

中断与质量多重风险下的供应链动态采购策略研究

胡韩莉^{1,2}, 曹裕^{3*}, 吴堪⁴

(1. 长沙理工大学 经济与管理学院, 湖南 长沙 410004; 2. 长沙理工大学 现代企业管理研究中心, 湖南 长沙 410004; 3. 中南大学 商学院, 湖南 长沙 410083; 4. 长沙学院 经济与管理学院, 湖南 长沙 410022)

摘要: 新冠病毒疫情的暴发对全球供应链稳定造成了较大冲击, 导致多种风险凸显。本文建立马尔科夫决策模型, 研究由两个供应商、一个制造商与两类零售商组成的供应链在应对供需中断与质量多重风险下的多期动态采购决策问题, 并比较了检查与延期付款两种质量控制机制对采购决策的影响。研究表明, 供应中断风险不会影响延期付款机制下的采购决策, 但在检查机制下, 供应中断风险越高, 越倾向于采购高质量产品; 区域需求中断风险与供应中断风险对采购决策的影响是一致的, 不同的是区域需求中断会降低整体的采购量。同时, 在高质量产品库存较低时, 提高检查精度或延长延期付款期, 会使得制造商向低质量的供应商采购; 而在高质量产品库存较大时, 延期付款机制会使制造商向高质量供应商采购, 但检查机制下制造商不会改变采购决策。此外, 比较检查与延期付款机制可知, 在次品率较低时, 制造商应选择检查机制, 反之则应选延期付款机制, 但这种选择会随着中断风险而改变, 在中断风险越高时, 增加检查精度并不能提高制造商的收益, 但延长延期付款期可以提高制造商的收益。

关键词: 供应商选择; 中断风险; 检查机制; 延期付款机制; 马尔科夫过程

中图分类号: F275 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-6062(2024)02-0180-015

DOI: 10.13587/j.cnki.jieem.2024.02.013

0 引言

新冠病毒疫情的暴发不仅对世界经济产生了不利影响, 也给全球供应链安全造成了较大的冲击, 部分跨国供应被迫中断。根据邓白氏商业资料公司评估, 在《财富》1 000 强企业中, 有 94% 经历了新冠病毒带来的供应链中断。这种中断不仅包括供应中断, 还包括需求中断。例如, 尽管国内疫情得到了很好的控制, 但由于全球疫情蔓延, 企业也不得不面对国外买家甚至国内买家订单取消、延期以及付款延迟等问题, 根据世贸组织发布的《全球贸易数据与展望》报告显示, 受新冠疫情影响, 2020 年全球货物贸易量下滑了 5.3%。因此, 面对突如其来的供需中断风险, 如何设计更有韧性的供应商采购策略值得关注。事实上, 许多企业为了防范供应中断风险, 会同时向多个供应商进行采购。如三一重工集团会同时向意大利 NEM 企业和国内宁波宇洲企业采购起重机平衡阀, 其中 NEM 为主要供应商, 宇洲为备选供应商。那么, 该如何分配订单并制定采购计划是关键问题, 这会受到多个因素的影响, 其中质量是选择供应商的首要因素。但是, 在现实中许多企业所要求的产品质量往往只有极少数企业能够满足, 尤其是核心零部件往往需要向国

外供应商采购, 如华为公司的包括芯片、存储、连接线等多种产品的供应商均为美国企业, 但这些企业的中断风险相对国内供应商要大很多, 而国内供应商尽管可以降低中断风险, 但在质量上可能存在欠缺, 这就导致企业在选择供应商时必须衡量中断风险与质量风险。当然, 已有多种方式被企业用于控制质量, 如检查、延期付款等, 那么这些质量控制机制在应对中断风险时的效率如何, 该如何选择是本文研究的问题之一。基于此, 本文拟关注存在供需中断与质量多重风险下的供应商采购决策, 并分析不同质量控制机制的效果。

关于供应链中断的研究兴起于 2004 年^[1], 早期研究主要关注了供应链中断对财务与运作的影响^[2-4]。随后, 学者研究了供应中断风险下的供应链决策问题。Tomlin^[5]构建由两个供应商与一个买方构成的供应链, 研究当有两个供应商时管理供应中断风险的策略。Li 等^[6]研究双源采购下供应中断对价格策略的影响。李新军等^[7]将供应中断分为系统性与个体性两种, 研究双源采购下供应中断对供应商、零售商以及整条供应链运营绩效的影响。Esmaeili-Najafabadi 等^[8]也类似将供应中断风险分为局部中断与区域中断, 研究供应中断下集中

收稿日期: 2021-07-16

基金项目: 湖南省哲学社会科学基金青年项目(19YBQ002); 湖南省自然科学基金项目(2021JJ40614); 长沙市哲学社会科学规划课题(2022csskkt100)

*** 通讯作者:** 曹裕(1985—), 女, 湖南益阳人; 中南大学商学院教授, 博士生导师; 研究方向: 企业可持续运作管理。

<https://www.academax.com/doi/10.13587/j.cnki.jieem.2024.02.013>

式供应链的供应商选择和订单分配。Shan等^[9]则考虑中断之间的关联性,将供应中断分为独立中断与关联中断,研究不同中断对供应商定价与零售商采购决策的影响。Yu等^[10]进一步拓展到单源与双源采购两种情形,分析供应中断可能性对采购决策的影响。Sawik^[11-13]将中断分为独立中断与共同中断,研究了单源、双源或多源采购下考虑供应中断风险的供应商选择与分配问题。还有学者拓展了供应链结构研究中断问题。Kumar等^[14]探讨了双源采购下存在两个竞争零售商时供应中断风险对定价与采购的影响。Niu等^[15]研究了由原始设备制造商、竞争供应商与非竞争供应商构成的竞合供应链,研究原始设备制造商在权衡渠道竞争与供应中断风险下的双源采购问题。上述研究均未考虑需求中断,仅关注了需求随机下的供应中断,如文献[5]。也有学者探讨了需求中断问题,如Rahmani和Yavari^[16]研究了生产和销售绿色产品的双渠道供应链中的需求中断管理;Pi等^[17]研究了双渠道供应链系统中存在需求中断的定价和服务策略;Zhao等^[18]则研究了需求中断下时尚供应链的供应链协调问题。但上述文献均没有考虑供应与需求同时存在中断的现象,无法更具体地刻画新冠疫情下的中断现象,此外也未考虑产品质量的影响。

学者对供应商的质量控制问题进行了大量研究,多数研究聚焦于探讨检查机制在质量控制中的作用。如Reyniers和Tapiero^[19]建立供应商与买方的博弈模型,研究买方是否进行检查对供应商质量决策的影响。Baiman等^[20]同样建立供应商与买方的博弈模型研究了质量水平和检查精确度之间的均衡,此时买方需要决定检查的精确度。除了检查精确度外,Starbird^[21]设置的博弈模型中买方还可以决定检查水平以及检查水平对供应商产品质量的影响。Zhou等^[22]、Al-Salamah^[23]等学者基于经济订货批量模型(economic order quantity, EOQ)研究检查机制对质量控制的影响。除检查机制外,少数学者研究延期付款机制对供应商掺假行为的影响,但这种机制主要出现在金融贸易的信贷交易中。Long等^[24]通过分析1984—1987年所有工业企业的样本数据,表明当发现产品缺陷的时间越长时,贸易信贷(即延期付款)将会更有效。Lee和Stowe^[25]建立一个信号模型,假设买方不知道供应商的产品质量,而利用贸易信贷条款来反映产品的质量。Klapper等^[26]认为贸易信贷可以降低买方的风险,因为可以通过延期支付使得买方在决策后有更多的时间来检查产品的质量。少数学者研究了不同质量控制机制的效率。Babich和Tang^[27]比较了检查机制、延期付款机制以及组合机制(检查-延期付款)对供应商掺假行为的影响。Rui

和Lai^[28]研究了存在道德风险与信息积累因素下的延期付款与检查机制。曹裕等^[29]建立报童模型比较了全检、抽检、溯源以及组合机制(抽检-溯源)对零售商订购决策与质量控制效率的影响。但上述研究均没有考虑中断风险对质量控制机制的影响。只有少数学者同时考虑了供应商选择中的中断风险与质量等因素。Sawik^[30]研究考虑中断风险、质量与交付可靠性的供应商选择与订购决策问题。Altug和Ryzin^[31]研究一个站点与多个供应商,买方选择质量水平和交易成本。Clemons和Slotnick^[32]研究供应链中断对公司投资质量和订购决策的影响,考虑两个供应商之间的知识转移和选择。尽管以上文献在供应商选择与订购决策中考虑了中断风险与质量问题,但没有涉及质量控制机制。

综上所述,现有关于供应商质量控制的研究主要集中于探讨单一质量控制策略对供应商质量的影响,或分析考虑中断风险与价格均衡情形下的供应商选择问题,综合考虑质量与供需中断多重风险的文献较少,且没有考虑多种质量机制的效率。此外,上述研究多采用博弈模型、优化模型或者线性规划的方法探讨企业的采购决策,多为静态分析过程。但是事实上,供应商采购策略是一种动态的决策过程,它会受到上期决策、库存、需求等因素的影响,因此从多周期视角研究中断风险与采购决策更符合现实。例如, Schmitt和Snyder^[33]拓展研究了多周期下中断风险、产量不确定与需求不确定对库存与订单数量的影响,并将结果与单周期的情形相比较,发现单周期时间截断会扭曲最佳订单数量,并可能导致错误的供应风险缓解总体策略。Demirel等^[34]同样构建了一个多周期模型研究双源采购下中断风险与价格决策之间的互动,发现多期模型能够评估更现实和直观的定价策略,并在库存是潜在的中断缓解策略时研究更广泛的采购策略的有效性。可见,采用多周期建模方式研究能更好地刻画中断与采购之间的互动,而马尔科夫决策过程(markov decision process, MDP)是一种研究不同周期之间动态转移的理论方法^[35]。因此,为了弥补上述研究的不足,本文将在以下方面进行拓展:一是研究供需中断与质量风险同时存在下的供应商选择与采购问题;二是考虑检查与延期付款两种质量机制对采购决策的影响;三是建立马尔科夫决策模型研究供应链动态采购问题。

1 问题描述与研究假设

1.1 问题描述

研究由两个供应商、一个制造商与两类零售商

组成的多周期分散式供应链动态采购系统。在系统中,制造商可以向两个供应商(A和B)采购产品,并销售给两类零售商,其中采购的产品在使用功能上是相同的,仅在质量与供应中断风险上存在差异,供应商A提供的A产品质量高,但存在供应中断风险;供应商B提供的B产品质量较低,但不存在供应中断风险。

关于供应中断风险。参照 Niu 等^[15]的研究,用 $f \in \{0, 1\}$ 表示供应商A是否发生中断,其中 $f = 1$ 和 $f = 0$ 分别表示中断与未中断,则供应中断风险的概率为 $\theta = \Pr(f = 1)$ 。需要说明的是,在本文中假设每周期发生中断风险的概率是一致的且在每期都考虑这种中断,这是因为并非所有的中断都可以预测,必须考虑持续的中断风险,因此本文参照 Schmitt 和 Snyder^[33]的研究,每期以固定的发生概率对中断进行建模,能够很好地表征企业必须不断预测持续的中断风险。此外,中断风险与产量不确定是不一致的,在本文中发生中断就意味着无法从供应商A处获得任何产品,而多数研究中是用随机变量来表示产量的不确定性,表明企业将以一定的分布获得产品,如 Demirel 等^[34]假设产量服从均匀分布等。

关于需求不确定与区域需求中断。在需求端,制造商面临的需求风险来源于两个方面:下游零售商需求的不确定性以及新冠疫情导致的所有零售商需求的被迫中断,称为区域需求中断。假设A产品和B产品分别有Y和Z个下游零售商,且需求存在不确定性,假设零售商 $y \in \{1, 2, \dots, Y\}$ 和 $z \in \{1, 2, \dots, Z\}$ 的需求服从强度为 λ_y 和 λ_z 泊松分布,根据泊松分布的可加性,可得A产品和B产品的需求服从强度为 $\lambda_A = \sum_{y \in Y} \lambda_y$ 和 $\lambda_B = \sum_{z \in Z} \lambda_z$ 的泊松分布^[36]。当仅考虑A和B产品单个零售商的需求不确定性时,二者的总需求如式(1)所示。同时,在新冠疫情下各国采取的“封城”与社会疏离措施等会抑制需求,导致区域需求中断现象出现。假设发生区域需求中断的概率为 τ , 若发生则表示两类零售商的需求都将为零。

$$p_A(k) = \begin{cases} \frac{\lambda_A^k e^{-\lambda_A}}{k!} \Big/ \sum_{m=0}^{d_A^{\max}} \frac{\lambda_A^m e^{-\lambda_A}}{m!} & \text{if } k = 0, \dots, d_A^{\max} \\ 0 & \text{others} \end{cases}$$

$$p_B(k) = \begin{cases} \frac{\lambda_B^k e^{-\lambda_B}}{k!} \Big/ \sum_{m=0}^{d_B^{\max}} \frac{\lambda_B^m e^{-\lambda_B}}{m!} & \text{if } k = 0, \dots, d_B^{\max} \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (1)$$

关于质量、检查与延期付款机制。假设供应商

B的产品存在 α 的次品率,而供应商A不存在次品。如果制造商从供应商B处采购到次品并销售给零售商,将产生损失 h , 假设次品一定会被零售商发现。为了避免损失,制造商会采取检查与延期付款两种机制来约束供应商B的行为。在检查机制中,制造商会检查供应商B提供的产品,检查成本为 c_y , 若发现次品,则将所有产品退回给供应商,并对供应商B处以 l 的罚金;在延期付款机制中,制造商在期初只会支付 β 比例的定金,设置延期付款期为 N , 如果在 N 期内消费者发现产品是次品,则不支付剩余的货款。

根据马尔科夫理论,构建由供应商、制造商与零售商组成的供应链模型,假设在每个周期开始时制造商持有的库存为 (i, j) , 观察需求,并根据供需中断风险、产品质量风险等因素决策当期的采购策略。假设制造商在期初并不知道当期采购是否会发生中断或存在残次品,研究在可能存在质量风险与供需中断风险下的制造商采购决策。

1.2 研究假设

为把采购系统的优化问题建成一个MDP优化问题,下面将对A和B两种产品做出如下假设。

H1 制造商每次采购A和B两种产品的耗时相同,采购一次的耗时为一个决策期。

H2 制造商一个决策期最多采购1单位产品。每一期期初制造商根据A产品和B产品的库存量、采购成本、市场价格等因素决定采购1单位A产品、1单位B产品或者空转(不采购)。

H3 制造商每种产品的库存容量是有限的。当该种产品库存量达到最大库存时,该期不允许采购此产品;当两种产品的库存量都达到最大时,制造商当期只能采取空转策略。

H4 当期现有库存和采购仍无法满足当期需求时,会产生缺货成本,不考虑缺货等待。

H5 考虑制造商持续经营过程,因而该系统的最优化问题是无限阶段的最优化问题。

H6 制造商面临双重需求风险,即单个零售商的需求不确定性风险和区域需求中断风险。

1.3 变量定义

本文涉及主要参数总结如表1所示。

2 模型建立

考虑两个供应商、一个制造商和两类零售商组成的供应链系统,其中制造商只有一个采购运输系统,研究制造商的采购决策问题。首先,将问题建模为一个无限期的MDP问题,对仅考虑两种产品库存量和需求时的决策给出具体的状态矩阵、转移矩阵和收益矩阵;其次,建立存在供需中断风险与质

表1 变量与定义
Table 1 Variables and definitions

变量	定义	变量	定义
b_A	A产品的单位缺货成本	d_A	每期A产品的平均需求
b_B	B产品的单位缺货成本	d_A^{\max}	每期A产品的最大需求
i	期初A产品的库存量, $i \in \{0, \dots, I\}$	d_B	每期B产品的平均需求
i^*	期末A产品的库存量, $i^* \in \{0, \dots, I\}$	d_B^{\max}	每期B产品的最大需求
j	期初B产品的库存量, $j \in \{0, \dots, J\}$	r_A	A产品单位零售价
j^*	期末B产品的库存量, $j^* \in \{0, \dots, J\}$	r_B	B产品单位零售价
l	B产品被检查出次品时, 供应商的罚金	c_A	A产品的单位采购成本
h	B产品为次品流入市场后, 制造商的损失	c_B	B产品的单位采购成本
$p_A(k)$	每期A产品k单位需求的概率	θ	A产品的供应中断概率
$p_B(k)$	每期B产品k单位需求的概率	f	A产品是否中断
γ	B产品的检查精度	c_γ	B产品的检查成本
c	单位库存成本	α	B产品为次品的概率
N	B产品的延期付款期	β	B产品延期付款比例
m	索引	τ	区域需求中断概率

量风险的制造商MDP采购模型, 研究在检查机制与延期付款机制下的最优采购决策。定义状态空间 $S = \{s_{ij}\}$, 其中每个状态 S_{ij} 由两个要素构成, 即 $S_{ij} = \{i, j\}$ 。状态空间定义了制造商所有可能处于的状态, i 与 j 分别为制造商当前拥有的A、B产品的库存量, 该状态与采购方式是独立的。每一期制造商根据当前A产品与B产品的库存量、市场价格、库存成本、采购成本、供需中断风险、检查精度、延期付款比例等因素决策不同的采购方式。假设 $X = \{1, 2, 3\}$ 为制造商的决策空间。 $x = 1$ 决策表示该期采购A产品, $x = 2$ 决策表示该期采购B产品, $x = 3$ 决策表示空转(即该期不采购)。当总库存达到最大库存量时, 制造商只能采取空转策略。在设置了制造商的状态空间后, 根据状态可以得到一个 $(I + 1)(J + 1)$ 维的转移矩阵如式(2)所示:

$$T = T_{[(I+1)(J+1)] \cdot [(I+1)(J+1)]} = \{t_{mn}\} \quad (2)$$

该转移矩阵只是一个普通的模型概括, 具体的转移矩阵会因为采购决策不同而变化。也就是说, 虽然采购决策不影响零售的状态空间, 但它却能影响状态之间的相互转化关系。式(2)对应每种决策下相应的转移矩阵, 可以分别写为

$$\begin{aligned} T^1 &= T^1_{[(I+1)(J+1)] \cdot [(I+1)(J+1)]} = \{t_{mn}^1\} \\ T^2 &= T^2_{[(I+1)(J+1)] \cdot [(I+1)(J+1)]} = \{t_{mn}^2\} \\ T^3 &= T^3_{[(I+1)(J+1)] \cdot [(I+1)(J+1)]} = \{t_{mn}^3\} \end{aligned}$$

记 $\pi^x(s, s^*) = \pi^x(s_{ij}, s_{i^*j^*})$ 为采用 x 决策时企业状态从 S_{ij} 转移到状态 $S_{i^*j^*}$ 的期望成本, $\pi(s^*)$ 为期末制造商的最优收益。于是期初制造商处于 S 状态采取 x 决策的收益为 $\pi^x(s) = \sum_{s^* \in S} \pi^x(s, s^*)$ 。因此 $\pi(s) = \max_{x \in X} \pi^x(s)$ 为期初制造商处于 S 状态时的

最优收益。

在MDP模型中, 假设在一期内制造商只向一个供应商采购或者不采购, 因此存在三种情况: 只采购A产品、只采购B产品或者不采购(空转)。所以建立考虑供需中断风险与质量控制机制的MDP模型, 由于只有B产品存在次品, 因此只考虑检查机制与延期付款机制在采购B产品时的作用。具体设置如下。

2.1 制造商当期采购A产品

当制造商只采购A产品时, 需同时考虑缺货与供需中断风险的影响。

(1) 对于A产品

①当期发生了区域需求中断时, 则必然有 $i = i^* + 1$ 。

②当期未发生区域需求中断时, 若当期采购没有发生供应中断且未发生缺货 ($i^* > 0$) 时, 根据期初A产品库存量 i , 可得当期A产品的需求为 $i - i^* + 1$, 转移概率为 $p_A(i - i^* + 1)$, 收益为 $r_A(i - i^* + 1)$; 若当期采购没有发生供应中断但发生了缺货, 则当期A产品能够满足的需求为 $i + 1$, 收益为 $r_A(i + 1)$, 并产生 $[k - i - 1]^+$ (其中 k 为当期实际需求) 个单位缺货, 转移概率为 $\sum_{k \in \{0, \dots, d_A^{\max}\}} p_A(k - i - 1)^+$, 缺货损失为 $b_A p_A(k) [k - i - 1]^+$ 。当期采购发生供应中断时, 制造商会损失当期采购成本, 但库存并没有发生改变。因而当期采购发生供应中断但未发生缺货时, 当期A产品的实际需求为 $i - i^*$ 而非 $i - i^* + 1$, 相应转移概率也变为 $p_A(i - i^*)$, 收益相应减小到 $r_A(i - i^*)$; 当期采购发生供应中断且发生缺货 ($i^* = 0$) 时, 当期A产品实际能够满足的

需求为 i , 不再是 $i + 1$, 缺货量也增加到 $[k - i]^+$ 个单位, 此时 A 产品库存转移概率为 $\sum_{k \in \{0, \dots, d_A^{\max}\}} p_A(k - i)^+$, 缺货损失为 $b_{AP_A}(k)[k - i]^+$ 。因此, 对于 A 产品而言, 如果该期 A 产品未缺货 ($i^* > 0$), 库存量的转移概率为 $(1 - \theta)p_A(i - i^* + 1) + \theta p_A(i - i^*)$, 当期 A 产品的销售收益为 $(1 - \theta)r_A(i - i^* + 1) + \theta r_A(i - i^*)$; 而当 A 产品出现缺货 ($i^* = 0$) 时, A 产品存在缺货时的库存量的转移概率为 $(1 - \theta) \sum_{k \in \{0, \dots, d_A^{\max}\}} p_A(k - i + 1)^+ + \theta \sum_{k \in \{0, \dots, d_A^{\max}\}} p_A(k - i)^+$, 收益为 $(1 - \theta)r_A(i + 1) + \theta r_A i$, 缺货损失为 $(1 - \theta)b_{AP_A}(k)[k - i - 1]^+ + \theta b_{AP_A}(k)[k - i]^+$ 。

(2) 对于 B 产品

$$t_{mn}^{11} = t^{11}(s, s^*) = \begin{cases} ((1 - \theta)p_A(i - i^* + 1) + \theta p_A(i - i^*))p_B(j - j^*) & \text{if } i^* \in \{1, \dots, I\} \text{ and } j^* \in \{1, \dots, J\} \\ ((1 - \theta)p_A(i - i^* + 1) + \theta p_A(i - i^*)) \sum_{k \in \{0, \dots, d_B^{\max}\}} p_B(k - j)^+ & \text{if } i^* \in \{1, \dots, I\} \text{ and } j^* = 0 \\ ((1 - \theta) \sum_{k \in \{0, \dots, d_A^{\max}\}} p_A(k - i + 1)^+ + \theta \sum_{k \in \{0, \dots, d_A^{\max}\}} p_A(k - i)^+) p_B(j - j^*) & \text{if } i^* = 0 \text{ and } j^* \in \{1, \dots, J\} \\ ((1 - \theta) \sum_{k \in \{0, \dots, d_A^{\max}\}} p_A(k - i + 1)^+ + \theta \sum_{k \in \{0, \dots, d_A^{\max}\}} p_A(k - i)^+) \sum_{k \in \{0, \dots, d_B^{\max}\}} p_B(k - j)^+ & \text{if } i^* = 0 \text{ and } j^* = 0 \end{cases}$$

若当期发生了区域需求中断, 则制造商的状态转移概率为

$$t_{mn}^{12} = t^{12}(s, s^*) = \begin{cases} 1 & \text{if } i = i^* + 1 \text{ and } j = j^* \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

综上所述, 当制造商当期采购 A 产品时, 制造商的状态转移概率为 $t_{mn}^{11} = (1 - \tau)t_{mn}^{11} + \tau t_{mn}^{12}$ 。

若当期发生了区域需求中断, 则制造商当期的销售收入为 0, 因此可得在制造商当期只采购 A 产品时, 若未出现供应中断, 则制造商采购 A 产品的预期收益为

$$\begin{aligned} \pi^1(s, s^*) &= t^1(s, s^*)\pi(s^*) - c(i + j) \\ &\quad + r_A(i + 1 - i^*) + r_B(j - j^*) \\ &\quad - b_{AP_A}(k)[k - i - 1]^+ - b_{BP_B}(k)[k - j]^+ - c_A \end{aligned}$$

而出现供应中断时, 制造商采购 A 产品的预期收益为

$$\begin{aligned} \pi^1(s, s^*) &= t^1(s, s^*)\pi(s^*) - c(i + j) \\ &\quad + r_A(i - i^*) + r_B(j - j^*) \\ &\quad - b_{AP_A}(k)[k - i]^+ - b_{BP_B}(k)[k - j]^+ - c_A \end{aligned}$$

因此, 考虑采购中断风险时, 制造商当期采购 A 产品的预期收益如式(3)所示:

①当期发生了区域需求中断时, 则必然有 $j = j^*$ 。

②当期未发生区域需求中断时, 如果当期 B 产品未发生缺货 ($j^* > 0$), 类似于 A 产品, 可知当期 B 产品的需求为 $j - j^*$, 相应的转移概率为 $p_B(j - j^*)$, 收益为 $r_B(j - j^*)$; 如果当期 B 产品可能缺货 ($j^* = 0$) 时, 则当期 B 产品实际满足的需求为 j , B 产品的当期销售收益为 $r_B j$, 并产生 $[k - j]^+$ 个单位缺货, 因而有缺货时 B 产品的转移概率为 $\sum_{k \in \{0, \dots, d_B^{\max}\}} p_B(k - j)^+$, 当期 B 产品产生缺货成本为 $b_{BP_B}(k)[k - j]^+$ 。

因此, 若当期未发生区域需求中断, 则根据 A 产品和 B 产品的需求是独立的, 且中断风险发生的概率为 θ , 可得制造商的状态转移概率为

$$\begin{aligned} \pi^1(s, s^*) &= t^1(s, s^*)\pi(s^*) - c(i + j) \\ &\quad + r_A(i - i^*) + r_B(1 - \theta) + r_B(j - j^*) \\ &\quad - (1 - \theta)b_{AP_A}(k)[k - i - 1]^+ \\ &\quad - \theta b_{AP_A}(k)[k - i]^+ - b_{BP_B}(k)[k - j]^+ - c_A \end{aligned} \tag{3}$$

式(3)是由出现供应中断风险下的预期收益与不出现供应中断风险下的预期收益构成的, 其中出现供应中断的概率为 θ , 不出现供应中断的概率为 $1 - \theta$ 。

2.2 制造商当期采购 B 产品

如果当期制造商只采购 B 产品, 此时不存在供应中断风险。

(1) 对于 A 产品

①当期发生了区域需求中断时, 则必然有 $i = i^*$ 。

②当期未发生区域需求中断时, 若当期 A 产品未发生缺货时, A 产品的转移概率为 $p_A(i - i^*)$, 销售收益为 $r_A(i - i^*)$; 当期 A 产品可能发生缺货时的销售收益为 $r_A i$, 缺货 $[k - i]^+$ 个单位, 转移概率为 $\sum_{k \in \{0, \dots, d_A^{\max}\}} p_A(k - i)^+$, 缺货损失的期望为

$b_A p_A(k) [k - i]^+$ 。

(2) 对于 B 产品

①当期发生了区域需求中断时,则必然有 $j = j^* + 1$ 。

②当期未发生区域需求中断时,若不考虑次品带来的损失,如果未发生缺货,当期 B 产品库存量的转移概率为 $p_B(j + 1 - j^*)$,当期销售收益为 $r_B(j + 1 - j^*)$; 如果发生缺货,则当期 B 产品的销售收益为 $r_B(j + 1)$,并产生 $[k + 1 - j]^+$ 个单位缺货,B 产品的库存量转移概率为 $\sum_{k \in \{0, \dots, d_B^{\max}\}} p_B(k - j - 1)^+$, 缺货损失的期望为 $b_B p_B(k) [k - j - 1]^+$ 。

因此,若当期未发生区域需求中断,制造商的状态转移概率为

$$t_{mn}^{21} = t^{21}(s, s^*) = \begin{cases} p_A(i - i^*) p_B(j - j^* + 1) & \text{if } i^* \in \{1, \dots, I\} \text{ and } j^* \in \{1, \dots, J\} \\ p_A(i - i^*) \sum_{k \in \{0, \dots, d_B^{\max}\}} p_B(k - j - 1)^+ & \text{if } i^* \in \{1, \dots, I\} \text{ and } j^* = 0 \\ \sum_{k \in \{0, \dots, d_A^{\max}\}} p_A(k - i)^+ p_B(j - j^* + 1) & \text{if } i^* = 0 \text{ and } j^* \in \{1, \dots, J\} \\ \sum_{k \in \{0, \dots, d_A^{\max}\}} p_A(k - i)^+ \sum_{k \in \{0, \dots, d_B^{\max}\}} p_B(k - j - 1)^+ & \text{if } i^* = 0 \text{ and } j^* = 0 \end{cases}$$

若当期发生了区域需求中断,则制造商的状态转移概率为

$$t_{mn}^{21} = t^{21}(s, s^*) = \begin{cases} 1 & \text{if } i = i^* \text{ and } j = j^* + 1 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

综上所述,当制造商当期采购 B 产品时,制造商的状态转移概率为 $t_{mn}^2 = (1 - \tau)t_{mn}^{21} + \tau t_{mn}^{22}$ 。

而在考虑次品带来损失的情况下,制造商将运用检查和延期付款两种机制来控制供应商的质量。由于现有库存中次品只影响现有收益,对采购决策和未来新采购的产品并不产生影响,因而不考虑现有库存中的次品,即假设现有库存中的次品率为 0。

在检查机制下,假设制造商将对新采购的 B 产品进行检查,检查精度为 γ , B 产品的次品率为 α 。当制造商检查出次品时,供应商的罚金为 l ,而当制造商未检查出次品时,次品将流入市场,次品被零售商使用后将一定会被发现,制造商将产生损失 h ,因而制造商采购新产品的预期收益为 $\alpha\gamma l - \alpha(1 - \gamma)h$, 因此,检查机制下,制造商采购 B 产品的收益如式(4)所示:

$$\begin{aligned} \pi^2(s, s^*) &= t^2(s, s^*) \pi(s^*) - c(i + j) \\ &\quad + r_A(i - i^*) + r_B(j + 1 - j^*) \\ &\quad - b_A p_A(k) [k - i]^+ - b_B p_B(k) [k - j - 1]^+ \\ &\quad + \alpha\gamma l - \alpha(1 - \gamma)h - c_B - \gamma c_\gamma \end{aligned} \quad (4)$$

在延期付款机制下,制造商不会对新采购的 B 产品进行检查,而是直接销售到市场上。采购时制造商将向供应商支付部分采购成本 $(1 - \beta)c_B$ (其中 β 为延期付款比例), 剩余部分延期付款,延期付款期为 N , 制造商对产品采取先到先销售的销售模式。若制造商在延期付款期内销售了新采购的 B 产品,如果 B 产品为次品,则制造商拒绝支付剩余部分采购成本,如果 B 产品是正品,则制造商支付剩余部分采购成本。若制造商在延期付款期内未能销售该产品,延期付款期后,无论 B 产品是正品还是次品,制造商都需要支付剩余部分采购成本。假设采购期内第 n 期需求 k_n 单位 B 产品的概率为 $p_B(k_n)$, 则在延期付款期内, B 产品的总需求为 K 的概率为 $p_B(k_1) p_B(k_2) \dots p_B(k_N)$ (其中 $K = k_1 + k_2 + \dots + k_N$), 因此在期初 B 产品的库存为 j 时,制造商新采购的 B 产品在延期付款期内被销售的概率为 $\sum_{K > j} \prod_{\sum_{k_n = K} p_B(k_n)}$, 被销售并被发现为次品的概率为 $\alpha \sum_{K > j} \prod_{\sum_{k_n = K} p_B(k_n)}$, 因此制造商支付剩余部分采购成本的概率为 $\beta c_B (1 - \alpha \sum_{K > j} \prod_{\sum_{k_n = K} p_B(k_n)})$ 。此时延期付款机制下制造商采购 B 产品的预期收益如式(5)所示:

$$\begin{aligned} \pi^2(s, s^*) &= t^2(s, s^*) \pi(s^*) - c(i + j) + r_A(i - i^*) \\ &\quad + r_B(j + 1 - j^*) - b_A p_A(k) [k - i]^+ \\ &\quad - b_B p_B(k) [k - j - 1]^+ - (1 - \beta)c_B \\ &\quad - \beta c_B (1 - \alpha \sum_{K > j} \prod_{\sum_{k_n = K} p_B(k_n)}) \end{aligned} \quad (5)$$

2.3 制造商当期空转

当期制造商当期不采购时,因此不存在供应中断风险。

①当期发生了区域需求中断时,则必然有 $i = i^*, j = j^*$ 。

②当期未发生区域需求中断时,若未发生缺货,则当期 A、B 产品的需求分别为 $i - i^*$ 和 $j - j^*$, 相应的概率分别为 $p_A(i - i^*)$ 和 $p_B(j - j^*)$, 收益分别为 $r_A(i - i^*)$ 和 $r_B(j - j^*)$; 若发生缺货,在当期实际需求为 k 时, A、B 产品会分别产生 $[k - i]^+$ 和 $[k - j]^+$ 个单位的缺货, 缺货成本分别为 $b_A p_A(k) [k - i]^+$ 和 $b_B p_B(k) [k - j]^+$, 相应的转移概率分别为 $\sum_{k \in \{0, \dots, d_A^{\max}\}} p_A(k - i)^+$ 和 $\sum_{k \in \{0, \dots, d_B^{\max}\}} p_B(k - j)^+$, 收益分别为 $r_A i$ 和 $r_B j$ 。因此,若当期未发生区域需求中断,制造商的状态转移概率为

$$t_{mn}^{31} = t^{31}(s, s^*) = \begin{cases} p_A(i - i^*)p_B(j - j^*) & \text{if } i^* \in \{1, \dots, I\} \text{ and } j^* \in \{1, \dots, J\} \\ p_A(i - i^*) \sum_{k \in \{0, \dots, d_B^{\max}\}} p_B(k - j)^+ & \text{if } i^* \in \{1, \dots, I\} \text{ and } j^* = 0 \\ \sum_{k \in \{0, \dots, d_A^{\max}\}} p_A(k - i)^+ p_B(j - j^*) & \text{if } i^* = 0 \text{ and } j^* \in \{1, \dots, J\} \\ \sum_{k \in \{0, \dots, d_A^{\max}\}} p_A(k - i)^+ \sum_{k \in \{0, \dots, d_B^{\max}\}} p_B(k - j)^+ & \text{if } i^* = 0 \text{ and } j^* = 0 \end{cases}$$

若当期发生了区域需求中断,则制造商的状态转移概率为

$$t_{mn}^{31} = t^{31}(s, s^*) = \begin{cases} 1 & \text{if } i = i^* \text{ and } j = j^* + 1 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

综上,空转策略下制造商的状态转移概率为 t_{mn}^{33} $= (1 - \tau)t_{mn}^{31} + \tau t_{mn}^{32}$ 。制造商当期空转的收益如式(6)所示:

$$\begin{aligned} \pi^3(s, s^*) &= t^3(s, s^*)\pi(s^*) - c(i + j) \\ &+ r_A(i - i^*) + r_B(j - j^*) - b_A p_A(k)[k - i]^+ \\ &- b_B p_B(k)[k - j]^+ \end{aligned} \quad (6)$$

由此,给出了在考虑供需中断风险与质量控制机制下的MDP模型。

3 数值分析

结合 Clemons 和 Slotnick^[32]的研究,设置数值如下:两种产品的单位库存成本为 $c = 0.1$, A 产品的单位采购成本为 $c_A = 5$, B 产品的单位采购成本为 $c_B = 4$,产品价格为 $r_A = r_B = 10$,单位产品缺货成本为

$b_A = b_B = 30$,产品最大库存量为 $I = J = 20$,次品率为 $\alpha = 5\%$,检查精度为 $\gamma = 90\%$,检查成本为 $c_\gamma = 2$,被检查出次品时供应商的罚金为 $l = 3.2$,次品流入市场后制造商的损失为 $h = 200$,延期付款比例为 $\beta = 80\%$,延期付款期为 $N = 2$,供应中断风险发生的概率为 $\theta = 5\%$,需求强度为 $\lambda_A = \lambda_B = 0.8$,区域需求中断风险发生的概率为 $\tau = 2\%$ 。采用平均MDP模型求解,计算软件为Matlab的MDPtoolbox包。下面将具体分析不同参数对制造商采购决策的影响,包括库存、次品率、中断风险、检查精度等。假设当考虑A产品库存量变化时,B产品库存取3;当考虑B产品库存量变化时,A产品库存取4。

3.1 库存与次品率对制造商采购决策的影响

根据变量的设置,库存对制造商采购决策的影响结果如表2所示。表中第一列为期初A产品的库存量,第一行为期初B产品的库存量,A表示当期采购A产品,B表示当期采购B产品,N表示当期不采购。综合表2的结果可以看出:第一,当A、B

表2 库存水平与采购决策

Table 2 Inventory levels and purchasing decisions

i/j	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
1	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
2	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
3	B	B	B	B	A	A	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
4	B	B	B	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
5	B	B	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
6	B	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
7	B	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
8	B	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
9	B	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
10	B	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
11	B	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
12	B	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
13	B	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
14	B	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
15	B	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
16	B	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
17	B	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
18	B	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
19	B	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
20	B	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

产品的库存量都较大时,制造商将为节约库存成本而采取空转策略;第二,当A产品与B产品的库存量减少,但短时间都不会产生缺货时,制造商也将采购产品而非空转;第三,当A产品(B产品)的库存量较大而B产品(A产品)库存较小时,制造商为减少缺货带来的损失而采购B产品(A产品);第四,当A产品与B产品的库存量都很小时,制造商主要从减少缺货成本角度考虑采购策略;第五,当A产品与B产品的库存一样时,制造商会倾向于采购B产品,这表明可靠性可能比质量更能吸引订单,这与以往研究中发现的可靠性比成本更有竞争力的结论较为一致。

在检查与延期付款机制中,次品率均是影响制造商采购决策的重要因素,如图1和图2所示。从图中可知,随着次品率的增加,无论是在检查还是延期付款机制中,制造商均会倾向于选择高质量的A产品,尤其在延期付款机制中,为了防止次品损失制造商会更快转向采购A产品,并存在只采购A产品而放弃对B产品采购的情形。可见,延期付款机制更能倒逼制造商提供高质量产品。此外,从图1

还可看出,检查机制下次品率的变化几乎不影响制造商当期是否采购的问题,而只影响采购何种产品的决策问题,而在延期付款机制下,次品率的变化不仅影响制造商当期是否采购,还影响采购何种产品的决策。

3.2 中断风险对制造商采购决策的影响

图3和图4分别描述了检查与延期付款机制下供应中断风险对制造商采购决策的影响。从图可知,当B产品库存量为3时,无论在何种质量控制机制下,供应中断风险不会改变制造商的采购决策,即在A产品库存低时会采购B产品以应对中断风险,当A产品库存增加时,会选择采购A产品以降低次品损失,之后选择空转策略。不同的是,延期付款会促使制造商更快转向从高质量供应商A处采购。而在A产品库存量为4且B产品库存很低时,无论是检查还是延期付款机制下,尽管A产品存在中断风险,制造商仍会选择采购A产品。这是由于此时A产品存在一定库存可以防止中断风险引起的缺货,因此制造商继续采购A产品将以一定概率成功并获得高质量带来的收益。不同的是,

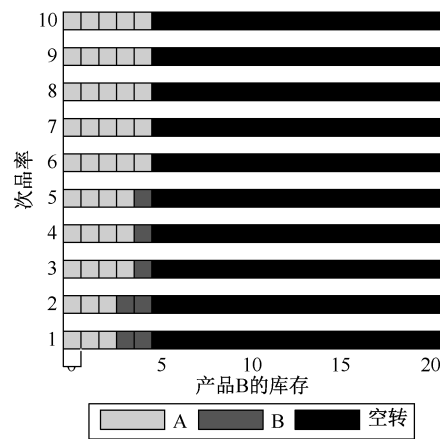
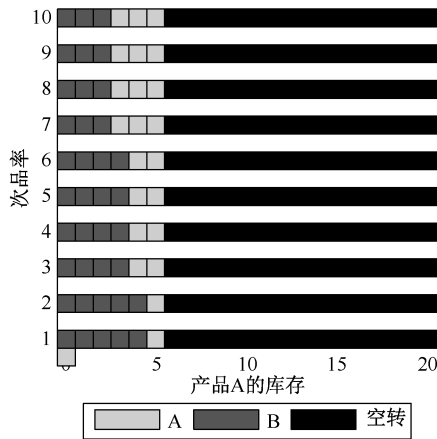


图1 检查机制下次品率对采购决策的影响

Figure 1 The impact of defective rate on purchasing decision under the inspection mechanism

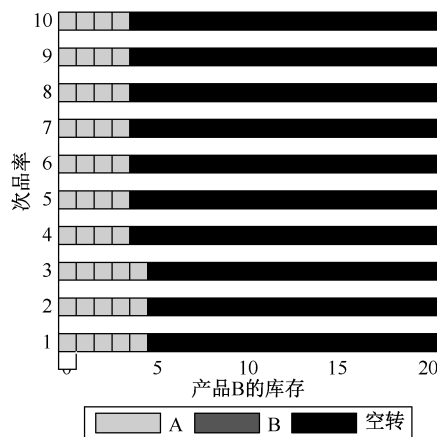
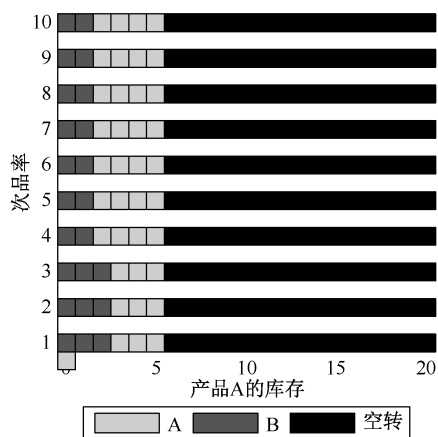


图2 延期付款机制下次品率对采购决策的影响

Figure 2 The impact of defective rate on purchasing decision under the deferred payment mechanism

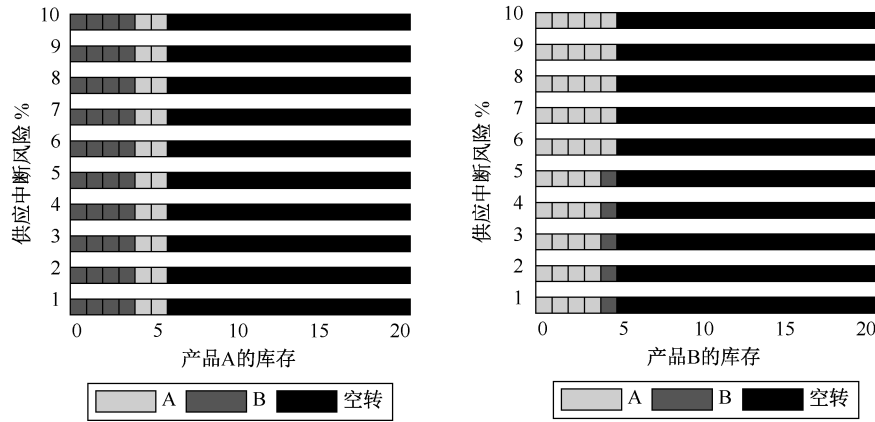


图3 检查机制下供应中断风险对采购决策的影响

Figure 3 The impact of supply interruption risk on purchasing decision under the inspection mechanism

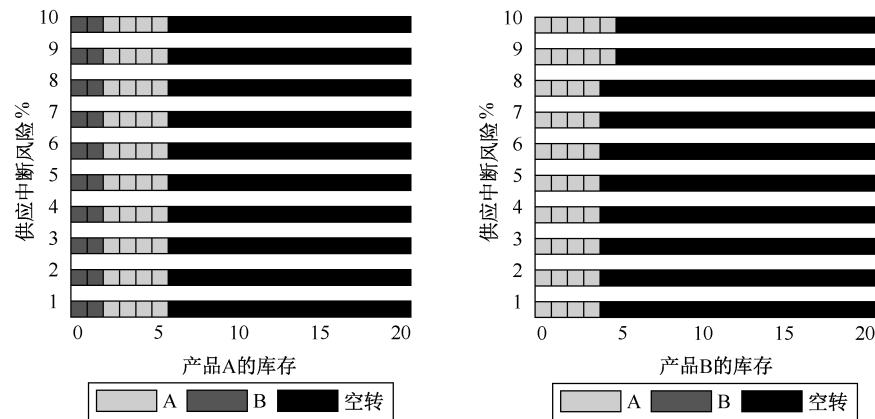


图4 延期付款机制下供应中断风险对采购决策的影响

Figure 4 The impact of supply interruption risk on purchasing decision under the deferred payment mechanism

在检查机制下,在供应中断风险较低时,随着 B 产品库存的增加,制造商也会选择采购 B 产品。进一步比较两种质量控制机制可知,在产品 B 库存不变时,检查机制会促使制造商在更多情况下选择产品 B,而延期付款机制则会更多促使制造商选择产品 A;在产品 A 库存不变时,延期付款机制会完全阻止制造商向低质量供应商 B 进行采购。

图 5 和图 6 分析了区域需求中断风险对制造商采购决策的影响。从图中可知,与供应中断风险相比,区域需求中断风险的变化会显著影响制造商的采购决策,在 A 产品库存很低时,制造商会选择采购 B 产品,随着区域需求中断风险的增加,制造商会更快转向采购 A 产品。可见,高的需求中断风险会倒逼制造商采购高质量产品以防止由于质量问题产生的需求损失。从图 5(左)可知,当 B 产品库存量为 3 时,若 A 产品库存也较少,制造商会采购产品 B,随着 A 产品库存量的增加,制造商会选择从供应商 A 处采购,之后选择空转策略,且会随着区域需求中断风险的增加更快地转向采购产品 A。从 5(右)图可知,当 A 产品库存量为 4 时,在区域需求

中断风险较低时,制造商会选择从供应商 B 处采购产品,但随着区域需求中断风险的增加,制造商只会选择从供应商 A 处采购。从图 6 可知,延期付款机制下制造商的采购策略与检查机制下的一致,不同的是延期付款机制下会促使制造商更多更快地选择产品 A。此外,还发现与供应风险相比,区域需求中断风险增加,总体采购更少的产品。与检查相比,区域需求中断风险对延期的影响更大,因为区域需求中断风险导致次品在延期付款期内发现的概率降低。

3.3 检查精度与延期付款期对制造商采购决策的影响

图 7 和图 8 分别分析了检查精度与延期付款期对制造商采购决策的影响。从图可知,在 B 产品库存量为 3 且 A 产品的库存量较低时,随着检查精度的提高或延期付款期的延长,制造商会更倾向于向供应商 B 进行采购,尤其在检查精度达到 98.5% 时,制造商不再购买高中断风险的高质量产品 A。但在延期付款机制下,无论延期付款期如何变化,只要 A 产品的库存达到一定阈值,制造商都会转向

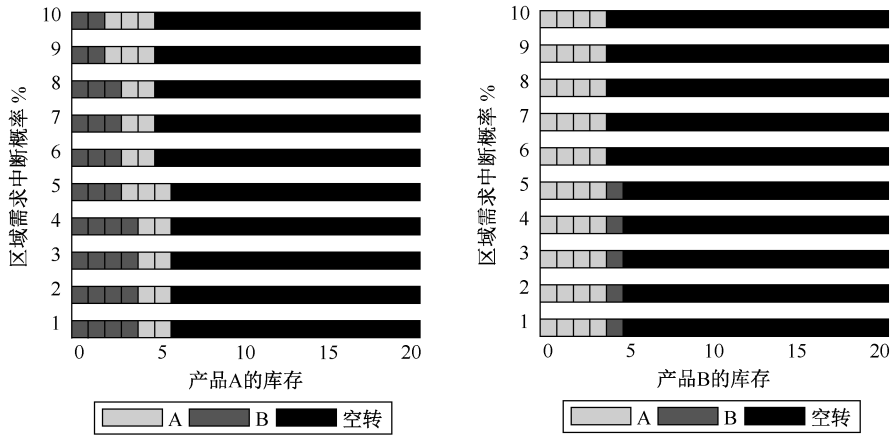


图5 检查机制下区域需求中断风险对采购决策的影响

Figure 5 The impact of regional demand interruption risk on purchasing decision under the inspection mechanism

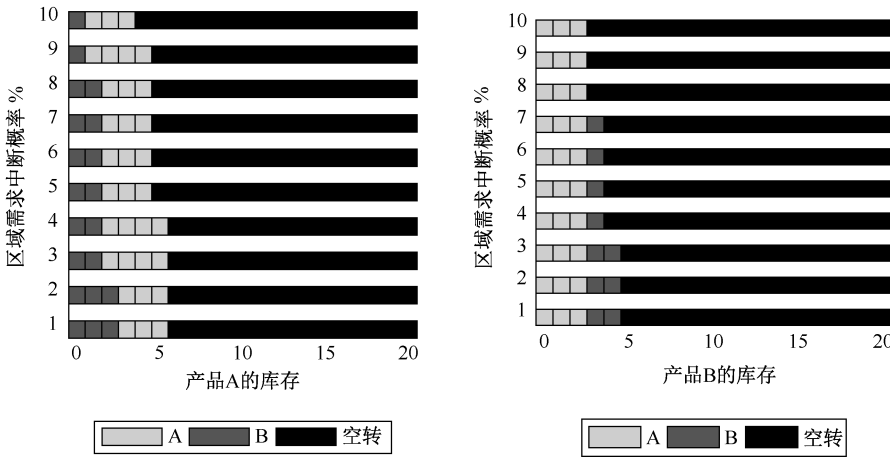


图6 延期付款机制下区域需求中断风险对采购决策的影响

Figure 6 The impact of regional demand interruption risk on purchasing decision under the deferred payment mechanism

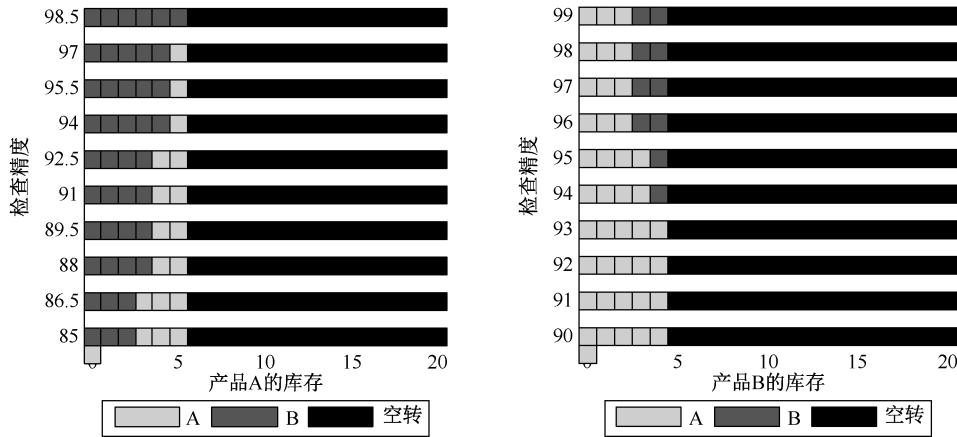


图7 检查机制下检查精度对采购决策的影响

Figure 7 The impact of inspection accuracy on purchasing decision under the inspection mechanism

采购 A 产品,可见,延期付款机制更能诱使制造商采购高质量产品。

3.4 检查机制和延期付款机制下制造商的利润分析

进一步分析检查与延期付款机制下制造商的收益情况,如图 9 和图 10 所示。从图可知,在 A、B

产品库存变化时,两种机制下制造商利润的变化呈现出相同的趋势。其中,在检查机制下,制造商的最大收益为 69.98,对应的 A 产品的库存量为 14,B 产品的库存量为 14;在延期付款机制下,制造商的最大收益为 70.54,对应的 A 产品的库存量为 15,B 产品的库存量为 12。从图还可知,第一,当 A 产品

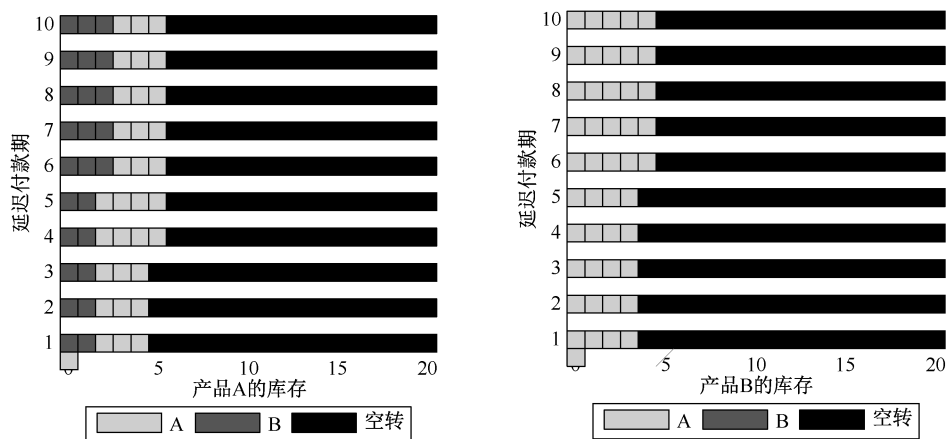


图8 延期付款机制下延期付款期对采购决策的影响

Figure 8 The impact of deferred payment period on purchasing decision under the deferred payment mechanism

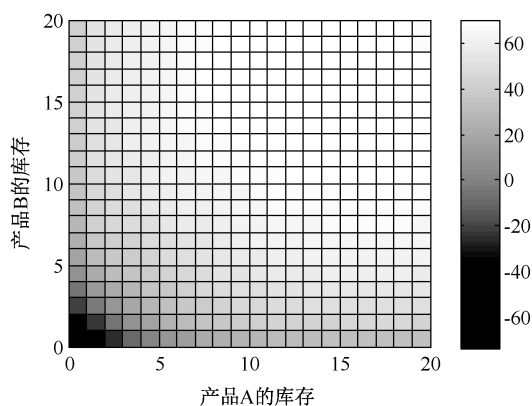


图9 检查机制下的利润分析

Figure 9 Profit analysis under the inspection mechanism

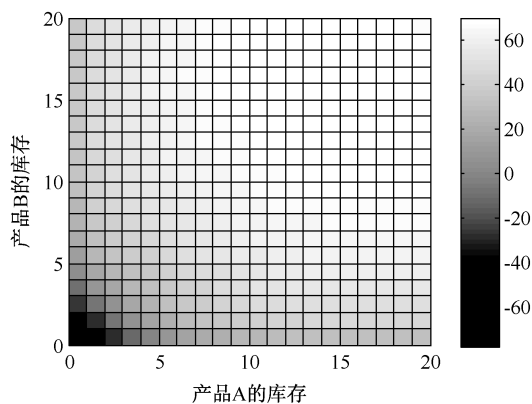


图10 延期付款机制下的利润分析

Figure 10 Profit analysis under the deferred payment mechanism

和 B 产品库存处于(0,0) (1,0) (0,1) (2,0) (0,2) 和(1,1) 几种状态下,制造商将产生净损失,这是因为长远来看,在这几种状态下会出现供不应求的情况,此时制造商将承担较大的缺货损失。第二,在 A 和 B 产品的库存水平大于 5 时,制造商的利润均为正,且随着两种产品库存水平的增加而增加,但当两种产品的库存量均很大时,制造商的利润会下降,如点(20,20),此时检查机制下的利润为 66.73,

延期付款机制下的利润为 66.88。可见,随着 A、B 产品库存的变化,制造商的利润呈现出中间大、四周小的特征,即在两类产品的库存量均很低的情况下,制造商会出现负利润;在其中一类产品库存高且另一类产品库存较低时,或者两类产品库存均较高时,制造商的利润也较低;而当两类产品的库存水平处于中间区域时,制造商的利润较高。

接下来比较检查机制与延期付款机制对次品率、供需中断风险与利润的影响,结果如图 11~13 所示。从整体上来看,图 11 表明随着次品率的增加,制造商的利润会下降。当检查精度由 85% 变为 90% 和 95%,制造商的利润是上升的,表明随着次品率的增加,提高检查精度可以大大减少制造商由于销售次品带来的损失,此时制造商的收益会增加。当延期付款期延长时,即由 $N = 2$ 变为 $N = 5$ 和 $N = 10$ 时,制造商的收益会增加,表明延长支付货款的时间,制造商可以更大程度上避免次品带来的损失,从而使得收益上升。从图 11 还可知,在延期付款期或者检查精度不同时,会存在检查机制优于延期付款机制的情况,或延期付款机制更优的情况,但是制造商的利润对延期付款期更为敏感。比如,在 $N = 5$ 且 $\gamma = 90%$ 时,在次品率较低时,制造商应选择检查机制,而在次品率较高时,则应选延期付款机制;在 $N = 5$ 变为 $N = 10$ 时,延期付款机制会更优,当 $\gamma = 90%$ 变为 $\gamma = 95%$ 时,则选检查机制。可见,延期付款周期与检查精度是影响制造商利润的重要因素。

从整体上来看,图 12 表明随着供应中断风险的增加,制造商的利润呈现出下降的趋势。当检查精度增加时,即检查精度由 85% 变为 90% 和 95% 时,制造商的利润是下降的,表明在次品率不变时,随着供应中断风险提高,增加对产品 B 的检查精度,并不能提高制造商的收益,这是因为在供应中断风

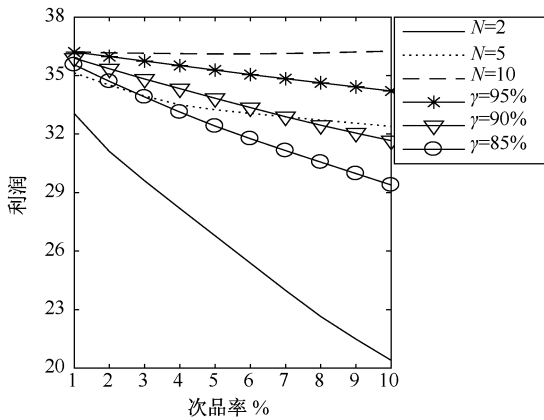


图 11 次品率与制造商利润

Figure 11 Defective product rate and retailer profit

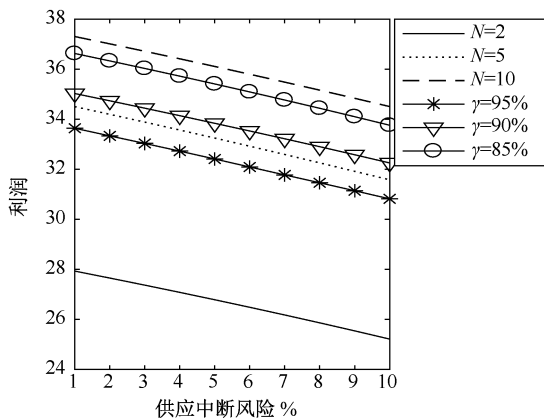


图 12 供应中断风险与制造商利润

Figure 12 Supply interruption risk and retailer profit

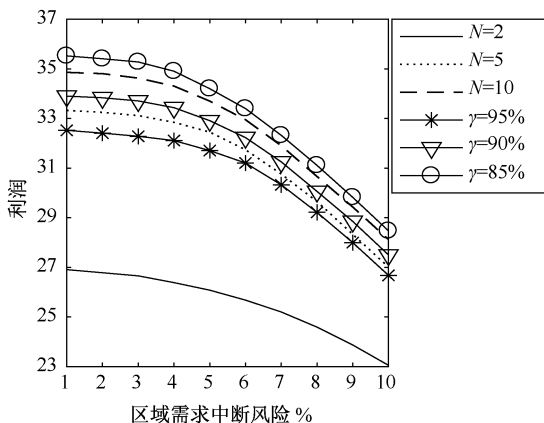


图 13 区域需求中断风险与制造商利润

Figure 13 Regional demand interruption risk and retailer profit

险提高时,制造商会更倾向于向供应商 A 采购,因此提高检查精度只会增加检查成本而不会促使制造商利润的增加。随着延期付款期的延长,即由 2 变为 5 和 10 时,制造商的收益是增加的,表明增加延迟付款期可以减少次品损失从而增加制造商的收益。从图 12 还可知,在延期付款期或者检查精度不同时,会存在检查机制优于延期付款机制的情

况,同时也存在相反的情况。可见,延期付款期与检查精度会调节供应商供应中断风险与制造商利润之间的关系。

图 13 探讨了区域需求中断风险对制造商利润的影响,发现与供应中断风险的影响较为一致,制造商的利润会随区域需求中断风险的增加而减少,且整体利润会下降。同时还发现,区域需求中断风险对制造商利润的影响更为显著,且在检查与延期付款机制下的利润差异会减少。这表明区域需求中断对制造商利润的影响大于供应中断,若不存在需求,两种质量机制的效果都会降低。此外,比较检查与延期付款机制也可以发现,提高检查精度不一定是有利的,延长付款期更为有利,且选择何种质量机制取决于检查精度与延迟付款期。

4 结论

本文研究由两个供应商、一个制造商与两类零售商组成的分散式供应链,其中一个供应商具有高质量但存在供应中断风险,另一个供应商质量较低但不存在供应中断风险,建立 MDP 决策模型,比较研究检查与延期付款机制下,质量与供需中断风险对供应商动态采购决策的影响。

研究表明,库存量、次品率、供需中断风险均是影响制造商采购决策的重要因素。首先,在一种产品的库存量较低时,会影响制造商的供应商选择策略,而在库存量较大时,会选择空转策略。其次,在检查和延期付款机制下,随着次品率的提高,制造商会更倾向于采购高质量产品,降低对低质量产品的采购甚至不采购。第三,无论是在检查还是延期付款机制下,当低质量产品存在库存时,供应中断风险不会改变制造商的采购决策,但在检查机制下会更多地选择从低质量供应商处采购;在存在高质量产品库存时,随着供应中断风险的提高,检查机制下制造商会选择从采购低质量产品转向采购高质量产品,但是延期付款机制下均只会从高质量供应商处采购。第四,在区域需求中断风险下,制造商的采购策略与供应中断风险时一致,延期付款机制会促使制造商更多更快地选择高质量产品。不同的是,与供应风险相比,区域需求中断风险增加,会减少制造商采购产品的总数量,且区域需求中断风险对延期付款机制的影响更大,因为区域需求中断风险导致次品在延期付款期内发现的概率降低。

研究还发现了检查精度与延期付款期对采购策略的影响。在检查机制下,只要检查精度足够高,无论产品库存如何,制造商还是会倾向于向低质量供应商进行采购。在延期付款机制下,当低质量产品库存不变且高质量产品的库存量较低时,随

着延迟付款期的延长,制造商会增加对低质量产品的采购;当高质量产品库存不变且低质量产品的库存量较低时,无论延期付款期如何变化,制造商只从高质量供应商处采购产品。可见,检查机制会给予制造商更多采购低质量产品的选择,而延期付款机制才能完全阻止制造商向低质量供应商进行采购。

此外,本文还比较了在检查与延期付款机制下制造商的利润情况。研究表明,第一,在高质量与低质量产品库存同时变化时,两种机制下制造商利润的变化均呈现中间大、四周小的趋势。第二,随着次品率的增加,制造商的利润均会下降,但增加制造商的检查精度或延期付款期,可以增加制造商的收益。在次品率较低时,制造商应选择检查机制,而在次品率较高时,则应选延期付款机制,但这种选择会随着延期付款期或者检查精度的不同而改变。第三,随着中断风险的提高,制造商的利润也会下降,在供应中断风险提高时,增加检查精度并不能提高制造商的收益,但延长延期付款期可以提高制造商的收益,可见在面对高的中断风险时,改变延期付款期对制造商更有利。

综上,可以得到以下管理启示:对供应商而言,尽管面对高的中断风险,但是提供高质量产品能为其在与高可靠供应商的竞争中获得优势,这也解释了为何国内制造商会向国外具有核心技术的供应商进行采购,因此对于国内供应商也应该不断提升产品技术含量,这样能够缓解由于疫情等导致的国际贸易中断。对制造商而言,延期付款机制能够更好地遏制高可靠供应商提供低质量的产品,而检查机制在次品率高时也是有效的方式。面对中断风险,要充分利用低可靠的供应商以满足高质量市场的需求,而非仅向低可靠供应商进行采购。同时,面对长期存在的供需中断风险,应保存更多的高质量产品,这样可以帮助自身在存在高中断风险时有更多的采购选择。

参考文献

- [1] TANG O, MUSA S N. Identifying risk issues and research advancements in supply chain risk management [J]. *International Journal of Production Economics*, 2011, 133(1): 25-34.
- [2] HENDRICKS K B, SINGHAL V R. The effect of supply chain glitches on shareholder wealth [J]. *Journal of Operations Management*, 2003, 21(5): 501-522.
- [3] HENDRICKS K B, SINGHAL V R. Association between supply chain glitches and operating performance [J]. *Management Science*, 2005a, 51(5): 695-711.
- [4] HENDRICKS K B, SINGHAL V R. An empirical analysis of the effect of supply chain disruptions on long-run stock price performances and equity risk of the firm [J]. *Journal of Operations Management*, 2005b, 14(1): 35-52.
- [5] TOMLIN B. On the value of mitigation and contingency strategies for managing supply chain disruption risks [J]. *Management Science*, 2006, 52(5): 639-657.
- [6] LI J, WANG S Y, CHENG T C E. Competition and cooperation in a single-retailer two-supplier supply chain with supply disruption [J]. *International Journal of Production Economics*, 2010, 124(1): 137-150.
- [7] 李新军, 季建华, 王淑云. 供应中断情况下基于双源采购的供应链协调与优化 [J]. *管理工程学报*, 2014, 28(3): 141-147.
- [8] LI X J, JI J H, WANG S Y. Coordination and optimization of dual sourcing under supply disruptions [J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2014, 28(3): 141-147.
- [9] ESMAEILI-NAJAFABADI E, AZAD N, NEZHAD M S F. Risk-averse supplier selection and order allocation in the centralized supply chains under disruption risks [J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 175: 114691.
- [10] SHAN X, LI T, SETHI S P. A responsive-pricing retailer sourcing from competing suppliers facing disruptions [J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2022, 24(1): 196-213.
- [11] YU H S, ZENG A Z, ZHAO L D. Single or dual sourcing: Decision-making in the presence of supply chain disruption risks [J]. *Omega*, 2009, 37(4): 788-800.
- [12] SAWIK T. Joint supplier scheduling of customer orders under disruption risks: Single vs. dual sourcing [J]. *Omega*, 2014, 43: 83-95.
- [13] SAWIK T. Optimization of cost and service level in the presence of supply chain disruption risks: Single vs. multiple sourcing [J]. *Computer of Operations Research*, 2014, 51: 11-20.
- [14] SAWIK T. On the fair optimization of cost and customer service level in a supply chain under disruption risks [J]. *Omega*, 2015, 53: 58-66.
- [15] KUMAR M, BASU P, AVITTATHUR B. Pricing and sourcing strategies for competing retailers in supply chains under disruption risk [J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 265(2): 533-543.
- [16] NIU B Z, LI J W, ZHANG J, et al. Strategic analysis of dual sourcing and dual channel with an unreliable alternative supplier [J]. *Production and Operations Management*, 2019, 28(3): 570-587.
- [17] RAHMANI K, YAVARI M. Pricing policies for a dual-channel green supply chain under demand disruptions [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 127: 493-510.
- [18] PI Z Y, FANG W G, ZHANG B F. Service and pricing strategies with competition and cooperation in a dual-

- channel supply chain with demand disruption [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 138: 1061-1070.
- [18] ZHAO T Y, XU X P, CHEN Y, et al. Coordination of a fashion supply chain with demand disruptions [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 134: 101838.
- [19] REYNIERS D J, TAPIERO C S. Contract design and the control of quality in a conflictual environment [J]. *European Journal of Operational Research*, 1995, 82(2): 373-382.
- [20] BAIMAN S, FISCHER P E, RAJAN M V. Information, contracting, and quality costs [J]. *Management Science*, 2000, 46(6): 776-789.
- [21] STARBIRD S A. Penalties, rewards, and inspection: Provisions for quality in supply chain contracts [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2001, 52(1): 109-115.
- [22] ZHOU Y W, CHEN C Y, LI C W, et al. A synergic economic order quantity model with trade credit, shortages, imperfect quality and inspection errors [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(2): 1012-1028.
- [23] AL-SALAMAH M. Economic production quantity in batch manufacturing with imperfect quality, imperfect inspection, and destructive and non-destructive acceptance sampling in a two-tier market [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 93: 275-285.
- [24] LONG M S, MALITZ I B, RAVID S A. Trade credit, quality guarantees, and product marketability [J]. *Financial Management*, 1993, 22(4): 117-127.
- [25] LEE Y W, STOWE J D. Product risk, asymmetric information, and trade credit [J]. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 1993, 28(2): 285-300.
- [26] KLAPPER L, LAEVEN L, RAJAN R. Trade credit contracts [J]. *Review of Financial Studies*, 2012, 25(3): 838-867.
- [27] 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.
- [28] RUI H X, LAI G M. Sourcing with deferred payment and inspection under supplier product adulteration risk [J]. *Production and Operations Management*, 2015, 24(6): 934-946.
- [29] 曹裕, 李青松, 胡韩莉. 基于报童模型的供应链产品质量控制机制研究 [J]. *管理科学学报*, 2020, 23(4): 110-126.
- CAO Y, LI Q S, HU H L. Product quality control mechanism in supply chains based on newsvendor model [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2020, 23(4): 110-126.
- [30] SAWIK T. Selection of supply portfolio under disruption risks [J]. *Omega*, 2011, 39(2): 194-208.
- [31] ALTUG M S, VAN RYZIN G. Product quality selection: Contractual agreements and supplier competition in an assemble-to-order environment [J]. *International Journal of Production Economics*, 2013, 141(2): 626-638.
- [32] CLEMONS R, SLOTNICK S A. The effect of supply-chain disruption, quality and knowledge transfer on firm strategy [J]. *International Journal of Production Economics*, 2016, 178: 169-186.
- [33] SCHMITT A J, SNYDER L V. Infinite-horizon models for inventory control under yield uncertainty and disruptions [J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(4): 850-862.
- [34] DEMIREL S, KAPUSCINSKI R, YU M. Strategic behavior of suppliers in the face of production disruptions [J]. *Management Science*, 2018, 64(2): 533-551.
- [35] 曹裕, 吴堪, 熊寿遥. 随机需求下双产品混合生产的 Markov 决策过程研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2018, 38(4): 899-909.
- CAO Y, WU K, XIONG S Y. Hybrid MTO/MTS production decision with stochastic demands based on FMDP [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2018, 38(4): 899-909.
- [36] BEEMSTERBOER B, LAND M, TEUNTER R. Hybrid MTO/MTS production planning: An explorative study [J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 248(2): 453-461.

Research on dynamic purchase strategies of supply chain under multiple risks of disruption and quality

HU Hanli^{1,2}, CAO Yu^{3*}, WU Kan⁴

- (1. School of Economics and Management, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China;
2. Modern Enterprise Management Research Center, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China;
3. School of Business, Central South University, Changsha 410083, China; 4. School of Economics and Management, Changsha University, Changsha 410022, China)

Abstract: The COVID-19 outbreak has not only adversely affected the world economy, but also had a big impact on global supply chain security. Some cross-border supply was forced to disrupt, including supply disruption and demand disruption. Therefore, in order to prevent supply disruption risks, enterprises always purchase from multiple suppliers at the same time. How to allocate orders and make purchase plans has become important decisions for enterprises, among which quality is the primary factor affecting supplier's selection. For some core components, if purchasing from foreign suppliers, the enterprises will face high disruption risks but quality assurance; however, if purchasing from domestic suppliers, they can reduce disruption risks but the quality may be difficult to guarantee. How to balance supply disruption and quality risk is one of the problems. In addition, due to the spread of the global pandemic, many enterprises have to face the order cancellation, delays and payment delays from foreign buyers and even domestic buyers, as manifested by regional demand disruptions. Therefore, how to design purchase strategies to deal with supply disruption, demand disruption and quality risk is the research question of this paper.

Establishing a Markov decision model, this study investigates the optimal purchasing decision of a decentralized supply chain composed of two suppliers and a manufacturer in response to multiple disruption and quality risks, and compares the influences of two quality control mechanisms of inspection and deferred payment on purchase decisions. Moreover, we explore the influences of factors such as inventory, defective rate, disruption risk, inspection accuracy, and deferred payment period on purchasing decisions through numerical analysis methods. We have obtained the following conclusions:

1) The influences of inventory and defective rate. Inventory affects whether the enterprise purchases and what products to purchase. When inventory is high, it does not purchase; while inventory is low, it is more inclined to purchase products with low inventory or low risk of disruption. Under the inspection and deferred payment mechanism, with the increase of defective rate, the manufacturer is more inclined to purchase high-quality products and reduce the purchase of low-quality products or even no purchase.

2) The influences of disruption risks. Whether under the inspection or under the deferred payment mechanism, when low-quality products are in stock, the supply disruption risk does not change the manufacturer's purchase decision, but there are more possibilities to purchase from low-quality suppliers under the inspection mechanism. When high-quality products are in stock, as the supply disruption risk increases, under the inspection mechanism, the manufacturer chooses to switch from purchasing low-quality products to high-quality products; however, under the deferred payment mechanism, the manufacturer only purchases from high-quality suppliers. Under regional demand disruption risk, the manufacturer's purchase strategy is consistent with the case of supply disruption risk. The difference is that the increased risk of regional demand disruption reduces the total number of products purchased by the manufacturer, and this risk has a greater impact on the deferred payment mechanism.

3) The influences of inspection accuracy and deferred payment period. Under the inspection mechanism, as long as the inspection accuracy is high enough, the manufacturer tends to purchase from low-quality suppliers regardless of the product inventory. Under the deferred payment mechanism, when the inventory of low-quality products is large, the manufacturer increases the purchase of low-quality products with the extension of the deferred payment period; while the inventory of high-quality products is large, the manufacturer only purchases products from high-quality suppliers despite any change of the deferred payment period.

4) Comparison between the inspection mechanism and the deferred payment mechanism. As the defective rate increases, the manufacturer's profits will decrease, but increasing the inspection accuracy or the deferred payment period can improve the manufacturer's profits. When the supply disruption risk increases, increasing inspection accuracy does not improve the manufacturer's profits, but extending the deferred payment period can.

The contributions of this paper are mainly reflected in the following aspects. First, we established a Markov decision model and investigated the dynamic purchase problem of the supply chain, extending the single-period model to a multi-period model. Second, we described the characteristics of disruption risks under COVID-19, and studied the supplier selection and purchase problems considering supply disruption risk, demand disruption risk and quality risk. Third, we introduced quality control mechanisms in multiple risks, and explored the influences of inspection and deferred payment mechanisms on purchase decisions.

Key words: Supplier selection; Disruption risks; Inspection mechanism; Deferred payment mechanism; Markov process

Received Date: 2021-07-16

Funded Project: The Hunan Provincial Philosophy and Social Science Foundation Youth Project (19YBQ002); The Hunan Natural Science Foundation for Youth (2021JJ40614); The Changsha Philosophy and Social Science Planning Project(2022csskkt100)

* Corresponding author