

多周期农产品废弃物供应链网络均衡模型构建

夏文汇¹, 肖潼¹, 夏乾尹², 李月思¹

(1.重庆理工大学 管理学院, 重庆 400054;

2.佐治亚州立大学 麦克罗宾逊商学院, 亚特兰大 30303, 美国)

摘要: **目的** 研究农产品废弃物可持续利用问题, 既实现供应链整体利润最优, 又减轻对环境的污染。**方法** 在随机需求的背景下, 考虑生产合作社对零售商的不同激励度, 分析生产合作社、零售商、需求市场的最优状态, 利用变分不等式建立相应的多周期供应链网络均衡模型。**结果** 从多周期角度, 实现了农产品废弃物供应链网络均衡利益最优化, 可为合作社与零售商在较长时间达到一种均衡状态提供有效解决方案。**结论** 既实现了多周期农产品废弃物的持续利用, 又促进了循环经济的发展, 同时还实现了供应链网络均衡、供应链整体利润最优和减轻环境污染等目标。

关键词: 多周期; 供应链网络; 均衡模型; 随机需求; 变分不等式

中图分类号: F304.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)01-0239-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.01.028

Construction of Network Equilibrium Model of Multi-cycle Agricultural Waste Supply Chain

XIA Wenhui¹, XIAO Tong¹, XIA Qianyi², LI Yuesi¹

(1. School of Management, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. MacRobinson School of Business, Georgia State University, Atlanta 30303, USA)

ABSTRACT: The work aims to study the sustainable utilization of agricultural waste, so as to achieve the overall profit optimization of the supply chain while reducing the pollution to the environment. In the context of random demand, considering different incentives of production cooperatives to retailers, the optimal state of production cooperatives, retailers and demand markets was analyzed, and the corresponding multi-period supply chain network equilibrium model was established using variational inequalities. From the perspective of multi-cycle, the balanced benefits of the agricultural waste supply chain network was optimized, which could provide an effective solution for cooperatives and retailers to reach an equilibrium state for a long time in the future. It not only realizes the sustainable utilization value of multi-cycle agricultural waste, but also promotes the development of circular economy. At the same time, it also achieves the goals of balancing the supply chain network, optimizing the overall profit of the supply chain, and reducing environmental pollution.

KEY WORDS: multi-cycle; supply chain network; equilibrium model; random demand; variational inequality

“三农”问题是关系到国计民生的根本性问题^[1], 农产品的生产是农民创收的重要经济来源。农作物在生产过程中会产生大量的废弃物, 对于这些废弃物

的利用程度也会对农业环境产生一定影响。目前, 农产品废弃物的主要用途在于肥料化、饲料化、能源化等^[2]。在肥料化、饲料化及能源化的利用途径上,

收稿日期: 2023-03-01

基金项目: 重庆市社会科学规划研究项目 (2020YBGL72); 重庆市社会科学规划重点研究项目 (2017ZDYY17); 重庆理工大学研究生教育高质量发展行动计划研究生科研创新校级联合项目 (gzlxx2023451)

研究供应链网络均衡不仅对生产合作社（或农民）有着增收的好处，还可为农产品供应链上的其他节点企业创造价值，同时可减轻因废弃物治理效率低下造成的环境污染。有部分学者从包装角度出发进行了研究，如刘翔等^[3]认为，当前农产品绿色可持续设计理念存在误区，普遍认为纸质包装就是绿色设计，设计师的理念也出现了偏差，提出要调整设计师的心理，引导用户循环使用农产品包装，采用持续的垃圾处理方式。可见，研究此类问题有着现实意义。

针对供应链网络均衡的研究，最先由 Nagurney 团队^[4-5]分析了供应链网络中各成员的决策行为及目标后提出了市场网络均衡概念，接着 Nagurney 等^[6-7]又考虑了运输因素和风险因素，进一步拓展了供应链网络均衡模型。滕春贤等^[8]首次建立了具有随机需求的多商品流供应链网络均衡模型。目前的研究主要以某些因素介入建立供应链网络均衡模型为主，例如随机需求^[9-10]、信息不对称^[11]、贸易政策^[12]等因素。研究农产品废弃物的相关文献较少，尤其是针对农产品废弃物供应链网络均衡模型的构建。如何科学、合理地从供应链均衡的视角研究农产品及其废弃物问题，实现农产品废弃物供应链网络的均衡性和利润最优是当前研究的重要课题。

1 文献述评

农产品供应链作为农产品重要的载体^[13]，不仅需要考虑整体的经济可持续性，还要考虑环境可持续性、社会可持续性，谋求整体的最优平衡。有学者从博弈论的角度出发进行了研究，霍红等^[14]从区块链角度出发，建立了农产品供应商与加工者的演化博弈模型；覃燕红等^[15]从天气影响角度出发，建立了公司主导的 Stacklbery 模型，以研究农产品供应链。也有学者基于多元化角度对农产品供应链进行了研究分析，例如：周冬娥^[16]从乡村振兴的角度对农产品供应链进行了风险分析；陈科^[17]从金融科技背景角度对农产品供应链数字化进行了研究。

在农产品逆向物流的研究中，庄乾茜等^[18]认为，我国农产品的流通成本大、货损率大、价值链优化水平低下。由此，从价值链最优理念出发，尝试构建了农产品逆向物流体系，以提升农产品流通现代化水平。韩强、梦溪^[19]认为，我国农产品逆向物流水平整体较落后，提出应以循环经济为核心，加强资源的高效利用和循环利用。费威^[20]、段彩泉等^[21]都从补贴角度出发，分别运用博弈论和变分不等式建立了数学模型，探索了不同补贴下农产品废弃物回收模式，为我国农产品废弃物的有效回收提供了对策。

目前，大多数学者基于农产品供应链或供应链网络均衡模型进行了研究。在模型的架构中，大多数文献仍以静态为主，鲜有涉及动态的供应链网络均衡模型。由此，文中提出多周期农产品废弃物可持续供应

链网络均衡，利用变分不等式建立一个通俗易懂、符合实际的模型。此模型的建立可有效提升供应链上的农产品合作社（或农民）及其他节点企业快速响应市场需求的能力，同时也可减轻环境污染。由于废弃物可在多周期进行回收利用，因此整个供应链网络会形成良性循环，不断推动供应链向前发展。

2 问题描述及其假设

以三级供应链网络为模型，设有 M 个生产合作社（记作 $m, m=1, 2, \dots, M$ ）、 N 个零售商（记作 $n, n=1, 2, \dots, N$ ）、 D 个需求市场（记作 $d, d=1, 2, \dots, D$ ）。同时，在多周期条件下进行研究，因此有 T 个周期（记作 $t, t=1, 2, \dots, T$ ）。每层成员都是非合作竞争关系，每层成员的目标是实现自身经济利益的最大化。为了方便研究，作出如下假设。

1) 农产品废弃物的产生由生产合作社及从零售商回收来的产品组成。废弃物内容为秸秆、畜禽粪污、包装回收物等可以重新利用到农业中的资源。

2) 生产合作社回收来的产品无法重新卖给零售商，因此只能加工为农田资源。

3) 农产品的成长环境在多周期内保持一致，且合作社回收制造设备与技术在未来一段时间内保持不变。

4) 由于生产合作社激励零售商购买，因此零售商不存在缺货情况。

3 模型构建

3.1 生产合作社的最优行为与均衡条件

为了描述生产合作社的行为，对变量进行解释，与生产合作社相关的变量解释如下。 $q_m^1(t)$ ： t 周期内合作社需要的农产品原材料数量， $Q_M^1(T) \in R_+^{MT}$ 。 $q_m^2(t)$ ： t 周期内合作社从农田回收的废弃物数量， $Q_M^2(T) \in R_+^{MT}$ 。 $q_{mn}^1(t)$ ： t 周期内合作社与零售商的交易数量， $Q_{MN}^1(T) \in R_+^{MNT}$ 。 $q_{mn}^2(t-1)$ ： $t-1$ 周期内合作社从零售商回收而来的农产品数量， $Q_{MN}^2(T-1) \in R_+^{MNT}$ 。 $p_{mn}^1(t)$ ： t 周期内合作社给零售商制定的批发价格。 $p_{mn}^2(t-1)$ ： $t-1$ 周期内合作社制定的回收价格。 ξ ：单位农产品成长所需的成本。 μ ：合作社对零售商的购买激励度。 $\alpha(q_m^2(t), \sum_{n=1}^N q_{mn}^2(t-1))$ ：废弃物回收制造后为单位农产品创造的价值。 γ ：农田废弃物的单位回收成本。 $C_m^1(t)(q_m^1(t))$ ： t 周期内合作社采购农产品原材料的成本。 $C_m^2(t)(q_m^2(t))$ ： t 周期内合作社将从农田得到的废弃物转化为资源的成本。 $C_{mn}^2(t-1)(q_{mn}^2(t-1))$ ： $t-1$ 周期内合作社将回收废弃物转化为资源的成本。 $C_{mn}^{11}(t)(q_{mn}^1(t))$ ： t 周期内合作社将农产品运至零售商的运输成本。 $C_{mn}^{12}(t)(q_{mn}^1(t))$ ： t 周期

内合作社将农产品运至零售商的保鲜成本。 $\pi_m(t)$: 农村合作社在 t 周期内的利润函数。收益组合:

$$(1-\mu)p_{mn}^1(t) \cdot q_m^1(t) \text{。成本组合: } (\xi - \alpha(q_m^2(t), \sum_{n=1}^N q_{mn}^2(t-1))) \cdot q_m^1(t) + \gamma \cdot q_m^2(t) + p_{mn}^2(t-1) \cdot q_m^2(t-1) + C_m^1(t)(q_m^1(t)) + C_m^2(t)(q_m^2(t)) + C_{mn}^{11}(t)(q_{mn}^1(t)) + C_{mn}^{12}(t)(q_{mn}^1(t)) + C_{mn}^2(t-1)(q_{mn}^2(t-1)) \text{。}$$

生产合作社的利润函数由上述收益与成本构成, 由此可以得出 t 周期内生产合作社的利润函数, 见式(1)~(2)。

$$\pi_m(t) = \sum_{t=1}^T \{ \sum_{n=1}^N (1-\mu)p_{mn}^1(t) \cdot q_m^1(t) - (\xi - \alpha(q_m^2(t), \sum_{n=1}^N q_{mn}^2(t-1))) \cdot q_m^1(t) - \gamma \cdot q_m^2(t) - \sum_{n=1}^N p_{mn}^2(t-1) \cdot q_m^2(t-1) - C_m^1(t)(q_m^1(t)) - C_m^2(t)(q_m^2(t)) - \sum_{n=1}^N C_{mn}^{11}(t)(q_{mn}^1(t)) - \sum_{n=1}^N C_{mn}^{12}(t)(q_{mn}^1(t)) - \sum_{n=1}^N C_{mn}^2(t-1)(q_{mn}^2(t-1)) \} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{n=1}^N q_m^1(t) \geq q_m^2(t) \quad (2)$$

式(2)表明, 生产合作社在 t 周期内的销售数量应大于在 t 周期内从农田回收来的废弃物总量。设 $\lambda(t)$ ($\lambda(t) \in R_+^{MT}$) 为式(2)的拉格朗日乘子。假设生产合作社的成本均为连续可微凸函数, 求其利润最大化的均衡条件转化为式(3)的变分不等式, 即求解 $(Q_M^1(T), Q_M^2(T), Q_{MN}^2(T-1), Q_{MN}^1(T), \lambda^*(t)) \in R_+^{3MT+2MNT}$ 。

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T [(\mu-1)p_{mn}^1(t) + \frac{\partial C_{mn}^{11}(t)(q_{mn}^1(t))}{\partial q_{mn}^1(t)} + \frac{\partial C_{mn}^{12}(t)(q_{mn}^1(t))}{\partial q_{mn}^1(t)} - \lambda^*(t)] \cdot [q_{mn}^1(t) - q_{mn}^1(t)] + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T [(\xi - \alpha(q_m^2(t), \sum_{n=1}^N q_{mn}^2(t-1))) + \frac{\partial C_m^1(t)(q_m^1(t))}{\partial q_m^1(t)}] \cdot [q_m^1(t) - q_m^1(t)] + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T [-\frac{\partial \alpha(q_m^2(t), \sum_{n=1}^N q_{mn}^2(t-1))}{\partial q_m^2(t)} \cdot q_m^1(t) + \gamma + \frac{\partial C_m^2(t)(q_m^2(t))}{\partial q_m^2(t)} + \lambda^*(t)] \cdot [q_m^2(t) - q_m^2(t)] + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T [-\frac{\partial \alpha(q_m^2(t), \sum_{n=1}^N q_{mn}^2(t-1))}{\partial q_{mn}^2(t-1)} \cdot q_m^1(t) + p_{mn}^2(t-1) + \frac{\partial C_{mn}^2(t-1)(q_{mn}^2(t-1))}{\partial q_{mn}^2(t-1)}] \cdot [q_{mn}^2(t-1) - q_{mn}^2(t-1)] + \\ & [\lambda(t) - \lambda^*(t)] \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)的第1项可得式(4), 由式(3)的第3项可得式(5)。

$$p_{mn}^1(t) = \frac{1}{1-\mu} [\frac{\partial C_{mn}^{11}(t)(q_{mn}^1(t))}{\partial q_{mn}^1(t)} + \frac{\partial C_{mn}^{12}(t)(q_{mn}^1(t))}{\partial q_{mn}^1(t)} - \lambda^*(t)] \quad (4)$$

$$\lambda^*(t) = \frac{\partial \alpha(q_m^2(t), \sum_{n=1}^N q_{mn}^2(t-1))}{\partial q_m^2(t)} \cdot q_m^1(t) - \gamma - \frac{\partial C_m^2(t)(q_m^2(t))}{\partial q_m^2(t)} \quad (5)$$

将式(5)带入式(4), 可得到影响批发价格的因素, 见式(6)。

$$p_{mn}^1(t) = \frac{1}{1-\mu} [\frac{\partial C_{mn}^{11}(t)(q_{mn}^1(t))}{\partial q_{mn}^1(t)} + \frac{\partial C_{mn}^{12}(t)(q_{mn}^1(t))}{\partial q_{mn}^1(t)} + \frac{\partial C_m^1(t)(q_m^2(t))}{\partial q_m^2(t)} + \gamma - \frac{\partial \alpha(q_m^2(t), \sum_{n=1}^N q_{mn}^2(t-1))}{\partial q_m^2(t)} \cdot q_m^1(t)] \quad (6)$$

由式(6)可知, 批发价格受到激励度、边际运输成本、边际保鲜成本、单位农田废弃物成本等因素的影响。当批发价格与上述成本相等时, 交易才会产生, 否则这种交易不存在。

3.2 零售商的最优行为与均衡条件

对零售商相关的变量解释如下。 $p_{nd}^1(t)$: t 周期内零售商与需求市场的交易价格, 即零售价格。 $q_{nd}^1(t)$: t 周期内零售商与需求市场的交易数量, $Q_{ND}^1(T) \in R_+^{NDT}$ 。 $C_{nm}^{21}(t-1)(q_{mn}^2(t-1))$: $t-1$ 周期内零售商将多余农产品运至合作社的运输成本。 $C_{nd}^{31}(t)(q_{nd}^1(t))$: t 周期内零售商将农产品运至需求市场的运输成本。 $C_{nd}^{32}(t)(q_{nd}^1(t))$: t 周期内零售商将农产品运至需求市场的保鲜成本。 $\pi_n(t)$: t 周期内零售商的利润函数。收益: $q_{nd}^1(t) \cdot p_{nd}^1(t) + p_{mn}^2(t-1) \cdot q_{mn}^2(t-1)$ 。成本: $C_{nm}^{21}(t-1)(q_{mn}^2(t-1)) + C_{nd}^{31}(t)(q_{nd}^1(t)) + C_{nd}^{32}(t)(q_{nd}^1(t)) + (1-\mu) \cdot p_{mn}^1(t) \cdot q_{mn}^1(t)$ 。

零售商的利润函数由收益组合函数和成本组合函数构成, 因此可知零售商在 t 周期内得到的利润, 见式(7)。

$$\pi_n(t) = \sum_{t=1}^T [\sum_{d=1}^D q_{nd}^1(t) \cdot p_{nd}^1(t) + \sum_{m=1}^M p_{mn}^2(t-1) \cdot q_{mn}^2(t-1) - \sum_{m=1}^M C_{nm}^{21}(t-1)(q_{mn}^2(t-1)) - \sum_{d=1}^D C_{nd}^{31}(t)(q_{nd}^1(t)) - \sum_{d=1}^D C_{nd}^{32}(t)(q_{nd}^1(t)) - \sum_{m=1}^M (1-\mu) \cdot p_{mn}^1(t) \cdot q_{mn}^1(t)] \quad (7)$$

$$\text{s.t. } \sum_{d=1}^D q_{nd}^1(t) \leq \sum_{m=1}^M q_{mn}^1(t) \quad (8)$$

式(8)表示零售商进行销售的总量不能超过合作社销售给零售商的总量。设 $\varphi(t)$ ($\varphi(t) \in R_+^{NT}$)为式(8)的拉格朗日乘子,假设零售商的成本为连续可微凸函数。若要得到利润最大化的均衡条件,则求式(9)的变分不等式,寻求一组解 $(Q_{ND}^*(T), Q_{MN}^*(T), Q_{MN}^{2*}(T-1), \phi^*(t)) \in R_+^{NDT+2MNT+NT}$ 。

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D [-p_{nd}^*(t) + \frac{\partial C_{nd}^{31}(t)(q_{nd}^*(t))}{\partial q_{nd}^1(t)} + \frac{\partial C_{nd}^{32}(t)(q_{nd}^*(t))}{\partial q_{nd}^1(t)} + \\ & \phi^*(t) \cdot [q_{nd}^1(t) - q_{nd}^*(t)] + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M [(1-\mu) \cdot \\ & p_{mn}^*(t) - \phi^*(t)] \cdot [q_{mn}^1(t) - q_{mn}^*(t)] + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M [q_{mn}^1(t) - \\ & \sum_{d=1}^D q_{nd}^1(t)] \cdot [\phi(t) - \phi^*(t)] + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M [-p_{mn}^{2*}(t-1) + \\ & \frac{\partial C_{mn}^{21}(t-1)(q_{mn}^{2*}(t-1))}{\partial q_{mn}^2(t-1)}] \cdot [q_{mn}^2(t-1) - q_{mn}^{2*}(t-1)] \geq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

根据式(9)的前1、2项可得式(10),即零售商的销售价格需与需求市场的边际运输成本、边际保鲜及批发价格有关。当销售价格与需求市场的边际运输成本、边际保鲜成本及批发价格达成某种平衡时交易才会产生,否则此交易不存在。平衡条件如(10)所示。

$$p_{nd}^*(t) = \frac{\partial C_{nd}^{31}(t)(q_{nd}^*(t))}{\partial q_{nd}^1(t)} + \frac{\partial C_{nd}^{32}(t)(q_{nd}^*(t))}{\partial q_{nd}^1(t)} + (1-\mu)p_{mn}^*(t) \quad (10)$$

3.3 需求市场的最优行为及其均衡条件

需求市场从零售商处购买农产品,其期望价格须等于支付农产品的零售价格,需求市场的需求也与价格相关。为了研究方便,假设需求市场的需求量是关于价格的递减函数,即价格越高,则需求量越少;价格越低,则需求量越大。这符合生活实际。 $q_d(t)(p_d(t))$: t 周期内需求市场的期望需求量。 $p_d(t)$: t 周期内需求市场的期望价格。 $P_d(T) \in R_+^{DT}$ 。

根据空间价格理论,可以得到式(11)~(12)。

$$p_{nd}^*(t) \begin{cases} = p_d^*(t) & q_{nd}^*(t) \geq 0 \\ \geq p_d^*(t) & q_{nd}^*(t) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$q_d(p_d^*(t)) \begin{cases} = \sum_{n=1}^N q_{nd}^*(t) & p_d^*(t) \geq 0 \\ \leq \sum_{n=1}^N q_{nd}^*(t) & p_d^*(t) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

根据变分不等式及与互补条件的等价性,当需求市场的价格可以弥补销售商的销售价格时,需求市场达到最优状态。此时,假定需求与供给保持平衡状态,由此可得到变分不等式,见式(13)。

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \sum_{d=1}^D [p_{nd}^*(t) - p_d^*(t)] \cdot [q_{nd}^1(t) - q_{nd}^*(t)] + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^N [q_{nd}^*(t) - q_d(p_d^*(t))] \cdot [p_d(t) - p_d^*(t)] \geq 0 \end{aligned} \quad (13)$$

4 多周期农产品可持续供应链网络模型

系统中的农产品交易数量及交易价格需满足各层成员、需求市场的均衡条件,生产合作社销往零售商的农产品数量需要与零售商的接受量一致。生产合作社的产量、零售商的农产品销量、需求市场的需求价格应当满足变分不等式(3)、(7)、(13),将这3个公式相加,获得多周期农产品可持续供应链网络模型。若要找到多周期农产品可持续供应链网络的均衡条件,则寻求一组最优解, $[Q_{MN}^*(T), Q_{MN}^{2*}(T-1), Q_{ND}^*(T), Q_M^*(T), Q_M^{2*}(T), P_D^*(T), \lambda^*(t), \phi^*(t)] \in R_+^{2MNT+NDT+3MT+DT+NT} = \Omega$, 其中 Ω 为空间集,使其满足式(14)。

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T [\frac{\partial C_{mn}^{11}(t)(q_{mn}^*(t))}{\partial q_{mn}^1(t)} + \frac{\partial C_{mn}^{12}(t)(q_{mn}^*(t))}{\partial q_{mn}^1(t)} - \\ & \lambda^*(t) - \phi^*(t)] \cdot [q_{mn}^1(t) - q_{mn}^*(t)] + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T [\frac{\partial C_{mn}^{21}(t-1)(q_{mn}^{2*}(t-1))}{\partial q_{mn}^2(t-1)} + \frac{\partial C_{mn}^{22}(t-1)(q_{mn}^{2*}(t-1))}{\partial q_{mn}^2(t-1)} - \\ & \frac{\partial \alpha(q_m^2(t), \sum_{n=1}^N q_{mn}^{2*}(t-1))}{\partial q_m^2(t-1)} \cdot q_m^*(t)] \cdot [q_m^2(t-1) - q_m^{2*}(t-1)] + \\ & \sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T [\frac{\partial C_{nd}^{31}(t)(q_{nd}^*(t))}{\partial q_{nd}^1(t)} + \frac{\partial C_{nd}^{32}(t)(q_{nd}^*(t))}{\partial q_{nd}^1(t)} + \phi^*(t) - p_d^*(t)] \cdot \\ & [q_{nd}^1(t) - q_{nd}^*(t)] + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T [\xi - \alpha(q_m^2(t), \sum_{n=1}^N q_{mn}^{2*}(t-1)) + \\ & \frac{\partial C_m^1(t)(q_m^*(t))}{\partial q_m^1(t)}] \cdot [q_m^1(t) - q_m^*(t)] + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T [\frac{\partial C_m^2(t)(q_m^{2*}(t))}{\partial q_m^2(t)} + \end{aligned} \quad (14)$$

$$\gamma + \lambda^*(t) - \frac{\partial \alpha(q_m^2(t), \sum_{n=1}^N q_{mn}^{2*}(t-1))}{\partial q_m^2(t)} \cdot q_m^*(t)] \cdot [q_m^2(t) - q_m^{2*}(t)] +$$

$$\begin{aligned} & \sum_{d=1}^D \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T [\sum_{n=1}^N q_{nd}^*(t) - q_d(t)(p_d^*(t))] \cdot [p_d(t) - p_d^*(t)] + \\ & \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M [q_{mn}^*(t) - \sum_{d=1}^D q_{nd}^*(t)] \cdot [\phi(t) - \phi^*(t)] + \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N [q_{mn}^*(t) - q_m^{2*}(t)] \cdot [\lambda(t) - \lambda^*(t)] \geq 0 \end{aligned}$$

证明:将式(3)、(7)、(13)3个变分不等式相加,化简内生变量 $p_{mn}^1(t)$ 、 $p_{nd}^1(t)$ 。由于过程较简单,考虑到文章篇幅,这里不再叙述。

由前文可知, $p_{mn}^1(t)$ 、 $p_{nd}^1(t)$ 与边际保鲜成本、边际运输成本、合作社对零售商的激励度等有关。由此可知,在不同激励度条件下,该供应链会处于新的均衡状态。虽然在式(14)中并未表现出激励度对公式的影响,但是由于激励度改变了批发价格和销售价格,必然会对整个供应链产生影响。也可根据这个变化来研究现实中的回购问题。

5 算例分析

基于笔者前期项目涉及的样本代表性和算例分析数据可靠性, 考虑 A 公司生产合作社对零售商的不同激励度, 进一步细化生产合作社、零售商、需求市场的最优状态。经过综合平衡面板数据处理和模型构建的变量设置, 结合文中研究模型和案例分析实际, 首先设置 2 个生产合作社、2 个零售商、2 个需求市场。为了保证数值符合一定区间, 采用参考文献[21]的方法对相关函数进行定义, 见式(15)。

$$\begin{aligned} \alpha(q_m^2(t), \sum_{n=1}^N q_{mn}^2(t-1)) &= 0.002[q_m^2(t)]^2 + 0.003[q_{mn}^2(t-1)]^2 \\ C_m^1(t)(q_m^1(t)) &= 0.2[q_m^1(t)]^2 + 0.1q_m^1(t)C_m^2(t)(q_m^2(t)) \\ &= 0.05[q_m^2(t)]^2 + 0.1q_m^2(t) \\ C_{mn}^2(t-1)(q_{mn}^2(t-1)) &= 0.05[q_{mn}^2(t-1)]^2 + 0.05q_{mn}^2(t-1) \\ C_{mn}^{11}(t)(q_{mn}^1(t)) &= 0.15[q_{mn}^1(t)]^2 + 0.2q_{mn}^1(t) \\ C_{mn}^{12}(t)(q_{mn}^1(t)) &= 0.1[q_{mn}^1(t)]^2 + 0.3q_{mn}^1(t) \\ C_{mn}^{21}(t-1)(q_{mn}^2(t-1)) &= 0.5[q_{mn}^2(t-1)]^2 + q_{mn}^2(t-1) + 0.1 \\ C_{nd}^{31}(t)(q_{nd}^1(t)) &= 0.1[q_{nd}^1(t)]^2 + q_{nd}^1(t) + 0.2 \\ C_{nd}^{32}(t)(q_{nd}^1(t)) &= 0.1[q_{nd}^1(t)]^2 + q_{nd}^1(t) + 0.3 \\ q_d(t)(p_d(t)) &= 45 - 2.5p_d(t) - p_{3-d}(t) \end{aligned} \quad (15)$$

利用投影算法对算式进行分析, 其中设置迭代步长 $g=0.001$, 终止条件 $e=10^{-6}$ 。其他参数设置: $\gamma=0.1$, $\xi=0.1$ 。将激励度 μ 依次设置为 0、0.1、0.2。此过程需利用编程软件进行计算。算法可简化为如下步骤。

1) 选定一初始点 $X^{(0)} \in \Omega$, 确定精度 $\varepsilon > 0$, 确定迭代步长 g , 令 $k=0$ 。

2) 计算 $X^{(k+1)}$, $X^{(k+1)} = \arg \min_{X \in \Omega} \left\{ \frac{1}{2} X^T \cdot X - [X^{(k)} + aF(X^{(k)})]^T \cdot X \right\}$ 。

3) 计算 $\|X^{(k+1)} - X^{(k)}\|$ 与 ε 的关系。若 $\|X^{(k+1)} - X^{(k)}\| \leq \varepsilon$, 那么 $X^{(k+1)}$ 便是式(14)的解, 否则转入步骤 2), 如此循环往复, 直到满足 $\|X^{(k+1)} - X^{(k)}\| \leq \varepsilon$, 获得最优解。

6 结语

1) 通过农产品废弃物回收资源化来激发供应链活力。文中的农产品废弃物种类包含了秸秆、畜禽污粪等具有较高可降解性的物质, 将转化的资源作为农产品生长的新动力, 在一定程度上减轻了环境压力, 并且减少了资源浪费, 实现了农产品供应链网络的循环发展与良性运作。目前, 我国农产品废弃物的处理还处于较低水平, 整体回收率较低, 资源尚未得到较

好的利用, 经济效益较低。研究农产品废弃物回收的新发展模式, 通过企业的积极参与使得资源在供应链网络内部循环, 还可得到政府的关注, 促使政府制定较详细的法律法规, 双方参与合作, 使供应链网络运行更加健康。

2) 积极的回收活动有利于提升正向物流效率。正向物流与回收活动互相作用, 农产品的正向物流往往影响着回收活动的进行, 在正向物流活力较高时, 回收活动的活力也相对较高, 也会不断增强正向物流的生命力。由此可见, 通过积极的回收活动方式提升正向物流效率, 以多批发多周期为视角, 保证随机需求市场的条件下, 将不需要的农产品及由此产生的废弃物进行回收, 减少了前期的产品生产成本。既提高了正向物流的效率, 又最大程度地减少了废弃物对环境的危害。

3) 大力促进农产品供应链网络循环经济的发展。农产品供应链网络均衡模型既包含多个协同层次企业, 又涵盖了多周期不同层级的供应链。随着均衡模型的普及, 以及在实际中的推广应用, 最大程度地激发市场需求, 有效实施农产品扩大内需战略。多措并举, 缓解农产品正向物流和废弃物回收物流的压力, 增强农产品废弃物供应链网络循环经济的内生动力, 有利于充分平衡农产品财政政策、投资政策和市场需求的关系, 积极引导多方面资金投向农产品供应链网络建设, 促进农产品整体市场的供应链和循环经济高质量发展。

借助变分不等式构建多周期农产品废弃物可持续供应链网络均衡, 从长远角度出发, 协调了生产合作社与零售商的关系, 并充分考虑了废弃物的回收途径, 达到了供应链利润最大化, 减轻了环境污染, 进一步优化了农产品废弃物供应链网络均衡及其算法设计。

参考文献:

- [1] 胡春华. 以习近平总书记关于“三农”工作的重要论述为指引 奋力开创全面推进乡村振兴新局面[J]. 农村工作通讯, 2022(15): 4-7.
HU C H. The Important Discussion on the Work of "Agriculture, Rural Areas and Farmers" is to Create a New Situation for Comprehensively Promoting Rural Revitalization[J]. Rural Work Communication 2022(15): 4-7.
- [2] 李冬霞. 农业废弃物由“废”变“宝”助力农业绿色、可持续发展[J]. 蔬菜, 2020(7): 1-10.
LI D X. Agricultural Wastes Change from "Waste" to "Treasure" to Help the Green and Sustainable Develop-

- ment of Agriculture[J]. *Vegetables*, 2020(7): 1-10.
- [3] 刘翔, 何人可, 季铁. 基于精准农业的农产品绿色可持续设计研究[J]. *包装工程*, 2021, 42(8): 328-333.
- LIU X, HE R K, JI T. Agricultural Green Sustainable Design Based on Precision Agriculture[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(8): 328-333.
- [4] NAGURNEY A, ZHANG D. Dynamics of a Transportation Pollution Permit System with Stability Analysis and Computations[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2001, 6(4): 243-268.
- [5] NAGURNEY A, ZHANG D, DONG J E. Spatial Economic Networks with Multicriteria Producers and Consumers: Statics and Dynamics[J]. *The Annals of Regional Science*, 2002, 36(1): 79-105.
- [6] NAGURNEY A, CRUZ J, DONG J E, et al. Supply Chain Networks, Electronic Commerce, and Supply Side and Demand Side Risk[J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 164(1): 120-142.
- [7] NAGURNEY A, MATSYPURA D. Global Supply Chain Network Dynamics with Multicriteria Decision-Making under Risk and Uncertainty[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2005, 41(6): 585-612.
- [8] 滕春贤, 姚锋敏, 胡宪武. 具有随机需求的多商品流供应链网络均衡模型的研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2007, 27(10): 77-83.
- TENG C X, YAO F M, HU X W. Study on Multi-Commodity Flow Supply Chain Network Equilibrium Model with Random Demand[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2007, 27(10): 77-83.
- [9] 段彩泉, 姚锋敏, 滕春贤. 随机需求下考虑广告遗忘效应的多周期闭环供应链网络均衡[J]. *运筹与管理*, 2023, 32(2): 29-37.
- DUAN C Q, YAO F M, TENG C X. Multi-Period Closed-Loop Supply Chain Network Equilibrium Considering Advertising Forgetting Effect under Random Demand[J]. *Operations Research and Management Science*, 2023, 32(2): 29-37.
- [10] 周晓阳, 曹文静, 符皓然, 等. 随机需求下考虑产品替代的跨国供应链网络均衡决策[J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(11): 2853-2868.
- ZHOU X Y, CAO W J, FU H R, et al. Cross-National Supply Chain Network Equilibrium Decision of Considering Product Substitution under Stochastic Demand[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2022, 42(11): 2853-2868.
- [11] 杨玉香, 刘秀磊, 管倩, 等. 信息不对称下碳限额政策对供应链网络均衡的影响[J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(9): 3009-3017.
- YANG Y X, LIU X L, GUAN Q, et al. Impact of Carbon Cappolicy on Supply Chain Network Equilibrium under Information Asymmetry[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2022, 28(9): 3009-3017.
- [12] 周晓阳, 曹文静, 冯平平, 等. 多贸易政策影响下的跨区域供应链网络均衡策略[J]. *管理工程学报*, 2023, 37(1): 200-215.
- ZHOU X Y, CAO W J, FENG P P, et al. The Strategies of Inter-Regional Supply Chain Network Equilibrium under the Impact of Multi-Trade Policies[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2023, 37(1): 200-215.
- [13] YU M, NAGURNEY A. Competitive Food Supply Chain Networks with Application to Fresh Produce[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 224(2): 273-282.
- [14] 霍红, 钟海岩. 农产品供应链质量安全中区块链技术投入的演化分析[J]. *运筹与管理*, 2023, 32(1): 15-21.
- HUO H, ZHONG H Y. Evolution Analysis of Blockchain Technology Investment Based the Quality and Safety of Agricultural Supply Chain[J]. *Operations Research and Management Science*, 2023, 32(1): 15-21.
- [15] 覃燕红, 王少杰. 不利天气影响下考虑农户公平关切的农产品供应链协调机制研究[J]. *系统科学与数学*, 2023, 43(3): 595-609.
- QIN Y H, WANG S J. Coordination Mechanism of Agricultural Products Supply Chain by Considering Fairness Concern of Farmer under Adverse Weather[J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2023, 43(3): 595-609.
- [16] 周冬娥. 乡村振兴背景下农产品供应链的风险识别与控制探讨[J]. *中国物流与采购*, 2022(22): 113-114.
- ZHOU D E. Discussion on Risk Identification and Control of Agricultural Product Supply Chain under the Background of Rural Revitalization[J]. *China Logistics & Purchasing*, 2022(22): 113-114.

- [17] 陈科. 金融科技背景下推动农产品供应链金融数字化的对策研究[J]. 农业经济, 2022(11): 119-121.
CHEN K. Research on Countermeasures to Promote Financial Digitization of Agricultural Products Supply Chain under the Background of Financial Science and Technology[J]. Agricultural Economy, 2022(11): 119-121.
- [18] 庄乾茜, 纪卫宁. 物流管理价值链最优化理念下农产品逆向物流体系设计[J]. 商业经济研究, 2021(5): 94-97.
ZHUANG Q X, JI W N. Design of Reverse Logistics System of Agricultural Products under the Optimization Concept of Logistics Management Value Chain[J]. Journal of Commercial Economics, 2021(5): 94-97.
- [19] 韩强, 梦溪. 循环经济下农产品逆向物流的发展对策[J]. 山东财经大学学报, 2017, 29(5): 106-112.
HAN Q, MENG X. Development Countermeasures for Agricultural Product Reverse Logistics under Recycling Economy[J]. Journal of Shandong University of Finance and Economics, 2017, 29(5): 106-112.
- [20] 费威. 废弃农产品回收处理及补贴策略研究[J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(16): 1-11.
FEI W. Research on the Recovery and Processing of Abandoned Agricultural Products and Subsidies Strategy[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2016, 46(16): 1-11.
- [21] 段彩泉, 姚锋敏, 夏莹, 等. 不同秸秆回收补贴制度下可持续农产品供应链网络均衡[J/OL]. 中国管理科学, 2022: 1-12. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.2117>.
DUAN C Q, YAO F M, XIA Y, et al. Sustainable Agricultural Product Supply Chain Network Equilibrium under Different Straw Recycling Subsidy Systems[J/OL]. China Management Science, 2022: 1-12. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.2117>.