

# 考虑众包的生鲜电商网络均衡决策

廖志颖, 孟 芳

武汉科技大学, 汽车与交通工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年1月5日; 录用日期: 2023年2月17日; 发布日期: 2023年2月23日

---

## 摘要

为了解决生鲜电商因疫情而生的终端配送用工问题, 提出了考虑众包配送模式的生鲜电商网络均衡模型, 使用了修正投影算法求解, 并进行算例分析。结果表明, 消费者的成本并没有受到参数改变所带来的影响, 而生鲜电商的利润会随着自由快递员配送生鲜损失承担率的变化而变化, 其可选择合适的阈值使得供应链整体利润增长, 众包平台的利润和自由配送员可据参数的提升而迎来一定的提升, 且整体利润会随之不断提升。故生鲜电商可以考虑与合适的众包平台对接以减轻成本, 众包平台也可考虑与自由配送员一起承担生鲜配送的损失, 承担率可以选择合适的区间以保证合作的顺利。

---

## 关键词

生鲜电商, 众包物流, 均衡条件, 供应链网络, 修正投影算法

---

# Network Equilibrium Decision of Fresh Food E-Commerce Considering Crowdsourcing

Zhiying Liao, Fang Meng

School of Automotive and Transportation Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Jan. 5<sup>th</sup>, 2023; accepted: Feb. 17<sup>th</sup>, 2023; published: Feb. 23<sup>rd</sup>, 2023

---

## Abstract

In order to solve the terminal distribution employment problem of fresh food e-commerce due to the epidemic situation, a fresh food e-commerce network equilibrium model considering crowdsourcing distribution mode is proposed, and a modified projection algorithm is used to solve it, and an example is analyzed. The results show that the cost of consumers is not affected by the change of parameters, but the profit of fresh e-commerce will change with the change of the bearing rate of fresh delivery loss of free couriers. It can choose an appropriate threshold to increase

**the overall profit of the supply chain. The profit of crowdsourcing platforms and free couriers can be improved according to the improvement of parameters, and the overall profit will continue to increase. Therefore, fresh food e-commerce can consider interfacing with the appropriate crowdsourcing platform to reduce costs, and the crowdsourcing platform can also consider sharing the losses of fresh food distribution with free distributors. The commitment rate can choose an appropriate range to ensure smooth cooperation.**

## Keywords

**Fresh E-Commerce, Crowdsourcing Logistics, Equilibrium Conditions, Supply Chain Network, Modified Projection Algorithm**

Copyright © 2023 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

2020年初，在新冠肺炎疫情的持续影响下，线下购物模式因隐含的病毒接触感染风险受到一定的冲击，导致网购需求量激增，生鲜电商在此背景下得以迅猛发展。而生鲜电商在突如其来的订单激增和因疫情导致的配送人员不足的双重压力下，采用了“共享员工”的方式去缓解终端配用工问题。共享员工是指通过雇佣非本企业的员工，可能为社会人员，其他公司员工或者专业人士来引导和发展雇佣企业的一种用工方式。共享员工是在共享经济的不断发展中催生出来的一种新的用工形式。近年来，共享理念在物流业也得到广泛应用和不断发展，产生了众包物流这一独特的形态。刘伯超，许秋茗<sup>[1]</sup>将众包物流定义为是一种利用互联网平台将配送任务以自愿和有偿的形式，通过网络外包给非特定社会群体，这些社会群体可在自由支配时间段抢单、取货、送货的物流模式。众包物流因其自身的轻资产，员工数量不限的多种特质，可帮助解决部分生鲜电商企业配用工少的问题。

## 2. 文献综述

目前在关于生鲜电商网络构建和众包物流使用方面的研究情况大致如下：在生鲜电商的研究领域中，学者们对于生鲜电商的前景，配送模式，消费者需求，配送路径优化，购买行为的影响因素，等多个方面进行了研究。首先从宏观而言，黄友文<sup>[2]</sup>利用SWOT分析法对我国生鲜电商物流的现状和趋势做出了详细的阐述。陈耀庭，黄和亮<sup>[3]</sup>讲述了我国生鲜电商行业现有的配送模式的优劣，并提出了生鲜众包配送的策略。Liu Y H, Ma D Q, Hu J S<sup>[4]</sup>考虑了区块链支持的可追溯商誉和产品新鲜度，探究了电商平台在与不同传统零售商的竞争中是否选择转售或代理销售生鲜食品。而后从微观而言，付朝晖，刘长石<sup>[5]</sup>针对生鲜电商城市配送问题，综合考量包括新鲜度和车辆灵活性等因素，建立了开放式时变车辆路径的优化模型。林海，胡雅淇<sup>[6]</sup>利用支持向量机的数据挖掘的方法，表明影响生鲜电商销售量的相关影响因素，并利用这些因素预测了相关商品的销售情况。Lin J B, Li T, Guo J Y<sup>[7]</sup>从感知价值的角度出发，探索了生鲜电商上消费者重复购买行为的影响因素。但以上的分析未从生鲜电商供应链整体进行，缺乏整体性。而生鲜电商供应链网络的研究正好解决了整体性的问题，并且也解答了各个主体间的协调问题。

目前关于生鲜电商供应链网络的研究，主要集中在使用收益契约理论解决不同层级的关系和利益分配上。例如白世贞，谢爽，吴绒等<sup>[8]</sup>通过价格对消费者需求的影响，建设了考虑价格参考效应的供应链协调机制。郑金山<sup>[9]</sup>将配送服务质量作为关键参数引入生鲜电商的不同主导权模式利润分析中。

张科静, 马曼琼[10]通过考量退货影响的生鲜电商双渠道供应链网络的不同决策方式的利润分析, 提出了相应的利润分配契约。徐慧婷[11]通过对生鲜电商直营三级供应链网络的不同决策利润分析, 提出返利收益共享契约。

不过收益契约理论对于生鲜电商供应链网络整体均衡触及较少, 而基于变分不等式的网络均衡模型主要研究多层的各个层级之内相互竞争且各个主体之间互不竞争的供应链网络, 可求解出整体供应链网络的均衡解, 为企业决策提供参考。其最早由 Nagurney A, Dong J, Zhang D [12]所提出, 并构建了基础的三层供应链网络, 且用变分不等式求解。而现今研究角度较为多样, 从宏观来讲有网购, 逆向物流, 碳税等多个方面。例如胡一竑, 李学迁, 张江华等[13], 依据网购供应链多配送服务商和消费者自提的特点来建立相关模型。曹炳汝, 朱博文[14]依据不同的回收标准与补贴政策, 设计了考虑利润最大化和排放量最小化的再制造投资网络均衡模型。Zhang G T, Cheng P Y, Sun H [15]构建了考虑不同碳税规制的双渠道供应链网络均衡模型。从微观来讲, 有多商品, 库存, 消费者偏向等多个方面。张铁柱, 刘志勇, 滕春贤等[16]建立了考虑多商品流动的供应链网络均衡模型。何胜学, 潘红[17]由各个层级之间流量和流向建立了考虑库存的区域网络均衡模型。周礼南, 周根贵, 熊方中等[18]通过对生鲜农产品市场需求量的模糊化和消费者对有机农产品的偏向, 建立了生鲜农产品供应链网络均衡模型。

众包物流的研究, 则聚焦在定价, 运力调度, 接包方, 发包方, 大众参与度等各个角度。在定价方面, 王文杰, 孙中苗, 徐琪等[19]利用最优化控制的方法, 解决了众包物流在考虑市场随机性和服务商竞争的情况下的最优定价问题。王文杰, 陈颖, 蒋帅杰[20]利用动态定价的方法解决了考虑众包平台价格竞争的最优服务定价问题。而在运力调度方面, 慕静, 杜田玉, 刘爽等[21]在一定的客户满意度和配送人员利益最大化的条件下, 建立了考虑即时配送和收益激励的众包物流运力调度模型。之后李玉, 吴斌, 王超[22]基于发货方视角引入保价制度, 利用演化博弈对配送方和众包平台进行风险管理。向传凯, 张毅[23]基于接包方视角利用多种评定方法对于众包平台进行评定, 指出匹配效率, 信任, 沟通是众包平台加强管理的方向。邱洪全[24]利用行为决策的理论, 将大众选择众包物流的意愿的影响因素具体化。

综上所述, 生鲜电商的研究内容较少集中在实际配送模式的构建, 众包物流的研究内容较少研究具体某一行业的企业作为发包方, 仅孟秀丽, 吴艾婧, 杨静[25]利用网络均衡模型模拟了众包平台和物流企业合作时的情形。生鲜电商因其最后一公里配送距离短, 配送需求平缓, 配送速度快等特点, 使其在一天之中需要均衡的配送多次, 故需要配送人员时刻在线等待, 对于人员需求较大。而众包物流具备较多的人员实时在线接单, 可以很好地衔接生鲜电商的配送需求。

因此, 本文将生鲜电商与众包物流相结合, 将众包这种配送形式引入生鲜电商最后一公里配送, 建立消费者, 生鲜电商, 众包平台, 自由配送员的四层网络。其中生鲜电商之间, 众包平台之间, 生鲜电商的自营配送员与众包平台之间, 众包平台的自由配送员与自营配送员之间为竞争关系, 而生鲜电商与众包平台之间, 众包平台与配送员之间为合作关系, 为了研究网络的各个主体之间, 这种既有竞争又有合作的关系, 故选择使用网络均衡模型的方法进行研究。

据此构建基于网络均衡模型中的变分不等式和 NASH 均衡理论, 考虑生鲜损耗系数, 众包平台使用率, 自由配送员使用率, 自由配送员生鲜配送损失承担率等参数, 以网络决策者利润最大为目标的消费者, 生鲜电商, 众包平台, 自由配送员四个层级的考虑众包的生鲜电商网络均衡模型, 为生鲜电商与众包物流的结合发展提出优化策略与建议。

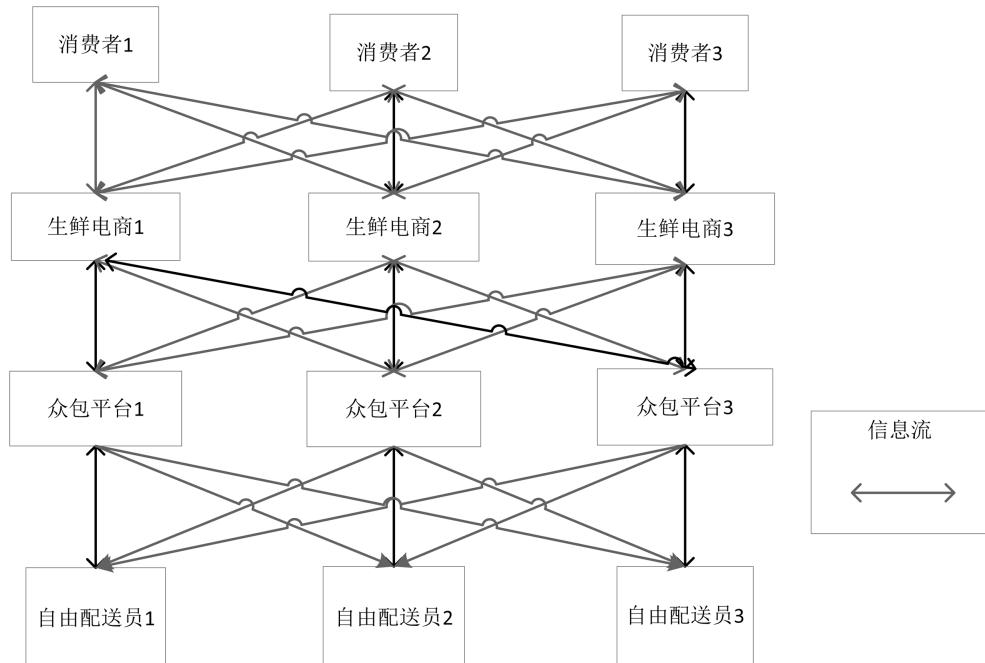
### 3. 问题描述与假设

生鲜电商现今的最后一公里配送模式有配送到户, 直营店面, 社区店加盟, 智能配送柜等方式。

当消费者在生鲜电商平台上下单时, 生鲜电商平台会将生鲜商品打包配送到前置仓或者相关门店, 可由消费者选择门店自提或配送到家。若选择配送, 生鲜电商平台收到配送请求后会进行配送到户。若选择门店自提, 生鲜电商会将货物放至消费者指定且加入生鲜电商运营的门店, 而后由消费者利用闲暇时间领取。

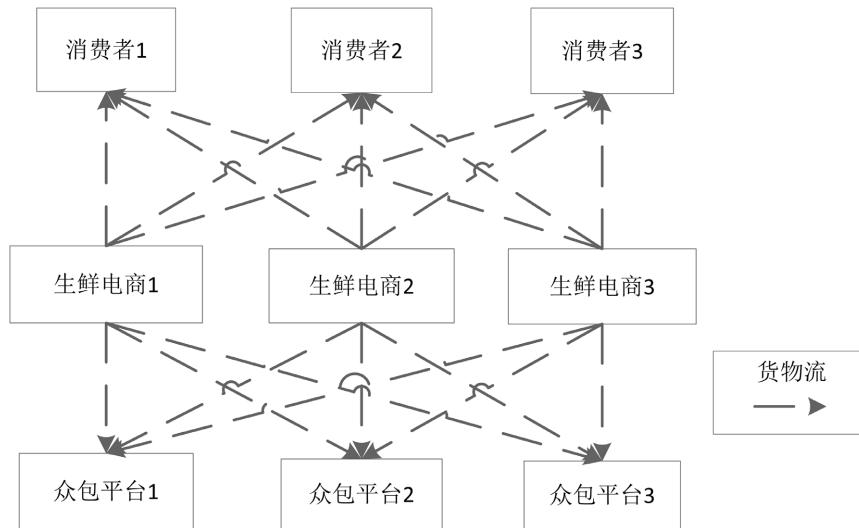
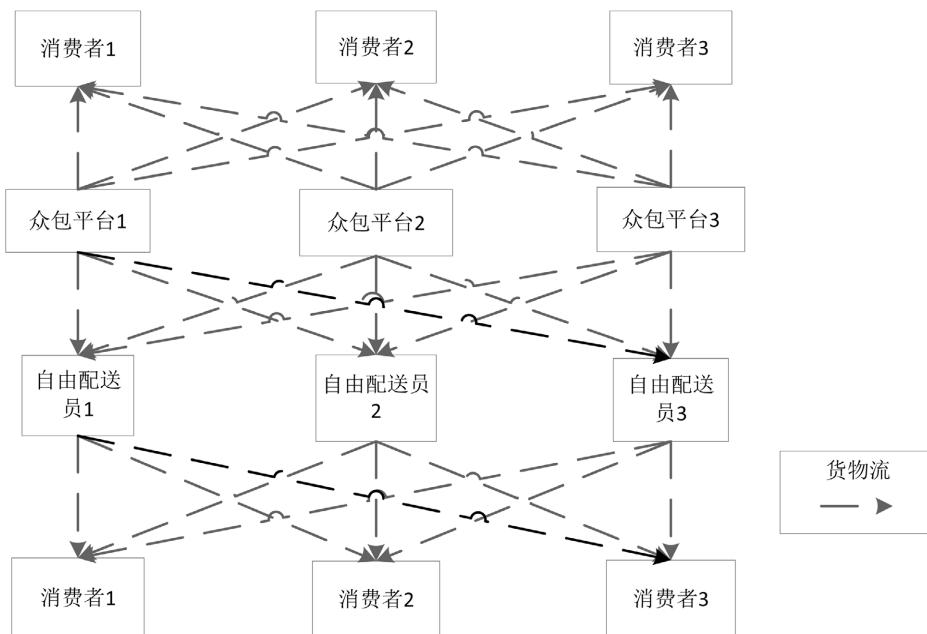
大部分生鲜电商处于发展的初级阶段时, 均选择在配送过程中设置专业的自营配送员以保证配送服务的质量和降低生鲜配送的损耗, 但随着生鲜电商规模的不断增大, 自营配送员的不断增加, 随之而来的配送员成本问题也不断严重。为解决这一问题, 生鲜电商或可考量让众包配送部分替代自营配送以解决用工成本问题。故假设生鲜电商在执行最后一公里配送时考虑众包配送方案, 将部分订单转交至众包平台。众包平台在保证服务质量的情况下, 与生鲜电商的选择类似, 皆在发展的初级阶段会选择专业的自营配送人员, 不同的是众包平台以自由配送员为主体, 而生鲜电商仅有自营配送员。

如若生鲜电商采取众包配送, 则将配送需求传至众包平台, 而后众包平台将按订单需求的特性分配订单至众包配送员(众包平台自营配送员或者自由配送员), 最后货物均被配送员配送至消费者手中, 从而构成消费者, 生鲜电商, 众包平台, 自由配送员的四层网络均衡模型, 如图 1。



**Figure 1.** Four-layer network structure diagram  
**图 1.** 四层网络结构图

图 2 中, 生鲜电商扮演着类似于生产商, 分销商般的角色, 其承担着生鲜的采集, 运输, 存储和配送, 同时也是众包任务中的发包方。其中生鲜电商的自营配送员承担着部分订单的配送任务, 与众包平台形成竞争。众包平台职责为发包方和接包方提供交流的基础和对接包方奖励的指定和实施, 部分生鲜配送订单交由众包平台, 意味着货物配送的支配权交由众包平台决定, 故生鲜电商与众包平台之间产生货物流。自由配送员是社会上的相关从业者作为接包方获取配送任务, 并履约获得配送奖励。图 3 中, 众包平台的自营快递员承担着部分订单的配送任务, 自由快递员承担着另一部分订单的配送任务, 二者为竞争关系, 其目的均为最终将商品送至消费者手中。生鲜电商之间, 众包平台之间, 配送员之间为相互竞争的关系, 而生鲜电商和众包平台, 众包平台和配送员之间为相互合作的关系。

**Figure 2.** Fresh e-commerce equilibrium relationship**图 2.** 生鲜电商均衡关系**Figure 3.** Crowdsourcing logistics network balance**图 3.** 众包物流网络均衡

据此, 假设该考虑众包的生鲜电商物流网络有  $m$  个消费者市场,  $n$  个生鲜电商企业,  $o$  个众包平台,  $p$  个配送员,  $r$  种商品。各层决策者均为理性决策者, 进行相互竞争以达到 NASH 均衡。考虑众包的生鲜电商物流网络的运作流程如图 1 所示: 消费者市场  $i$  将  $r$  种产品订单发送给生鲜电商企业  $j$ , 生鲜电商企业  $j$  收到预订单信息后, 根据自身企业的考量, 将最后一公里的配送任务部分发布到的众包平台  $k$  上, 众包平台  $k$  可将部分配送任务分配给自由配送员  $l$ , 由自由配送员  $l$  将生鲜商品配送给消费者市场。

其中生鲜电商需要对众包平台进行选择, 故令生鲜电商对众包平台的使用率为  $\delta_j$ ; 若自由配送员  $l$  抢到配送订单, 自由配送员可承担的配送任务的比例为众包平台对自由配送员的使用率  $\theta_k$ 。自由配送员  $l$  配送生鲜途中, 可能产生生鲜损耗, 若此损耗由众包平台和配送员共同承担, 则令自由配送员生鲜损失

承担率为  $\omega_l$ 。考虑众包平台生鲜损失承担率的意义在于了解众包平台和自由配送员于配送产生的生鲜损耗的承担对于整体供应链均衡结果的影响, 且为方便研究, 不考虑时间、库存等因素。本文所涉及的部分符号变量如下表 1。

**Table 1.** Symbols and meanings**表 1.** 符号与含义

符号	含义
$q_{ij}^r$	消费者市场 $i$ 与生鲜电商 $j$ 之间关于 $r$ 种商品的自提订单交易量, 向量为 $Q_2 \in R_+^{mnr}$
$q_{ij2}^r$	消费者市场 $i$ 与生鲜电商 $j$ 之间关于 $r$ 种商品的配送上门订单交易量, 向量为 $Q_3 \in R_+^{mnr}$
$\bar{q}_{jk}$	生鲜电商 $j$ 与众包平台 $k$ 之间的订单交易量, 向量为 $\bar{Q}_7 \in R_+^{no}$
$\hat{q}_{kl}$	众包平台 $k$ 配送员 $l$ 之间订单的交易量, 向量为 $\hat{Q}_8 \in R_+^{op}$
$p_{ij}^r$	消费者市场 $i$ 与生鲜电商 $j$ 之间 $r$ 种商品的订单交易价格, 向量为 $P_1 \in R_+^{mn}$
$p_i^r$	消费者市场 $i$ 愿意支付的订单交易价格, 向量为 $P_4 \in R_+^{mn}$
$\bar{p}_{jk}$	生鲜电商 $j$ 与众包平台 $k$ 之间的订单交易价格, 向量为 $\bar{P}_2 \in R_+^{no}$
$\hat{p}_{kl}$	众包平台 $k$ 配送员 $l$ 之间的订单交易价格, 向量为 $\hat{P}_3 \in R_+^{op}$
$\delta_j$	生鲜电商企业 $j$ 的众包平台使用率, $\delta_j \in [0,1]$
$\omega_l$	自由配送员 $l$ 的生鲜配送损失承担率, $\omega_l \in [0,1]$
$\theta_k$	众包平台 $k$ 的自由配送员的使用率, $\theta_k \in [0,1]$
$g_l$	自由配送员配送时间补偿系数
$h_k$	众包物流利润补偿系数
$f_j^r(Q_4)$	生鲜电商企业 $j$ 的 $r$ 种商品货物处理成本(包括生产, 运输和存储), 向量为 $f \in R_+^n$
$\bar{f}_k(\bar{Q}_7)$	众包平台 $k$ 的运营成本, 向量为 $\bar{f} \in R_+^o$
$c_{ij}^r(Q_1)$	消费者市场 $i$ 与生鲜电商企业 $j$ 之间的 $r$ 种商品交易成本, 向量为 $c_1 \in R_+^{mn}$
$c_{ij}(Q_2)$	生鲜电商企业 $j$ 的消费者 $i$ 的自提交易成本, 向量为 $c_2 \in R_+^{mn}$
$o_j(Q_2)$	在相关接待客人时会有相关接待成本, 向量为 $o_1 \in R_+^n$
$\bar{c}_{jk}(\bar{Q}_7)$	生鲜电商企业 $j$ 与众包平台 $k$ 之间的交易成本, 向量为 $\bar{c} \in R_+^{no}$
$\hat{c}_{kl}(\hat{Q}_8)$	众包平台 $k$ 与配送员 $l$ 之间的交易成本, 向量为 $\hat{c} \in R_+^{op}$

**Continued**

$s_{j1}(Q_1)$	货物由仓库向配送点补货在补货期间的成本, 向量为 $s_1 \in R_+^n$
$s_{j2}(Q_2)$	配送点在自营配送致消费者的成本, 向量为 $s_2 \in R_+^n$
$\bar{s}_k(\bar{Q}_k)$	众包平台 $k$ 的自营配送员成本, $\bar{s} \in R_+^o$
$d_i^r$	消费者市场 $i$ 对于产品 $r$ 的需求量, 向量为 $D \in R_+^n$
$T_{il}(\hat{Q}_s)$	自由配送员 $l$ 为消费者市场 $i$ 的配送时间成本, 向量为 $T_1 \in R_+^{mo}$
$T_{ij}$	消费者市场 $i$ 去生鲜电商 $j$ 自提的时间成本, 向量为 $T_3 \in R_+^{mn}$
$T_{ji}(Q_3)$	生鲜电商 $j$ 为消费者市场 $i$ 的配送时间成本, 向量为 $T_2 \in R_+^{mm}$
$V_j^r(Q_6)$	生鲜电商企业 $j$ 生产, 运输和存储带来的 $r$ 种商品的生鲜损耗, 向量为 $V_1 \in R_+^n$
$V_{ji}(Q_5)$	生鲜电商企业 $j$ 自营配送产生的生鲜损耗, 向量为 $V_2 \in R_+^n$
$\bar{V}_{ki}(\bar{Q}_k)$	众包平台 $k$ 自营配送产生的生鲜损耗, 向量为 $\bar{V} \in R_+^o$
$\hat{V}_{il}(\hat{Q}_s)$	自由配送员 $l$ 配送产生的生鲜损耗, 向量为 $\hat{V} \in R_+^o$

## 4. 网络均衡模型的构建

### 4.1. 消费者的最优行为及均衡条件

消费者作为订单的下达者, 处于网络的第一层, 其可自由选择生鲜电商平台进行购买, 依据市场价格和自身实际情况来选择配送到家或者门店自提的取货方式。设  $p_{ij}^r$  为消费者市场  $i$  与生鲜电商  $j$  之间  $r$  种商品的订单交易价格,  $q_{ij1}^r$  为消费者市场  $i$  与生鲜电商  $j$  之间关于  $r$  种商品的自提订单交易量,  $q_{ij2}^r$  为消费者市场  $i$  与生鲜电商  $j$  之间关于  $r$  种商品的配送上门订单交易量,  $p_i^r$  为消费者市场  $i$  于愿意支付的订单交易价格,  $c_{ij}(Q_2)$  为生鲜电商企业  $j$  的  $r$  种商品的消费者  $i$  的自提交易成本,  $d_i^r$  为消费者市场  $i$  对于产品  $r$  的需求量, 且有  $d_i^r = d_i^r(p_i^r)$ ,  $T_{ij}$  为消费者市场  $i$  去生鲜电商  $j$  自提的时间成本。 $T_{ji}(Q_3)$  为消费者市场  $i$  等待配送的时间成本。消费者在生鲜电商平台上购买商品是满意商品价格才会采取的行动, 故应当采用交通网络均衡模型来模拟消费者最优选择行为。

则消费者自提的均衡条件为:

$$p_{ij}^r + c_{ij}(Q_2) + T_{ij} \begin{cases} = p_i^r, & q_{ij1}^r > 0 \\ \geq p_i^r, & q_{ij1}^r = 0 \end{cases} \quad (1)$$

则消费者接受配送的均衡条件为

$$p_{ij}^r + \bar{p}_{jk} + T_{ji}(Q_3) \begin{cases} = p_i^r, & q_{ij2}^r > 0 \\ \geq p_i^r, & q_{ij2}^r = 0 \end{cases} \quad (2)$$

消费者的需求满足情况如下

$$d_i^r(p_i^r) \begin{cases} = \sum_{j=1}^n q_{ij1}^r + \sum_{j=1}^n q_{ij2}^r, p_i^r > 0 \\ \leq \sum_{j=1}^n q_{ij1}^r + \sum_{j=1}^n q_{ij2}^r, p_i^r = 0 \end{cases} \quad (3)$$

上述均衡条件可作如下的经济学解释:

一式表示消费者*i*自生鲜电商*j*处购买商品*r*的售价加上自提所产生的交易成本加上自提的时间成本不高于消费者市场所愿意支付的购买成本, 交易才会发生;

二式表示消费者*i*自生鲜电商*j*处购买商品*r*的售价加上消费者*i*等待配送的时间成本加上配送的成本不高于消费者市场所愿意支付的购买成本, 交易才会发生;

三式表示消费者市场对商品*r*所愿意支付的成本需大于零, 供需平衡, 供大于求时商品*r*为免费商品。

若模型达至最优时, 决策变量为 $(Q_2^*, Q_3^*, P_4^*) \in \Omega$  达至最优解, 可表达为下列变分不等式

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^e (p_{ij}^{r*} + c_{ij}(Q_2^*) + T_{ij} - p_i^{r*}) (q_{ij1}^r - q_{ij1}^{r*}) \\ & + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^e (p_{ij}^{r*} + \bar{p}_{jk}^* + T_{ji}(Q_3^*) - p_i^{r*}) (q_{ij2}^r - q_{ij2}^{r*}) \\ & + \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^e \left( \sum_{j=1}^n q_{ij1}^{r*} + \sum_{j=1}^n q_{ij2}^{r*} - d_i(p_i^{r*}) \right) (p_i^r - p_i^{r*}) \geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

## 4.2. 生鲜电商的最优行为及均衡条件

生鲜电商企业处在网络的第二层, 负责接收消费者市场的订单, 可以将部分订单配送的需求发布到众包平台上, 其目标是获得最大利润。在生鲜产品由源头运输到配送中心的过程中会随时间有价值上的减少, 即产品新鲜度对于产品价值的减少。故用 $\varphi(t) = 1 - \xi(t) = 2 - e^{\ln 2/Tt}$ ,  $\varphi(t) \in [0, 1]$ , 表达生鲜产品在销售过程中与销售时间相关的有效价值比例因子, 其中*t*为产品等待售货期, *T*为产品保鲜期。生鲜电商的总的产品数为 $(q_{ij1}^r + q_{ij2}^r)$ , 令其向量为 $Q_1 \in R_+^{mn}$ 。消费者市场*i*与生鲜电商*j*之间关于*r*种商品的自提订单交易量为 $q_{ij1}^r$ , 向量为 $Q_2 \in R_+^{mn}$ 。消费者市场*i*与生鲜电商*j*之间关于*r*种商品的配送上门订单交易量为 $q_{ij2}^r$ , 向量为 $Q_3 \in R_+^{mn}$ 。生鲜电商于供应商或者源头采购需要的货物量为:

$$\sum_{i=1}^m (q_{ij1}^r + q_{ij2}^r) / \varphi(t), \text{ 令其向量为 } Q_4 \in R_+^{mn}.$$

生鲜电商企业*j*生产生鲜产品的成本(包括货物生产, 包装成本等)为 $f_j^r(Q_4)$ , 消费者市场*i*与生鲜电商企业*j*之间的*r*种商品交易成本(包括货物生产存储, 运输成本等)为 $c_{ij}^r(Q_1)$ 。生鲜电商企业一部分订单配送业务选择众包物流, 另一部分业务采取自营物流。其中生鲜电商企业*j*生产, 运输和存储带来的*r*种商品的生鲜损耗量为:

$$\sum_{i=1}^m (1/\varphi(t) - 1) (q_{ij1}^r + q_{ij2}^r)$$

其向量为 $Q_6 \in R_+^{mn}$ , 损耗金额为 $V_j^r(Q_6)$ 。设生鲜电商企业的众包平台使用率为:

$$\delta_j = f \left( \left( \sum_{k=1}^o V_{ki}(\bar{Q}_K) + \sum_{l=1}^p V_{li}(\hat{Q}_3) \right) / \sum_{i=1}^m V_{ij}(Q_5), h_k \right)$$

其取值将依据众包物流的生鲜损耗总值与生鲜电商自营配送生鲜损耗的比例。 $h_k$ 为众包物流利润补

偿系数, 因为众包物流会给生鲜电商节约成本, 故需满足生鲜电商对于利润的追逐, 提供相应的利润补偿。为了保证计算时交易量对计算式无影响, 仅在计算此式时  $\bar{Q}_k + \hat{Q}_8 = Q_5$ 。

其中  $Q_5 = \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^e (1 - \delta_j) q_{ij2}^r$ , 其向量为  $Q_5 \in R_+^{mn}$ 。

而货物由仓库向配送点补货, 在补货期间的成本为  $s_{j1}(Q_1)$ , 则自营配送成本为  $s_{j2}(Q_5)$ , 在接待选择自提的消费者时会有相关接待成本为  $o_j(Q_2)$ 。生鲜电商企业  $j$  自营配送产生的生鲜损耗金额为  $V_{ji}(Q_5)$ 。假设生鲜电商企业各成本函数是连续可微凸函数, 决策变量为  $(Q_2, Q_3, \bar{Q}_k, \lambda) \in \Omega$ , 生鲜产品损耗值的权重为  $\alpha_j$ , 为谋取最大利润, 生鲜电商企业  $j$  的目标优化函数如式(5)所示。

$$\begin{aligned} \max U_j^L &= \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^e (q_{ij1}^r + q_{ij2}^r) p_{ij}^r - \sum_{r=1}^e f_i^r(Q_4) - \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^e c_{ij}^r(Q_1) - s_{j2}(Q_5) \\ &\quad - s_{j1}(Q_7) + o_j(Q_2) - \sum_{k=1}^o \bar{q}_{jk} \bar{p}_{jk} - \alpha_j \left( \sum_{r=1}^e V_j^r(Q_6) + \sum_{i=1}^m V_{ij}(Q_5) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^o \bar{q}_{jk} \geq \delta_j \sum_{i=1}^m q_{ij2}, \quad (6)$$

$$q_{ij1}^r \geq 0, \quad q_{ij2}^r \geq 0, \quad \bar{q}_{jk} \geq 0$$

约束式(6)表示的是生鲜电商平台与众包平台的交易量应不小于众包平台选择率乘以生鲜电商平台的配送订单量, 若生鲜电商平台进行非合作完全博弈, 达到 NASH 均衡, 决策变量为均衡解,  $(Q_2^*, Q_3^*, \bar{Q}_k^*, \lambda^*) \in \Omega$  可表达为下列变分不等式:

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^e \left( \frac{\partial f_j^r(Q_4^*)}{\partial q_{ij1}^r} + \frac{\partial c_{ij}^r(Q_1^*)}{\partial q_{ij1}^r} + \frac{\partial s_{j1}(Q_1^*)}{\partial q_{ij1}^r} + \alpha_j \frac{\partial V_j^r(Q_6^*)}{\partial q_{ij1}^r} + \frac{\partial o_j(Q_2^*)}{\partial q_{ij1}^r} - p_{ij}^{r*} \right) (q_{ij1}^r - q_{ij1}^{r*}) \\ &+ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^e \left( \frac{\partial f_j^r(Q_4^*)}{\partial q_{ij2}^r} + \frac{\partial c_{ij}^r(Q_1^*)}{\partial q_{ij2}^r} + \frac{\partial s_{j1}(Q_1^*)}{\partial q_{ij2}^r} + \alpha_j \frac{\partial V_j^r(Q_6^*)}{\partial q_{ij2}^r} + \alpha_j \frac{\partial V_{ij}(Q_5^*)}{\partial q_{ij2}^r} + \frac{\partial s_{j2}(Q_1^*)}{\partial q_{ij2}^r} + \lambda_j^* \delta_j^* - p_{ij}^{r*} \right) (q_{ij2}^r - q_{ij2}^{r*}) \\ &+ \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^o (\bar{p}_{jk}^* - \lambda_j^*) (\bar{q}_{jk} - \bar{q}_{jk}^*) + \sum_{j=1}^n \left( \sum_{k=1}^o \bar{q}_{jk}^* - \delta_j^* \sum_{i=1}^m q_{ij}^* \right) (\lambda_j - \lambda_j^*) \geq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)的第四项中,  $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n) \in R_+^n$  为约束 6 的拉格朗日乘子列向量, 是为当  $\lambda_j > 0$  时,

$$\sum_{k=1}^o \bar{q}_{jk}^* = \delta_j^* \sum_{i=1}^m q_{ij}^*$$

生鲜电商和众包平台发生交易, 是为发生交易的影子价格。

式(7)的第三项中, 当  $\bar{q}_{jk} > 0$  时, 影子价格等于生鲜电商与众包平台的边际交易价格。

式(7)的第二项中, 当  $q_{ij2}^{r*} > 0$  时, 消费者与生鲜电商的交易价格等于生鲜电商的各项边际成本加上生鲜电商自营配送的边际成本加上影子价格乘以众包平台选择率。

式(7)的第一项中, 当  $q_{ij1}^{r*} > 0$  时, 消费者与生鲜电商的交易价格等于各项自提所需边际成本的和。

### 4.3. 众包平台的最优行为及均衡条件

众包平台位于网络结构的第三层, 在网络中充当了重要角色, 负责将生鲜电商企业的订单需求通过互联网平台展现, 分配订单, 匹配配送员, 接到消费者签收回执后, 下放奖励。众包平台  $k$  产生的运营成本为  $\bar{f}_k(\bar{Q}_7)$ , 众包平台与生鲜电商企业之间的交易成本为  $\bar{c}_{jk}(\bar{Q}_7)$ , 均与众包平台所有交易量  $\bar{q}_{jk}$  相关, 自营配送员配送成本为  $\bar{s}_k(\bar{Q}_k)$ , 众包平台  $k$  自营配送产生的生鲜损耗  $\bar{V}_{ki}(\bar{Q}_k)$ , 其中  $\bar{Q}_k = (1 - \theta_k) \sum_{j=1}^m \bar{q}_{jk}$ ,

生鲜产品损耗值的权重为  $\alpha_k$ 。众包平台一部分业务选择自由配送员配送, 另一部分业务采取自营配送员配送。设众包平台的自由配送员使用率为:

$$\theta_k = f\left(\left((1-\omega_l) * \sum_{l=1}^p V_{li}(\hat{Q}_3) / \sum_{k=1}^o V_{ki}(\bar{Q}_K)\right), g\right)$$

其取值将依据众包平台自营配送的生鲜损耗值与自由配送员配送的生鲜损耗的比例(因为自由配送员若是承担生鲜损耗较多, 众包平台在比较自营损耗之后, 会更倾向选择自由配送员)以及自由配送员配送时间补偿系数  $g$ 。自由配送员配送时间补偿系数是当自由配送员所承担的份额过多时会产生配送时间上的大幅增加, 为了商品配送至消费者手中时, 时间最快, 故而加入此参数平衡配送分配, 令  $g = f(\omega_l)$ 。为了保证计算时交易量对计算式无影响, 仅在计算此式时  $\bar{Q}_k = \hat{Q}_3$ 。

假设运营成本、交易成本和配送成本都是连续可微凸函数, 决策变量为  $(\hat{Q}_s, \bar{Q}_k, \beta) \in \Omega$ , 则众包平台  $k$  的目标函数如式(8)所示

$$\begin{aligned} \max U_k^C = & \sum_{j=1}^n \bar{q}_{jk} \bar{p}_{jk} - \bar{f}_k(\bar{Q}_7) - \sum_{j=1}^n \bar{c}_{jk}(\bar{Q}_7) - \sum_{l=1}^p \hat{q}_{kl} \hat{p}_{kl} \\ & - \bar{s}_k(\bar{Q}_K) - \alpha_k V_{ki}(\bar{Q}_K) - \alpha_k (1-\omega_l) \sum_{l=1}^p V_{li}(\hat{Q}_3) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sum_{l=1}^p \hat{q}_{kl} & \geq \theta_k \sum_{j=1}^n \bar{q}_{jk} \\ \hat{q}_{kl} & \geq 0, \bar{q}_{jk} \geq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

约束式(9)表示的是众包平台与自由配送员的交易量应不小于自由快递员选择率乘以众包平台的配送订单量, 若众包平台进行非合作完全博奕, 达到 NASH 均衡, 决策变量为均衡解  $(\bar{Q}_k^*, \hat{Q}_s^*, \beta^*) \in \Omega$ , 可表达为下列变分不等式:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^o \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial \bar{f}_k(\bar{Q}_7^*)}{\partial \bar{q}_{jk}} + \frac{\partial \bar{c}_{jk}(\bar{Q}_7^*)}{\partial \bar{q}_{jk}} + \frac{\partial \bar{s}_k(\bar{Q}_K^*)}{\partial \bar{q}_{jk}} + \alpha_k \frac{\partial V_{ki}(\bar{Q}_k^*)}{\partial \bar{q}_{jk}} + \beta_k^* \theta_k - \bar{p}_{jk}^* \right) (\bar{q}_{jk} - \bar{q}_{jk}^*) \\ & + \sum_{k=1}^o \sum_{k=1}^p \left( \hat{p}_{kl}^* + \alpha_k (1-\omega_l) \frac{\partial V_{li}(\hat{Q}_3^*)}{\partial \hat{q}_{kl}} - \beta_k^* \right) (\hat{q}_{kl} - \hat{q}_{kl}^*) + \sum_{k=1}^o \left( \sum_{l=1}^p \hat{q}_{kl}^* - \theta_k \sum_{j=1}^n \bar{q}_{jk}^* \right) (\beta_k - \beta_k^*) \geq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)的第三项中,  $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_o) \in R_+^o$  为约束(9)的拉格朗日乘子列向量, 是为当  $\beta_k > 0$  时  $\sum_{l=1}^p \hat{q}_{kl}^* = \theta_k \sum_{j=1}^n \bar{q}_{jk}^*$ , 众包平台与自由配送员发生交易, 是为发生交易的影子价格。

式(10)的第二项中, 当  $\hat{q}_{kl} > 0$  时, 影子价格等于生鲜电商与众包平台的边际交易价格与众包平台所承担自由配送员的部分边际生鲜损耗成本。

式(10)的第一项中, 当  $\bar{q}_{jk} > 0$  时, 生鲜电商与众包平台的交易价格等于众包平台的各项边际成本的和加影子价格乘以自由配送员选择率。

#### 4.4. 配送员的最优行为及均衡条件

自由配送员处于考虑众包的生鲜电商物流服务网络的第四层, 起到了为生鲜电商企业配送货物至客户手中的作用。在配送过程中存在生鲜损耗, 自由配送员与众包平台共同承担, 自由配送员的承担系数为  $\omega_l$ , 自由配送员与众包平台的交易成本为  $\hat{c}_{kl}(\hat{Q}_s)$ , 生鲜配送损耗成本为  $\hat{V}_{li}(\hat{Q}_s)$ , 为自由配送员为消

费者市场的配送时间成本是  $T_{li}(\hat{Q}_8)$ , 均与自由配送员交易量  $\hat{q}_{kl}$  有关, 生鲜产品损耗值的权重为  $\alpha_l$ 。假设各项成本是连续可微凸函数,  $(\hat{Q}_8) \in \Omega$  则自由配送员 1 的目标最优函数如式(11)所示:

$$\max U_l^E = \sum_{k=1}^o \hat{q}_{kl} \hat{p}_{kl} - \sum_{k=1}^o \hat{c}_{kl}(\hat{Q}_8) - T_{li}(\hat{Q}_8) - \alpha_l(\omega_l) \sum_{i=1}^m V_{li}(\hat{Q}_8) \quad (11)$$

$$\hat{q}_{kl} \geq 0$$

若自由配送员进行非合作完全博弈, 达到 NASH 均衡, 决策变量为均衡解  $(\hat{Q}_8^*) \in \Omega$  可表达为下列变分不等式:

$$\sum_{l=1}^p \sum_{k=1}^o \left( \frac{\partial \hat{c}_{kl}(\hat{Q}_8^*)}{\partial \hat{q}_{kl}} + \alpha_l(\omega_l) \frac{\partial V_{li}(\hat{Q}_8^*)}{\partial \hat{q}_{kl}} + \frac{\partial T_{li}(\hat{Q}_8^*)}{\partial \hat{q}_{kl}} - \hat{p}_{kl}^* \right) (\hat{q}_{kl} - \hat{q}_{kl}^*) \geq 0 \quad (12)$$

式(12)中, 当  $\hat{q}_{kl} \geq 0$  时, 众包平台与自由配送员的交易价格等于自由快递员的各项边际成本的和。

#### 4.5. 生鲜电商众包网络均衡模型的整体最优条件

将变分不等式(4), (7), (10), (12)式进行加和, 消去内生的相关价格变量变为变分不等式相加的形式, 如下:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^o \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial \bar{f}_k(\bar{Q}_7^*)}{\partial \bar{q}_{jk}} + \frac{\partial \bar{c}_{jk}(\bar{Q}_7^*)}{\partial \bar{q}_{jk}} + \frac{\partial \bar{s}_k(\bar{Q}_k^*)}{\partial \bar{q}_{jk}} + \alpha_k \frac{\partial V_{ki}(\bar{Q}_k^*)}{\partial \bar{q}_{jk}} + \beta_k^* \theta_k - \lambda_j^* \right) (\bar{q}_{jk} - \bar{q}_{jk}^*) \\ & + \sum_{l=1}^p \sum_{k=1}^o \left( \frac{\partial \hat{c}_{kl}(\hat{Q}_3^*)}{\partial \hat{q}_{kl}} + \alpha_k(1-\omega_l) \frac{\partial V_{li}(\hat{Q}_3^*)}{\partial \hat{q}_{kl}} + \alpha_l(\omega_l) \frac{\partial V_{li}(\hat{Q}_8^*)}{\partial \hat{q}_{kl}} + \frac{\partial T_{li}(\hat{Q}_8^*)}{\partial \hat{q}_{kl}} - \beta_k^* \right) (\hat{q}_{kl} - \hat{q}_{kl}^*) \\ & + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^e \left( \frac{\partial f_j^r(Q_4^*)}{\partial q_{ij2}^r} + \frac{\partial c_{ij}^r(Q_1^*)}{\partial q_{ij2}^r} + \frac{\partial s_{j1}(Q_1^*)}{\partial q_{ij2}^r} + \alpha_j \frac{\partial V_j^r(Q_6^*)}{\partial q_{ij2}^r} + \bar{p}_{jk}^* + \alpha_j \frac{\partial V_{ij}(Q_5^*)}{\partial q_{ij2}^r} \right. \\ & \left. + \frac{\partial s_{j2}(Q_5^*)}{\partial q_{ij2}^r} + \lambda_j^* \delta_j^* + T_{ji}(Q_3^*) - p_i^{r*} \right) (q_{ij2}^r - q_{ij2}^{r*}) \\ & + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^e \left( \frac{\partial f_j^r(Q_4^*)}{\partial q_{ij1}^r} + \frac{\partial c_{ij}^r(Q_1^*)}{\partial q_{ij1}^r} + \frac{\partial s_{j1}(Q_1^*)}{\partial q_{ij1}^r} + \alpha_j \frac{\partial V_j^r(Q_6^*)}{\partial q_{ij1}^r} + \frac{\partial o_j(Q_2^*)}{\partial q_{ij1}^r} + c_{ij}(Q_2^*) + T_{ij} - p_i^{r*} \right) (q_{ij1}^r - q_{ij1}^{r*}) \\ & + \sum_{j=1}^n \left( \sum_{k=1}^o \bar{q}_{jk}^* - \delta_j^* \sum_{i=1}^m q_{ij}^* \right) (\lambda_j - \lambda_j^*) + \sum_{k=1}^o \left( \sum_{l=1}^p \hat{q}_{kl}^* - \theta_k \sum_{j=1}^n \bar{q}_{jk}^* \right) (\beta_k - \beta_k^*) \\ & + \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^e \left( \sum_{j=1}^n q_{ij1}^r + \sum_{j=1}^n q_{ij2}^r - d_i^r(p_i^{r*}) \right) (p_i^r - p_i^{r*}) \geq 0 \end{aligned} \quad (13)$$

在考虑众包的生鲜电商网络均衡模型整体达到均衡时, 变分不等式可求得均衡解为  $(Q_2^*, Q_3^*, \hat{Q}_8, \bar{Q}_k, \lambda^*, \beta^*, P_4^*) \in \Omega$ 。

#### 4.6. 均衡交易价格

当考虑众包的生鲜电商网络均衡模型整体达到均衡时, 整体变分不等式达到均衡可求得均衡解为  $(Q_2^*, Q_3^*, \hat{Q}_8, \bar{Q}_k, \lambda^*, \beta^*, P_4^*) \in \Omega$

当  $q_{ij1}^{r*} \geq 0$  时, 依据式(7)可得:

$$p_{ij}^{r^*} = \frac{\partial f_j^r(Q_4^*)}{\partial q_{ij1}^r} + \frac{\partial c_{ij}^r(Q_1^*)}{\partial q_{ij1}^r} + \frac{\partial s_{j1}(Q_1^*)}{\partial q_{ij1}^r} + \alpha_j \frac{\partial V_j^r(Q_6^*)}{\partial q_{ij1}^r} + \frac{\partial o_j(Q_2^*)}{\partial q_{ij1}^r} \quad (14)$$

依据式(4)可得:

$$p_i^{r^*} = p_{ij}^{r^*} + c_{ij}(q_2^*) + T_{ij} \quad (15)$$

当  $\bar{q}_{jk}^* \geq 0$  时, 依据式(7)可得:

$$\bar{p}_{jk}^* = \lambda_j^* = \frac{\partial \bar{f}_k(\bar{Q}_7^*)}{\partial \bar{q}_{jk}} + \frac{\partial \bar{c}_{jk}(\bar{Q}_7^*)}{\partial \bar{q}_{jk}} + \frac{\partial \bar{s}_k(\bar{Q}_k^*)}{\partial \bar{q}_{jk}} + \alpha_k \frac{\partial V_{ki}(\bar{Q}_k^*)}{\partial \bar{q}_{jk}} + \beta_k^* \theta_k \quad (16)$$

当  $\hat{q}_{kl}^* \geq 0$  时, 依据式(12)可得:

$$\hat{p}_{kl}^* = \frac{\partial \hat{c}_{kl}(\hat{Q}_8^*)}{\partial \hat{q}_{kl}} + \alpha_l(\omega_l) \frac{\partial V_{li}(\hat{Q}_8^*)}{\partial \hat{q}_{kl}} + \frac{\partial T_l(\hat{Q}_8^*)}{\partial \hat{q}_{kl}} \quad (17)$$

$$\beta_k^* = \hat{p}_{kl}^* + \alpha_k(1 - \omega_l) \frac{\partial V_{li}(\hat{Q}_3^*)}{\partial \hat{q}_{kl}} \quad (18)$$

## 5. 数值分析

### 5.1. 参数设置

算例采用的是两个消费者市场 M1, M2, 两种商品 R1, R2, 两个生鲜电商 N1, N2, 两个众包平台 O1, O2, 两个自由配送员 P1, P2。设生鲜电商的众包平台使用率

$$\delta_j = a + b * \left( \sum_{k=1}^o V_{ki}(\bar{Q}_K) + \sum_{l=1}^p V_{li}(Q_3) \right) / \left( \sum_{i=1}^m V_{ij}(Q_5) + f * h_k \right), \text{ 设 } a = 1.2, b = -0.5, f = 0.4,$$

$h_k = \log_{10}(10 * (\theta_l)^2)$ , 即为  $\delta_j = 1.2 - 0.5 * (\theta_l / 2 + 1)^2 + 0.4 * \log_{10}(10 * (\theta_k)^2)$ , 设众包平台自由配送员使用率为  $\theta_l = c + d * \left( (1 - \omega_l) * \sum_{l=1}^p V_{li}(\hat{Q}_8) \right) / \left( \sum_{k=1}^o V_{ki}(\bar{Q}_K) \right) + e * g$ , 令  $c = 1.1, d = -0.6, e = -0.2$ ,

$$g = \log_{10}(10 * (\omega_l)^2), \text{ 即为 } \theta_l = 1.1 - 0.6 * (1.5 * (1 - \omega_l))^2 - 0.2 * \log_{10}(10 * (\omega_l)^2), T = 3, t = 0.5.$$

考虑众包的生鲜电商网络均衡模型的具体参数设置参考了 Dong J, Zhang D, Nagurney A 等的设计[12]。

1) 消费者的需求函数

$$d_1^1 = -0.9 * p_1^1 - 1.2 * p_2^1 + 1000, d_2^1 = -0.9 * p_2^1 - 1.2 * p_1^1 + 1000$$

$$d_1^2 = -0.9 * p_1^2 - 1.2 * p_2^2 + 1000, d_2^2 = -0.9 * p_2^2 - 1.2 * p_1^2 + 1000$$

2) 消费者的去拿取货物的交易成本函数

$$c_{ij11} = 30, c_{ij12} = 48, c_{ij21} = 30, c_{ij22} = 48$$

3) 消费者的去拿取货物的时间成本函数

$$T_{ji11} = 65, T_{ji12} = 66, T_{ji21} = 65, T_{ji22} = 66$$

4) 配送货物的等待时间成本函数

$$T_{j1} = 0.5 * \left( \sum_{j=1}^1 \sum_{i=1}^2 \sum_{r=1}^2 q_{ij2}^r \right)^2 + 2; T_{j2} = 0.5 * \left( \sum_{j=2}^2 \sum_{i=1}^2 \sum_{r=1}^2 q_{ij2}^r \right)^2 + 2$$

## 5) 生鲜电商的生产成本函数

$$f_{jr11} = 2 * \left( \sum_{i=1}^2 q_{i12}^1 / \varphi(t) \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^2 q_{i12}^1 / \varphi(t) \right) * \left( \sum_{i=1}^2 q_{i22}^1 / \varphi(t) \right) + 2 * \left( \sum_{i=1}^2 q_{i12}^1 / \varphi(t) \right)$$

$$f_{jr12} = 3 * \left( \sum_{i=1}^2 q_{i12}^2 / \varphi(t) \right)^2 + 2 * \left( \sum_{i=1}^2 q_{i12}^2 / \varphi(t) \right) * \left( \sum_{i=1}^2 q_{i22}^2 / \varphi(t) \right) + \left( \sum_{i=1}^2 q_{i12}^2 / \varphi(t) \right)^2$$

$$f_{jr21} = 2 * \left( \sum_{i=1}^2 q_{i22}^1 / \varphi(t) \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^2 q_{i22}^1 / \varphi(t) \right) * \left( \sum_{i=1}^2 q_{i12}^1 / \varphi(t) \right) + 2 * \left( \sum_{i=1}^2 q_{i22}^1 / \varphi(t) \right)$$

$$f_{jr22} = 3 * \left( \sum_{i=1}^2 q_{i22}^2 / \varphi(t) \right)^2 + 2 * \left( \sum_{i=1}^2 q_{i22}^2 / \varphi(t) \right) * \left( \sum_{i=1}^2 q_{i12}^2 / \varphi(t) \right) + \left( \sum_{i=1}^2 q_{i22}^2 / \varphi(t) \right)^2$$

## 6) 生鲜电商的交易成本函数

$$c_{ijr} = 0.5 * (q_{ij1r} + q_{ij2r})^2 + 3.5 * (q_{ij1r} + q_{ij2r})$$

## 7) 生鲜电商的补货配送成本函数

$$s_{j1} = 0.25 * 0.5 * 0.2 * \left( \sum_{i=1}^2 \sum_{r=1}^2 (q_{ij1}^r + q_{ij2}^r) \right)^2 + 0.2 * \left( \sum_{i=1}^2 \sum_{r=1}^2 (q_{ij1}^r + q_{ij2}^r) \right)$$

## 8) 生鲜电商的接待成本函数

$$o_j = 0.2 * \left( \sum_{r=1}^2 \sum_{i=1}^2 q_{ij1}^r \right)^2 + 0.5 * \left( \sum_{r=1}^2 \sum_{i=1}^m q_{ij1}^r \right)$$

## 9) 生鲜电商的自营配送成本函数

$$s_{j2} = 2.5 * \left( (1 - \delta_j) * \left( \sum_{r=1}^2 \sum_{i=1}^2 q_{ij2}^r \right)^2 + 0.2 * 5 * \left( (1 - \delta_j) * \left( \sum_{r=1}^2 \sum_{i=1}^2 q_{ij2}^r \right) \right) \right)$$

## 10) 生鲜电商的内部生鲜损耗函数

$$V_{jr} = (1 / \varphi(t) - 1) * \left( \sum_{i=1}^2 (q_{ij1}^r + q_{ij2}^r) \right)$$

## 11) 生鲜电商的生鲜配送损耗成本函数

$$V_{ij} = 0.1 * (1 - \delta_j) * \left( \sum_{r=1}^2 q_{ij2}^r \right)$$

## 12) 众包平台的运营成本

$$\bar{f}_k = 0.25 * \left( \sum_{j=1}^2 \bar{q}_{jk} \right)^2 + 2 * \left( \sum_{j=1}^2 \bar{q}_{jk} \right)$$

## 13) 众包平台的交易成本

$$\bar{c}_{jk} = 0.5 * (\bar{q}_{jk})^2 + 2$$

## 14) 众包平台的自营配送成本

$$\bar{s}_k = 1.5 * \left( (1 - \theta_l) * \left( \sum_{j=1}^2 \bar{q}_{jk} \right) \right)^2 + 3 * 0.2 * \left( (1 - \theta_l) * \left( \sum_{j=1}^2 \bar{q}_{jk} \right) \right)$$

15) 众包平台的自营配送生鲜损耗成本

$$\begin{aligned}\bar{V}_{ki11} &= 0.2 * (1 - \theta_l) * \bar{q}_{jk11}; \bar{V}_{ki12} = 0.2 * (1 - \theta_l) * \bar{q}_{jk12} \\ \bar{V}_{ki21} &= 0.2 * (1 - \theta_l) * \bar{q}_{jk21}; \bar{V}_{ki22} = 0.2 * (1 - \theta_l) * \bar{q}_{jk22}\end{aligned}$$

16) 配送员的交易成本函数

$$\hat{c}_{kl} = 0.5 * (\hat{q}_{kl})^2 + \hat{q}_{kl}$$

17) 配送员的配送成本

$$T_l = 0.25 * \left( \sum_{k=1}^2 \hat{q}_{kl} \right)^2 + 0.4 * \left( \sum_{k=1}^2 \hat{q}_{kl} \right)$$

18) 配送员的生鲜损耗成本

$$V_{hi11} = 0.3 * \hat{q}_{kl11}; V_{hi12} = 0.3 * \hat{q}_{kl12}; V_{hi21} = 0.3 * \hat{q}_{kl21}; V_{hi22} = 0.3 * \hat{q}_{kl22}$$

其中模型采用 matlab2016b 求解, 求解精度为  $\varepsilon < 10^{-4}$ , 采用修正投影方法进行迭代。

## 5.2. 灵敏度分析

由众包平台自由配送员生鲜配送损耗承担率进行灵敏度分析, 得交易量的变化如下图 4~7。

当自由配送员配送生鲜损失承担率增长时, 众包平台与自由配送员之间的交易量增长, 但由于自由配送员配送时间补偿系数也随之增长, 使得增长速率由起始至最后由大到小。而众包平台使用率依据众包物流的生鲜损耗总值与生鲜电商自营配送产生的生鲜损耗的比例, 当自由配送员使用率提高时, 众包平台使用率也依次提高。在总体上自提交易量总量与配送交易量总量分别略微减少和增加, 这是由于商品价值和配送服务无有太大的改变, 使得商品的交易价格和消费者的满意的价格维持不变, 交易量也随之无有太大的波动。

由众包平台自由配送员生鲜配送损耗承担率进行灵敏度分析, 得相关价格的变化如下图 8~11, 得各方利润的变化如下图 12~15。

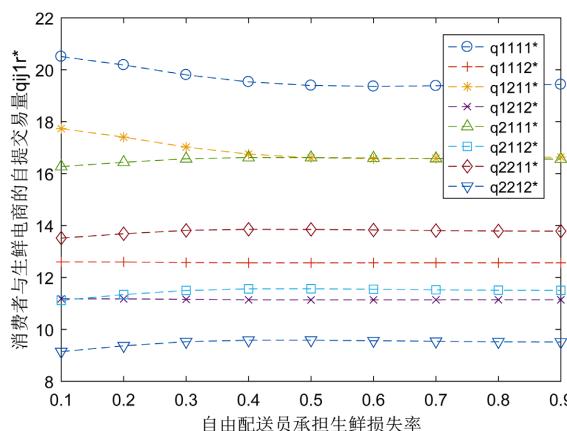
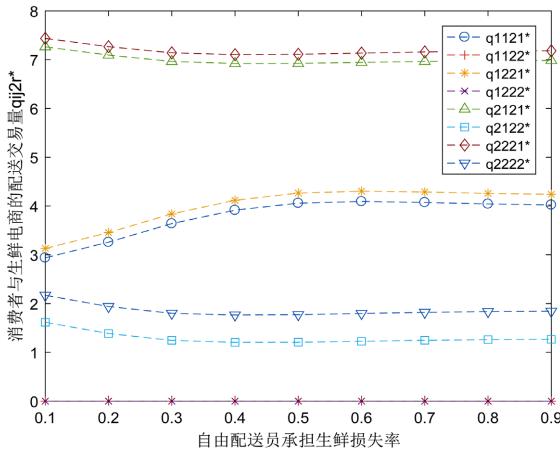
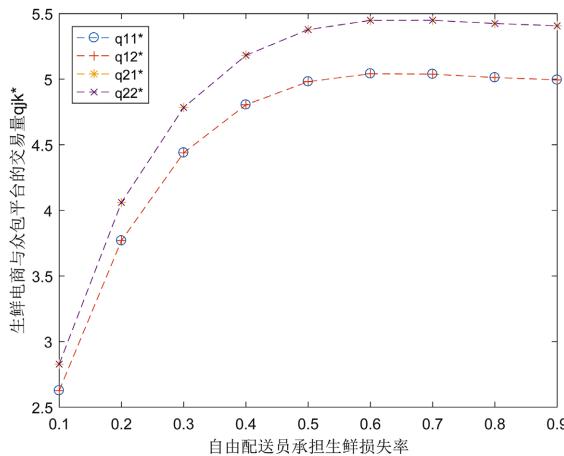
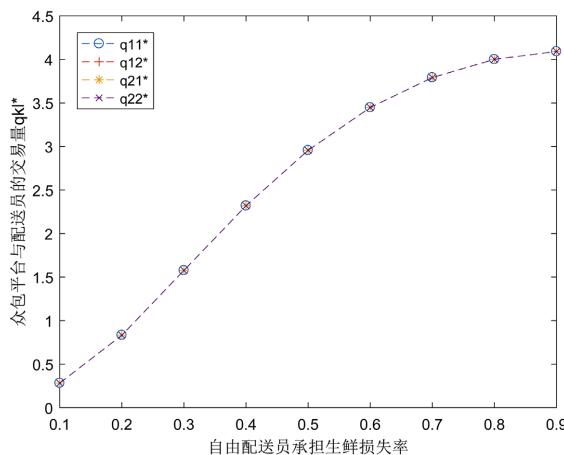
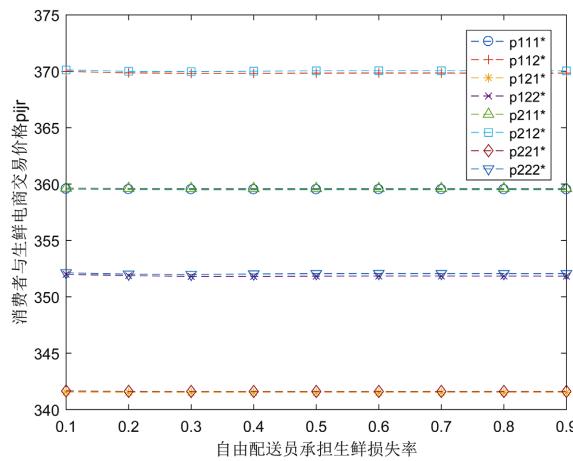
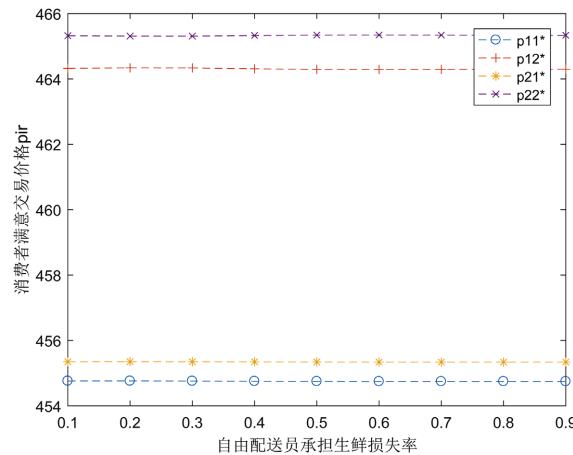
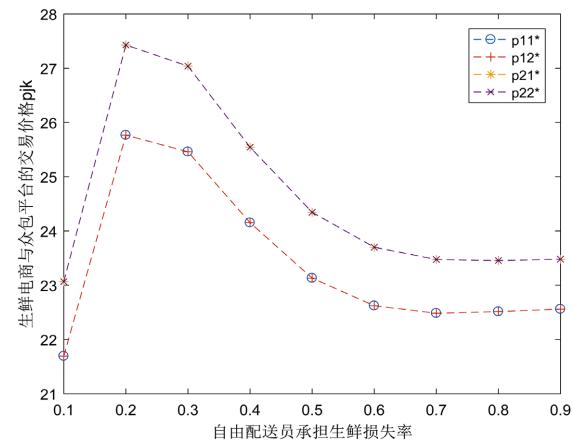
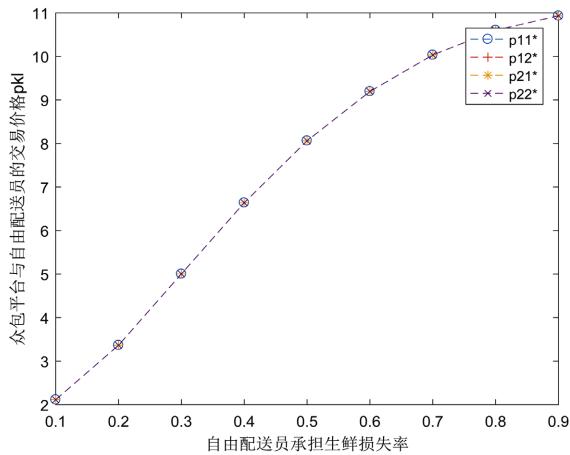
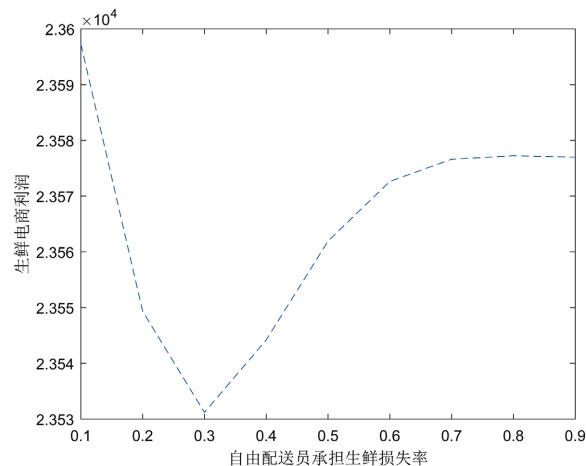
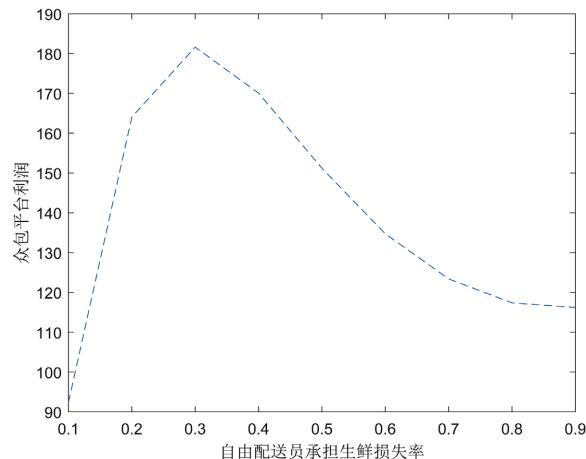


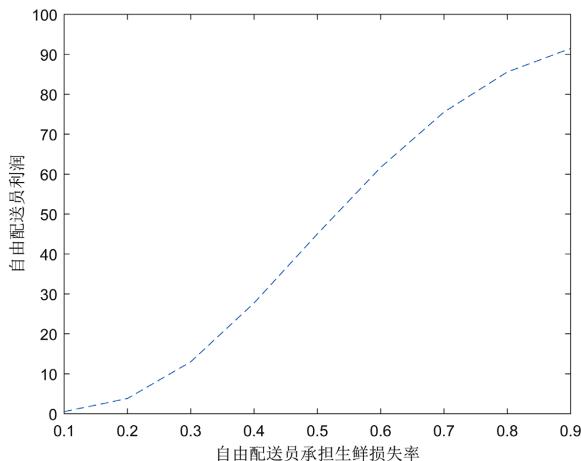
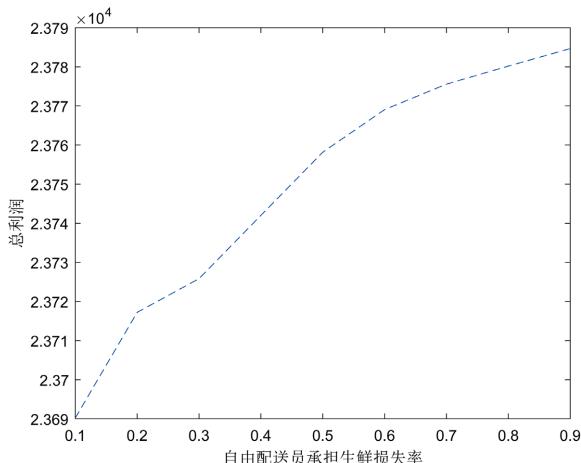
Figure 4.  $q_{ij1}^{r*}$  Changes with  $\omega_k$

图 4.  $q_{ij1}^{r*}$  随  $\omega_k$  的变化

**Figure 5.**  $q_{ij2}^*$  Changes with  $\omega_k$ **图 5.**  $q_{ij2}^*$  随  $\omega_k$  的变化**Figure 6.**  $\bar{q}_{jk}^*$  Changes with  $\omega_k$ **图 6.**  $\bar{q}_{jk}^*$  随  $\omega_k$  的变化**Figure 7.**  $\hat{q}_{kl}^*$  Changes with  $\omega_k$ **图 7.**  $\hat{q}_{kl}^*$  随  $\omega_k$  的变化

**Figure 8.**  $p_{ij}^{r^*}$  Changes with  $\omega_k$ **图 8.**  $p_{ij}^{r^*}$  随  $\omega_k$  的变化**Figure 9.**  $p_i^{r^*}$  Changes with  $\omega_k$ **图 9.**  $p_i^{r^*}$  随  $\omega_k$  的变化**Figure 10.**  $\bar{p}_{jk}^*$  Changes with  $\omega_k$ **图 10.**  $\bar{p}_{jk}^*$  随  $\omega_k$  的变化

**Figure 11.**  $\hat{p}_{kl}^*$  Changes with  $\omega_k$ 图 11.  $\hat{p}_{kl}^*$  随  $\omega_k$  的变化**Figure 12.** The profit of fresh e-commerce changes with  $\omega_k$ 图 12. 生鲜电商的利润随  $\omega_k$  的变化**Figure 13.** Profit of crowdsourcing platform changes with  $\omega_k$ 图 13. 众包平台的利润随  $\omega_k$  的变化

**Figure 14.** The profit of free distributors changes with  $\omega_k$ **图 14.** 自由配送员的利润随  $\omega_k$  的变化**Figure 15.** Total profit changes with  $\omega_k$ **图 15.** 总的利润随  $\omega_k$  的变化

众包物流的使用并没有影响消费者与生鲜电商之间和消费者满意的交易价格，这是由于生鲜电商的逐利性，虽然成本降低但并未选择降低与消费者之间的交易价格。在生鲜电商与众包平台的交易量提高较快时，生鲜电商与众包平台的交易价格也随之增长，从而使得生鲜电商的配送成本上升，利润有所下降。与此同时虽然众包平台与自由配送员的交易量和交易价格均在持续增长，但其总体的成本是下降的，故众包平台的利润在持续增长。

当众包平台利润达至顶点之后，生鲜电商与众包平台的交易量提高较为平缓，而众包平台与自由配送员的交易量和交易价格仍在持续增长，故为提高众包配送的竞争力，众包平台选择降低了生鲜电商与众包平台的交易价格。由此成本上升，收入下降，众包平台的利润便随之下降。而生鲜电商由于众包平台降低了交易价格，成本下降，收入基本维持，利润随之回升。自由配送员随着承担生鲜损失率的提高，众包平台更乐意将配送任务交由自由配送员，故自由配送员使用率也不断提高，一则原因是配送成本的不断上升，二则是交易份额的不断增加，其选择提高交易价格以保证盈利，故利润也随之不断上升。

总之，随着自由配送员配送生鲜损失承担率的不断上升，各个层级之间的交易量和交易价格也依其动态调整，各个层级的利润最高点也不尽相同，故不同的决策者可以选择不同的阈值去调整自己的利润。

## 6. 结论

本文将众包物流的概念引入了生鲜电商最后一公里配送模式中, 建立了考虑生鲜电商配送网络特点和众包物流网络特点的网络均衡模型, 使用了众包平台使用率, 自由配送员使用率, 自由配送员配送生鲜损失承担率, 自由配送员配送时间补偿系数等参数, 利用变分不等式和修正投影算法对模型进行了求解, 分析了自由配送员承担生鲜损失率对于整体考虑众包的生鲜电商网络的影响, 本文得到以下结论:

1) 生鲜电商与消费者的交易价格不随参数的改变而变化。这是由于生鲜电商商品的定价是依据商品所具价值而定, 而消费者满意的价格是依据市场的需求和生鲜电商的服务所定, 其两者皆不随生鲜电商自身架构的变化而变化, 如若生鲜电商保证商品的质量和专注提升配送服务的质量, 则可以为商品赋能, 提升商品的价值, 为企业创造更多生存空间。

2) 自利润而言, 生鲜电商, 众包平台各自可选择合适的参数阈值使自身的利润达到最大。虽然二者利润最大的参数阈值不一, 但如若参照整体利润的变化, 可选择使整体和自身均受益的阈值。即生鲜电商可选择自身发展, 或提升整体供应链的利润来减轻自身管理负担和发挥企业的社会责任。

3) 众包物流的参与提升了供应链整体的利润, 但过多自由配送员的参与会减少众包平台的利润。故众包物流企业应平衡自由配送员与自营配送员的数量, 既专注服务质量的提升, 也减少规模效益所带来的成本。而自由配送员的配送所产生的生鲜损耗若由自由配送员与众包平台共同承担, 其承担率的变化会给众包平台带来一定的利润增长。

本文为生鲜电商如何释放最后一公里配送压力做出了考量, 通过众包物流的参与, 减轻了生鲜电商的配送管理压力和减少了生鲜电商的配送成本, 促进了生鲜电商供应链整体的协调发展。但本文仍有许多不足之处, 例如生鲜电商库存, 商品需求随机等现实因素未纳入考量, 且本文所构建的模型为静态模型, 未来研究或可加入时间因素, 考量相关现实因素, 增强模型的现实意义。

## 参考文献

- [1] 刘伯超, 许秋茗. 我国众包物流发展的现状、困境与升级路径[J]. 对外经贸实务, 2017(11): 89-92.
- [2] 黄友文. 基于 SWOT 分析的我国生鲜电商物流研究[J]. 保鲜与加工, 2017, 17(2): 108-113.
- [3] 陈耀庭, 黄和亮. 我国生鲜电商“最后一公里”众包配送模式[J]. 中国流通经济, 2017, 31(2): 10-19.
- [4] Liu, Y.H., Ma, D.Q., Hu, J.S. and Zhang, Z.Y. (2021) Sales Mode Selection of Fresh Food Supply Chain Based on Blockchain Technology under Different Channel Competition. *Computers & Industrial Engineering*, **162**, Article ID: 107730. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107730>
- [5] 付朝晖, 刘长石. 生鲜电商配送的开放式时变车辆路径问题研究[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(1): 271-278.
- [6] 林海, 胡雅淇. 大数据剖析生鲜电商平台销量的影响因素——基于支持向量机方法的实证研究[J]. 贵州社会科学, 2021(3): 129-138.
- [7] Lin, J.B., Li, T. and Guo, J.Y. (2021) Factors Influencing Consumers' Continuous Purchase Intention on Fresh Food E-Commerce Platforms: An Organic Foods-Centric Empirical Investigation. [J]. *Electronic Commerce Research and Applications*, **50**, Article ID: 101103. <https://doi.org/10.1016/j.elerap.2021.101103>
- [8] 白世贞, 谢爽, 吴绒, 鄢章华. 基于价格参考效应的生鲜电商供应链协调策略研究[J]. 保鲜与加工, 2018, 18(1): 118-124.
- [9] 郑金山. 新冠疫情下基于配送服务影响需求量的生鲜电商供应链模型研究[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2020, 36(4): 30-32.
- [10] 张科静, 马曼琼. 考虑生鲜电商退货的双渠道供应链协调研究[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2021, 47(6): 116-123.
- [11] 徐慧婷. 基于 F2F 的生鲜电商三级供应链决策及协调研究[J]. 广东工业大学学报, 2022, 39(3): 25-31.
- [12] Nagurney, A., Dong, J. and Zhang, D. (2002) A Supply Chain Network Equilibrium Model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **38**, 281-303. [https://doi.org/10.1016/S1366-5545\(01\)00020-5](https://doi.org/10.1016/S1366-5545(01)00020-5)

- [13] 胡一竑, 李学迁, 张江华, 张建同. 网购供应链网络均衡模型研究[J]. 运筹与管理, 2012, 21(4), 34-40.
- [14] 曹炳汝, 朱博文. 考虑再制造投资的闭环供应链网络均衡模型[J]. 工业工程, 2021, 24(3): 1-9.
- [15] Zhang, G.T., Cheng, P.Y., Sun, H., et al. (2021) Carbon Reduction Decisions under Progressive Carbon Tax Regulations: A New Dual-Channel Supply Chain Network Equilibrium Model. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1077-1092. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.029>
- [16] 张铁柱, 刘志勇, 滕春贤, 胡运权. 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, 2005, 25(7): 61-66.
- [17] 何胜学, 潘红. 考虑库存的供应链框架下区域运输网络均衡模型[J]. 系统工程, 2013, 31(5): 9-15.
- [18] 周礼南, 周根贵, 蒙方中, 曹柬. 考虑消费者有机产品偏好的生鲜农产品供应链均衡研究[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(2): 360-371.
- [19] 王文杰, 孙中苗, 徐琪, 王志宏. 随机需求下考虑服务商竞争的众包物流动态定价策略[J]. 工业工程与管理, 2018, 23(2): 114-121.
- [20] 王文杰, 陈颖, 蒋帅杰. 考虑平台竞争的众包物流社会配送服务最优定价策略[J]. 运筹与管理, 2020, 29(10): 11-20.
- [21] 慕静, 杜田玉, 刘爽, 等. 基于即时配送和收益激励的众包物流运力调度研究[J]. 运筹与管理, 2018, 27(5): 58-65.
- [22] 李玉, 吴斌, 王超. 基于前景理论的众包物流配送方行为决策演化博弈分析——基于发货方视角[J]. 运筹与管理, 2019, 28(6): 129-135.
- [23] 向传凯, 张毅. 接包方视角下众包物流平台评价研究[J]. 商业经济研究, 2020(9): 112-114.
- [24] 邱洪全. 基于 TAM 模型的众包物流大众参与行为影响因素[J]. 中国流通经济, 2018, 32(4): 110-119.
- [25] 孟秀丽, 吴艾婧, 杨静. 众包物流服务网络决策优化[J]. 系统工程, 2020, 38(1): 75-84.