

灵活条件约束下供应链加工运输优化研究

李瑞康, 何胜学, 贾田峰

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年11月10日; 录用日期: 2024年12月10日; 发布日期: 2024年12月16日

摘要

本文针对农产品加工与运输供应链在复杂市场环境中的灵活性和适应性问题, 提出了一种多层次、多路径供应链优化模型。模型允许供应商直接向消费市场销售或通过制造商二次加工后销售, 以实现资源的动态高效配置。研究引入变分不等式理论, 确保模型在不依赖参数单调性和可微性的条件下, 更真实地反映多层次供应链的复杂性。结合多尺度模型学习算法, 模型实现了资源分配优化和整体成本降低。结果表明, 该模型不仅能够优化供应链资源分配和降低整体成本, 还为复杂约束条件下的农产品供应链优化提供了新的理论框架和解决路径。

关键词

生产优化, 变分不等式, 供应链优化, 农产品供应链

Research on Supply Chain Processing and Transportation Optimization under Flexible Conditional Constraints

Ruikang Li, Shengxue He, Tianfeng Jia

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Nov. 10th, 2024; accepted: Dec. 10th, 2024; published: Dec. 16th, 2024

Abstract

This study addresses the flexibility and adaptability challenges of agricultural product processing and transportation supply chains in complex market environments by proposing a multi-level, multi-path supply chain optimization model. The model allows suppliers to sell directly to consumer markets or through manufacturers for secondary processing, enabling dynamic and efficient

resource allocation. The research introduces variational inequality theory, ensuring that the model realistically captures the complexity of multi-level supply chains without relying on parameter monotonicity or differentiability. Coupled with a multi-scale model learning algorithm, the model achieves optimized resource allocation and reduced overall costs. Results demonstrate that the model not only optimizes resource allocation and reduces costs but also provides a new theoretical framework and solution approach for agricultural supply chain optimization under complex constraints.

Keywords

Production Optimization, Variational Inequality, Supply Chain Optimization, Agricultural Product Supply Chain

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球化经济的复杂环境下，供应链的运作面临着越来越多的挑战，包括国际政治冲突、公共卫生事件和经济波动等因素对资源流动和生产链条的干扰。这些突发因素不仅造成了生产与物流中断，还加剧了供应链的不确定性。尤其是对于易腐产品和农产品的加工与运输环节，供应链的灵活性和韧性成为了关键需求。在供应链网络模型中，传统的链状式结构通常呈现为线性关系，即供应商直接向制造商供货，制造商再将产品销售至消费市场。这种模型强调了供应链各环节之间的顺序流动性，侧重于信息和物资的逐级传递。

现阶段，涉及到供应链网络建模研究都会应用变分不等式模型。Nagurney (1999) [1]在其著作《网络经济学：变分等式方法》中，系统地探讨了使用变分等式方法分析多种网络，如交通、供应链和金融网络的均衡与最优性问题，为网络经济学领域提供了一个全面的理论框架和解决方案。Nagurney [2]构建了一个供应链博弈论网络模型来捕捉劳动力限制，模拟了由于劳动力短缺对供应链网络中的产品流动和企业利润的影响。Nagurney, Besik 和 Yu [3]构建了一个食品供应链网络模型，他们采用了一种网络均衡方法，来处理不同供应链参与者在质量和数量上的竞争策略。Besik, Nagurney 和 Dutta (2023) [4]提出了一个多层供应链网络模型，研究了竞争性农业公司和加工公司在新鲜农产品及其质量方面的竞争行为。何建佳等人(2013) [5]研究了短生命周期产品供应链中的清仓收益共享契约，建立了基于快速反应策略的决策模型，通过理论推导和数值分析比较了在清仓收入共享和不考虑清仓收入共享的两种情境下，供应链的总产量和利润变化；谭晓军等人(2020) [6]提出了一种基于云平台的智造供应链信息协作方案，利用分布式协作模型提升供应链企业间的数据互联与协作效率。Moein Qaisari Hasan Abadi (2024) [7]提出了一种基于区块链的决策框架和动态能源定价模型，以提高智能电网中的供应链弹性，尤其是在能源危机期间。该模型通过美国消费者的实证数据验证其有效性，并表明其在能源中断时降低了总能源成本。Abdollah Babaeinesami 等人(2023) [8]研究了一个在不确定条件下的闭环供应链斯塔克尔伯格博弈，使用了遗传算法(GA)和灰狼优化(GWO)来比较优化效果。Jauhari (2023) [9]提出了一个闭环供应链协调模型，考虑了绿色技术水平、销售价格和促销对市场需求的影响，研究表明，投资绿色技术可以提升财务和环境表现，同时降低排放有助于提高销售量。Ghosh (2023) [10]采用集成的多标准决策方法和多变量分析方法来评估和选择汽车行业的绿色供应商。田刚和齐小雨[11]研究了在突发事件冲击下，企业协同履责

对再制造供应链绩效的影响,发现企业协同履责能够显著提升供应链绩效,而突发事件和供应链文化对这一关系具有调节作用。刘助忠和龚荷英[12]提出了一种基于云计算技术的农产品供应链服务平台,通过虚拟化和整合线上线下资源,实现了农产品供应链的高效整合和创新,从而解决了生产与流通中的分散、实力弱小、市场混乱等问题。冯春、李梦、蒋雪和杨雄[13]研究了在农产品随机产出条件下,结合“农商对接”模式的农产品供应链模型,分析了风险因素对农户和零售商的最优决策和期望收益的影响。何胜学和崔允汀(2023) [14]提出了一种新的变分不等式模型,用于优化多层供应链网络中的均衡状态,并引入了一种称为多尺度模型学习算法的启发式算法来解决非线性规划问题,实现供应链各层级之间的有效决策。赵娴和陈佳豪[15]探讨了如何利用区块链技术优化农产品供应链的信息管理,通过去中心化和信息共享机制,促进供应链的协调与合作,提升农产品供应链的整体效益。梁傲男、王淑云[16]通过构建生鲜农产品的预售静态定价和常规销售动态定价模型,分析了新鲜度、价格及营销努力对消费需求的影响。曹梦菲等人[17]提出了一种考虑节点风险的多式联运网络优化方法,通过引入节点风险测度和多目标优化模型,分析了运输成本与风险的平衡。潘晓飞、张涛[18]构建了一个生鲜品供应链优化决策模型,分析了商超的保鲜努力和定价策略以及合作社的回购补贴对供应链整体效用的影响。朱文英[19]等提出了一种基于 Shapley 值并结合 AHP 法的多式联运收益分配优化模型,考虑了参与方的贡献、风险承担和时间窗约束等因素。

基于此,本文构建了一种创新的多层次、多路径供应链优化模型,允许供应商直接向消费市场销售产品或将产品提供给制造商进行二次加工后再销售。该模型通过变分不等式方法构建平衡条件,使得资源在各节点间实现高效配置,避免了传统模型的单一流动限制。采用多尺度模型学习算法(MMLA)进行求解,实现了算法在复杂供应链网络中的快速收敛,优化了供应链的资源分配和成本控制。最终,实验验证了模型的有效性,显著提升了供应链的适应性和灵活性。

2. 模型构建

2.1. 供应链构建及符号说明

本节构建的供应链网络拓扑结构如图 1 所示。传统链状模型偏重于顺序流动的简化关系,而本文模型则呈现了供应链参与者之间更为复杂和动态的交互,反映了现代供应链中竞争与合作并存的现实特征。

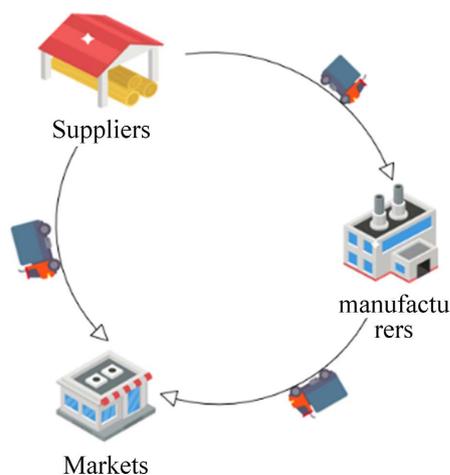


Figure 1. Multi-layer supply chain network topology diagram
图 1. 多层供应链网络拓扑结构图

参数说明及定义:

| | | | |
|------------------|----------------|------------------|-----------------------------------|
| $Q_{k,sold}$ | 农业企业到消费市场的流量 | $P_{i(i,k)}$ | 农业企业到消费市场的出厂价格 |
| $Q_{j,sold}$ | 农业企业到加工企业的流量 | $P_{k(i,k)}$ | 农业企业的产品在消费市场的卖价 |
| Q_{jk} | 加工企业到消费市场的流量 | $P_{l(i,j)}$ | 农业企业到加工企业时的出厂价格 |
| Q_i | 农业企业生产总量 | $P_{j(i,j)}$ | 加工企业购买未加工的产品的价格 |
| $Q_{i,leff}$ | 农业企业自存量 | $P_{j(j,k)}$ | 加工企业卖到消费市场的出厂价格 |
| $Q_{j,leff}$ | 加工企业自存量 | $P_{k(j,k)}$ | 加工企业的产品在消费市场的卖价 |
| γ_e | 农业企业到消费市场的利润率 | i | 第 i 个农业企业, $i = 1, 2, \dots, m$ |
| γ'_e | 农业企业到加工企业的利润率 | j | 第 j 个加工企业, $j = 1, 2, \dots, n$ |
| r_j | 加工企业到消费市场的利润率 | k | 第 k 个需求市场, $k = 1, 2, \dots, l$ |
| $c(p_{ij})$ | 农企到加企的生产成本函数 | $c_{i,leff}$ | 农业企业的存储成本函数 |
| $c(p_{ij1})$ | 农企到加企的固定生产成本函数 | $c_{j,leff}$ | 加工企业的存储成本函数 |
| $c(p_{ij2})$ | 农企到加企的可变生产成本函数 | $c(a_{ij})$ | 农企业加企的平均成本函数 |
| $c_k(f_{ik})$ | 农业企业到消费市场的运输成本 | RT_j | 加工企业加工农产品的转化率 |
| $c_{ij}(f_{ij})$ | 农业企业到加工企业的运输成本 | $c_{jk}(f_{jk})$ | 加工企业到消费市场的运输成本 |
| d_i | 消费市场对农业企业的需求量 | d_j | 消费市场对加工企业的需求量 |

2.2. 模型约束

农业企业 i 与消费市场 k 之间的路径表示为 (i, k) , 路径 (i, k) 上的流量表示为 f_{ik} , 同理, (i, j) 上的流量为 f_{ij} , (j, k) 上的流量为 f_{jk} 。设单位产品运输成本函数为:

$$c_{ik}(f_{ik}) = \begin{cases} a_{ik} f_{ik} + b_{ik} f_{ik}^2 + \varepsilon_{ik} f_{ik}^3 + d_{ik} & \text{if } f_{ik} \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

a_{ik} , b_{ik} , ε_{ik} , d_{ik} 是四个与路径 (i, k) 相关联的给定的系数。同理 $c_{ij}(f_{ij})$ 和 $c_{jk}(f_{jk})$ 的表示方法与此类似。

当路径达到一个平衡状态时, 路径上所有的决策者作出的决策和流程保持不变都应该满足以下不等式:

$$\left(p_{i(i,k)}^* + c_{ik}(f_{ik}^*) - p_{k(i,k)}^* \right) (f_{ik} - f_{ik}^*) \geq 0, \forall (i, k) \quad (2)$$

将此约束条件作为农产品得以向下一个地点运输的前提。

当路径达到平衡状态时, 路径上所有的决策者作出的决策和流程保持不变, 对于加工企业 j 来说, 只要满足:

$$\left(p_{k(j,k)}^* - p_{j(j,k)}^* - c_{jk}(f_{jk}) \right) (f_{jk} - f_{jk}^*) \geq 0, \forall (j, k) \quad (3)$$

以上不等式, 对于农业企业 i 来说便可以进行交易。即由农业企业到消费市场的运输费用由农业企业本身承担。而农业企业到加工企业和加工企业到消费市场的运输费用全部由加工企业承担。只有在有利润空间的前提下, 路径中才会存在流量。

在本模型中还需满足以下模型约束：农业企业到加工企业的生产成本函数表示为：

$$c(p_{ij}) = c(p_{ij1}) + c(p_{ij2}) \quad (4)$$

即生产成本由两部分组成，一部分为平均生产成本函数，另一部分为可变生产成本函数组成。可变生产成本函数表示为：

$$c(p_{ij2}) = a_{ij}Q_{j,sold} + b_{ij}Q_{j,sold}^2 \quad (5)$$

a_{ij} 和 b_{ij} 是与农业企业 i 相关的两个给定的系数。可由总生产成本得出平均生产成本函数：

$$c(a_{ij}) = \frac{c(p_{ij})}{Q_{j,sold}} \quad (6)$$

企业依据自身决策的利润率得出销售价格，表示为：

$$p_{i(i,j)} = c(a_{ij})(1+r'_e) \quad (7)$$

本模型中的价格均由此得出。农业企业、加工企业和消费市场的模型约束不再重复进行约束。其次，农业企业要遵循总量守恒约束。表示为：

$$Q_i = Q_{k,sold} + Q_{j,sold} + Q_{i,left} \quad (8)$$

加工企业生产二次加工的农产品遵循一定转化率，表示为：

$$Q_j = RT_j \cdot Q_{j,sold} \quad (9)$$

2.3. 目标函数

2.3.1. 农业企业利润

农业企业供应链网络均衡模型构建。在构建的农产品加工运输供应链中共包含 m 家农业企业，以农业企业供应商利益最大化为目标，由此建立农业企业 i 的决策模型：

$$\begin{aligned} \max & \left(\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l p_{i(i,k)} Q_{k,sold} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{i(i,j)} Q_{j,sold} \right) - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c(p_{ij}) - \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l c(p_{ik}) - \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l c_{ik}(f_{ik}) - \sum_{i=1}^m c_{i,left} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} Q_{k,sold} \cdot Q_{j,sold} \leq Q_i \\ Q_{k,sold} \cdot Q_{j,sold} \geq 0 \\ i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)为农业企业 i 的利润函数，农业企业 i 的主要收入来源为农业企业生产的农产品与消费市场进行交易时得到的收入 $\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l p_{i(i,k)} Q_{k,sold}$ ，与加工企业进行交易时得到的收入 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{i(i,j)} Q_{j,sold}$ ，同时农业企业支出包含了卖到加工企业的生产成本 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c(p_{ij})$ 和卖到消费市场的生产成本 $\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l c(p_{ik})$ ，同时还需要承担到消费市场的运输成本 $\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l c_{ik}(f_{ik})$ 和自身的存储成本 $\sum_{i=1}^m c_{i,left}$ 。其约束成本为：农业企业 i 到加工企业和消费市场的流量应少于总产量 Q_i 。

2.3.2. 加工企业利润

加工企业网络均衡模型构建。在农产品加工运输供应链网络中共有 n 个加工企业，以加工企业利润最大化为目标，由此可以建立一个加工企业 j 的决策模型：

$$\max \left(\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l p_{j(j,k)} Q_{jk} \right) - \sum_{j=1}^n c(p_j) - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}(f_{ij}) - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l c_{jk}(f_{jk}) - \sum_{j=1}^n c_{j,left}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} Q_{jk} \geq 0 \\ Q_{jk} \leq Q_j \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (11)$$

式(11)为农产品加工运输供应链网络中加工企业 j 的利润函数, 表示加工企业 j 主要的收入来源是卖到消费市场的二次加工的产品的利润收入 $\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l p_{j(j,k)} Q_{jk}$, 加工企业 j 的主要支出包括了其从农业企业 i 购买的农产品原材料和其他生产成本 $\sum_{j=1}^n c(p_j)$, 还需要承担从农业企业 i 运输到加工企业 j 的运输成本 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}(f_{ij})$ 、加工企业 j 到消费市场 k 的运输成本 $\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l c_{jk}(f_{jk})$ 以及其自身存储成本 $\sum_{j=1}^n c_{j,left}$ 。其约束条件为: 运输到消费市场的流量 Q_{jk} 不得高于其生产的产量 Q_j 。

2.3.3. 市场需求

根据空间价格均衡理论, 需求市场 k 的决策模型为:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^l d_i = \sum_{i=1}^m Q_{k,sold} \cdot p_{k(i,k)} > 0 \\ \sum_{k=1}^l d_i \leq \sum_{i=1}^m Q_{k,sold} \cdot p_{k(i,k)} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^l d_j = \sum_{j=1}^n Q_{jk} \cdot p_{k(j,k)} > 0 \\ \sum_{k=1}^l d_j \leq \sum_{j=1}^n Q_{jk} \cdot p_{k(j,k)} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)表示, 在网络均衡条件下, 消费市场对农业企业 i 的需求量应等于所有销售至消费市场的农产品数量, 需求供给需一致。同理, 消费市场对加工企业 j 的需求量应等于所有销售至消费市场的产品数量, 需求供给需一致。

3. 求解算法

3.1. 多尺度模型学习算法基本思想

算法的基本思想是模拟学校班级中学生的学习过程。在一个学习周期内, 学生(学习者)会通过一系列的测试来调整他们的学习行为, 包括模仿成绩优异的学生或根据自身经验进行自我调整。随着时间的推移, 学生的学习经验会趋于一致, 导致学习行为的收敛。在此基础上, MMLA 进一步细化了学习行为的调整, 通过缩小搜索空间和优化学习效率的调整, 促使算法能在后期学习阶段找到更优的解决方案。

3.2. 多尺度模型学习算法操作流程

多尺度模型学习算法的基本操作主要包括两个主要步骤: 学习阶段内的个体学习和缩小搜索空间, 这些操作对于算法导航解决方案空间和优化潜在解决方案的能力至关重要, 模仿了群体中个体通过学习提高性能的过程, 将这一概念应用于解决优化问题。图 2 表示了 MMLA 算法的算法流程图。

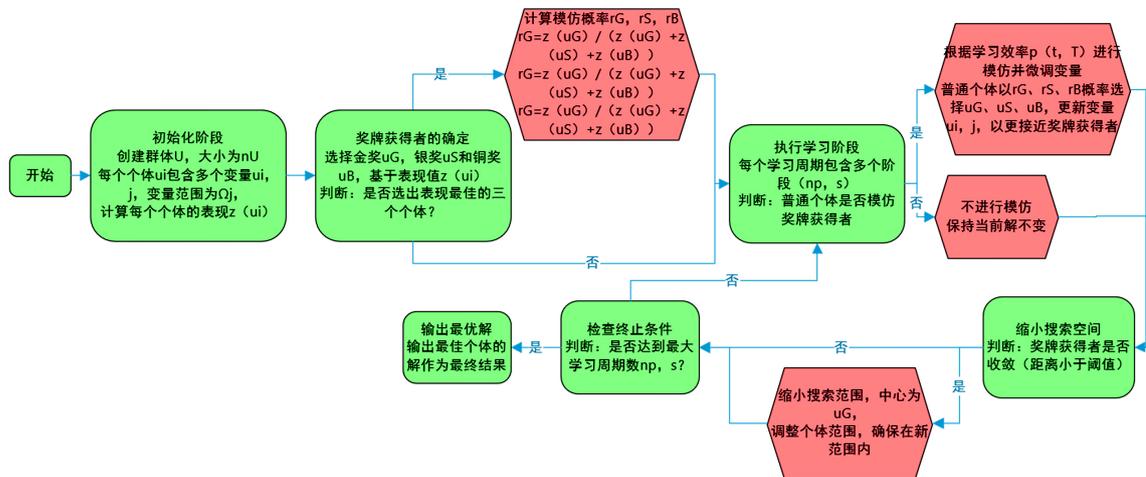


Figure 2. Implementation process of the MMLA algorithm
图 2. MMLA 算法的实施流程

4. 数值实验与分析

在本节中，我们将通过构建一个供应链网络，使用 MMLA 算法进行求解，并进行分析。MMLA 是用 JAVA 实现的，在 IntelliJ IDEA 2024.1 上执行，该算法运行在 Intel(R) Core(TM) i7-1065G7 CPU @ 1.30 GHz~1.50 GHz 的计算机处理器上。

在构建的本供应链网络中由两个农工企业(用 s_1 和 s_2 来表示)、两个制造商(用 p_1 和 p_2 来表示)和两个消费市场(用 m_1 和 m_2 来表示)组成，如图 3 所示。

在本供应链网络中，我们以土豆为例。数据来源于企业内部。农业企业 s_1 和农业企业 s_2 的固定生产成本分别为 20 和 19。与 s_1 和 s_2 有关的一单位产品的持有成本分别为 0.03 和 0.02。 s_1 和 s_2 的未加工农产品的单位交易成本分别为 0.002 和 0.002。农业企业生产原材料的可变生产成本 s_1 中的参数 a_i 和 b_i 分别为 0.02 和 0.000012， s_2 中的参数 a_i 和 b_i 分别为 0.01 和 0.00001。在本案例中，这两家农业企业的最大生产数量 Q_{\max} 设置为 1000。

本案例中包含两个加工企业，加工企业 p_1 的固定生产成本为 46，加工企业 p_2 的固定生产成本为 45。对于 p_1 ，可变生产成本函数参数 a_j 和 b_j 分别为 0.001 和 0.000003；对于 p_2 ，可变生产成本函数参数 a_j 和 b_j 分别为 0.0014 和 0.00004。加工企业 p_1 的加工好的单位产品交易成本为 0.002，加工企业 p_2 的加工好的单位产品交易成本为 0.003，加工企业 p_1 的加工好的产品持有成本为 0.001，加工企业 p_2 的加工好的产品持有成本为 0.001。

消费市场 m_1 中市场定价函数中 b_1 、 c_1 、 f_1 和 g_1 的取值分别为：0.000076、0.0032、0.000045、0.0045，消费市场 m_2 中市场定价函数中 b_2 、 c_2 、 f_2 和 g_2 的取值分别为：0.000079、0.0031、0.000045、0.0042。

运输成本函数中各参数设置取值如下表 1 所示。我们将构建的供应链网络中存在的 12 条路径上允许通过的最大流量设置为 5000。在表 1 中， (i, j) 表示连接决策者 i 和 j 的路径，在供应链网络中我们在相应的路径旁边进行了路径序号的标注。

经过 606 个学习阶段，MMLA 收敛得到最优解，得到的最优目标函数值为 8.969331438083117，整个计算过程耗时为 6948 ms，共包含了三个学习阶段，如图 4，其中第一个学习阶段数为 294 个，第二个学习阶段数为 221 个，第三个学习阶段数为 91 个，从图中可以看出，随着阶段数量的增加，学习阶段的数量会减少，这表明可能需要更少的学习周期，或者在后期阶段提前终止。

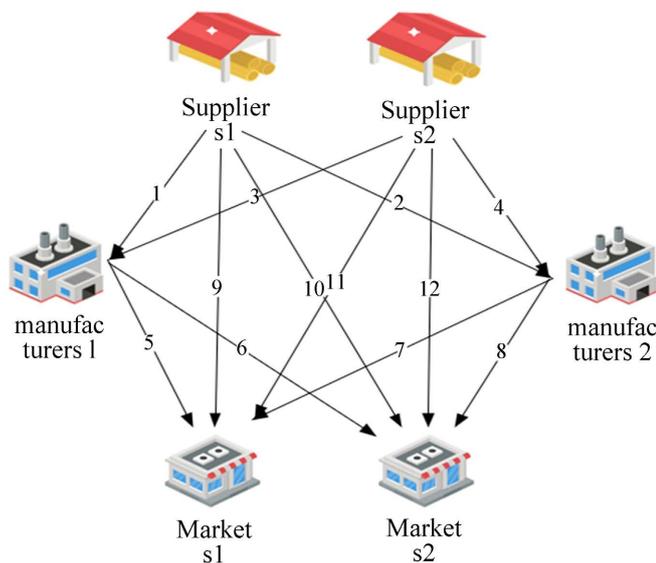


Figure 3. Schematic diagram of the constructed supply chain network topology
图 3. 构建的供应链网络拓扑结构示意图

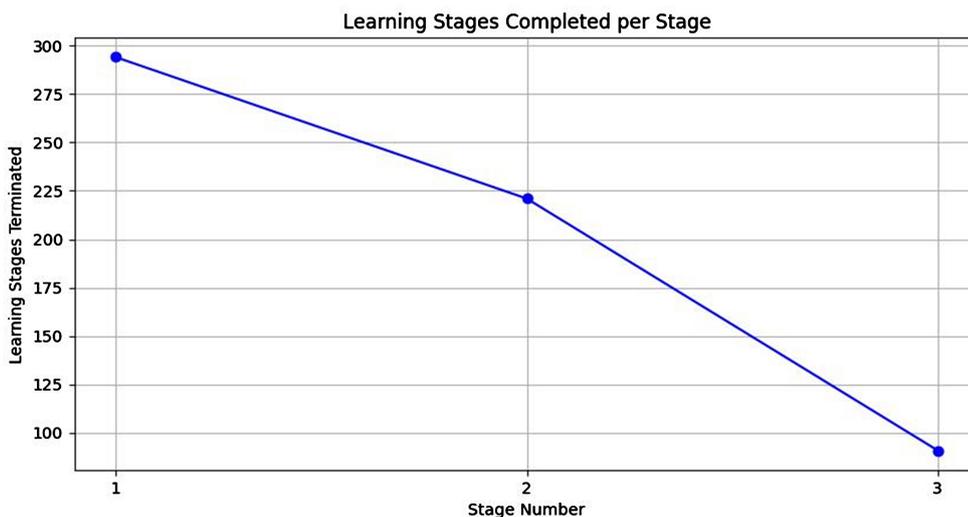


Figure 4. A classic example of spatial data sets
图 4. MMLA 算法三个阶段学习周期分布图

在收敛阶段，三名奖牌获得者在第一阶段、第二阶段和第三阶段适应度变化如图 5 所示，图中曲线表示在三个不同阶段金牌、银牌、铜牌获得者收敛程度不同，但三者成绩都处于一个明显提升的学习趋势，最终达到一个共同的水平，表明经过 606 个学习阶段后，收敛取得了最优解。

在供应链网络中，不同节点的决策者根据算法得出的平衡解如下表所示。表 1 表示在我们构建的供应链网络结构中共 12 条路径经过收敛最后得出了平衡结果。将表 1 中所列出的后面两列数据乘积，可验证是否严格满足供应链模型中提出的不等式约束条件。由结果所示，在加工企业连接消费市场的路径上，还未达到平衡条件，由此得出，加工企业应缩减其运营成本，选择更低的采购价格才能实现其自身利益最大化。

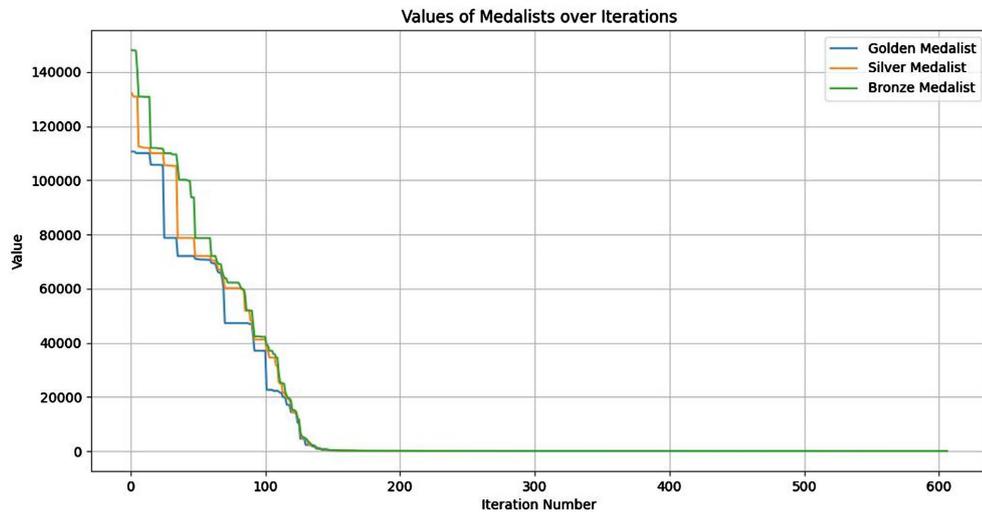


Figure 5. Changes in gold, silver, and bronze over 606 learning stages
图 5. 金牌、银牌、铜牌经过 606 个学习阶段变化

Table 1. Balance results of each path in the supply chain network
表 1. 供应链网络中各条路径平衡结果

| No. (i, j) | $P_{i(i,j)}$ | c_{ij} | $P_{j(i,j)}$ | $P_{j(i,j)} - c_{ij} - P_{i(i,j)}$ | f_{ij} |
|----------------|--------------|----------|--------------|------------------------------------|----------|
| 1 | 29.3287 | 0.0042 | 29.2325 | -0.1005 | 0.5546 |
| 2 | 29.3287 | 0.0050 | 29.2327 | -0.1010 | 0.000 |
| 3 | 29.2285 | 0.0040 | 29.2324 | 0.000 | 0.0008 |
| 4 | 29.2285 | 0.0042 | 29.2327 | 0.000 | 0.5634 |
| 5 | 59.9945 | 0.0044 | 59.9939 | 0.0050 | 0.6583 |
| 6 | 59.9945 | 0.0022 | 59.9967 | 0.0038 | 0.3969 |
| 7 | 59.9918 | 0.0023 | 59.9939 | -0.0073 | 0.6906 |
| 8 | 59.9918 | 0.0051 | 59.9967 | 0.0011 | 0.3798 |
| 9 | 40.0917 | 0.0041 | 39.9999 | -0.0959 | 0.3479 |
| 10 | 40.0917 | 0.0031 | 39.9999 | -0.0948 | 0.0768 |
| 11 | 40.0035 | 0.0050 | 39.9999 | -0.0086 | 0.2266 |
| 12 | 40.0035 | 0.0040 | 39.9999 | -0.0076 | 0.1179 |

经过 606 个学习阶段，我们得出供应链网络中各条路径运费系数取值和各个节点的决策者所达到利益最大化时的平衡结果如表 2、表 3、表 4 和表 5 所示。

Table 2. Freight cost coefficients for each path in the supply chain network
表 2. 供应链网络中各条路径运费系数取值

| No (i, k) | a_{ik} | b_{ik} | ε_{ik} | d_{ik} |
|---------------|----------|----------|--------------------|----------|
| 1 | 0.0007 | 0.00005 | 0.0060 | 0.0040 |
| 2 | 0.0008 | 0.00004 | 0.0060 | 0.0050 |
| 3 | 0.0007 | 0.00003 | 0.0050 | 0.0040 |

续表

| | | | | |
|----|--------|---------|--------|--------|
| 4 | 0.0006 | 0.00005 | 0.0060 | 0.0040 |
| 5 | 0.0008 | 0.00004 | 0.0030 | 0.0040 |
| 6 | 0.0009 | 0.00003 | 0.0030 | 0.0020 |
| 7 | 0.0004 | 0.00005 | 0.0030 | 0.0020 |
| 8 | 0.0005 | 0.00003 | 0.0050 | 0.0050 |
| 9 | 0.0006 | 0.00008 | 0.0040 | 0.0040 |
| 10 | 0.0007 | 0.00005 | 0.0030 | 0.0030 |
| 11 | 0.0005 | 0.00003 | 0.0030 | 0.0050 |
| 12 | 0.0005 | 0.00005 | 0.0035 | 0.0040 |

Table 3. Balance results of agricultural enterprise decision makers**表 3.** 农业企业决策者的平衡结果

| | Q_i | $Q_{k,sold}$ | $Q_{j,sold}$ | $Q_{i,left}$ | $P_{i(i,k)}$ | r_e | $P_{i(i,j)}$ | r'_e |
|---|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|--------------|--------|
| 1 | 0.9945 | 0.4247 | 0.5546 | 0.0152 | 29.3287 | 0.9593 | 29.3287 | 0.4333 |
| 2 | 0.9289 | 0.3444 | 0.5642 | 0.0203 | 29.2285 | 0.9104 | 29.2285 | 0.3959 |

Table 4. Balance results of processing enterprise decision makers**表 4.** 加工企业决策者的平衡结果

| | Q_j | Q_{jk} | $Q_{j,left}$ | $P_{j(i,j)}$ | $P_{k(j,k)}$ | r_j |
|---|--------|----------|--------------|--------------|--------------|--------|
| 1 | 1.0553 | 1.0399 | 0.0154 | 29.2325 | 59.9945 | 0.0167 |
| 2 | 1.0704 | 1.0536 | 0.0168 | 29.2327 | 59.9918 | 0.0441 |

Table 5. Balance results of consumer market decision makers**表 5.** 消费市场决策者的平衡结果

| | d_i | d_j |
|---|--------|--------|
| 1 | 0.5745 | 1.3489 |
| 2 | 0.5088 | 0.7768 |

5. 总结与讨论

在本文中，我们基于变分不等式面向灵活约束条件建立了一个农产品加工运输供应链网络均衡模型，本模型主要对交易环节上的均衡条件进行限制，所有决策者的决策过程可以用定义变分不等式模型的函数来表示，使得建立的模型更加符合现实生活中的条件约束。在算法方面我们使用 MMLA 算法进行模型求解，最终求得符合本模型约束条件的均衡解。

在本文中，我们在农产品加工运输供应链网络中给出的与运输成本、交易成本、可变生产成本等相关的函数可以根据现实中实际情况进行假设，也可以被其他形式的函数所取代，对本文构建的农产品加工运输供应链没有影响。在模型中，我们设定的销售价格与现实世界中也是可取的。现实世界中，一个完整的农产品加工运输供应链网络应该包含了多家供应商、加工商和消费市场，且供应链中包含的农产品也不止一种，模型中的这种假设在现实世界中也并不常见，在本文中，我们仅将表达式进行简化，以便供应链网络的构建。综上所述，本文提出的建模方法在现实世界中是可行且高效的。

变分不等式模型可以解决更为复杂的现实情景，对于其他更为复杂的供应链网络如链状供应链、网状供应链等都可用这种新的变分不等式模型建模，此外，以网络中流量为基础的优化方向也可以利用此模型框架构建更为复杂的变分不等式模型。

参考文献

- [1] Nagurney, A. (1999) *Network Economics: A Variational Equality Approach*. Kluwer Academic Publishers
- [2] Nagurney, A. (2021) Supply Chain Game Theory Network Modeling under Labor Constraints: Applications to the Covid-19 Pandemic. *European Journal of Operational Research*, **293**, 880-891. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.12.054>
- [3] Nagurney, A., Besik, D. and Yu, M. (2018) Dynamics of Quality as a Strategic Variable in Complex Food Supply Chain Network Competition: The Case of Fresh Produce. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, **28**, Article ID: 043124. <https://doi.org/10.1063/1.5023683>
- [4] Besik, D., Nagurney, A. and Dutta, P. (2023) An Integrated Multitiered Supply Chain Network Model of Competing Agricultural Firms and Processing Firms: The Case of Fresh Produce and Quality. *European Journal of Operational Research*, **307**, 364-381. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.07.053>
- [5] 何建佳, 徐福缘, 马庆国, 等. 短生命周期产品供应链清仓收入共享契约研究[J]. 运筹与管理, 2013(5): 62-68.
- [6] 谭晓军, 何建佳, 何胜学. 产业互联网下面向云平台的智造供应链信息协作[J]. 计算机系统应用, 2020, 29(2): 101-106.
- [7] Abadi, M.Q.H., Sadeghi, R., Hajian, A., Shahvari, O. and Ghasemi, A. (2024) A Blockchain-Based Dynamic Energy Pricing Model for Supply Chain Resiliency Using Machine Learning. *Supply Chain Analytics*, **6**, Article ID: 100066. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2024.100066>
- [8] Babaeinesami, A., Ghasemi, P., Abolghasemian, M. and Chobar, A.P. (2023) A Stackelberg Game for Closed-Loop Supply Chains under Uncertainty with Genetic Algorithm and Gray Wolf Optimization. *Supply Chain Analytics*, **4**, Article ID: 100040. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100040>
- [9] Jauhari, W.A., Kamila, N.S. and Laksono, P.W. (2023) A Coordination Model for Closed-Loop Supply Chain Systems with a Single Manufacturer and Retailer. *Supply Chain Analytics*, **4**, Article ID: 100051. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100051>
- [10] Ghosh, S., Bhowmik, C., Sinha, S., Raut, R.D., Mandal, M.C. and Ray, A. (2023) An Integrated Multi-Criteria Decision-Making and Multivariate Analysis Towards Sustainable Procurement with Application in Automotive Industry. *Supply Chain Analytics*, **3**, Article ID: 100033. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100033>
- [11] 田刚, 齐小雨. 突发事件冲击下企业协同履责对再制造供应链绩效的影响[J/OL]. 中国流通经济: 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3664.F.20240812.0913.002.html>, 2024-09-08.
- [12] 刘助忠, 龚荷英. “互联网+”时代农产品供应链演化新趋势——基于“云”的农产品供应链运作新模式[J]. 中国流通经济, 2015, 29(9): 91-97.
- [13] 冯春, 李梦, 蒋雪, 等. 随机产出下双渠道农产品供应链主体决策行为[J]. 综合运输, 2022, 44(4): 103-110, 160.
- [14] He, S. and Cui, Y. (2023) A Novel Variational Inequality Approach for Modeling the Optimal Equilibrium in Multi-Tiered Supply Chain Networks. *Supply Chain Analytics*, **4**, Article ID: 100039. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100039>
- [15] 赵娴, 陈佳豪. 基于区块链技术的农产品供应链信息优化研究[J]. 供应链管理, 2020, 1(3): 23-32.
- [16] 梁傲男, 王淑云. 生鲜农产品两阶段销售动态定价及生产优化[J]. 公路交通科技, 2024, 41(4): 214-222.
- [17] 曹梦菲, 牛志强, 赵南希, 等. 考虑节点风险的多式联运网络优化[J]. 公路交通科技, 2023, 40(S2): 420-426.
- [18] 潘晓飞, 张涛. 考虑损失规避的生鲜品供应链保鲜努力和定价优化[J]. 公路交通科技, 2023, 40(5): 228-236.
- [19] 朱文英, 赵雨, 张红英, 等. 时间窗约束下多式联运企业收益分配优化模型研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(12): 247-254.