

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2025.12.009

应对供应商掺假行为的区块链+延期支付策略^①

陈晓红^{1,2,3}, 张维东^{1,4}, 王傅强^{1,3*}

(1. 中南大学商学院, 长沙 410083; 2. 湖南工商大学前沿交叉学院, 长沙 410205;
3. 湘江实验室, 长沙 410205; 4. 长沙理工大学经济与管理学院, 长沙 410114)

摘要: 针对一个买家和两个供应商组成的供应链, 考虑供应商存在掺假行为, 构建信息不对称下买家主导的委托代理模型, 分析了买家采用延期支付策略或结合区块链的延期支付策略对供应链质量管理的影响. 通过比较买家在采用延期支付和区块链+延期支付策略下的均衡结果, 分析两种策略下供应商的掺假动机、掺假被发现的概率等对买家决策和供应链利润的影响, 揭示出区块链在供应链质量管理中的价值和各方动机. 研究表明: 在延期支付策略下, 买家需根据供应商掺假时问题产品被消费者发现的边际概率制定三种不同的最优策略; 在区块链+延期支付策略下, 因为买家可以追溯到掺假的供应商而仅需一种策略. 采用区块链可以降低买家质量管理的复杂性, 但不一定能增加买家和供应链的利润. 当供应商的掺假动机较高或两个供应商同时掺假被消费者发现的概率较低时, 买家更适合采用区块链. 区块链+延期支付策略相较传统延期支付策略将使供应商的利润受损或保持不变. 因此, 在特定条件下, 买家应通过转移支付来提升供应商的利润以促使供应商接受采用区块链, 实现供应链协调.

关键词: 延期支付策略; 区块链; 供应商掺假; 委托代理; 多源采购

中图分类号: F273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2025)12-0123-15

0 引言

因供应商掺假而造成的产品质量问题频发, 不仅使人民的生命健康遭受重大威胁, 也使企业和行业蒙受了严重的声誉和经济损失. 2008年中国奶制品污染导致30多万名婴儿健康受到伤害, 国内相关企业和行业受到沉重打击. 近年来, 我国接连爆出的“瘦肉精事件”等也引发了人们对食品安全的持续担心. 企业如何通过有效的质量管理来避免供应商掺假已成为供应链质量管理中的一个重要问题. 在现实中, 企业采用了多种质量管理策略, 如延期支付^[1]、检查^[2]、认证^[3]等. 然而, 以上策略并没有完全杜绝产品质量问题的发生.

本文着重研究延期支付策略对产品质量管理

的影响. 在该策略下, 企业在期初支付给供应商部分货款, 而只有当在预先设定的时间内未发现产品质量问题时, 企业才将剩余货款支付给供应商. 相较于其他策略, 延期支付策略有着独特的优势^[1]. 然而, 现有对延期支付策略的研究主要考虑一个买家和一个供应商的情形. 在现实中, 买家往往从多个供应商采购相同的原材料或产品. 这时, 由于缺乏合适的技术, 买家在追溯供应商产品质量责任时面临困难. 一方面, 买家可能需要较长的时间并付出较大努力才能辨识掺假的供应商; 另一方面, 即使买家能够辨识, 也可能由于缺乏可信的第三方来证明辨识结果的可信性, 供应商不同意买家的辨识方案和结果. 由此, 当买家不向其认定有掺假行为的供应商支付剩余货款时, 买家

① 收稿日期: 2021-12-29; 修订日期: 2024-05-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助卓越研究群体项目(72088101); 国家自然科学基金资助项目(71972184).

通讯作者: 王傅强(1984—), 男, 湖南湘潭人, 副教授, 博士生导师. Email: wfqqfw11@foxmail.com

和供应商可能无法达成一致. 面对上述挑战, 买家可能选择当发现产品掺假时, 对所有供应商进行延期支付, 即采用集体担保合同 (Group-warranty contract) 的形式. 类似的集体担保合同已在文献中得到了研究^[4, 5], 在实践中, 美国食品药品监督管理局也要求制造商和供应商负责产品召回的所有相关费用, 无论其是否应承担相应的责任^[6].

近年来, 区块链技术的出现为买家解决上述问题提供了新的思路. 由于区块链具有不可篡改、可追溯和可验证等特性, 买家可以通过将其生产和物流中与质量有关的信息都记录在区块链中, 确保在产品掺假被发现时, 迅速且可信地定位到掺假的供应商. 这为买家只对掺假的供应商进行延期支付创造了条件. 现实中, 许多企业已将区块链应用于产品质量管理. 例如, 沃尔玛通过搭建区块链平台追溯猪肉商品, 在多个供应商向沃尔玛供应猪肉的情况下, 通过记录猪肉的供应商来源和质量等相关信息, 以便在产品出现质量问题时, 能够通过区块链快速识别和验证造成该问题的供应商^[7]. 宝马集团通过对其来自多个供应商的车辆前大灯进行区块链溯源, 对每个大灯分配唯一的标识并将供应商在制造过程中的数据上传, 在发生质量问题后, 宝马可以快速识别和验证造成问题的前大灯供应商^[8]. 通过区块链, 买家可以追溯并确认掺假的供应商. 因此, 买家可以结合区块链重新设计其延期支付策略. 鉴于已有文献尚未考虑在多供应商下的延期支付策略以及如何将区块链和延期支付结合起来, 本文拟将两者结合, 探讨在多供应商下延期支付策略和区块链 + 延期支付策略分别进行产品质量管理的有效性, 以及区块链在其中的作用机制和价值等问题, 以为多供应商下供应链质量管理的理论和实践提供参考.

与本文相关的文献主要包括供应链质量管理和区块链在供应链管理中的应用两方面. 在供应链质量管理方面, 刘心报等^[9]提出了在新一代信息技术环境下全生命周期质量管理体系. Hwang 等^[3]分析了一个风险中性的供应链中, 买家如何通过评估和认证机制来提升供应商的产品质量. Chen 和 Deng^[10]构建由单一供应商和单一买家组成的供应链模型, 发现认证机制有利于提升供应商产品质量. Lee 和 Li^[11]研究了买方的产品

检查机制对供应商产品质量改进的影响. 毕军贤和赵定涛^[12]研究了在风险中性的供应链中, 抽样检验产品策略下买卖双方的质量检验博弈. Balachandran 和 Radhakrishnan^[13]针对制造商主导的供应链, 分析了基于内部检验或外部失败而签订的罚款和质保机制在供应链质量管理中的有效性.

Babich 和 Tang^[1]率先研究了延期支付策略在供应链质量管理中的应用. 他们比较和分析了延期支付、检查和两者结合三种机制分别防止供应商掺假的作用. Rui 和 Lai^[14]通过内生买家采购决策和考虑一般化的产品缺陷发现过程扩展了 Babich 和 Tang^[1]的研究. 申强等^[15]分析了四级供应链中, 制造商与经销商之间的延期支付对供应链产品质量管理的影响, 发现制造商缩短延期支付时间有利于提高供应商原材料的质量水平.

在区块链于供应链管理中的应用方面, Babich 和 Hilary^[16]结合区块链的可见性、可验证等特性, 分析了区块链在供应链风险管理、数据集成等领域的应用前景. 胡祥培等^[17]对基于区块链的农产品供应链溯源研究进行了综述. Zhang 等^[18]研究了基于区块链的数字化转型对冷链物流的影响. Keskin 等^[19]探讨了区块链在保持产品生鲜度透明性方面的价值. 少数学者研究了区块链在供应链质量管理中的应用. Cui 等^[20]研究了在平行供应链和链式供应链的结构中, 如何通过区块链的可追溯性提升供应商产品质量. Pun 等^[21]研究了当市场中同时存在正品制造商和仿制品制造商时, 正品制造商如何通过定价策略和区块链来区分正品和仿制品. Liu 等^[22]针对建设区块链溯源防伪平台项目, 构建了基于客户需求的项目供应商评估模型.

综上所述, 已有文献大多基于一个供应商和一个买家的供应链结构, 研究了检验、延期支付等策略应用于供应链产品质量管理的问题. 较少文献考虑多个供应商的情形, 且只有少数研究探讨了区块链在供应链产品质量管理中的应用. 基于此, 本文考虑由两个供应商和一个占主导地位的买家构成的两级供应链, 通过构建买家和供应商之间的委托代理模型, 从买家角度研究上游存在多个可能掺假的供应商时延期支付策略以及区块链 + 延期支付策略在供应链质量管理中的应用,

为相关理论和实践提供参考。

1 问题描述与模型假设

考虑一条由两个供应商和一个买家组成的供应链, 市场规模标准化为 1. 买家从两个供应商处分别采购一单位原材料, 将其加工为一单位的最终产品并销售. 本文聚焦于买家如何对上游供应商的原材料质量进行管理, 因此, 参考 Babich 和 Tang^[1] 和 Cui 等^[20] 的研究, 假设不存在买家掺假行为. 上游供应商生产决策相互独立, 买家生产的产品质量由两个供应商共同决定. 在本文中, 供应商存在两种生产决策: 掺假 ($a = d$), 其生产成本为 c_d ; 不掺假 ($a = n$), 其生产成本为 c_n , 且 $c_d < c_n$. 由于信息不对称, 买家无法监测到供应商的生产行为, 只能通过最终产成品质量判断供应商是否掺假, 且供应商掺假的生产成本更低, 因此供应商存在掺假动机. 用 $\theta = \frac{c_d}{c_n}$ 反映供应商的掺假动机的大小, 即当 θ 越小时表示供应商掺假获得的利润更多, 买家面临供应商的道德风险问题也更严重, 反之亦然. 在延期支付策略下, 买家无法追溯掺假的供应商, 若消费者发现产品掺假, 只能对全部的供应商进行惩罚. 而在区块链 + 延期支付策略下, 买家可以追溯掺假的供应商, 因此仅对掺假的供应商进行惩罚.

买家作为供应链中的领导者, 首先对原材料的订购合同进行决策. 若供应商同意该合同, 则进行生产决策, 掺假 ($a = d$) 或不掺假 ($a = n$). 买家收到供应商的原材料之后立即对产品进行生产, 并以净现值为 p 的销售价格将产品销售给消费者. 与 Babich 和 Tang^[1] 的研究一致, 假定若供应商掺假, 消费者将在时间 σ 发现产品掺假, 非负随机变量 σ 服从累积分布函数为 $F(\cdot)$ 的分布. 为简化分析, 本文考虑对称情形, 即当供应商 s_1 不掺假、供应商 s_2 掺假时产品被消费者发现掺假的概率等于供应商 s_1 掺假、供应商 s_2 不掺假时产品被消费者发现掺假的概率. 因此, 若买家决定延期支付时间为 T , 当供应商 s_1 不掺假, 而供应商 s_2 掺假时, 问题产品在时间 T 内被消费者发现的概率为 $F(T, n, d)$. 当供应商 s_1 掺假, 而供应商

s_2 不掺假时, 问题产品在时间 T 内被消费者发现的概率为 $F(T, d, n) = F(T, n, d)$. 当两个供应商同时掺假时, 问题产品在时间 T 内被消费者发现的概率为 $F(T, d, d)$. 进一步, 假设 $0 < F(T, n, d) < F(T, d, d) < 1$, 即两个供应商同时掺假时问题产品被消费者发现的概率大于一个供应商掺假时问题产品被发现的概率. 若消费者发现产品掺假, 买家需对消费者进行赔偿, 并对所有产品进行召回, 产生单位成本 ρ_B . 假设 ρ_B 的期望净现值 $v_B = \rho_B \mathbb{E}[e^{-\alpha_B \sigma}]$ 总是大于产品销售价格的净现值 p , 即若产品掺假买家必将遭受损失, 以此激励买家实施有效的产品质量管理措施. 若供应商不掺假, 则买家生产的产品不存在问题.

2 延期支付策略

在延期支付策略下, 买家作为博弈的领导者首先进行延期支付合同的相关决策, 供应商作为跟随者进行原材料质量的相关决策, 延期支付合同包含 $\{y_{0i}^D, y_{1i}^D, T\}$ 三部分, 其中 $i \in \{1, 2\}$. 买方在期初先向供应商 s_1 和供应商 s_2 分别支付 y_{01}^D 和 y_{02}^D . 若消费者在时间 T 没有发现产品问题, 买家再分别向两个供应商支付 y_{11}^D 和 y_{12}^D ; 若消费者在时间 T 发现产品问题, 由于买家无法识别掺假的供应商, 买家向两个供应商都不支付剩余货款. 用 $\pi_B^D, \pi_{s_i}^D$ 分别表示买家和供应商 i 的预期利润, 其中上标 D 表示延期支付策略.

当供应商等待买家支付货款时, 需要向银行进行贷款以满足其运营的资金需求. 假设两个供应商的融资利率均为 α_s , 买家的融资利率为 α_B . 根据现实情境, 与 Babich 和 Tang^[1] 的研究一致, 假设供应商在公司规模和盈利能力上都弱于买家, 所以买家能以更优惠的利率从银行获得贷款, 即 $\alpha_s \geq \alpha_B > 0$, 供应商的融资成本不低于买家的融资成本.

根据供应商生产决策的不同, 可以分为以下四种情形:

情形 1 两个供应商都不掺假. 此时, 两个供应商的生产成本均为 c_n . 在期初, 买家向两个供应商分别支付 y_{01}^D 和 y_{02}^D . 在时间 T , 买家向两个供应商分别支付 y_{11}^D 和 y_{12}^D . 参考 Babich 和 Tang^[1]、Rui 和 Lai^[14] 等, 供应商和买家的预期利

润分别为 $\pi_{s_1}^D = y_{01}^D + y_{11}^D e^{-\alpha_s T} - c_n$, $\pi_{s_2}^D = y_{02}^D + y_{12}^D e^{-\alpha_s T} - c_n$, $\pi_B^D = p - y_{01}^D - y_{11}^D e^{-\alpha_B T} - y_{02}^D - y_{12}^D e^{-\alpha_B T}$.

情形 2 供应商 s_1 不掺假, 供应商 s_2 掺假. 此时, 供应商 s_1 和 s_2 的生产成本分别为 c_n 和 c_d . 在期初, 买家向两个供应商分别支付 y_{01}^D 和 y_{02}^D . 在时间 T , 若消费者没有发现产品问题, 则买家再向两个供应商分别支付 y_{11}^D 和 y_{12}^D ; 反之, 则买家对两个供应商都不支付剩余货款. 此时, 供应商和买家的预期利润分别为 $\pi_{s_1}^D = y_{01}^D + y_{11}^D e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, n, d)) - c_n$, $\pi_{s_2}^D = y_{02}^D + y_{12}^D e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, n, d)) - c_d$, $\pi_B^D = p - y_{01}^D - y_{11}^D e^{-\alpha_B T} (1 - F(T, n, d)) - y_{02}^D - y_{12}^D e^{-\alpha_B T} (1 - F(T, n, d)) - v_B$.

情形 3 供应商 s_1 掺假, 供应商 s_2 不掺假. 此

情况与情形 2 类似, 因此不再赘述.

情形 4 两个供应商同时掺假. 此时, 两个供应商的生产成本均为 c_d . 在期初, 买家向两个供应商分别支付 y_{01}^D 和 y_{02}^D . 在时间 T , 若消费者没有发现产品问题, 则买家再向两个供应商分别支付 y_{11}^D 和 y_{12}^D ; 反之, 则买家对两个供应商都不进行支付. 此时, 供应商和买家的预期利润分别为 $\pi_{s_1}^D = y_{01}^D + y_{11}^D e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, d, d)) - c_d$, $\pi_{s_2}^D = y_{02}^D + y_{12}^D e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, d, d)) - c_d$, $\pi_B^D = p - y_{01}^D - y_{11}^D e^{-\alpha_B T} (1 - F(T, d, d)) - y_{02}^D - y_{12}^D e^{-\alpha_B T} (1 - F(T, d, d)) - v_B$.

综合以上分析, 得到延期支付策略下供应商与买家的收益矩阵如表 1 所示.

表 1 延期支付策略下供应商与买家的收益矩阵

Table 1 The matrix of the supplier's and buyer's profits under the deferred payment strategy

生产决策	供应商 s_1	供应商 s_2	买家 B
$a = \{n, n\}$	$y_{01}^D + y_{11}^D e^{-\alpha_s T} - c_n$	$y_{02}^D + y_{12}^D e^{-\alpha_s T} - c_n$	$p - y_{01}^D - y_{11}^D e^{-\alpha_B T} - y_{02}^D - y_{12}^D e^{-\alpha_B T}$
$a = \{n, d\}$	$y_{01}^D + y_{11}^D e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, n, d)) - c_n$	$y_{02}^D + y_{12}^D e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, n, d)) - c_d$	$p - y_{01}^D - y_{11}^D e^{-\alpha_B T} (1 - F(T, n, d)) - y_{02}^D - y_{12}^D e^{-\alpha_B T} (1 - F(T, n, d)) - v_B$
$a = \{d, n\}$	$y_{01}^D + y_{11}^D e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, d, n)) - c_d$	$y_{02}^D + y_{12}^D e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, d, n)) - c_n$	$p - y_{01}^D - y_{11}^D e^{-\alpha_B T} (1 - F(T, d, n)) - y_{02}^D - y_{12}^D e^{-\alpha_B T} (1 - F(T, d, n)) - v_B$
$a = \{d, d\}$	$y_{01}^D + y_{11}^D e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, d, d)) - c_d$	$y_{02}^D + y_{12}^D e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, d, d)) - c_d$	$p - y_{01}^D - y_{11}^D e^{-\alpha_B T} (1 - F(T, d, d)) - y_{02}^D - y_{12}^D e^{-\alpha_B T} (1 - F(T, d, d)) - v_B$

根据表 1, 建立买家与供应商的委托代理模型如下

$$\max_{y_{01}^D, y_{02}^D \geq 0, y_{11}^D, y_{12}^D \geq 0, T \geq 0} \pi_B^D = p - y_{01}^D - y_{11}^D e^{-\alpha_B T} - y_{02}^D - y_{12}^D e^{-\alpha_B T} \quad (1a)$$

$$\text{s. t.} \quad y_{01}^D + y_{11}^D e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, n, d)) - c_n \geq y_{01}^D + y_{11}^D e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, d, d)) - c_d \quad (1b)$$

$$y_{02}^D + y_{12}^D e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, d, n)) - c_n \geq y_{02}^D + y_{12}^D e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, d, d)) - c_d \quad (1c)$$

$$y_{01}^D + y_{11}^D e^{-\alpha_s T} - c_n \geq y_{01}^D + y_{11}^D e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, d, n)) - c_d \quad (1d)$$

$$y_{02}^D + y_{12}^D e^{-\alpha_s T} - c_n \geq y_{02}^D + y_{12}^D e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, n, d)) - c_d \quad (1e)$$

$$y_{01}^D + y_{11}^D e^{-\alpha_s T} - c_n \geq 0 \quad (1f)$$

$$y_{02}^D + y_{12}^D e^{-\alpha_s T} - c_n \geq 0 \quad (1g)$$

模型中式(1b)、式(1c)、式(1d)和式(1e)为供应商激励相容约束(IC), 其中式(1b)表示供应商 s_1 不掺假、供应商 s_2 掺假时供应商 s_1 获得的利润大于两个供应商都掺假时供应商 s_1 获得的利润. 式(1d)表示两个供应商都不掺假时供应商 s_1 获得的利润大于供应商 s_1 掺假、供应商 s_2 不掺假时供应商 s_1 获得的利润. 式(1c)和式(1e)分别与式(1b)、式(1d)类似. 式(1f)和式(1g)为供应商个体理性约束(IR). 令 $\alpha = \alpha_s - \alpha_B$ 表示供应商与买家之间的融资利率差, $y_i^D = y_{ii}^D e^{-\alpha_s T}$, $i \in \{1, 2\}$ 表

示买家对供应商延期支付的现值. 则延期支付策略下买家与供应商的委托代理模型可简化为

$$\max_{y_{01}^D, y_{02}^D \geq 0, y_1^D, y_2^D \geq 0, T \geq 0} \pi_B^D = p - y_{01}^D - y_1^D e^{\alpha T} - y_{02}^D - y_2^D e^{\alpha T} \quad (2a)$$

$$\text{s. t.} \quad y_1^D (F(T, d, d) - F(T, n, d)) - (c_n - c_d) \geq 0 \quad (2b)$$

$$y_2^D (F(T, d, d) - F(T, d, n)) - (c_n - c_d) \geq 0 \quad (2c)$$

$$y_1^D F(T, n, d) - (c_n - c_d) \geq 0 \quad (2d)$$

$$y_2^D F(T, d, n) - (c_n - c_d) \geq 0 \quad (2e)$$

$$y_{01}^D + y_1^D - c_n \geq 0 \quad (2f)$$

$$y_{02}^D + y_2^D - c_n \geq 0 \quad (2g)$$

在模型(2)中,延期支付时间 T 仅出现在激励相容约束中,且买家的利润随 T 的减少而增加。由此可得引理 1。

引理 1 在最优情况下,模型(2)中至少有一个激励相容约束是紧的。

不失一般性,假设 $y_1^D \geq y_2^D$,则在模型(2)中,若式(2c)成立,则式(2b)一定成立。同理,若式(2e)成立,则式(2d)一定成立。因此,约束条件式(2b)和式(2d)可以剔除。根据引理 1,对模型(2)进行求解,通过分别考虑激励相容约束式(2c)是紧的、式(2e)是紧的或式(2c)和式(2e)同时是紧的情况,可得在 $T_a > T_c$ 、 $T_a < T_c$ 和 $T_a = T_c$ 时,买家的最优决策分别如定理 1、定理 2 和定理 3 所示。其中 T_a 、 T_c 分别是等式 $F(T, n, d) = 1 - \frac{c_d}{c_n}$, $F(T, d, d) - F(T, n, d) = 1 - \frac{c_d}{c_n}$ 的解。

定理 1 当 $T_a > T_c$ 时,买家采用延期支付策略的最优决策为以下三种情形之一:

情形 1 $y_{01}^D = 0$, $y_{02}^D = 0$, $y_1^D = \frac{c_n - c_d}{F(T_1^D, n, d)}$, $y_2^D = \frac{c_n - c_d}{F(T_1^D, n, d)}$, $T = T_1^D$ 。此时,买家的利润为 $\pi_B^D = p - 2 \frac{(c_n - c_d)e^{\alpha T_1^D}}{F(T_1^D, n, d)}$, 供应商的利润分别为 $\pi_{s_1}^D = \frac{c_n - c_d}{F(T_1^D, n, d)} - c_n$, $\pi_{s_2}^D = \frac{c_n - c_d}{F(T_1^D, n, d)} - c_n$, 其中 $T_1^D = \arg \min_T \left(\frac{e^{\alpha T}}{F(T, n, d)} \right)$ 。

情形 2 $y_{01}^D = 0$, $y_{02}^D = 0$, $y_1^D = c_n$, $y_2^D = c_n$, $T = T_a$ 。此时,买家的利润为 $\pi_B^D = p - 2c_n e^{\alpha T_a}$, 供应商的利润均为 0, 其中 T_a 为 $F(T, n, d) = 1 - \frac{c_d}{c_n}$ 的解。

情形 3 $y_{01}^D = c_n - \frac{c_n - c_d}{F(T_2^D, n, d)}$, $y_{02}^D = c_n - \frac{c_n - c_d}{F(T_2^D, n, d)}$, $y_1^D = \frac{c_n - c_d}{F(T_2^D, n, d)}$, $y_2^D = \frac{c_n - c_d}{F(T_2^D, n, d)}$, $T = T_2^D$ 。此时,买家的利润为 $\pi_B^D = p - 2c_n - 2 \times \frac{(c_n - c_d)(e^{\alpha T_2^D} - 1)}{F(T_2^D, n, d)}$, 供应商的利润

均为 0, 其中 $T_2^D = \arg \min_T \left(\frac{e^{\alpha T} - 1}{F(T, n, d)} \right)$ 。

若 $T_1^D \leq T_a$, 则情形 1 为最优决策; 若 $T_1^D > T_a > T_2^D$, 则情形 2 为最优决策; 在其它情形下, 情形 3 为最优决策。

由引理 1, 激励相容约束在最优情况下至少有一个是紧的。进一步, 从模型(2)中的激励相容约束可知, 买家需要通过调整延期支付金额 y_1^D 和 y_2^D 或延期支付时间 T 来避免供应商掺假。而从式(2a)可以看出, 随着 y_1^D 、 y_2^D 或 T 的增加, 买家的利润均会降低。因此, 买家需要在延期支付金额和延期支付时间之间进行权衡, 以使在满足供应商激励相容约束和个体理性约束的前提下, 自身利润最大化。由此, 得定理 1。在定理 1 中, 因为 $T_a > T_c$, 即 $F(T_c, n, d) < F(T_a, n, d) = F(T_c, d, d) - F(T_c, n, d)$, 所以 $F(T_c, d, d) > 2F(T_c, n, d)$, 表明两个供应商同时掺假时问题产品在时间 T_c 被消费者发现的概率大于两倍仅一个供应商掺假时问题产品在时间 T_c 被消费者发现的概率, 即当其中一个供应商掺假时, 另外一个供应商再进行掺假时问题产品被发现的边际概率增加。

定理 1 中的情形 1 表明, 当 $T_1^D \leq T_a$ 时, 买家对两个供应商都采取完全延期支付是其最优决策。注意到当 $T_1^D \leq T_a$ 时, $F(T_1^D, n, d) \leq F(T_a, n, d) = 1 - \theta$, 因此, 可以将 $T_1^D \leq T_a$ 改写成 $\theta \leq 1 - F(T_1^D, n, d)$ 。即情形 1 对应于供应商掺假时的单位成本 c_d 远低于不掺假时的单位成本 c_n 的情形。此时, 买家将对两个供应商都进行完全延期支付。同时, 为激励两个供应商参与合约, 买家为两个供应商都提供了正的利润。

定理 1 中的情形 2 表明, 当 $T_1^D > T_a > T_2^D$ 时, 买家的最优决策是对两个供应商都采取完全延期支付。此时, $1 - F(T_1^D, n, d) < \theta < 1 - F(T_2^D, n, d)$, 表明供应商掺假成本处于中等水平。买家为提升自己的利润, 对两个供应商都仅支付不掺假生产成本 c_n 的延期支付金额来避免供应商掺假。此时, 两个供应商的利润均为 0。

定理 1 中的情形 3 表明, 当 $T_a < \min\{T_1^D, T_2^D\}$ 时, 买家对两个供应商都采取部分延期支付是其最优决策。此时, $\theta > \max\{1 - F(T_1^D, n, d), 1 - F(T_2^D, n, d)\}$, 供应商的掺假成本较高。因此, 这表明当供应商的掺假动机较低时, 买家可以通

过提供期初支付为正的部分延期支付合同来管理供应商的原材料质量。

与定理 1 类似,当 $T_a < T_c$ 时,得定理 2。

定理 2 当 $T_a < T_c$ 时,买家采用延期支付策略的最优决策为以下三种情形之一:

情形 1 $y_{01}^D = 0, y_{02}^D = 0, y_1^D = \frac{c_n - c_d}{F(T_3^D, d, d) - F(T_3^D, n, d)}, y_2^D = \frac{c_n - c_d}{F(T_3^D, d, d) - F(T_3^D, n, d)}, T = T_3^D$. 此时,买家的利润为 $\pi_B^D = p - 2 \times \frac{(c_n - c_d)e^{\alpha T_3^D}}{F(T_3^D, d, d) - F(T_3^D, n, d)}$, 供应商的利润分别为 $\pi_{s_1}^D = \frac{c_n - c_d}{F(T_3^D, d, d) - F(T_3^D, n, d)} - c_n, \pi_{s_2}^D = \frac{c_n - c_d}{F(T_3^D, d, d) - F(T_3^D, n, d)} - c_n$, 其中 $T_3^D = \arg \min_T \left(\frac{e^{\alpha T}}{F(T, d, d) - F(T, n, d)} \right)$.

情形 2 $y_{01}^D = 0, y_{02}^D = 0, y_1^D = c_n, y_2^D = c_n, T = T_c$. 此时,买家的利润为 $\pi_B^D = p - 2c_n e^{\alpha T_c}$, 供应商的利润均为 0, 其中 T_c 为 $F(T, d, d) - F(T, n, d) = 1 - \frac{c_d}{c_n}$ 的解。

情形 3 $y_{01}^D = c_n - \frac{c_n - c_d}{F(T_4^D, d, d) - F(T_4^D, n, d)}, y_{02}^D = c_n - \frac{c_n - c_d}{F(T_4^D, d, d) - F(T_4^D, n, d)}, y_1^D = \frac{c_n - c_d}{F(T_4^D, d, d) - F(T_4^D, n, d)}, y_2^D = \frac{c_n - c_d}{F(T_4^D, d, d) - F(T_4^D, n, d)}, T = T_4^D$. 此时,买家的利润为 $\pi_B^D = p - 2c_n - 2 \times \frac{(c_n - c_d)(e^{\alpha T_4^D} - 1)}{F(T_4^D, d, d) - F(T_4^D, n, d)}$, 供应商的利润均为 0, 其中 $T_4^D = \arg \min_T \left(\frac{e^{\alpha T} - 1}{F(T, d, d) - F(T, n, d)} \right)$.

若 $\theta \leq 1 - [F(T_3^D, d, d) - F(T_3^D, n, d)]$, 则情形 1 为最优决策;若 $1 - [F(T_3^D, d, d) - F(T_3^D, n, d)] < \theta < 1 - [F(T_4^D, d, d) - F(T_4^D, n, d)]$, 则情形 2 为最优决策;在其它情形下,情形 3 为最优决策。

在定理 2 中,因为 $T_a < T_c$, 所以 $F(T_c, d, d) < 2F(T_c, n, d)$, 表明两个供应商同时掺假时问题产品在时间 T_c 被消费者发现的概率小于两倍仅一个供应商掺假时问题产品在时间 T_c 被消费者发现的概率,即当其中一个供应商掺假时,另外一个

供应商再进行掺假时问题产品被发现的边际概率减小。

与定理 1 类似,定理 2 中的情形 1 ~ 情形 3 分别对应于供应商的掺假成本很低、中等和很高的情形。在三种情况下,买家对两个供应商采用的策略及供应商利润均与定理 1 对应的情形相似。

当 $T_a = T_c$ 时,得命题 3。

定理 3 当 $T_a = T_c$ 时, $y_{01}^D = 0, y_{02}^D = 0, y_1^D = c_n, y_2^D = c_n$, 买家的利润为 $\pi_B^D = p - 2c_n e^{\alpha T_5^D}$, 供应商的利润均为 0, 其中 T_5^D 为 $F(T, n, d) = F(T, d, d) - F(T, n, d) = 1 - \frac{c_d}{c_n}$ 的解。

当 $T_a = T_c$ 时,两个供应商同时掺假时问题产品在时间 T_c 被消费者发现的概率恰好为一个供应商掺假时问题产品在时间 T_c 被消费者发现的概率的两倍。定理 3 表明,此时买家的最优延期支付合同是对两个供应商都采取完全延期支付,且仅支付给供应商不掺假时的生产成本的金额,两个供应商的利润均为 0。

综上,在延期支付策略下,买家的最优延期支付合同取决于供应商掺假被发现的边际概率。当 $T_a < T_c$ ($T_a > T_c$) 时,两个供应商同时掺假时问题产品在时间 T_c 被消费者发现的概率小于(大于)两倍一个供应商掺假时问题产品在时间 T_c 被消费者发现的概率。此时,根据供应商掺假动机(掺假成本)的不同,买家将对供应商采用不同的延期支付策略。当 $T_a = T_c$ 时,买家只会采用完全延期支付策略,且仅支付供应商的生产成本。

3 区块链 + 延期支付策略

前面研究发现在延期支付策略下,由于买家无法可信地认定掺假的供应商,其在上游存在多个供应商时,需根据供应商掺假时问题产品被消费者发现的边际概率制定不同的最优策略。通过采用区块链,买家可以认定掺假的供应商,因此,仅对掺假的供应商进行惩罚。在本节中,研究区块链 + 延期支付合同下买家的最优策略。与延期支付模式类似,区块链 + 延期支付合同也包含 $\{y_{0i}^{BD}, y_{1i}^{BD}, T\}$ 三部分,其中 $i \in \{1, 2\}$ 。

由于本文聚焦于买家对供应商产品质量的管理,参考 Rui 和 Lai^[14] 和 Cui 等^[20] 的研究,不考虑

买家采用区块链后,产品价格提高并影响需求的情形。假设在区块链 + 延期支付策略下,产品价格仍为 p 。同时,为聚焦于区块链为产品质量管理带来的价值,不考虑区块链的采纳成本。此外,考虑到区块链的作用主要在于实现产品及原材料、零部件等在生产和流通过程中的追溯和数据的不可篡改,进而保证数据真实性。然而正如 Babich 和 Hilary^[16]指出,区块链的缺点之一是“Garbage in, garbage out”,即如果原始上传到区块链平台中的数据是错的,那么就将一直是错的。因此,实践中为了避免出现该问题,解决的办法是尽量采用物联网设备直接将生产和流通过程中的数据上传,减少人为录入数据时可能产生的故意造假。因此,假设采用区块链后,虽然消费者可能也能查看到产品生产和流通过程中的相关记录,但是并不能提高消费者发现产品掺假的概率。

根据供应商生产决策的不同,分为以下四种情形:

情形 1 两个供应商都不掺假。此时,两个供应商的生产成本均为 c_n 。在期初,买家向两个供应商分别支付 y_{01}^{BD} 和 y_{02}^{BD} 。在时间 T ,买家向两个供应商分别支付 y_{11}^{BD} 和 y_{12}^{BD} 。此时,供应商和买家的预期利润分别为 $\pi_{s_1}^{BD} = y_{01}^{BD} + y_{11}^{BD} e^{-\alpha_s T} - c_n$, $\pi_{s_2}^{BD} = y_{02}^{BD} + y_{12}^{BD} e^{-\alpha_s T} - c_n$, $\pi_B^{BD} = p - y_{01}^{BD} - y_{11}^{BD} e^{-\alpha_B T} - y_{02}^{BD} - y_{12}^{BD} e^{-\alpha_B T}$ 。

表 2 区块链 + 延期支付策略下供应商与买家的收益矩阵

Table 2 The matrix of the supplier's and buyer's profits under the blockchain + deferred payment strategy

生产决策	供应商 s_1	供应商 s_2	买家 B
$a = \{n, n\}$	$y_{01}^{BD} + y_{11}^{BD} e^{-\alpha_s T} - c_n$	$y_{02}^{BD} + y_{12}^{BD} e^{-\alpha_s T} - c_n$	$p - y_{01}^{BD} - y_{11}^{BD} e^{-\alpha_B T} - y_{02}^{BD} - y_{12}^{BD} e^{-\alpha_B T}$
$a = \{n, d\}$	$y_{01}^{BD} + y_{11}^{BD} e^{-\alpha_s T} - c_n$	$y_{02}^{BD} + y_{12}^{BD} e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, n, d)) - c_d$	$p - y_{01}^{BD} - y_{11}^{BD} e^{-\alpha_B T} - y_{02}^{BD} - y_{12}^{BD} e^{-\alpha_B T} (1 - F(T, n, d)) - v_B$
$a = \{d, n\}$	$y_{01}^{BD} + y_{11}^{BD} e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, d, n)) - c_d$	$y_{02}^{BD} + y_{12}^{BD} e^{-\alpha_s T} - c_n$	$p - y_{01}^{BD} - y_{11}^{BD} e^{-\alpha_B T} (1 - F(T, d, n)) - y_{02}^{BD} - y_{12}^{BD} e^{-\alpha_B T} - v_B$
$a = \{d, d\}$	$y_{01}^{BD} + y_{11}^{BD} e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, d, d)) - c_d$	$y_{02}^{BD} + y_{12}^{BD} e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, d, d)) - c_d$	$p - y_{01}^{BD} - y_{11}^{BD} e^{-\alpha_B T} (1 - F(T, d, d)) - y_{02}^{BD} - y_{12}^{BD} e^{-\alpha_B T} (1 - F(T, d, d)) - v_B$

前面已假设 $F(T, d, d) > F(T, n, d)$, 因此, $y_{01}^{BD} + y_{11}^{BD} e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, d, n)) - c_d > y_{01}^{BD} + y_{11}^{BD} e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, d, d)) - c_d$ 。

$$\max_{y_{01}^{BD}, y_{02}^{BD} \geq 0, y_{11}^{BD}, y_{12}^{BD} \geq 0, T \geq 0} \pi_B^{BD} = p - y_{01}^{BD} - y_{11}^{BD} e^{-\alpha_B T} - y_{02}^{BD} - y_{12}^{BD} e^{-\alpha_B T} \quad (3a)$$

$$\text{s. t. } y_{01}^{BD} + y_{11}^{BD} e^{-\alpha_s T} - c_n \geq y_{01}^{BD} + y_{11}^{BD} e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, d, n)) - c_d \quad (3b)$$

$$y_{02}^{BD} + y_{12}^{BD} e^{-\alpha_s T} - c_n \geq y_{02}^{BD} + y_{12}^{BD} e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, n, d)) - c_d \quad (3c)$$

$$y_{01}^{BD} + y_{11}^{BD} e^{-\alpha_s T} - c_n \geq 0 \quad (3d)$$

$$y_{02}^{BD} + y_{12}^{BD} e^{-\alpha_s T} - c_n \geq 0 \quad (3e)$$

$$y_{12}^{BD} e^{-\alpha_B T}.$$

情形 2 供应商 s_1 不掺假, 供应商 s_2 掺假。此时, 供应商 s_1 和供应商 s_2 的生产成本分别为 c_n 和 c_d 。在期初, 买家向两个供应商分别支付 y_{01}^{BD} 和 y_{02}^{BD} 。在时间 T , 若消费者没有发现产品掺假, 则买家再向两个供应商分别支付 y_{11}^{BD} 和 y_{12}^{BD} ; 反之, 则买家仅向不掺假的供应商支付。此时, 供应商和买家的预期利润分别为 $\pi_{s_1}^{BD} = y_{01}^{BD} + y_{11}^{BD} e^{-\alpha_s T} - c_n$, $\pi_{s_2}^{BD} = y_{02}^{BD} + y_{12}^{BD} e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, n, d)) - c_d$, $\pi_B^{BD} = p - y_{01}^{BD} - y_{11}^{BD} e^{-\alpha_B T} - y_{02}^{BD} - y_{12}^{BD} e^{-\alpha_B T} (1 - F(T, n, d)) - v_B$ 。

情形 3 供应商 s_1 掺假, 供应商 s_2 不掺假。此情况与情形 2 类似, 因此不再赘述。

情形 4 两个供应商同时掺假。此时, 两个供应商的生产成本均为 c_d 。在期初, 买家向两个供应商分别支付 y_{01}^{BD} 和 y_{02}^{BD} 。在时间 T , 若消费者没有发现问题产品, 则买家再向两个供应商分别支付 y_{11}^{BD} 和 y_{12}^{BD} ; 反之, 则买家对两个供应商都不进行支付。此时, 供应商和买家的预期利润分别为 $\pi_{s_1}^{BD} = y_{01}^{BD} + y_{11}^{BD} e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, d, d)) - c_d$, $\pi_{s_2}^{BD} = y_{02}^{BD} + y_{12}^{BD} e^{-\alpha_s T} (1 - F(T, d, d)) - c_d$, $\pi_B^{BD} = p - y_{01}^{BD} - y_{11}^{BD} e^{-\alpha_B T} (1 - F(T, d, d)) - y_{02}^{BD} - y_{12}^{BD} e^{-\alpha_B T} (1 - F(T, d, d)) - v_B$ 。

综上所述, 可以得到区块链 + 延期支付策略下供应商与买家的收益矩阵, 如表 2 所示。

根据表 2 建立区块链 + 延期支付策略下买家与供应商的委托代理模型

类似于延期支付策略,式(3b)和式(3c)为供应商激励相容约束(IC),式(3d)和式(3e)为供应

$$\max_{y_{01}^{BD}, y_{02}^{BD} \geq 0, y_1^{BD}, y_2^{BD} \geq 0, T \geq 0} \pi_B^{BD} = p - y_{01}^{BD} - y_1^{BD} e^{\alpha T} - y_{02}^{BD} - y_2^{BD} e^{\alpha T} \quad (4a)$$

$$\text{s. t.} \quad y_1^{BD} F(T, d, n) - (c_n - c_d) \geq 0 \quad (4b)$$

$$y_2^{BD} F(T, n, d) - (c_n - c_d) \geq 0 \quad (4c)$$

$$y_{01}^{BD} + y_1^{BD} - c_n \geq 0 \quad (4d)$$

$$y_{02}^{BD} + y_2^{BD} - c_n \geq 0 \quad (4e)$$

在区块链+延期支付策略下,买家可以精准识别掺假的供应商.因此,不需要像延期支付策略下根据 T_a 与 T_c 的关系,将其划分为三种情况.不失一般性,假设 $y_1^{BD} \geq y_2^{BD}$,可得定理4:

定理4 在区块链+延期支付策略下,买家的最优决策为以下三种情形之一:

情形1 $y_{01}^{BD} = 0, y_{02}^{BD} = 0, y_1^{BD} = \frac{c_n - c_d}{F(T_1^{BD}, n, d)}$,

$y_2^{BD} = \frac{c_n - c_d}{F(T_1^{BD}, n, d)}$, $T = T_1^{BD}$. 此时,买家的利润为

$\pi_B^{BD} = p - \frac{2(c_n - c_d)e^{\alpha T_1^{BD}}}{F(T_1^{BD}, n, d)}$, 供应商的利润分别为

$\pi_{s_1}^{BD} = \frac{c_n - c_d}{F(T_1^{BD}, n, d)} - c_n$, $\pi_{s_2}^{BD} = \frac{c_n - c_d}{F(T_1^{BD}, n, d)} -$

c_n , 其中 $T_1^{BD} = \arg \min_T \left(\frac{e^{\alpha T}}{F(T, n, d)} \right)$.

情形2 $y_{01}^{BD} = 0, y_{02}^{BD} = 0, y_1^{BD} = c_n, y_2^{BD} = c_n$, $T = T_b$. 此时,买家的利润为 $\pi_B^{BD} = p - 2 \times c_n e^{\alpha T_b}$, 供应商的利润分别为 $\pi_{s_1}^{BD} = 0, \pi_{s_2}^{BD} = 0$,

其中 T_b 为 $F(T, n, d) = 1 - \frac{c_d}{c_n}$ 的解.

情形3 $y_{01}^{BD} = c_n - \frac{c_n - c_d}{F(T_2^{BD}, n, d)}, y_{02}^{BD} = c_n -$

$\frac{c_n - c_d}{F(T_2^{BD}, n, d)}, y_1^{BD} = \frac{c_n - c_d}{F(T_2^{BD}, n, d)}, y_2^{BD} =$

$\frac{c_n - c_d}{F(T_2^{BD}, n, d)}$, $T = T_2^{BD}$. 此时,买家的利润为 $\pi_B^{BD} =$

$p - 2c_n - 2 \frac{(c_n - c_d)(e^{\alpha T_2^{BD}} - 1)}{F(T_2^{BD}, n, d)}$, 供应商的利润

为0, 其中 $T_2^{BD} = \arg \min_T \left(\frac{e^{\alpha T} - 1}{F(T, n, d)} \right)$.

若 $T_1^{BD} \leq T_b$, 则情形1为最优决策;若 $T_1^{BD} > T_b > T_2^{BD}$, 则情形2为最优决策;在其它情形下,

商个体理性约束(IR). 令 $\alpha = \alpha_s - \alpha_B, y_1^{BD} = y_{11}^{BD} e^{-\alpha_s T}, y_2^{BD} = y_{12}^{BD} e^{-\alpha_s T}$, 模型(3)可简化为

情形3为最优决策.

定理4中的情形1表明,当 $T_1^{BD} \leq T_b$ 时,买家对两个供应商都采取完全延期支付是其最优决策.此时, $\theta \leq 1 - F(T_1^{BD}, n, d)$, 表明供应商的掺假成本很低.为防止两个供应商掺假,买家为两个供应商都提供正的利润.

定理4中的情形2表明,当 $T_1^{BD} > T_b > T_2^{BD}$ 时,买家的最优决策是对两个供应商都采用完全延期支付.此时, $1 - F(T_1^{BD}, n, d) < \theta < 1 - F(T_2^{BD}, n, d)$, 供应商的掺假成本处于中等水平.两个供应商的利润均为0.

定理4中的情形3表明,当 $T_b < \min\{T_1^{BD}, T_2^{BD}\}$ 时,买家的最优决策是对两个供应商都进行部分延期支付.此时, $\theta > \max\{1 - F(T_1^{BD}, n, d), 1 - F(T_2^{BD}, n, d)\}$, 供应商掺假的单位成本 c_d 与不掺假的单位成本 c_n 十分接近.买家为供应商提供大于0的期初支付来激励供应商参与合同.

4 两种策略的对比分析

本节对延期支付策略和区块链+延期支付策略进行对比分析.

命题1 在延期支付策略下,买家需要根据 T_a 和 T_c 的不同大小情况分别设计不同的策略.而在区块链+延期支付策略下,买家只需要采用一种策略就能对供应商的掺假行为进行管理.

在多个供应商的情形下,企业采用延期支付策略在实施中限制条件更多.例如,因为买家无法可信地认定掺假的供应商,根据一个供应商掺假时,另一个供应商也掺假导致产品掺假被消费者发现的概率分别小于、大于或等于两倍一个供应商掺假时产品掺假被消费者发现的概率,买家需要分别制定不同的最优决策,增加了买家品质

量管理决策的复杂度和难度. 但在区块链 + 延期支付策略下, 因为买家通过区块链追溯, 可以可信地认定掺假的供应商, 仅对掺假的供应商进行惩罚. 因此, 应用区块链后, 买家针对不同情况都可以通过一个统一的合同对供应商的掺假行为进行管理, 这简化了买家产品质量管理, 提升了运营效率.

命题 2 当 $T_a > T_c$ 时, 买家、供应商和供应链在区块链 + 延期支付策略下的利润等于延期支付策略下的利润.

命题 2 表明, 当两个供应商同时掺假时问题产品在时间 T_c 被消费者发现的概率大于两倍仅一个供应商掺假时问题产品在时间 T_c 被消费者发现的概率时, 供应链各方在延期支付和区块链 + 延期支付策略下的利润一致. 这说明, 当两个供应商同时掺假会导致问题更容易暴露时, 采用区块链并不能改进供应链成员的利润, 采用传统的延期支付策略已能有效应对供应商的掺假. 然而, 区块链可简化买家的质量管理.

当 $T_a \leq T_c$ 时, 很难就供应链各方在延期支付和区块链 + 延期支付策略下的利润进行比较. 为进一步分析, 参考 Babich 和 Tang^[1]、Rui 和 Lai^[14] 等, 考虑 $F(\cdot)$ 服从指数分布的情形, 即在时间 T 消费者发现问题产品的概率为 $F(T, n, d) = F(T, d, n) = 1 - e^{-\lambda T}$, $F(T, d, d) = 1 - e^{-a\lambda T}$. 其中, $1/\lambda$ 为只一个供应商掺假时, 问题产品被消费者发现的平均时间, a 为当两个供应商同时掺假时, 参数 λ 放大的倍数. 因此, 当 a 越大时, 表明当两个供应商同时掺假时, 问题产品被消费者发现的平均时间越短.

特别地, 当 $a = 2$ 时, 因为 $F(T_c, d, d) - 2F(T_c, n, d) = (e^{-\lambda T_c} - 1)(1 - e^{-\lambda T_c}) < 0$, 所以 $F(T_a, n, d) = F(T_c, d, d) - F(T_c, n, d) < F(T_c, n, d)$, 即 $T_a < T_c$. 此时, 可得以下推论:

推论 1 当 $a = 2$ 时, 在指数分布下, 令 $\theta_1 = 1 - \left[\frac{\alpha + \lambda}{\alpha + 2\lambda} - \left(\frac{\alpha + \lambda}{\alpha + 2\lambda} \right)^2 \right]$, 则在最优延期支付策略下, 当 $\theta \leq \theta_1$ 时, 合同形式与定理 2 中的情形 1 一致; 当 $\theta_1 < \theta < 1$ 时, 合同形式与定理 2 中的情形 2 一致.

推论 2 当 $a = 2$ 时, 在指数分布下, 令 $\theta_2 = \frac{\alpha}{\alpha + \lambda}$, 则在最优区块链 + 延期支付策略下, 当

$\theta \leq \theta_2$ 时, 合同形式与定理 4 中的情形 1 一致; 当 $\theta_2 < \theta < 1$ 时, 合同形式与定理 4 中的情形 2 一致.

在指数分布下, 因为定理 2 和定理 4 中较大的阈值均退化为 1, 所以在推论 1 和推论 2 中, 随 θ 的变化, 合同形式中只出现了定理 2 中的情形 1 和情形 2, 定理 4 中的情形 1 和情形 2 的部分. 这与 Babich 和 Tang^[1]、Rui 和 Lai^[14] 等的研究一致. 此外, 注意到 θ_1 和 θ_2 均随 λ 的增加而减小, 表明当 λ 增加时, 即当消费者能够更快发现产品掺假时, 买家采用完全延期支付并向供应商提供正的利润的区域缩小, 即买家会更多地采用定理 2 中的情形 2 (定理 4 中的情形 2) 中的合同形式对供应商的产品质量进行管理. 特别是, 当 λ 趋近于无穷大时, θ_1 趋向于 $\frac{3}{4}$, 而 θ_2 趋近于 0; 当 λ 趋近于 0 时, θ_1 和 θ_2 均趋近于 1. 表明当消费者能够很快发现产品掺假时 (λ 趋近于无穷大), 在延期支付策略下, 买家仍在相当大的 θ 范围内需要通过采用完全延期支付并向供应商提供正的利润才能促使买家不掺假, 而在区块链 + 延期支付策略下, 买家虽然仍需要采用完全延期支付, 但是此时供应商获得的利润为 0. 而当消费者在较短时间内很难发现产品掺假时 (λ 趋近于 0), 买家在延期支付和区块链 + 延期支付策略下均需要采用完全延期支付并向供应商提供正的利润才能对供应商的掺假行为进行有效管理.

5 数值分析

本节通过数值分析进一步揭示供应商掺假动机等对买家决策和供应链成员及整体利润的影响. 相关参数取值基本设定如下 $c_n = 1, p = 20, \alpha_B = 0.1, \alpha_S = 0.2, \lambda = 0.1, a = 2$.

5.1 供应商掺假动机 θ 在两种策略下对买家决策和供应链成员利润的影响

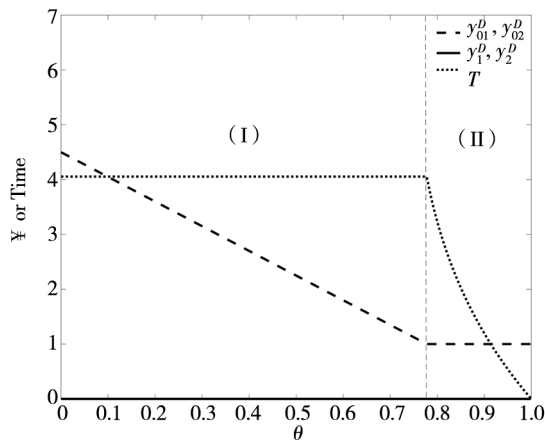
图 1(a) 和图 1(b) 分别展示了供应商掺假动机 θ 对延期支付策略和区块链 + 延期支付策略下买家决策的影响. 由图 1 可知, 在指数分布下, 根据 θ 的大小, 可以将买家的决策划分为两个区域,

与推论 1 和推论 2 一致.

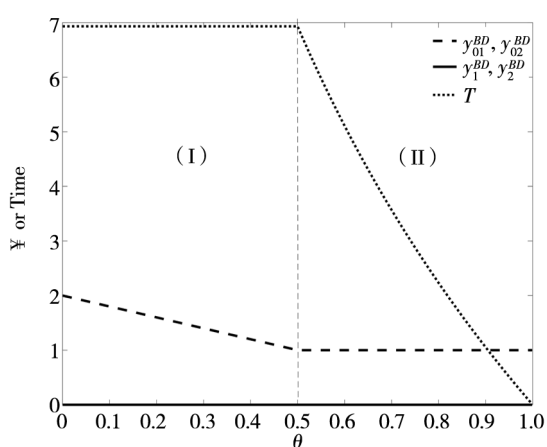
对比图 1(a) 与图 1(b), 买家在两种策略下的最优决策随供应商掺假成本增加而变化的趋势类似. 其中, 当 θ 很小时 (区域 (I)), 延期支付策略下买家通过较高的延期支付金额和较短的延期支付时间组合来避免供应商掺假, 而在区块链 + 延期支付策略下买家通过较低的延期支付金额和较长的延期支付时间组合来对供应商的产品质量进行管理. 由于在延期支付策略下买家无法识别掺假的供应商, 若出现问题产品, 两个供应商都无法获得剩余支付. 因此, 为激励供应商参与合同, 买家需要在延期支付策略下支付更多的金额和更短的延期支付时间, 而在区块链 + 延期支付策略下, 买家可以支付更少的延期支付金额和获得更

长的延期支付时间. 此外, 对比图 1(a) 和图 1(b) 还可以发现, 在延期支付策略下区域 (I) 的范围更大, 表明在延期支付策略下, 因为无法追溯到真实掺假的供应商, 买家更依赖于采用完全延期支付并让供应商获得正的利润的方式来避免供应商掺假.

图 2 中的 (a)、(b)、(c) 分别展示了在延期支付和区块链 + 延期支付策略下供应商掺假动机对买家、供应商和供应链整体利润的影响. 图 2(a) 表明, 在两种策略下, 买家的利润均随供应商掺假动机的减小而增加. 特别地, 当掺假成本 c_d 很低时, 区块链的应用能够显著地提高买家利润. 随着 c_d 的增加, 两种策略下买家获得的利润差越来越小. 表明当买家的掺假成本较低时, 企业采用区块链 + 延期支付策略更佳.



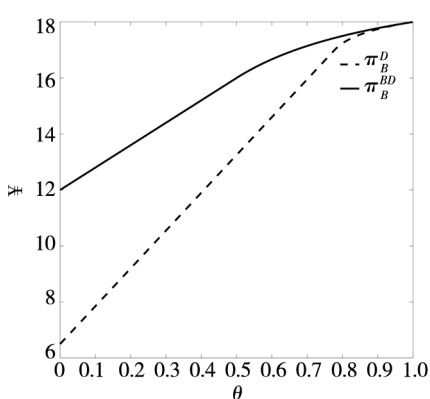
(a) 延期支付策略



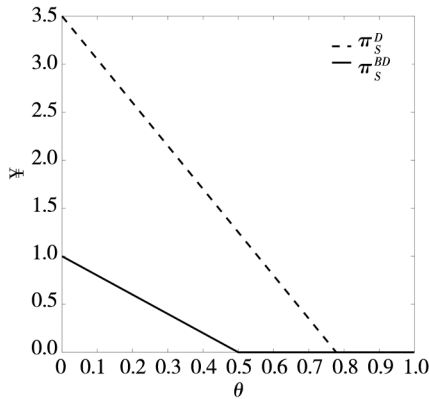
(b) 区块链 + 延期支付策略

图 1 不同策略下 y_{0i}^D 、 y_i^D 、 T 与 θ 的关系, 其中 $i \in \{1, 2\}$

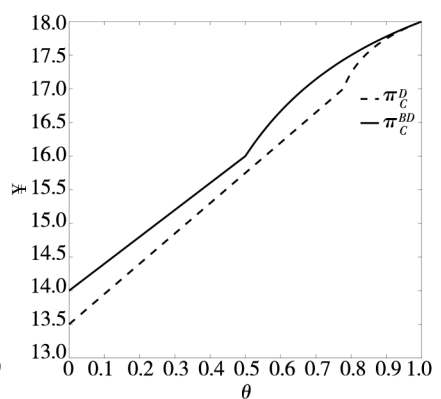
Fig. 1 The variations of y_{0i}^D , y_i^D and T with θ under different strategies, when $i \in \{1, 2\}$



(a) 买家利润



(b) 供应商利润



(c) 供应链整体利润

图 2 供应商掺假动机 θ 对买家、供应商和供应链整体利润的影响

Fig. 2 The effect of θ on the profits of the buyer, supplier, and the overall supply chain

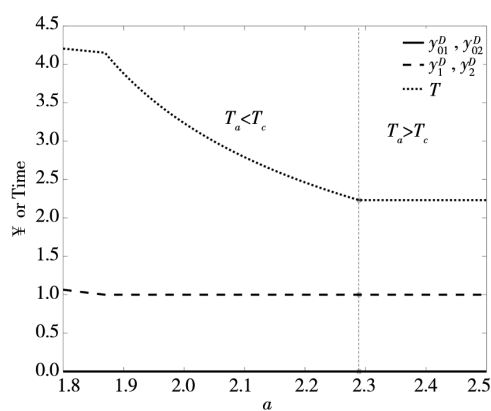
从图 2(b)可知,在延期支付和区块链 + 延期支付策略下,供应商的利润随供应商掺假动机的减小而减小. 对比图 2(a)可知,结合区块链的延期支付策略会提高买家的利润,但是会降低供应商的利润. 特别地,当掺假成本 c_d 降低时,供应商在买家采用延期支付策略下的利润远高于其在区块链 + 延期支付策略下的利润. 这表明当 c_d 很低时,相比延期支付,买家采用区块链 + 延期支付将给供应商造成更大的利润损失,由此形成双方之间激烈的利益冲突.

从图 2(c)可知,区块链的采用提高了供应链整体利润,并且当掺假成本 c_d 较低时,利润的增加更为显著. 供应链整体的利润随着 c_d 的增加而增加. 图 2(a)、(b)、(c)表明,通过在延期支付策略中结合区块链会使买家利润增加,而供应商利润降低,且供应链整体利润增加. 因此,虽然采用区块链能够有效简化买家的质量管理,并为其带来更大的利润,但是同时,其也可能造成供应链上

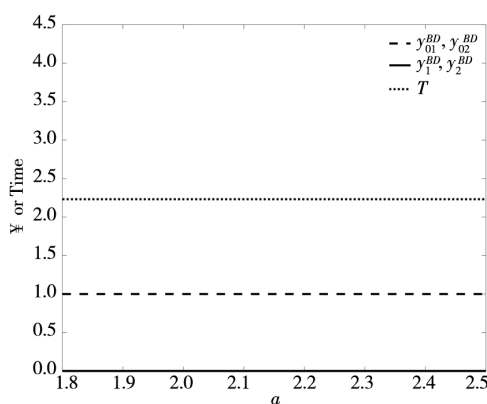
下游之间激烈的利益冲突,供应商没有动机接受买家采用区块链. 因此,此时买家需要通过转移支付等手段来补偿供应商,以促使其接受买家采用区块链,实现供应链总体的协调.

5.2 不同 λ 和 a 在两种策略下对买家决策和供应链成员利润的影响

给定 $\theta = 0.8$, 图 3 和图 4 展示了在不同 λ 和 a 下买家分别在延期支付和区块链 + 延期支付策略下的最优决策. 与定理 1 至定理 4 一致,随 a 增加,买家在延期支付策略下将分别面临 $T_a < T_c$ 、 $T_a = T_c$ 和 $T_a > T_c$ 三种情形,而在区块链 + 延期支付策略下,买家只需要面临一种情形. 当 $T_a < T_c$ 时,随着 a 增加,买家的延期支付时间和延期支付金额均随 a 的增加而减小,表明当两个供应商掺假更容易被发现时,买家只需要通过较短的延期支付时间和较少的延期支付金额即可约束供应商的行为.



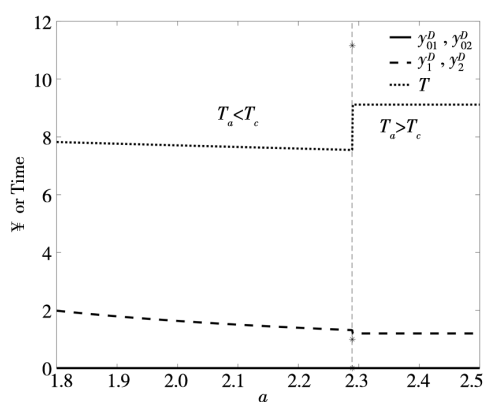
(a) 延期支付策略



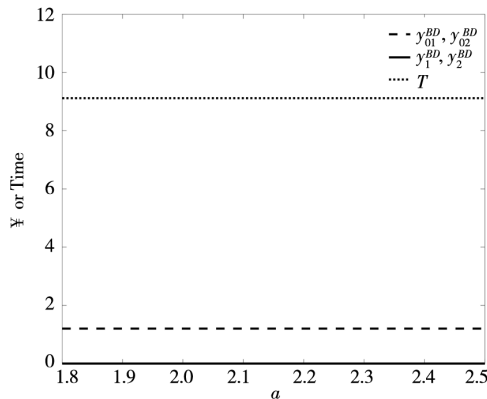
(b) 区块链 + 延期支付策略

图 3 当 $\lambda = 0.1$ 时,不同策略下 y_{0i}^D 、 y_i^D 、 T 与 a 的关系, 其中 $i \in \{1, 2\}$

Fig. 3 The variations of y_{0i}^D , y_i^D and T with a under different strategies when $\lambda = 0.1$, $i \in \{1, 2\}$



(a) 延期支付策略



(b) 区块链 + 延期支付策略

图 4 当 $\lambda = 0.02$ 时,不同策略下 y_{0i}^D 、 y_i^D 、 T 与 a 的关系, 其中 $i \in \{1, 2\}$

Fig. 4 The variations of y_{0i}^D , y_i^D and T with a under different strategies when $\lambda = 0.02$, $i \in \{1, 2\}$

图5和图6给出了当 λ 分别等于0.1和0.02时, a 在延期支付策略和区块链+延期支付策略下对买家、供应商和供应链整体利润的影响.与命题2一致,当 $T_a > T_c$ 时,买家、供应商和供应链在两种策略下的利润相等.而当 $T_a < T_c$ 时,与图2一致,当 λ 较大时,区块链的采用能够增加买家和供应链的利润,但供应商的利润将受损.特别地,采用区块链后,买家和供应链利润的增加幅度均随 a 的增加而减小.这表明,当两个供应商同时掺假更容易被消费者发现时,在延期支付策略下买家只需要付出较小的成本就能够促使供应商不掺假,从而也就减小了区块链采纳的价值.有意思的是,图6进一步表明,当 λ 较小时,随着 a 的增加,买家和供应链在延期支付策略下的利润将高于其在区块链+延期支付策略下的利润.注意到在指数分布下, λ 和 a 分别反映了在一个供应商掺假和两个供应商同时掺假的情况下,掺假被消费者发现的容易程度.因为在延期支付策略下,一个供应商掺假也可能使另一供应商受到惩罚,这

种“集体担保”效应增加了两家供应商进行掺假的动机.而另一方面,如若同时掺假更容易被消费者所发现,这又将反过来减少供应商掺假的动机.上述两种作用的净效应决定了延期支付策略下供应商掺假动机的大小,并在后者作用更大时,将从整体上降低供应商掺假的动机.而在区块链+延期支付策略下,由于买家能够准确追溯到掺假的供应商,因而供应商的掺假动机不受两个供应商同时掺假被消费者发现的概率影响.因此,图6表明,当两个供应商掺假比一个供应商掺假被发现的概率显著增加时,供应商在延期支付下的掺假动机更小,从而买家和供应链能在该策略下获得比在区块链+延期支付策略下更大的利润.此时,买家只需要采用延期支付策略就能够对供应商的掺假行为进行较好的管理.图2、图5和图6表明,区块链的采用使供应商的利润受损或保持不变.因此,必要时,买家需要向供应商支付一定的转移费用,才能激励供应商接受买家采纳区块链,实现买家和供应商的共赢.

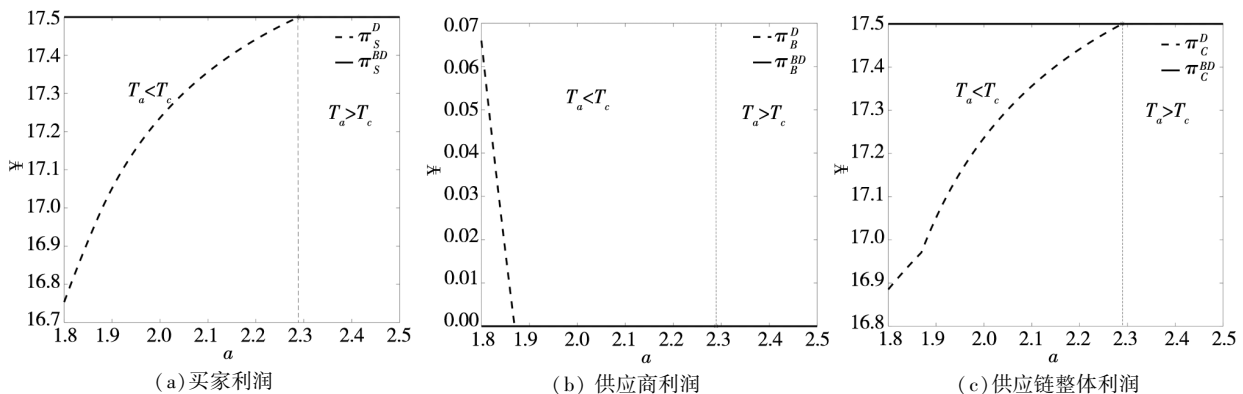


图5 当 $\lambda = 0.1$ 时, a 对买家、供应商和供应链整体利润的影响

Fig. 5 The effect of a on the profits of the buyer, supplier and the overall supply chain when $\lambda = 0.1$

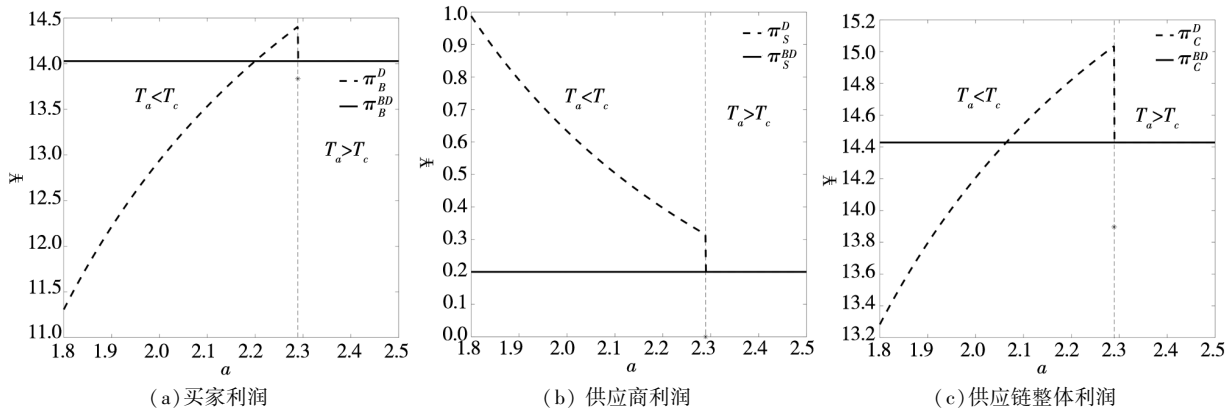


图6 当 $\lambda = 0.02$ 时, a 对买家、供应商和供应链整体利润的影响

Fig. 6 The effect of a on the profits of the buyer, supplier and the overall supply chain when $\lambda = 0.02$

6 结束语

本文针对一个由上游两个供应商和一个下游买家组成的供应链, 供应商可能存在产品掺假行为的情形, 构建委托代理模型, 得出了买家在延期支付及区块链 + 延期支付策略下分别的最优决策, 分析了区块链的采用对供应链质量管理的影响, 以及在两种策略下供应商掺假动机对买家、供应商和供应链整体利润的影响, 揭示出区块链在供应链质量管理中的价值及供应链不同成员采用区块链的动机. 本文的主要结论如下:

1) 在考虑多个供应商可能掺假的情况下, 延期支付策略下, 供应商掺假被发现的边际概率是决定买家延期支付合同形式的重要因素. 即买家需根据一个供应商掺假时, 另一个供应商掺假导致问题产品被消费者发现的概率小于、大于或等于两倍一个供应商掺假时被消费者发现的概率, 分别制定不同的最优合同形式, 这极大地增加了买家质量管理决策的复杂性.

2) 相较于延期支付策略, 区块链 + 延期支付策略可以有效地简化买家的运营决策. 延期支付策略虽然改善了产品质量管理, 但是没有从根本上解决信息不对称问题. 在区块链 + 延期支付策略下, 买家只需要采用一种策略就能对供应商的掺假行为进行管理, 其原因在于买家能够可信地

追随并认定掺假的供应商, 因而不需要根据供应商掺假被发现的边际概率做出不同的最优决策, 从而简化了买家的产品质量管理.

3) 通过考虑供应商产品掺假被消费者发现的时间服从指数分布的情形, 结果表明随着供应商掺假成本的降低, 区块链 + 延期支付策略将使得买家和供应链整体利润增加. 而随着两个供应商同时掺假时产品掺假被发现的概率增加, 因为延期支付下的“集体担保”效应, 供应商掺假的动机可能反而降低. 此时, 采用延期支付策略对供应商的掺假行为进行管理能使买家和供应链获得比在区块链 + 延期支付策略下更大的利润. 因此, 若考虑区块链采纳的成本, 当供应商的掺假成本或两个供应商同时掺假被消费者发现的概率较低时, 买家更适合采用区块链 + 延期支付策略. 此外, 区块链 + 延期支付策略相较传统延期支付策略将使供应商的利润受损或保持不变. 因此, 采用区块链可能导致买家与供应商的利益冲突, 供应商缺乏采用区块链的动机. 此时买家需要通过转移支付等手段来补偿供应商, 以增强其接受买家采用区块链的意愿, 实现供应链协调.

本文仅对由一个买家和两个对称供应商组成的供应链进行了分析, 未来研究可以进一步拓展到上游存在多个供应商且其不对称的情形. 此外, 对于检查等其它质量管理策略, 如何结合区块链进行产品质量管理也是值得研究的方向.

参考文献:

- [1] Babich V, Tang C S. Managing opportunistic supplier product adulteration: Deferred payments, inspection, and combined mechanisms[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2012, 14(2): 301–314.
- [2] Sarkar B, Saren S. Product inspection policy for an imperfect production system with inspection errors and warranty cost[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 248(1): 263–271.
- [3] Hwang I, Radhakrishnan S, Su L. Vendor certification and appraisal: Implications for supplier quality[J]. *Management Science*, 2006, 52(10): 1472–1482.
- [4] Duenyas I, Iravani S M, Li L, et al. Group warranty contracts to coordinate assembly supply chains with nontestable components[J]. *Production and Operations Management*, 2024, 33(2): 475–493.
- [5] Li L. Capacity and Quality Contract Design in Supply Chain[D]. Evanston: Northwestern University, 2012.

- [6] Cui Y, Hu M, Liu J. Impact of Blockchain-Driven Accountability in Multi-Sourcing Supply Chain[M]. Cham: Springer, 2022.
- [7] Agi M, Jha A K. Blockchain technology in the supply chain: An integrated theoretical perspective of organizational adoption[J]. International Journal of Production Economics, 2022, (247): 108458.
- [8] Dorofte A. BMW group uses blockchain to drive supply chain transparency[EB/OL]. <https://www.bmwblog.com/2020/03/31/bmw-group-uses-blockchain-to-drive-supply-chain-transparency/>.
- [9] 刘心报, 胡俊迎, 陆少军, 等. 新一代信息技术环境下的全生命周期质量管理[J]. 管理科学学报, 2022, 25(7): 2-11.
- Liu Xinbao, Hu Junying, Lu Shaojun, et al. The entire life cycle quality management in the new generation of information technology environment[J]. Journal of Management Sciences in China, 2022, 25(7): 2-11. (in Chinese)
- [10] Chen Y J, Deng M. Supplier certification and quality investment in supply chains[J]. Naval Research Logistics, 2013, (60): 175-189.
- [11] Lee H H, Li C H. Supplier quality management: Investment, inspection, and incentives[J]. Production and Operations Management, 2018, 27(2): 304-322.
- [12] 毕军贤, 赵定涛. 抽样检验产品的质量检验博弈与诚信机制设计[J]. 管理科学学报, 2011, 14(5): 43-51.
- Bi Junxian, Zhao Dingtao. Quality inspection game and incentive mechanism for building trust in sampling inspection quality product trade[J]. Journal of Management Sciences in China, 2011, 14(5): 43-51. (in Chinese)
- [13] Balachandran K R, Radhakrishnan S. Quality implications of warranties in a supply chain[J]. Management Science, 2005, 51(8): 1266-1277.
- [14] Rui H, Lai G. Sourcing with deferred payment and inspection under supplier product adulteration risk[J]. Production and Operations Management, 2015, 24(6): 934-946.
- [15] 申 强, 杨为民, 刘笑冰, 等. 基于两种策略的四级供应链质量控制优化研究[J]. 中国管理科学, 2016, 24(10): 52-59.
- Shen Qiang, Yang Weimin, Liu Xiaobing, et al. The optimization of quality control in four levels of supply chain based on the two kinds of strategies[J]. Chinese Journal of Management Science, 2016, 24(10): 52-59. (in Chinese)
- [16] Babich V, Hilary G. Distributed ledgers and operations: What operations management researchers should know about blockchain technology[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2020, 22(2): 223-240.
- [17] 胡祥培, 都 牧, 孔祥维, 等. 基于区块链的农产品供应链溯源研究综述[J]. 管理科学学报, 2024, 27(5): 1-12.
- Hu Xiangpei, Du Mu, Kong Xiangwei, et al. Review of blockchain-based traceability systems for agri-food supply chains[J]. Journal of Management Sciences in China, 2024, 27(5): 1-12. (in Chinese)
- [18] Zhang X F, Li Z, Li G. Impacts of blockchain-based digital transition on cold supply chains with a third-party logistics service provider[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2023, (170): 103014.
- [19] Keskin N B, Li C, Song J S. The blockchain newsvendor: Value of freshness transparency and smart contracts[J]. Management Science, 2025, 71(8): 6319-7222.
- [20] Cui Y, Hu M, Liu J. Value and design of traceability-driven blockchains[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2023, 25(3): 1099-1116.
- [21] Pun H, Swaminathan J M, Hou P. Blockchain adoption for combating deceptive counterfeits[J]. Production and Operations Management, 2021, 30(4): 864-882.
- [22] Liu A J, Liu T N, Mou J, et al. A supplier evaluation model based on customer demand in blockchain tracing anti-counterfeiting platform project management[J]. Journal of Management Science and Engineering, 2020, 5(3): 172-194.

Managing suppliers' product adulteration behavior via blockchain + deferred payment strategy

CHEN Xiao-hong^{1, 2, 3}, ZHANG Wei-dong^{1, 4}, WANG Fu-qiang^{1, 3}*

1. School of Business, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Frontier Crossover Studies, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China;
3. Xiangjiang Laboratory, Changsha 410205, China;
4. School of Economics and Management, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China

Abstract: For a supply chain with two suppliers and a buyer, this paper studies the impact of the deferred payment strategy and the blockchain + deferred payment strategy on supply chain quality management, taking supplier adulteration into account, by constructing a principal-agent model in which the buyer acts as the leader under asymmetric information. Specifically, by comparing the equilibrium results under the deferred payment strategy and the blockchain + deferred payment strategy, this paper analyzes the impacts of factors such as the supplier's adulteration motivations and the probability of adulteration being discovered on buyer's decisions and supply chain profits, and reveals the value of blockchain technology in supply chain quality management as well as the incentives for supply chain members to adopt it. The result suggests that, under deferred payment strategy, the buyer needs to make three different optimal policies according to the marginal probability of the adulterated product being found by customers. However, under the blockchain + deferred payment strategy, the buyer's optimal policy is unique due to traceability. Though adopting blockchain can reduce the complexity of buyer's quality management, it may not necessarily increase the profits of both the buyer and the supply chain. When the supplier's motivation for adulteration is high, or the probability that two suppliers adulterate at the same time is detected by consumers is low, the buyer is more inclined to adopt blockchain. Compared to the traditional deferred payment strategy, the blockchain + deferred payment strategy may reduce the supplier's profit or leave it unchanged. Therefore, under certain conditions, the buyer should improve the supplier's profits through transfer payments to achieve supply chain coordination.

Key words: deferred payment strategy; blockchain; supplier product adulteration; principal-agent; multi-sourcing purchasing