

应用区块链的食品供应链质量溯源决策研究

陈昌华^{1,2} 李 峯² 许帅帅²

(1. 西华大学管理学院; 2. 西华大学国际经济与管理研究院 四川成都 610039)

摘要:为明确应用区块链进行食品供应链质量溯源前后的成本变动情况,吸引食品供应链各方积极参与区块链质量溯源,本文引入成本变动系数和食品质量构建决策模型,探究食品供应链采用区块链进行质量溯源的条件和应用区块链使各方成本降低且利润提升的成本分摊阈值。研究表明,区块链技术应用能否为供应链各主体带来经济价值,取决于各主体单位成本投入、区块链成本分摊系数及投入成本等多重因素;只有区块链技术成本分摊系数达到一定临界条件时,才能使制造商和供应商的利润都得到提升,进而吸引二者积极参与区块链质量溯源。

关键词:食品供应链; 食品安全; 区块链; 食品质量溯源; 供应链

中图分类号:F203 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-1124(2023)03-0064-10

DOI: 10.12181/jjgl.2023.03.06

一、引言

近年来,食品质量问题时有发生,对消费者的生命健康造成影响^[1]。区块链和食品供应链存在一定的契合性,日渐成熟的区块链可以有效地增强食品质量信息的透明度和可追溯性,为解决食品安全问题提供一种方法和思路^[2]。但是,如果不能使食品供应链各主体充分了解参与区块链溯源的经济价值和条件,就无法有效地调动各主体应用区块链的积极性,难以真正实现区块链在食品质量溯源领域的应用落地。

学者们对区块链在供应链中的应用条件及影响进行了大量研究。Ni等^[3]认为只有在投资成本比价格低时供应链才适合应用区块链技术。梁喜和肖金凤^[4]从制造商占主导的角度分析了区块链技术对双渠道供应链定价及渠道选择的影响。Jiang、Chen^[5]和Guo等^[6]发现应用区块链的供应链系统能否实现价值增值与市场规模、制造商制造成本以及价格敏感等因素相关。Zhang等^[7]和孙中苗等^[8]研究发现,区块链的应用会对最终产品的零售价格产生影响,但其是否能增加供应链整体利润受临界条件的影响。Liu和Guo^[9]、Niu等^[10]、Hayrutdinov等^[11]构建了博弈模型进行研究,发现只要区块链技术的投资成本在一定范围内,区块链的应用对提升产品可靠性、抑制各主体的隐藏行为、提升顾客价格敏感度、提高供应链主要参与者的利润和整体业绩均具有积极的正向影响。学者们还就如何协调和激励供应链成员积极应用区块链技术进行了研究,如Liu P等^[12]和Liu L等^[13]的研究证明可以将成本分摊和收益分成契约作为一种有效的内部激励措施来激励成员应用区块链技术。

就食品供应链而言,区块链的应用对消除信息不对称问题、缓解食品安全问题,更好地保障消费者权益

收稿日期:2023-02-06

基金项目:四川省科技计划项目“基于区块链的食品供应链多形态变化全流程安全溯源关键技术研究”(2022YFS0515);西华大学国际经济与管理研究院创新基金项目(20230001)。

作者简介:陈昌华(1982—),男,博士研究生,副教授,主要研究方向为生产与物流管理、技术经济及管理;李峯(1998—),女,硕士研究生,研究方向为生产与物流管理。

通信作者简介:许帅帅(1998—),男,硕士研究生,研究方向为生产与物流管理。

有重要意义,因此,越来越多的学者专门对食品供应链中的区块链应用问题进行研究。比如,尚杰和吉雪强^[14]针对生态农产品供应链内部契约合作的稳定性构建博弈模型进行分析,证实运用区块链技术可以提高供应链的整体运行效率。由于区块链技术对供应链利润的影响具有不确定性^[15],因此学者们针对食品供应链中区块链技术推广应用的影响因素进行了研究。如Wu等^[16]发现供应链成员是否采用区块链技术与消费者对区块链产品的态度、生鲜变质率以及供应链成员溯源成本分摊比例等因素有关,Fan等^[17]的研究表明供应链成员是否采用区块链技术与消费者的追溯意识、供应商和制造商的生产成本以及使用区块链技术的成本等因素有关。此外,复杂食品供应链如何通过区块链技术提升供应链各方收益也是一个亟待解决的问题,学者们主要从食品供应链成员区块链投入成本的角度对此进行研究。刘亮、李斧头^[18]和陈化飞等^[19]探究了区块链技术的成本投资阈值和应用区块链的协调契约,提出在区块链投资成本阈值范围内,区块链技术的应用可以抑制生产商谎报鲜活度信息的行为,提高供应链整体和各成员的利润。

从现有文献可以看出,学者们越来越关注食品供应链的区块链应用问题,但大部分研究探究的是应用区块链时供应链各成员的成本分摊问题,与成本变动对各主体参与区块链质量溯源意愿的影响和成本变动基础上的区块链投资成本分摊临界条件相关的研究较少,对应用区块链技术是否可以降低食品供应链成本尚无统一结论,成本分摊临界条件的有效性还有待进一步验证。因此,本文以供应商、制造商构成的两级食品供应链为研究对象,引入成本变动系数,构建食品供应链区块链质量溯源决策模型,剖析应用区块链技术进行质量溯源前后食品供应链各成员生产交易成本的变动和区块链投资成本分摊条件,以期为供应链各成员决定是否应用区块链进行食品质量溯源提供参考依据。

二、模型描述与假设

为反映应用区块链进行质量溯源前后供应链的成本变动情况,提升食品供应链各方参与区块链质量溯源的意愿,本文构建图1所示的供应链决策模型。在此模型中,供应商 s 作为跟随者,为制造商提供生产所需的原材料;制造商 m 作为主导者,生产一种食品并直接销售该食品。制造商的决策变量为食品零售价格 p_m ,供应商的决策变量为原材料批发价格 w_s 。

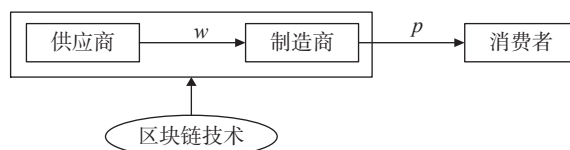


图1 两级食品供应链结构

未应用区块链技术进行食品质量溯源时,制造商与供应商之间存在信息不对称情况,因此两者的成本中不仅包含生产制造成本,还包含与交易相关的信息搜寻、获取以及交易执行监督等成本,本文统称以上成本为生产交易成本。假设制造商的单位生产交易成本为 c_m ;供应商的单位生产交易成本为 c_s ;参考林强等^[20]提出的需求函数,假设 a 为食品的潜在市场规模; α 为食品质量潜在市场规模削弱因子, $0 < \alpha < 1$; θ 为食品质量的价格弹性系数; β 为食品质量对消费者购买意愿的影响因子; γ 为食品质量正向需求的折扣因子, $0 < \gamma < 1$; e 为制造商生产的食品质量。此时食品的市场需求为 $D^n = a(1 - \alpha) - \theta p_m + \beta e(1 - \gamma)$ 。

假设区块链技术可以真正地满足消费者对食品质量溯源的需求,则应用区块链进行食品质量溯源后食品的市场需求为 $D^b = a - \theta p + \beta e$ 。应用区块链技术进行食品质量溯源后,食品质量信息公开透明,信息不对称情况得到改善,制造商和供应商的成本结构发生改变。假设食品供应链应用区块链技术进行质量溯源的投入总成本为 C_B ,制造商区块链技术成本分摊系数为 λ ($\lambda > 0$),供应商区块链技术成本分摊系数为 $1 - \lambda$,制造商和供

应商的生产交易成本变动系数为 η_j ($\eta_j > 0$; j =制造商 m , 供应商 s)。各符号的具体含义见表 1。

表 1 符号及说明

符号	说明
w_s^i	供应商的单位批发价格 ($i = n, b$)
c_j	供应商、制造商的单位成本 ($j = m, s$)
p_m^i	制造商的单位零售价格
a	食品的潜在市场规模
α	食品质量潜在市场规模削弱因子
θ	食品质量的价格弹性系数
β	食品质量对消费者购买意愿的影响因子
γ	食品质量正向需求的折扣因子
e	制造商生产的食品质量
D^i	食品的市场需求
C_B	供应链应用区块链溯源的技术投入总成本
λ	制造商的区块链成本分摊系数
$1 - \lambda$	供应商的区块链成本分摊系数
η_j	应用区块链后供应商、制造商的生产交易成本变动系数
π_j^i	供应商和制造商的利润
π^i	食品供应链的总利润
n	未应用区块链进行食品质量溯源的供应链模型
b	应用区块链进行食品质量溯源的供应链模型

三、食品质量溯源的供应链策略选择

(一) 未应用区块链的供应链质量溯源

在未应用区块链进行食品质量溯源时, 供应链各成员的质量信息不公开、不透明, 供应链成员、消费者以及其他利益相关者对食品质量缺乏完全的信任。

假设未应用区块链进行食品质量溯源时制造商利润函数、供应商利润函数以及食品供应链整体利润函数分别为:

$$\pi_m^n = (p_m^n - w_s^n - c_m)D^n \tag{1}$$

$$\pi_s^n = (w_s^n - c_s)D^n \tag{2}$$

$$\pi^n = (p_m^n - c_s - c_m)D^n \tag{3}$$

从上述函数可以推出, 供应商和制造商关于各自决策变量的二阶导数均小于 0, 目标函数存在唯一最优解, 依据 Stackelberg 博弈, 可以通过逆向求解得到定理 1。

定理 1: 未应用区块链技术进行食品质量溯源时, 制造商 m 的最优零售价格为 $p_m^n = \frac{3a(1-\alpha) + 3\beta e(1-\gamma)}{4\theta} + \frac{1}{4}(c_s + c_m)$, 最优利润为 $\pi_m^n = \frac{[a(1-\alpha) + \beta e(1-\gamma) - \theta(c_s + c_m)]^2}{8\theta}$; 供应商 s 的最优批发价格为 $w_s^n = \frac{a(1-\alpha) + \beta e(1-\gamma)}{4\theta} + \frac{3}{4}c_s - \frac{1}{4}c_m$, 最优利润为 $\pi_s^n = \frac{[a(1-\alpha) + \beta e(1-\gamma) - \theta(c_s + c_m)]^2}{16\theta}$; 需求函数为 $D^n = \frac{a(1-\alpha) + \beta e(1-\gamma)}{4} - \frac{1}{4}(c_s + c_m)$; 供应链整体利润为 $\pi^n = \frac{3[a(1-\alpha) + \beta e(1-\gamma) - \theta(c_s + c_m)]^2}{16\theta}$ 。

定理1表明消费者对食品质量的不信任以及制造商和供应商单位成本变动都会对市场需求、供应链上各成员的利润和整体利润产生影响,具体表现为消费者对食品质量的不信任会对批发、零售价格产生负向影响,而制造商和供应商的单位成本变动会对批发、零售价格产生正向影响。也就是说,质量不高或有质量缺陷的食品充斥市场会导致市场需求被削弱、高质量食品供给受到影响、消费者对食品质量的信任度下降,不利于食品供应链的良性发展。基于上述分析,本文认为推动食品供应链各主体积极应用区块链技术进行食品质量溯源是缓解食品质量信息不对称问题、提升消费者信任度和质量满意度的有效手段,也是提升市场需求和供应链利润、改变供应链成本结构、提高食品供应链运作效率的有效方法。

命题1:未应用区块链技术进行食品质量溯源的情况下,有 $\frac{\partial p_m^n}{\partial \alpha} < 0, \frac{\partial w_s^n}{\partial \alpha} < 0, \frac{\partial \pi_m^n}{\partial \alpha} < 0, \frac{\partial \pi_s^n}{\partial \alpha} < 0, \frac{\partial D^n}{\partial \alpha} < 0, \frac{\partial p_m^n}{\partial \gamma} < 0, \frac{\partial p_m^n}{\partial \gamma} < 0, \frac{\partial w_s^n}{\partial \gamma} < 0, \frac{\partial \pi_m^n}{\partial \gamma} < 0, \frac{\partial \pi_s^n}{\partial \gamma} < 0, \frac{\partial D^n}{\partial \gamma} < 0, \frac{\partial \pi^n}{\partial \gamma} < 0$ 。命题1表明食品质量潜在市场规模削弱因子 α 和食品质量正向需求折扣因子 γ 都会对批发零售价格、市场规模以及供应链整体和各成员的利润产生负向影响。消费者对食品质量的不信任会降低消费者对食品质量的期望,削弱市场需求,进而降低供应链整体和每个成员的利润。因此,为降低上述影响,低质量食品在销售时应该确定较低的零售价格。

传统的基于RFID的食品质量溯源系统虽然可以在一定程度上缓解企业与消费者之间的信息不对称程度,提升消费者对食品质量的信任度,但无法确保各主体披露信息的真实性,解决食品源头造假问题和食品质量缺陷问题的能力较弱。应用区块链的共识机制、智能合约、加密算法等技术构建的去中心化的食品质量溯源系统能够比传统的食品质量溯源系统更好地解决源头造假问题和信息真实性问题,进一步提升消费者对食品质量的信任度。

(二) 应用区块链的供应链质量溯源

应用区块链进行食品质量溯源,可以减少食品供应链成员以及供应链与消费者之间的信息不对称问题,提升消费者对食品质量的了解程度。这样虽然会增加供应链的技术成本,但同时也能够提升供应链利润,为降低生产交易成本提供可能。

应用区块链进行食品质量溯源时,制造商利润函数、供应商利润函数以及食品供应链整体利润函数分别为:

$$\pi_m^b = (p_m^b - w_s^b - \eta_m c_m) D^b - \lambda C_B \quad (4)$$

$$\pi_s^b = (w_s^b - \eta_s c_s) D^b - (1 - \lambda) C_B \quad (5)$$

$$\pi^b = (p_m^b - \eta_s c_s - \eta_m c_m) D^b - C_B \quad (6)$$

通过上述函数可知,目标函数存在唯一最优解。依据Stackelberg博弈,通过逆向求解可得定理2。

定理2:供应链应用区块链技术进行食品质量溯源的情况下,制造商 m 的最优零售价格为 $p_m^b = \frac{3(a + \beta e)}{4\theta} + \frac{1}{4}(\eta_s c_s + \eta_m c_m)$,最优利润为 $\pi_m^b = \frac{[a + \beta e - \theta(\eta_s c_s + \eta_m c_m)]^2}{8\theta} - \lambda C_B$; 供应商的最优批发价格为 $w_s^b = \frac{a + \beta e}{4\theta} + \frac{3}{4}\eta_s c_s - \frac{1}{4}\eta_m c_m$,最优利润为 $\pi_s^b = \frac{[a + \beta e - \theta(\eta_m c_m + \eta_s c_s)]^2}{16\theta} - (1 - \lambda) C_B$; 需求函数为 $D^b = \frac{a + \beta e - \theta(\eta_s c_s + \eta_m c_m)}{4}$; 食品供应链整体的最优利润为 $\pi^b = \frac{3[a + \beta e - \theta(\eta_s c_s + \eta_m c_m)]^2}{16\theta} - C_B$ 。

定理2表明应用区块链技术进行食品质量溯源时,投入成本的增加会导致食品供应链整体利润及各成员的利润下降。区块链技术应用能否带来食品供应链价值增值取决于价格弹性系数、食品质量对消费者购买意愿的影响因子、食品质量以及成本之间的关系。从区块链技术发展程度和应用推广现状看,一个企业即便拥有相应的技术、人才以及其他资源,独立应用区块链技术还是会面临相当大的成本压力,而供应链各主体

对区块链技术投入成本进行分摊则可以在一定程度上缓解单个企业的成本压力,改变各主体的成本结构,因此成本结构改变的方向以及区块链成本的分摊比例会对各主体是否愿意应用区块链技术进行食品质量溯源产生重要影响。

命题 2: 应用区块链进行食品质量溯源后, 博弈均衡结果与成本变动系数 η_m 、 η_s 的关系如下:

$$\frac{\partial p_m^b}{\partial \eta_m} > 0, \quad \frac{\partial w_s^b}{\partial \eta_s} > 0, \quad \frac{\partial \pi_m^b}{\partial \eta_m} < 0, \quad \frac{\partial \pi_s^b}{\partial \eta_s} < 0, \quad \frac{\partial \pi^b}{\partial \eta_m} < 0, \quad \frac{\partial \pi^b}{\partial \eta_s} < 0, \quad \frac{\partial D^b}{\partial \eta_m} < 0, \quad \frac{\partial D^b}{\partial \eta_s} < 0$$

命题 2 表明, 虽然应用区块链技术进行食品质量溯源后供应链的成本变动系数正向影响批发零售价格, 但由于其对食品市场需求的负向影响大于对批发零售价格的正向影响, 所以最终会导致成本变动系数负向影响食品供应链整体利润和每个成员的利润。

当 $1 > \eta_m > 0$ 且 $1 > \eta_s > 0$ 时, 应用区块链进行食品质量溯源可以降低供应链的生产交易成本, 提高整个食品供应链的运行效率; 当 $\eta_m \geq 1$ 和 $\eta_s \geq 1$ 时, 区块链技术的应用可能会使食品供应链的生产交易成本增加, 难以达到降本增效的目的。所以, 上述研究不能准确确定应用区块链进行食品质量溯源的技术成本与生产交易成本的变动关系, 也不能准确反映应用区块链技术能否降低食品供应链整体成本和提高效率。为此, 我们需要讨论应用区块链后食品供应链的成本变化, 确定应用区块链技术降低食品供应链成本的边界条件, 为食品供应链各成员积极参与区块链质量溯源提供决策参考。

四、成本变动的讨论分析

将区块链应用于食品质量溯源会改变供应链的成本, 同时区块链成本分摊大小和生产交易成本变动方向的不确定性将显著影响各主体积极参与区块链质量溯源的意愿。为此, 我们需要深度分析生产交易成本的变动条件以及区块链成本的分摊临界值, 以确保各主体在参与区块链质量溯源的同时实现生产交易成本的降低以及经营效率和利润的提升, 进而实现食品供应链的价值增值。

命题 3: 当 $\eta_m \geq 1 - \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta c_m} - (\eta_s - 1)\frac{c_s}{c_m}$ 且 $1 + \frac{c_m}{c_s} - \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta c_s} > \eta_s > 0$ 时, 有 $p_m^b \geq p_m^n$ 。

证明:

当 $\eta_m \geq 1 - \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta c_m} - (\eta_s - 1)\frac{c_s}{c_m}$ 时, 有 $3\frac{\alpha a + \beta e \gamma}{4\theta} - (1 - \eta_s)c_s - (1 - \eta_m)c_m \geq 0$, 即 $p_m^b - p_m^n = 3\frac{\alpha a + \beta e \gamma}{4\theta} - \frac{1}{4}(1 - \eta_s)c_s - \frac{1}{4}(1 - \eta_m)c_m \geq 0$, 所以, 为保持 $\eta_m > 0$ 恒成立, 需 $\eta_m \geq 1 - \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta c_m} - (\eta_s - 1)\frac{c_s}{c_m}$, 即 $1 + \frac{c_m}{c_s} - \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta c_s} > \eta_s$, 又因为 $\eta_s > 0$, 所以 $1 + \frac{c_m}{c_s} - \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta c_s} > \eta_s > 0$ 。

命题 3 表明未应用区块链进行食品质量溯源时的供应链成本结构和供应商应用区块链进行食品质量溯源后的成本变动均会影响制造商应用区块链后的成本变动。只要 η_m 和 η_s 满足命题 3 条件, 那么应用区块链技术进行食品质量溯源后, 食品售价随生产交易成本变化产生的变化会比未应用区块链时有所提升, 进而使利润得到提升。

推论 1: 当 $c_m > \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta}$, 有 $1 + \frac{c_m}{c_s} - \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta c_s} > \eta_s > 1$ 且 $0 < \eta_m < 1$, 所以 $1 > \eta_m > 1 - \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta c_m} - (\eta_s - 1)\frac{c_s}{c_m}$ 。在此条件下, 随着区块链技术的应用, 供应商的生产交易成本相比未应用时有所增加, 但制造商的生产交易成本有所下降。该条件仅仅有利于促进制造商积极参与区块链质量溯源, 无法有效促进供应商积极参与区块链质量溯源, 甚至会导致供应商对应用区块链技术进行食品质量溯源产生排斥心理。

推论 2: 当 $c_m < \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta}$, 有 $1 + \frac{c_m}{c_s} - \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta c_s} < 1$, 因此, $\eta_m > 1 - \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta c_m} - (\eta_s - 1)\frac{c_s}{c_m} > 1$, $0 < \eta_s < 1 - \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta c_s} < 1 + \frac{c_m}{c_s} - \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta c_s}$ 。此时, 随着区块链技术的应用, 供应商的生产成本相比未应用区块链技

术时有所下降, 而制造商的生产成本有所增加。在此条件下, 虽然应用区块链技术进行食品质量溯源可以提升供应商参与区块链质量溯源的积极性, 但无法帮助制造商降低生产交易成本, 甚至还有可能增加制造商的生产交易成本, 降低制造商参与区块链食品质量溯源的意愿。

推论 3: 当 $c_m < \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta}$ 时, 有 $0 < \eta_m < 1$ 和 $1 + \frac{c_m}{c_s} - \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta c_s} < 1$, 因此, $1 > \eta_m > 1 - \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta c_m} - (\eta_s - 1) \frac{c_s}{c_m}$, $1 + \frac{c_m}{c_s} - \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta c_s} > \eta_s > 1 - \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta c_s}$ 。由此可以看出, 应用区块链技术后, 供应商和制造商的成本均低于应用前的成本, 表明只要成本结构满足此条件, 区块链技术的应用就可以在在一定程度上降低供应链的生产交易成本, 实现食品供应链的降本增效, 从而有利于提升各主体参与区块链质量溯源的积极性。

命题 4: 当 $\eta_s \geq 1 + (\eta_m - 1) \frac{c_m}{3c_s} - \frac{\alpha a + \gamma\beta e}{3\theta c_s}$ 且 $\frac{\alpha a + \gamma\beta e}{\theta} > 3c_s - c_m$ 时, 有 $\eta_m > 0$ 使 $w_s^b \geq w_s^n$ 。

证明:

当 $\eta_s \geq 1 + (\eta_m - 1) \frac{c_m}{3c_s} - \frac{\alpha a + \gamma\beta e}{3\theta c_s}$ 时, 有 $\frac{\alpha a + \gamma\beta e}{\theta} - 3(1 - \eta_s)c_s - (\eta_m - 1)c_m \geq 0$, 即 $w_s^b - w_s^n = \frac{\alpha a + \gamma\beta e}{4\theta} - \frac{3}{4}(1 - \eta_s)c_s - \frac{1}{4}(\eta_m - 1)c_m \geq 0$, 所以, $w_s^b \geq w_s^n$; 又为使 $\eta_s > 0$ 恒成立, 需 $\eta_m > \frac{\alpha a + \gamma\beta e}{\theta c_m} - \frac{3c_s}{c_m} + 1$; 为使 $\eta_m > 0$ 恒成立, 需 $\frac{\alpha a + \gamma\beta e}{\theta c_m} - \frac{3c_s}{c_m} + 1 > 0$; 因此可得 $\frac{\alpha a + \gamma\beta e}{\theta} > 3c_s - c_m$ 。故当 $\eta_s \geq 1 + (\eta_m - 1) \frac{c_m}{3c_s} - \frac{\alpha a + \gamma\beta e}{3\theta c_s}$ 且 $\frac{\alpha a + \gamma\beta e}{\theta} > 3c_s - c_m$ 时, 有 $\eta_m > 0$ 使 $w_s^b \geq w_s^n$ 。

从上述分析可以知道, 应用区块链进行食品质量溯源后制造商和供应商的成本关系、制造商的成本变动系数均会影响供应商应用区块链后的成本变动。满足命题 4 条件时, 如果供应商应用区块链进行食品质量溯源, 那么其食品的批发价格会随成本的变化有所上升, 高于其未应用区块链技术时的批发价格, 价格的上升可以抵消应用区块链导致的成本变动对利润的影响。

推论 4: 当 $\eta_m > 1 + \frac{\alpha a + \gamma\beta e}{\theta c_m} > 1$ 时, 有 $\eta_s > 1 + (\eta_m - 1) \frac{c_m}{3c_s} - \frac{\alpha a + \gamma\beta e}{3\theta c_s} > 1$ 。这表明在此条件下应用区块链技术进行食品质量溯源会导致制造商成本增加, 进而导致供应商的生产交易成本也相应增加, 应用区块链技术反而会增加食品供应链的运行负担。也就是说, 此条件下未应用区块链进行食品质量溯源时的成本结构不利于实现食品供应链的降本增效, 不利于提升食品供应链各主体参与区块链食品质量溯源的积极性。

推论 5: 当 $\frac{\alpha a + \gamma\beta e}{\theta} > 3c_s - c_m$, 有 $0 < \eta_m < 1 + \frac{\alpha a + \gamma\beta e}{\theta c_m}$ 且 $0 < \eta_s < 1$, 使 $1 > \eta_s > 1 + (\eta_m - 1) \frac{c_m}{3c_s} - \frac{\alpha a + \gamma\beta e}{3\theta c_s}$ 。这表明如果制造商和供应商未应用区块链进行食品质量溯源时的成本结构满足此条件, 那么将区块链应用于食品质量溯源后, 无论制造商的生产交易成本是否降低, 供应商的生产成本必定会有一定程度下降。此时为确保食品供应链各成员都可以享受到区块链技术的协同优势, 都有意愿参与区块链食品质量溯源, 应采取一定措施使制造商应用区块链溯源后的生产交易成本也有所下降, 食品供应链整体的生产交易成本也得到一定程度降低。

命题 5: 当 $1 - \frac{\tau}{2} \leq \lambda \leq \tau$ 时, 有 $\pi_m^b \geq \pi_m^n$, $\pi_s^b \geq \pi_s^n$, 即制造商分摊的区块链技术投入总成本小于 τC_B 且大于 $(1 - \frac{\tau}{2}) C_B$ 时, 供应链的利润会有所上升。

证明:

$$\Delta \tau = \frac{[a + \beta e - \theta(\eta_s c_s + \eta_m c_m)]^2 - [a(1 - \alpha) + \beta e(1 - \gamma) - \theta(c_s + c_m)]^2}{8\theta C_B}$$

当 $\lambda \leq \tau$ 时, 有 $\frac{[a + \beta e - \theta(\eta_s c_s + \eta_m c_m)]^2 - [a(1 - \alpha) + \beta e(1 - \gamma) - \theta(c_s + c_m)]^2}{8\theta} - \lambda C_B \geq 0$, 又因为 $\pi_m^b - \pi_m^n = \frac{[a + \beta e - \theta(\eta_m c_m + \eta_s c_s)]^2 - [a(1 - \alpha) + \beta e(1 - \gamma) - \theta(c_s + c_m)]^2}{8\theta} - \lambda C_B \geq 0$, 所以 $\pi_m^b \geq \pi_m^n$ 。

当 $1 - \frac{\tau}{2} \leq \lambda$ 时, 有 $\frac{[a + \beta e - \theta(\eta_s c_s + \eta_m c_m)]^2 - [a(1 - \alpha) + \beta e(1 - \gamma) - \theta(c_s + c_m)]^2}{16\theta C_B} - (1 - \lambda)C_B \geq 0$, 又因为 $\pi_s^b - \pi_s^n = \frac{[a + \beta e - \theta(\eta_s c_s + \eta_m c_m)]^2 - [a(1 - \alpha) + \beta e(1 - \gamma) - \theta(c_s + c_m)]^2}{16\theta} - (1 - \lambda)C_B \geq 0$, 所以 $\pi_s^b \geq \pi_s^n$ 。

当 $\lambda \leq \tau$ 时, 有 $\pi_s^b - \pi_s^n = \frac{[a + \beta e - \theta(\eta_s c_s + \eta_m c_m)]^2 - [a(1 - \alpha) + \beta e(1 - \gamma) - \theta(c_s + c_m)]^2}{16\theta} - \lambda C_B \geq 0$, 即 $\pi_s^b \geq \pi_s^n$ 。

故当 $1 - \frac{\tau}{2} \leq \lambda \leq \tau$ 时, 有 $\pi_m^b \geq \pi_m^n, \pi_s^b \geq \pi_s^n$ 。

从上述分析可以知道, 满足命题 5 条件时, 将区块链技术应用于食品质量溯源可以充分发挥区块链技术的协同优势, 在消除消费者以及供应链成员之间信息不对称问题的同时, 提升制造商和供应商的利润, 极大地提升各主体参与区块链质量溯源的积极性。

命题 6: 当 $\tau \geq \frac{2}{3}$ 时, 有 $\pi^b \geq \pi^n$ 。

证明:

由 $\pi^b - \pi^n = 3 \frac{[a + \beta e - \theta(\eta_s c_s + \eta_m c_m)]^2 - [a(1 - \alpha) + \beta e(1 - \gamma) - \theta(c_s + c_m)]^2}{16\theta C_B} - 1 \geq 0$,

可得 $3 \frac{[a + \beta e - \theta(\eta_s c_s + \eta_m c_m)]^2 - [a(1 - \alpha) + \beta e(1 - \gamma) - \theta(c_s + c_m)]^2}{16\theta C_B} \geq 1$, 即 $\frac{3\tau}{2} \geq 1, \tau \geq \frac{2}{3}$ 。

命题 6 与食品质量、应用区块链后的成本变动以及区块链技术的成本有关。满足命题 6 条件时, 应用区块链技术后的供应链整体利润高于应用前的整体利润。也就是说, 当食品供应链的成本结构满足此条件时, 应用区块链进行食品质量溯源可以提升食品供应链的整体利润。

推论 6: 当 $\tau \geq \frac{2}{3}$ 且 $1 - \frac{\tau}{2} \leq \lambda \leq \tau$ 时, 有 $\pi_m^b \geq \pi_m^n, \pi_s^b \geq \pi_s^n, \pi^b \geq \pi^n$ 。这表明当供应商和制造商的区块链技术成本分摊满足推论 6 的条件时, 食品供应链每个成员的利润和供应链整体利润均会得到一定程度提升。满足推论 6 的条件时, 让食品供应链各成员充分了解区块链在食品质量溯源中的经济价值与意义, 可以有效地提升各成员参与区块链质量溯源建设的积极性, 推动区块链在食品行业的普及和应用, 实现食品供应链可持续健康发展。

五、数值算例分析

前文从理论上讨论分析了应用区块链进行食品质量溯源后的成本变动系数 η_s 和 η_m 与制造商售价 p_m , 供应商的批发价格 w_s , 食品供应链各主体的利润 π_s 、 π_m , 供应链整体利润 π 之间的关系, 确定了应用区块链进行食品质量溯源降低食品供应链生产交易成本, 提升食品零售批发价格以及供应链各方利润和整体利润的边界条件。本节将基于 MATLAB 通过数值算例就供应链应用区块链进行食品质量溯源前后的成本变动对 p_m 、 w_s 、 π_s 、 π_m 以及 π 的影响进行分析。为不失一般性, 模型参数赋值为 $a = 15, \theta = 2, e = 4, \alpha = 0.54, \gamma = 0.67, \beta = 0.8, c_s = 8, c_m = 13, C_B = 11, 0 < \eta_s < 1, 0 < \eta_m < 1$ 。

模型以成本变动系数 η_s 和 η_m 为自变量, 以 p_m 、 w_s 、 π_s 、 π_m 以及 π 为因变量, 在 $0 < \eta_s < 1$ 且 $0 < \eta_m < 1$ 范围内, 以数字仿真的形式探究自变量与因变量的关系。

由图 2 可知, 当 $0 < \eta_s < 1$ 且 $0 < \eta_m < 1$ 时, p_m^n 不受 η_s 和 η_m 的影响, p_m^b 随 η_s 和 η_m 的增加而增加, 并且随 η_m 增加的幅度大于随 η_s 增加的幅度。也就是说, 虽然应用区块链进行食品质量溯源可以降低制造商和供应商的生产交易成本, 但随着 η_s 和 η_m 逐渐趋近于 1, 区块链质量溯源降低供应链成本的效果也会逐渐下降, 此时制造商只能通过提高食品售价来降低区块链技术应用对其利润的影响。若满足 $\eta_m = 1 - \frac{3\alpha a + 3\gamma\beta e}{\theta c_m} - (\eta_s - 1) \frac{c_s}{c_m}$ 条件, 即 η_m 随 η_s 的增加而逐渐减小的过程中, 有 $p_m^b > p_m^n$ 。此过程中, 制造商应用区块链进行质量溯源后的食品售价逐渐大于应用区块链技术前的食品售价, 零售价格的提升可以弥补生产交易成本变动对利润的影响。

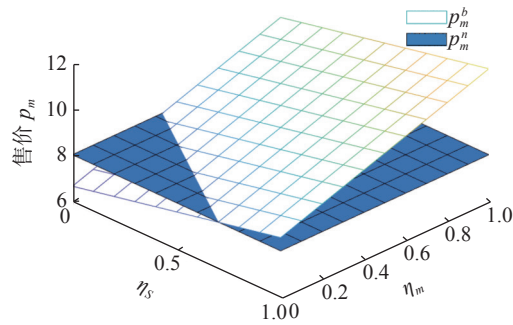


图 2 η_s 、 η_m 与 p_m^b 、 p_m^n 的关系

由图 3 可知, 当 $0 < \eta_s < 1$ 且 $0 < \eta_m < 1$ 时, w_s^n 不受 η_s 和 η_m 的影响; w_s^b 随 η_m 的增加而减少, 随 η_s 的增加而增大, 并且随 η_m 增加而减少的幅度大于随 η_s 增加而增大的幅度。这意味着虽然应用区块链进行食品质量溯源降低了供应商的生产交易成本, 但随着 η_s 逐渐从 0 趋近于 1, 区块链降低供应商生产交易成本的作用逐渐下降, 此时供应商需要通过提升批发价格来降低区块链应用后成本变动对利润的影响; 同时随着 η_m 逐渐从 0 趋近于 1, 批发价格也会随着应用区块链的制造商的生产交易成本增加而下降, 这可以降低供应商生产交易成本变动对批发价格的影响。当满足 $\eta_s = 1 + (\eta_m - 1) \frac{c_m}{3c_s} - \frac{\alpha a + \gamma \beta e}{3\theta c_s}$ 的关系前, η_m 随 η_s 增加而增加, 一直有 $w_s^b > w_s^n$, 这意味着供应商可以通过提高批发价格的方式来弥补应用区块链进行食品质量溯源后生产交易成本变化对利润的影响。

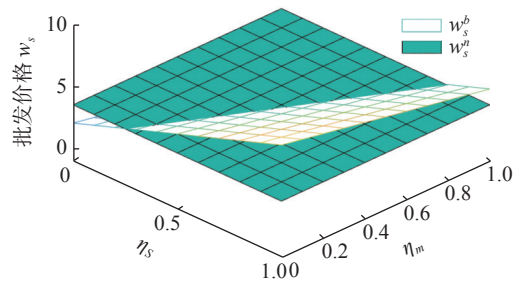


图 3 η_s 、 η_m 与 w_s^b 、 w_s^n 的关系

由 τ 的表达式可知, τ 随着 η_s 和 η_m 的增加而降低。同时, 从图 4 和图 5 可以看出, 在 $0 < \eta_s < 1$ 且 $0 < \eta_m < 1$ 时, π_m^n 与 π_s^n 不受 η_s 和 η_m 的影响。而在 $1 - \frac{\tau}{2} \leq \lambda \leq \tau$ 范围内, 制造商的利润 π_m 和供应商的利润 π_s 会先随 η_s 的减少与 η_m 的增加而逐渐增加, 直到达到最大利润后, 两者又会随 η_s 的减少和 η_m 的增加逐渐降低, 并且一直满足 $\pi_m^b \geq \pi_m^n$ 、 $\pi_s^b \geq \pi_s^n$ 。因此, 为确保应用区块链后制造商和供应商的利润比应用前高, 区块链的成本分摊系数必须满足 $1 - \frac{\tau}{2} \leq \lambda \leq \tau$, 这样才能吸引食品供应链各主体积极参与区块链质量溯源。

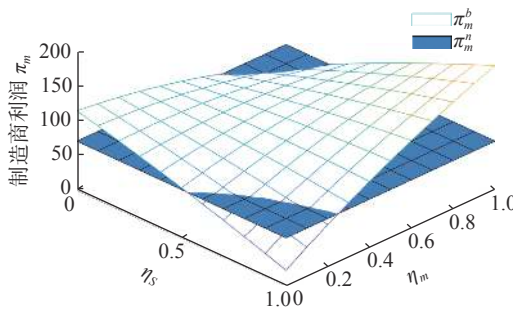


图 4 η_s 、 η_m 与 π_m^b 、 π_m^n 的关系

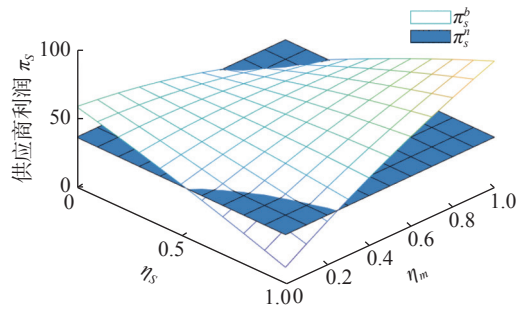


图 5 η_s 、 η_m 与 π_s^n 、 π_s^b 的关系

由图 6 可以看出,当 $0 < \eta_s < 1$ 且 $0 < \eta_m < 1$ 时, π^n 不受 η_s 和 η_m 的影响。而在 $\tau \geq \frac{2}{3}$ 的范围内,应用区块链进行食品质量溯源后供应链整体利润随 η_s 和 η_m 的减少而逐渐增加,并且 π^b 一直大于 π^n ,即应用区块链后供应链的整体利润大于应用前的整体利润。因此,为确保应用区块链进行质量溯源可以提升食品供应链的整体利润,必须满足条件 $\tau \geq \frac{2}{3}$ 。

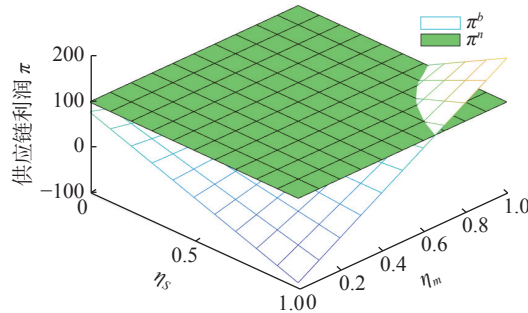


图 6 η_s 、 η_m 与 π^n 、 π^b 的关系

六、结论与展望

本文以两级食品供应链为研究对象,引入成本变动系数剖析应用区块链技术进行食品供应链质量溯源前后供应链各成员生产交易成本的变动和区块链技术成本分摊条件,得出以下结论:(1)在未应用区块链进行食品质量溯源时,消费者对食品质量的不信任因素会对市场规模、供应链各方的利润与供应链整体利润产生负向影响,此时只有降低食品定价才能降低这一负向影响。(2)只有当制造商和供应商的成本变动系数满足一定临界条件时,应用区块链技术才能在一定程度上降低供应链的生产交易成本,实现食品供应链的降本增效。(3)只有供应链上各主体应用区块链的成本分摊值在一定范围时,供应链整体利润才会随供应商和制造商成本变动系数减少而增加,并且一直大于应用区块链技术前的利润。

影响食品供应链各成员应用区块链溯源积极性的因素众多,下一步研究可以在考虑区块链应用前后食品质量变化的基础上,基于委托代理理论设计符合食品供应链特性的区块链溯源激励机制,进一步提升食品供应链各成员应用区块链质量溯源的意愿。

参考文献:

[1] 王海燕,陈欣,于荣.质量链协同视角下的食品安全控制与治理研究[J].管理评论,2016,28(11):228-234.
 [2] 田阳,陈智罡,宋新霞,等.区块链在供应链管理中的应用综述[J].计算机工程与应用,2021,57(19):70-83.
 [3] NI S, Bai X, LIANG Y, et al. Blockchain-based traceability system for supply chain: potentials, gaps, applicability and adoption game[J]. Enterprise Information Systems, 2022, 16(12): 1908-1937.
 [4] 梁喜,肖金凤.基于区块链和消费者敏感的双渠道供应链定价与渠道选择[J/OL].中国管理科学:1-12[2023-04-28].<https://kns.cnki.net/kcms/>

- detail/11.2835.g3.20210610.0834.001.html.
- [5] JIANG J, CHEN J. Managing the Product-Counterfeiting Problem with a Blockchain-Supported E-Commerce Platform[J/OL]. Sustainability, 2021, 13(11): 1-15 [2023-04-28]. <https://doi.org/10.3390/su13116016>.
- [6] GUO F, MA D, HU J, et al. Optimized combination of e-commerce platform sales model and blockchain anti-counterfeit traceability service strategy[J]. IEEE Access, 2021, 9: 138082-138105.
- [7] ZHANG R, XIA Z, LIU B. Optimal pricing decisions for dual-channel supply chain: Blockchain adoption and consumer sensitivity[J]. Complexity, 2022, 2022: 1-9.
- [8] 孙中苗, 徐琪, 史保莉. 区块链技术驱动下不同消费者类型的供应链最优定价决策[J]. 管理学报, 2021, 18(9): 1382-1391.
- [9] LIU Z Y, GUO P T. Supply chain decision model based on blockchain: A case study of fresh food E-commerce supply chain performance improvement[J/OL]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2021, 2021: 1-14 [2023-04-28]. <https://doi.org/10.1155/2021/5795547>.
- [10] NIU B, DONG J, LIU Y. Incentive alignment for blockchain adoption in medicine supply chains[J/OL]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2021, 152: 1-32 [2023-04-28]. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102276>.
- [11] HAYRUTDINOV S, SAEED M, RAJAPOV A. Coordination of supply chain under blockchain system-based product lifecycle information sharing effort[J/OL]. Journal of Advanced Transportation, 2020: 1-10 [2023-04-28]. <https://doi.org/10.1155/2020/5635404>.
- [12] LIU P, LONG Y, SONG H C, et al. Investment decision and coordination of green agri-food supply chain considering information service based on blockchain and big data[J/OL]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 1-11 [2023-04-28]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123646>.
- [13] LIU L, LI F, QI E. Research on risk avoidance and coordination of supply chain subject based on blockchain technology[J/OL]. Sustainability, 2019, 11(7): 1-14 [2023-04-28]. <https://doi.org/10.3390/su11072182>.
- [14] 尚杰, 吉雪强. 区块链应用下生态农产品供应链优化[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2020, 19(4): 67-75.
- [15] 崔铁军, 姚万焕. 基于区块链技术的农产品供应链演化博弈研究[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(12): 3558-3563.
- [16] WU X Y, FAN Z P, CAO B B. An analysis of strategies for adopting blockchain technology in the fresh product supply chain[J]. International Journal of Production Research, 2023, 61(11): 3717-3734.
- [17] FAN Z P, WU X Y, CAO B B. Considering the traceability awareness of consumers: Should the supply chain adopt the blockchain technology? [J]. Annals of Operations Research, 2020, 309(2): 837-860.
- [18] 刘亮, 李斧头. 考虑零售商风险规避的生鲜供应链区块链技术投资决策及协调[J]. 管理工程学报, 2022, 36(1): 159-171.
- [19] 陈化飞, 贾鑫, 姜曼. 谎报行为下生鲜供应链中区块链技术应用决策[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(16): 265-270.
- [20] 林强, 刘名武, 王晓斐. 嵌入区块链信息传递功能的绿色供应链决策[J/OL]. 计算机集成制造系统, 2022: 1-23 [2023-05-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20211006.1222.006.html>.

On the Use of Blockchain Technology in Enhancing Quality Traceability across the Food Supply Chain

Chen Changhua^{1,2} Li Yin² Xu Shuaishuai²

(1. School of Management, Xihua University;

2. School of International Economics and Management, Xihua University, Chengdu, Sichuan 610039, China)

Abstract: This article aims to clarify the cost changes associated with implementing blockchain technology for food supply chain quality traceability and encourage active participation from all parties involved. To achieve this, the article introduces the cost change coefficient and food quality to construct a decision-making model. The model explores the conditions for applying blockchain technology for quality traceability in the food supply chain and the cost-sharing threshold

(下转第 96 页)