of the added profit of the cloud manufacturing supply chain system. (3) In sensitivity analysis, it is found that the profit of cloud manufacturing supply chain is negatively related to the cost of carbon emission reduction and consumer price sensitivity, and is positively related to consumer low carbon preference, and the consumer's low carbon preference has the greatest impact on the total profit of the cloud manufacturing supply chain. The research conclusion and contract design will provide decision – making reference for cloud manufacturing service providers and cloud service platform operators in daily operation and carbon emission reduction in China.

Key words: cloud manufacturing; supply chain environmental governance; side payment self enforcing contract