

基于商品供需网络的城市物流仓储设施均衡模型及应用

杨 鹏^{1,2}, 史 峰¹

(1. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075; 2. 湖南财政经济学院, 长沙 410205)

摘 要 城市物流仓储设施具有以商流为前提、物质需求为基础的网络特性. 首先从价值流理论角度分析了从独立决策模型到交互决策模型的必要性和可行性, 利用变分不等式建立了包含物流仓储设施和商品供需成员的多层级供应链物流竞争超网络均衡模型, 得到了系统达到均衡的条件, 给出了经济解释和求解算法, 最后结合具体算例提供了验证求解和决策应用, 研究表明, 仓储设施层与商品供需层相互影响和制约, 设施效率改进、场址迁移等行为可能导致市场格局、商品流量和价格以及社会福利的有规律变动.

关键词 城市物流; 仓储设施; 商品供需; 网络均衡; 变分不等式

Urban logistics storage facilities equilibrium model based on commodity supply and demand network and its application

YANG Peng^{1,2}, SHI Feng¹

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. Hunan University of Finance and Economics, Changsha 410205, China)

Abstract Urban logistics storage facilities have the nature of network based on commercial trend and demand. In this paper, we first analyze the necessity and feasibility to change the independent decision-making model into interact decision-making model from the perspective of the value stream. Then, we establish a network equilibrium model with the competition of the multi-level members of the supply chain logistics which include the logistics storage facilities and the supplier or demander of the commodity using the variational inequalities theory. Besides, we also get conditions which can make the system reach equilibrium and offer the economic interpretation and the solving algorithm. Finally, we validate the model and present its decision-making applications by solving the specific examples. It shows that storage facilities layer and layer of the commodity's supply and demand always influence and restrict each other, and the improvement of the facilities efficiency, the migration of the sites and other behaviors like these may lead to the regular change of the market pattern, the quantities of commodity, the prices and the social welfare.

Keywords urban logistics; storage facilities; commodity supply and demand; network equilibrium; variational inequalities

1 引言

城市物流系统是满足城市需求的一个支持网络系统, 主要由众多物流线路与仓储设施构成. 与发达国家不同, 我国城乡二元结构特征明显, 劳动力廉价, 大量未规划的民间仓储设施难以统计, 而规划仓储设施如各种物流园区、物流中心和配送中心纷纷上马, 使竞争环境日趋膨胀, 呈现“资源分散, 效率低下”的特征^[1-2]. 随着城市化的加快, 其内部功能空间也将不断变化和重组, 物流仓储等设施容易出现重复建设、规划失当等问题, 因此亟需完善适合我国国情的物流设施布局、评价的理论或方法, 可有效地节约资源, 优化网络结构和空间布局, 提高经济效益和社会效益, 确保提供优质服务.

收稿日期: 2011-07-14

资助项目: 国家自然科学基金 (70901076, 71171200); 教育部博士点基金 (20090162120021)

作者简介: 杨鹏 (1980-), 男, 博士, 研究方向: 物流与运输系统优化, E-mail: bugu12001@yahoo.com.cn; 通讯作者: 史峰 (1956-), 男, 博士, 博士生导师, 研究方向: 交通系统优化、物流系统工程等, E-mail: shifeng@mail.csu.edu.cn.

目前,城市物流仓储设施的规划理论主要源于国外的设施选址,Bookbinder 和 Reece^[3] 定义了二层多商品配送体系,建立了非线性混合整数规划模型。Taniguchi 等^[4] 利用双层规划理论建立了物流枢纽选址模型,即从上层和下层进行布局和规划分析,通过启发式算法进行了求解。Ahmadi 等^[5] 将车辆库存路径问题与选址布局问题结合起来加以考虑。国内许多学者开始关注并展开了深入的研究,文献 [6] 详细分析了考虑竞争条件下、基于空间价格均衡条件等不同条件下的物流中心选址双层规划模型。文献 [7] 以物流总费用最小为目标函数提出了双层物流网络规划模型。文献 [8] 针对城市配送系统多层次结构,考虑不同层次节点间的物流量流动,建立了不同层次节点的选址互为影响的双层规划模型。文献 [9] 对由节点和链接构成的城市物流网络,利用选址模型和遗传算法优化城市物流网络的中间节点的空间分布和规模。文献 [10] 针对一类多商品物流网络优化设计问题,提出一种将库存控制决策和设施选址相结合的优化模型。总体上,上述通常考虑从工厂经配送中心送达客户的诸如费用,找出物流总成本最小的一个或多个位置,此类方法类似于交通规划中的“全有全无”配流,较适用于早期物流市场或垄断市场。

在城市土地越来越紧张的情况下,受供求因素的影响,具有区位优势的城市物流仓储资源在供应链中也愈加具有讨价还价能力,信息的越来越发达加上成本结构和价格机制的作用,使供应链中的供应商、中间商不仅在商品流量上与其所在行业竞争并实现均衡,而且进一步使派生行业城市物流仓储业通过竞争达到一定的市场均衡状态。对于由生产商、零售商和顾客组成的供应链市场均衡问题,Nagurney 等^[11] 首先运用网络均衡概念、变分不等式方法,建立了静态均衡模型并得到了网络整体乃至成员的均衡条件,后来国内外学者对此进行了较多扩展研究。在此基础上,文献 [15] 对具有多种商品流动的三层供应链网络均衡问题进行了分析,利用变分不等式构建了各层均衡模型以及系统均衡模型。文献 [16] 在均衡模型基础上运用随机效用理论和多项式 logit 模型,利用改进的相继平均法(MSA)研究了需求市场上产品随机选择问题。文献 [17] 研究了电子商务环境下渠道公平对供应链均衡的影响。其它网络均衡相关研究还考虑了多目标、多渠道和随机需求等不同条件,它逐渐成为一种统一处理具有多层次、多商品且竞争与合作并存网络问题的有效方法。

为反映这种以商流为前提、物质需求为基础的城市物流仓储设施的网络特性,本文拟结合网络均衡分析方法,从供应链系统出发,从新的角度探讨城市供应链下物流仓储设施市场问题,这对于掌握民间物流仓储设施的数量规模与规律以及制定可持续发展的城市物流方案具有十分重要的意义。

2 基于商品供需网络的城市物流仓储设施均衡问题分析

2.1 城市物流仓储设施均衡问题的价值流理论解释

传统的供应链网络均衡问题,认为网络同一层成员相互竞争,层与层之间成员相互合作,个体都采用最优行为决策,系统最终达到的是各方(节点)都满意的均衡状态^[11]。其模型的基础是层与层之间的商流(信息流和资金流),当然同时还伴随着相反方向的物流。商流和物流在本质上是统一的、互相联系和制约的,但又可以互相分离,各自独立运行。它们之所以是统一的,因为在商品的流通过程里,商流的数量和方向决定着物流的数量和方向,它们基本上是结合进行的。随着商品化大生产和社会分工的细化,用于交换的商品品种和数量增加,生产和消费在时间和空间的距离也日益扩大,商流可以通过货币媒介和信息媒介一下子完成,而物流则需要凭借仓库、运输通讯工具等才能进行,时空上与商流产生很大差别,商流和物流的这种合理分离已成为一种趋势。

在 Nagurney 等建立的供应链网络一般模型的基础上,需要考虑物流网络的决策行为及其对供应链商品供需成员决策的相互影响。商物分离似乎使供应链的简单的一维关系变得更加复杂,而经济学上的解释是无论商流活动还是物流活动,都是在不断给商品赋予相应的价值。从价值流角度,这样的网络仍存在着上下游关系和相互价值的交换和交易,它们由此及彼、由内到外连接成一条价值链,通过对价值链上的价值流动以及价值流本身的成本驱动因素,从整个生产和服务过程的角度来寻找成本降低的空间,上游环节向下游环节输出产品或物流服务,下游环节向上游环节反馈信息和支付费用^[12]。传统的三层供应链实际演变为包含城市物流仓储设施的供应链,如图 1 所示。网络中的流通过资金流和价值流最终实现商品的交易,不同的是:中间商层与需求层、供应商层之间是商品供需关系,中间商层与仓储商层是基于商品派生的仓储设施服务关系。

2.2 城市物流仓储设施均衡问题描述与假设

综上所述,城市范围内的大量物流仓储设施与供应链网络的中间商达成服务交易并相互合作,而相互竞争的设施间又形成一个新的层级——仓储设施层,传统的三层供应链网络实际上构成了一个商品供需层,

二者整体构成了一个多层次的城市供应链物流竞争超网络^[13-14]. 记此网络 $G = (N, E)$, 其中节点集 $N = I \cup J \cup K \cup L$, J 表示供应商集, 其成员为 $j = 1, 2, \dots, J$ 个供应商, K 表示中间商集 (包括批发商、零售商), 其成员为 $k = 1, 2, \dots, K$ 个中间商, L 表示需求市场集, 其成员为 $l = 1, 2, \dots, L$ 个顾客, J, K 与 L 之间形成商品供需层. I 表示仓储商集, 其成员为 $i = 1, 2, \dots, I$ 个仓储商. E 表示网络节点连接关系集, 如 $(j, k) \in E, (k, l) \in E$ 是商品的供需关系, 具体表现为商流和资金流, $(i, k) \in E$ 是物流服务关系, 具体表现为价值流和资金流, 各节点集内部成员之间存在直接的竞争关系, 具体表现为有限资源的争取或利用, 具体如图 2 所示. 供应商供应, 仓储商服务, 中间商销售, 客户需求的同种产品均同质无差异, 它由 H 种商品组成, $h = 1, 2, \dots, H$. 在此模式下, 中间商将城市需求的商品放在仓储商的仓库, 仓储商基于信息共享能及时获得中间商的服务指令, 下层中间商的运营决策主要包括样品展示、促销和交易等, 即做到收订单就要求上层向指定地点交货, 并根据实际销量向供应商支付购买费用. 与实际情况接近, 假设城市供应链物流竞争超网络同一层级之间存在非合作竞争, 市场上流通的商品均需经历一定的仓储周期, 即各供需商品要承担一个较为固定的库存费用, 且固定 OD 对之间配送所耗费的时间波动不大. 为便于研究, 同时不考虑各种商品供需的供应能力限制和仓储设施的各服务能力限制.

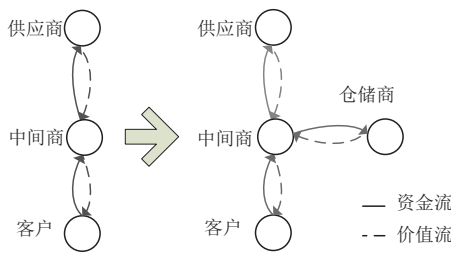


图 1 价值流驱动的城市供应链网络竞争关系演变

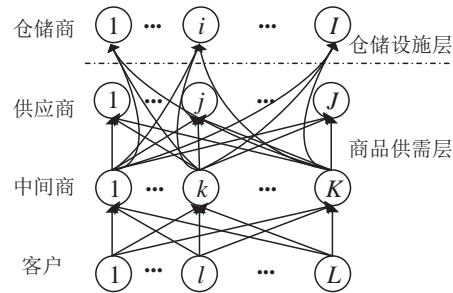


图 2 城市供应链物流竞争超网络结构

城市供应链物流竞争超网络涉及的是多层次决策者行为, 处于上层的仓储商或供应商之间存在竞争行为, 彼此都追求利益最大, 前后有序的价值流交易关系使物流仓储市场和商品供需市场最终达到均衡状态; 中间商要分别与仓储商或供应商之间进行交易, 在前两者价值产品的基础上, 进一步面向客户贡献出自己的价值产品, 中间商层级也存在非合作竞争, 在下游价值流交易关系的作用下, 也达到中间商市场的均衡状态; 最后是客户层级, 客户购买行为类似于交通网络均衡中的用户选择行为, 同样达到需求市场的均衡状态, 最终整个城市供应链物流超网络达到均衡状态, 商品流量在各个节点上都达成了平衡.

3 基于商品供需网络的城市物流仓储设施均衡模型的建立

3.1 仓储设施层收入成本分析与均衡模型

仓储设施层代表仓库、物流中心和配送中心的集合, 作为物流活动的起始节点, 它的一个主要任务是整合输入商品以及直接将其运送到目的地, 对可能短期内无法交付的要实行存储. 设施相对于客户所处的位置和货物的配送路径之间存在必然的联系, 配备的车辆出发而又结束于设施, 平均时速和往返距离可以视为恒定的常数, 设施的布局 and 规模主要决定了基于路径的交付成本^[6]. 因此, 仓储设施层的成本与它的功能有关, 不仅包括设施内成本, 还应考虑设施外成本, 前者一般由商品处理成本、商品装卸成本、储存成本等构成, 后者则主要是配送交付成本, 以下就给出城市物流仓储设施的一般运作成本模型和涉及的各种参数.

假设 q_i^h 表示仓储商 i 储存商品 h 的非负数量, $q_i^1 = (q_i^1, \dots, q_i^h, \dots, q_i^H)$ 表示仓储商 i 的储存向量, $q^1 = (q_1^1, \dots, q_1^h, \dots, q_I^1)$ 表示所有仓储商的商品储存向量; q_{ik}^h 表示仓储商 i 与中间商 k 达成的关于商品 h 的储存交易量, 记仓储商 i 与中间商 k 之间各商品的储存向量为: $Q_{ik}^1 = (q_{ik}^1, \dots, q_{ik}^h, \dots, q_{ik}^H)$, 记仓储商 i 与各中间商之间的储存向量为: $Q_i^1 = (Q_{i1}^1, \dots, Q_{ik}^1, \dots, Q_{iK}^1)$, 记各仓储商与各中间商之间的储存向量为: $Q^1 = (Q_1^1, \dots, Q_i^1, \dots, Q_I^1)$; p_{ik}^h 表示仓储商 i 给予中间商 k 商品 h 的储存价格; c_i^h 表示仓储商 i 储存每单位商品 h 的平均成本, 它受变量如自己储存量、竞争者储存量的影响, 记 $c_i^h = c_i^h(Q^1)$; d_{ik}^h 表示仓储商 i 与中间商 k 关于商品 h 的装卸管理成本, 且记 $d_{ik}^h = d_{ik}^h(q_{ik}^h)$; ρ_{ik}^h 表示仓储商 i 与中间商 k 关于商品 h 基于路径的配送交付成本, 由于配送车辆资源和道路资源的竞争, 它也受到自己交付量、竞争者交付量的影响, 且

记 $\rho_{ik}^h = \rho_{ik}^h(Q^1)$. 由于仓储商 i 储存量来源于各中间商 k 的服务交易量, 从而有:

$$q_i^h = \sum_{k=1}^K q_{ik}^h \quad (1)$$

综合以上, 各仓储商之间存在非合作竞争, 则对于任意的仓储商 i , 其利润最大化的目标函数可建立为:

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H p_{ik}^h q_{ik}^h - \sum_{h=1}^H c_i^h(Q^1) - \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H d_{ik}^h(q_{ik}^h) - \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \rho_{ik}^h(Q^1) \quad (2)$$

式 (2) 表示从理性经济人出发, 每个仓储商都追求各自利润的最大化, 其利润等于总的仓储收入与所有储存成本、装卸管理成本和配送交付成本之差. 储存成本 c_i^h 是指为满足客户需求而进行的储存活动所产生的成本, 除考虑仓储货物数量, 还应考虑商品的平均仓储周期, 它反映了各仓储设施处理能力和作业效率, 可以根据统计的各种货物历年平均库存周期分析确定. 同种商品不同类型仓储设施的平均仓储周期是不同的, 单位仓储时间单位储存数量的仓储费用在一定周期内是可以额定的, c_i^h 可表示为:

$$c_i^h(Q^1) = \vartheta_i^h(Q^1) T_i^h q_i^h \quad (3)$$

式中: $\vartheta_i^h(Q^1)$ 为仓储设施 i 关于商品 h 的单位仓储时间单位储存数量的仓储费用; T_i^h 为仓储设施 i 关于商品 h 的平均仓储周期.

装卸管理成本 $d_{ik}^h(q_{ik}^h)$ 与装备条件与管理水平相关, 具体体现在管理方式和手段上, 通过标准化与机械化作业, 不同的条件拥有大小不同的成本参数. 假设配送交付成本是指从设施点出发的配送车辆访问目的地并将商品送到各客户手中所耗费的成本, 是仓储配送量的函数, 而且取决于每频次出行时间, 不同位置、不同线路对其影响很大, 或者说还与配送路径、车辆型号、交通拥挤条件及单位运价等有关, 通过历史运作数据同时可估计 OD 间的平均行驶速度, 配送交付成本可表示为:

$$\rho_{ik}^h(Q^1) = \omega_{ik}^h(Q^1) \frac{L_{ik}^h q_{ik}^h}{\phi \varsigma \nu_{ik}^h} \quad (4)$$

式中: $\omega_{ik}^h(Q^1)$ 为每单位仓储配送量每单位时间的配送交付成本; L_{ik}^h 为从仓储设施 i 到目的地的距离; ϕ 为装载能力的平均利用系数; ς 为配送车辆的额定装载能力; ν_{ik}^h 为从仓储设施 i 到目的地配送车辆的平均行驶速度.

上述优化问题 (2) 可以转化为下面的等价形式:

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H p_{ik}^h q_{ik}^h - \sum_{h=1}^H \vartheta_i^h(Q^1) T_i^h q_i^h - \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H d_{ik}^h(q_{ik}^h) - \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \omega_{ik}^h(Q^1) \frac{L_{ik}^h q_{ik}^h}{\phi \varsigma \nu_{ik}^h} \quad (5)$$

设定 $\vartheta_i^h(Q^1)$ 、 $\omega_{ik}^h(Q^1)$ 、 $d_{ik}^h(q_{ik}^h)$ 为连续可微凸函数, 则 $c_i^h(Q^1)$ 、 $\rho_{ik}^h(Q^1)$ 同样满足条件, 当每个仓储商都是相对其它仓储商的最佳反应, 并没有动机改变其策略时, 便达到了相对的稳定点即 Nash 均衡点 (Q^{1*}). 上述最优化问题由文献 [18-19] 可知, 所有仓储层成员同时实现均衡的条件可以等价于如下的变分不等式形式:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \left\{ T_i^h \vartheta_i^h(Q^{1*}) + T_i^h q_i^h \frac{\partial \vartheta_i^h(Q^{1*})}{\partial q_{ik}^h} + \frac{\partial d_{ik}^h(q_{ik}^h)}{\partial q_{ik}^h} + \frac{L_{ik}^h}{\phi \varsigma \nu_{ik}^h} \left[\omega_{ik}^h(Q^{1*}) + q_{ik}^h \frac{\partial \omega_{ik}^h(Q^{1*})}{\partial q_{ik}^h} \right] - p_{ik}^{h*} \right\} \times (q_{ik}^h - q_{ik}^{h*}) \geq 0, \quad \forall (Q^1) \in R_+^{IKH} \quad (6)$$

式 (6) 表明: 当各仓储商的边际储存成本加上边际装卸管理成本和边际配送交付成本等于支付给仓储商的服务价格时, 仓储商才会接受此物流业务, 大于则会选择不接受.

3.2 商品供需层收入成本分析与均衡模型

商品供需层直接针对客户的需求而创造价值, 是商品交易的主体, 它可能由多个层次多个不同类型的组织所掌握或参与, 为便于分析, 这里仅描述供应商、中间商和客户三种成员的行为.

1) 供应商

设 q_{jk}^h 表示供应商 j 与中间商 k 关于产品 h 的成交量, 记供应商 j 与中间商 k 之间各产品的成交向量为: $Q_{jk}^2 = (q_{jk}^1, \dots, q_{jk}^h, \dots, q_{jk}^H)$, 记供应商 j 与各分销商之间的成交向量为: $Q_j^2 = (Q_{j1}^2, \dots, Q_{jk}^2, \dots, Q_{jK}^2)$, 记各供应商与各分销商之间的成交向量为: $Q^2 = (Q_1^2, \dots, Q_j^2, \dots, Q_J^2)$; f_j^h 表示供应商 j 供应产品 h 的成本, 它受变量如自己供应量、竞争者供应量的影响, 记 $f_j^h = f_j^h(Q^2)$; p_{jk}^h 表示供应商 j 给予中间商 k 关于商品

h 的成交价格; g_{jk}^h 表示供应商 j 与中间商 k 关于产品 h 的交易和管理成本, 且记 $g_{jk}^h = g_{jk}^h(q_{jk}^h)$. 由于供应商 j 产销量平衡, 有:

$$q_j^h = \sum_{k=1}^K q_{jk}^h \quad (7)$$

对于任意的供应商 j , 其利润最大化的目标函数为:

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H p_{jk}^h q_{jk}^h - \sum_{h=1}^H f_j^h(Q^2) - \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H g_{jk}^h(q_{jk}^h) \quad (8)$$

2) 中间商

中间商一方面从仓储商处购买仓储服务, 另一方面从供应商处采购商品, 并将商品转卖给需求市场, 设 q_{kl}^h 表示中间商 k 与客户 l 关于商品 h 的成交量, 记中间商 k 与客户 l 之间各商品的交易向量为: $Q_{kl}^3 = (q_{kl}^1, \dots, q_{kl}^h, \dots, q_{kl}^H)$, 记中间商 k 与各客户之间的交易向量为: $Q_k^3 = (Q_{k1}^3, \dots, Q_{kl}^3, \dots, Q_{kL}^3)$, 记各中间商与各客户之间的交易向量为: $Q^3 = (Q_1^3, \dots, Q_k^3, \dots, Q_K^3)$; p_{kl}^h 表示中间商 k 给予客户 l 关于商品 h 的成交价格; ν_k^h 表示中间商 k 关于商品 h 的运营成本, 它受变量如自己交易量、竞争者交易量的影响, 记 $\nu_k^h = \nu_k^h(Q^3)$. 对于任意的中间商 k , 其利润最大化的目标函数为:

$$\max \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H p_{kl}^h q_{kl}^h - \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H p_{jk}^h q_{jk}^h - \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^H p_{ik}^h q_{ik}^h - \sum_{h=1}^H \nu_k^h(Q^3) \quad (9)$$

另外, 须考虑其所有成交量或交易量的非负约束和相应成交能力约束, 令 $u_k^h, \pi_k^h, \sigma_k^h$ 是式 (9) 约束条件对应的拉格朗日乘子, u_k, π, σ 分别表示其相应维度的向量.

3) 客户

设 c_{kl}^h 表示客户 l 从中间商 k 购买商品 h 物流服务的交易成本, 记 $c_{kl}^h = c_{kl}^h(Q^3)$; p_l^h 为客户 l 购买商品 h 物流服务所愿支付的成本, $p_l = (p_l^1, \dots, p_l^h, \dots, p_l^H)$ 表示客户 l 的商品所愿支付成本向量, $p = (p_1, \dots, p_l, \dots, p_L)$ 表示所有客户的商品所愿支付成本向量; z_l^h 表示客户 l 对商品 h 的物流服务需求量, 由于一个市场的客户与其它市场的客户之间存在竞争, 它受变量如自己市场和其它市场物流服务需求价格的影响, 并设 $z_l^h = z_l^h(p)$. 对于需求的决策行为借用交通网络均衡中的用户最优选择行为, 对于任意的一个客户 l , 用户最优均衡条件为:

$$p_{kl}^{h*} + c_{kl}^h(Q^{3*}) \begin{cases} = p_l^{h*}, & q_{kl}^{h*} > 0 \\ \geq p_l^{h*}, & q_{kl}^{h*} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$z_l^h(p^*) \begin{cases} = \sum_{k=1}^K q_{kl}^{h*}, & p_l^{h*} > 0 \\ \leq \sum_{k=1}^K q_{kl}^{h*}, & p_l^{h*} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

假设 $f_j^h(Q^2)$ 、 $g_{jk}^h(q_{jk}^h)$ 、 $\nu_k^h(Q^3)$ 为连续可微凸函数, 当每个供应商、中间商都是相对其它供应商、中间商的最佳反应, 并没有动机改变其策略时, 便达到了相对的稳定点即 Nash 均衡点 $(Q^{2*}, (Q^{1*}, Q^{2*}, Q^{3*}, u^*, \pi^*, \sigma^*))$. 所有供应层、中间商层成员同时实现均衡的条件可以分别等价如下的变分不等式形式:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \left[\frac{\partial f_j^h(Q^{2*})}{\partial q_{jk}^h} + \frac{\partial g_{jk}^h(q_{jk}^{h*})}{\partial q_{jk}^h} - p_{jk}^{h*} \right] \times (q_{jk}^h - q_{jk}^{h*}) \geq 0, \quad \forall (Q^2) \in R_+^{JKH} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H (p_{ik}^{h*} - \pi_k^{h*} + \sigma_k^{h*}) \times (q_{ik}^h - q_{ik}^{h*}) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H (p_{jk}^{h*} - u_k^{h*} - \sigma_k^{h*}) \times (q_{jk}^h - q_{jk}^{h*}) \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H \left[u_k^{h*} + \frac{\partial \nu_k^h(Q^{3*})}{\partial q_{kl}^h} + \pi_k^{h*} - p_{kl}^{h*} \right] \times (q_{kl}^h - q_{kl}^{h*}) + \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \left(\sum_{j=1}^J q_{jk}^{h*} - \sum_{l=1}^L q_{kl}^{h*} \right) \times (u_k^h - u_k^{h*}) \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \left(\sum_{i=1}^I q_{ik}^{h*} - \sum_{l=1}^L q_{kl}^{h*} \right) \times (\pi_k^h - \pi_k^{h*}) + \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \left(\sum_{j=1}^J q_{jk}^{h*} - \sum_{i=1}^I q_{ik}^{h*} \right) \times (\sigma_k^h - \sigma_k^{h*}) \geq 0 \\ & \forall (Q^1, Q^2, Q^3, u, \pi, \sigma) \in R_+^{I(KH+JKH+KLH+KH+KH+KH)} \quad (13) \end{aligned}$$

式 (12) 表明: 当各供应商的边际供应成本加上交易成本等于交易价格时, 供应商才会进行供应, 大于则会选择不供应。

式 (13) 表明: 当各中间商的储存交易价格与拉格朗日乘子 σ_k^h 之和等于拉格朗日乘子 π_k^h 时, 中间商才会进行仓储服务, 大于则不选择; 当各中间商的拉格朗日乘子 u_k^h 与拉格朗日乘子 σ_k^h 之和等于商品订购价格时, 中间商才会进行订购, 大于则不选择; 当各中间商的拉格朗日乘子 u_k^h 、拉格朗日乘子 π_k^h 与边际运营成本等于零售商供给市场的商品要价时, 中间商才会进行销售。

相应的, 所有需求层成员同时实现均衡的条件是:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H [p_{kl}^{h*} + c_{kl}^h(Q^{3*}) - p_l^{h*}] \times (q_{kl}^h - q_{kl}^{h*}) + \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H \left[\sum_{k=1}^K q_{kl}^{h*} - z_l^h(p^*) \right] \times (p_l^h - p_l^{h*}) \geq 0 \quad (14)$$

$$\forall (Q^3, p) \in R_+^{K+LH+LH}$$

式 (14) 表明: 均衡时与中间商的商品 h 的交易价格加上客户交易所需支付的交易成本不超过客户愿意支付的价格 p_l^h 时, 交易才会发生, 反之则不发生; 均衡时市场客户愿意支付的价格须大于 0, 否则供给大于需求时该商品为免费服务。

3.3 基于商品供需网络的城市物流仓储设施均衡模型

当仓储设施层和商品供需层达到均衡时, 相联结的层级间的流出与流入量一致, 而且仓储商、供应商、中间商和客户的销售量、供应量或各交易量与价格必须满足变分不等式 (6)、(12)、(13)、(14) 的和。据此, 给出本文提出的具有竞争结构的包含商品供需和仓储设施的城市供应链物流超网络均衡状态的定义。

令 $\Omega \equiv \{(Q^1, Q^2, Q^3, u, \pi, \sigma, p) | (Q^1, Q^2, Q^3, u, \pi, \sigma, p) \in R_+^{IKH+JKH+KLH+KH+KH+KH+LH}\}$, 考虑以上多商品流城市供应链物流网络均衡的条件, 是要寻找一组均衡解 $(Q^{1*}, Q^{2*}, Q^{3*}, u^*, \pi^*, \sigma^*, p^*) \in \Omega$ 满足以下的变分不等式:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \left\{ T_i^h \vartheta_i^h(Q^{1*}) + T_i^h q_i^h \frac{\partial \vartheta_i^h(Q^{1*})}{\partial q_{ik}^h} + \frac{\partial d_{ik}^h(q_{ik}^{h*})}{\partial q_{ik}^h} + \frac{L_{ik}^h}{\phi \zeta \nu_{ik}^h} \left[\omega_{ik}^h(Q^{1*}) + q_{ik}^h \frac{\partial \omega_{ik}^h(Q^{1*})}{\partial q_{ik}^h} \right] - \pi_k^{h*} + \sigma_k^{h*} \right\} \times (q_{ik}^h - q_{ik}^{h*}) \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \left[\frac{\partial f_j^h(Q^{1*})}{\partial q_{jk}^h} + \frac{\partial g_{jk}^h(q_{jk}^{h*})}{\partial q_{jk}^h} - u_k^{h*} - \sigma_k^{h*} \right] \times (q_{jk}^h - q_{jk}^{h*}) \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H \left[u_k^{h*} + \frac{\partial \nu_k^h(Q^{3*})}{\partial q_{kl}^h} + \pi_k^{h*} + c_{kl}^h(Q^{3*}) - p_l^{h*} \right] \times (q_{kl}^h - q_{kl}^{h*}) \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \left(\sum_{j=1}^J q_{jk}^{h*} - \sum_{l=1}^L q_{kl}^{h*} \right) \times (u_k^h - u_k^{h*}) + \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \left(\sum_{i=1}^I q_{ik}^{h*} - \sum_{l=1}^L q_{kl}^{h*} \right) \times (\pi_k^h - \pi_k^{h*}) \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \left(\sum_{j=1}^J q_{jk}^{h*} - \sum_{i=1}^I q_{ik}^{h*} \right) \times (\sigma_k^h - \sigma_k^{h*}) + \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H \left[\sum_{k=1}^K q_{kl}^{h*} - z_l^h(p^*) \right] \times (p_l^h - p_l^{h*}) \geq 0 \\ & \forall (Q^1, Q^2, Q^3, u, \pi, \sigma, p) \in \Omega \end{aligned} \quad (15)$$

证明 见附录。

4 解算法与模型的应用

4.1 求解算法

求解变分不等式问题 (15) 的方法比较多, 但利用投影技巧是网络均衡模型研究中常见的一种有用迭代方法, 关于它可详细参阅文献 [20-21]。本文借助文献 [20] 中的修正投影算法求解此均衡问题, 可以将上式转化为变分不等式标准问题, 寻找 $X^* \in \Omega$, 使得其满足下面的变分不等式问题。

$$\langle F(X^*), X - X^* \rangle \geq 0, \quad \forall X \in \Omega \quad (16)$$

在这里, $X = (Q^1, Q^2, Q^3, u, \pi, \sigma, p)$, $F(X)$ 的各元素为变分不等式 (16) 中各乘号前的函数式, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示 n 维欧氏空间的内积。算法的具体步骤如下:

第 0 步 初始化。构造初始解 $X^0 \in \Omega$, 当前迭代步数记为 $m = 1$, 选择 $\alpha : 0 < \alpha < 1/L$ (L 为 Lipschitz 常数);

第 1 步 计算. 对以下变分不等式求解得 \bar{X}^m :

$$(\bar{X}^m + \alpha F(X^{m-1}) - X^{m-1})^T (X - \bar{X}^m) \geq 0, \quad X \in \Omega$$

第 2 步 修正. 利用第 1 步求得的 \bar{X}^m 求解以下变分不等式, 并得到 X^m .

$$(X^m + \alpha F(\bar{X}^m) - X^{m-1})^T (X - X^m) \geq 0, \quad X \in \Omega$$

第 3 步 收敛性检验. 若 $\|X^m - X^{m-1}\| \leq \varepsilon$ (ε 为事先给定的精度), 则停止, 否则转第 1 步.

并且, 只要函数 $F(X)$ 单调并且 Lipschitz 连续, 则上述算法收敛.

4.2 模型的应用

由于它可以分析城市物流仓储设施的宏微观决策所带来的影响, 可以将其应用于: 物流仓储项目的新建或改扩建, 根据辨识的成本等参数数据, 对几种方案作出科学分析与比较; 为企业的运作与管理综合采取有针对性的改进措施提供依据; 为政府的各项决策如税费政策的制定提供参考. 为了验证模型, 运用算例进行计算分析. 某城市有甲、乙两个仓储商具有相同的目标细分市场, 直接参与物流服务的竞争, 由于成本结构的特点, 其设施既可以是物流园区, 也可以是分散而又连结成片的民间仓储区. 同时简单构造一个 2 个供应商, 2 个中间商和 2 个需求市场的商品供需网络, 在此网络中有 A、B 两种商品完成城市的供应、交易和仓储配送, 每层各为两个节点, 每两层之间有四条路径, 而且成本函数具有对称性, 为了计算的简便, 不考虑变量的单位. 决策变量如下: 中间商通过仓储商设施的物流量 q_{ik}^h , 供应商给中间商的产品供应量 q_{jk}^h , 中间商到需求市场的商品流量 q_{kl}^h , 需求市场关于商品需求的支付价格 p_l^h .

要用到的相关成本与需求函数设置如下:

$$\begin{aligned} \vartheta_i^h &= \delta^1 q_i^h + \delta^2 (q_{-i}^h) + \delta^3, \quad d_{ik}^h = \delta^4 (q_{ik}^h)^2 + \delta^5 q_{ik}^h, \quad \omega_{ik}^h = \delta^6 q_{ik}^h + \delta^7 q_{-ik}^h, \\ f_j^h &= \delta^8 (q_j^h)^2 + \delta^9 (q_j^h)(q_{-j}^h) + \delta^{10} (q_j^h), \quad g_{jk}^h = \delta^{11} (q_{jk}^h)^2 + \delta^{12} (q_{jk}^h), \\ \nu_k^h &= \delta^{13} (\sum_{l=1}^L q_{kl}^h)^2, \\ c_{kl}^h &= \delta^{14} q_{kl}^h + \delta^{15}, \quad z_l^h = \delta^{16} p_l^h - \delta^{17} p_{-l}^h + \delta^{18} \end{aligned}$$

其中, q_{-i}^h 表示除仓储商 i 外另一个仓储商关于商品 h 的储存量水平, q_{-ik}^h 代表除仓储商 i 外另一个仓储商储存中间商 k 的数量, q_{-j}^h 表示除供应商 j 外另一个供应商的供应量水平, p_{-l}^h 表示除需求市场 l 外另一个需求市场的产品所愿支付成本, $\delta^1, \delta^2, \dots, \delta^{18}$ 是具有不同上下标即相应维度的参数向量, 表征某个网络成员自身或提供给其它网络成员商品或服务的成本控制能力.

首先, 参考企业的运营数据, 将甲、乙设施各商品的平均仓储周期 T_i^h 均设置为 5, 从两设施到各目的地的距离 L_{ik}^h 为 40, 从两设施到目的地配送车辆的平均行驶速度 ν_{ik}^h 为 40, $\phi = 8, \varsigma = 0.5$. 其它成本与需求函数的参数具体设置如表 1 所示.

表 1 成本与需求函数的相关参数设置

参数	1	2	3	4	参数	1	2	3	4	参数	1	2	3	4
δ^1	0.25	0.25	0.25	0.25		12	12	12	12	δ^{12}	1	1	1	1
	0.3	0.3	0.3	0.3	δ^7	4	4	4	4		1	1	1	1
δ^2	0.6	0.6	0.6	0.6		6	6	6	6	δ^{13}	3	3	3	3
	0.6	0.8	0.6	0.8	δ^8	2	2	2	2		3	3	3	3
δ^3	0.4	0.4	0.4	0.4		2	5	2	5	δ^{14}	1	1	1	1
	0.4	0.4	0.4	0.4	δ^9	3	3	3	3		1	1	1	1
δ^4	0.8	0.8	0.8	0.8		3	4	3	4	δ^{15}	1	1	1	1
	0.8	0.8	0.8	0.8	δ^{10}	2	2	2	2		1	1	1	1
δ^5	0.8	0.8	0.8	0.8		2	2	2	2	δ^{16}	1.5	1.5	1.5	1.5
	0.8	0.8	0.8	0.8	δ^{11}	3	3	3	3		1.5	1.5	1.5	1.5
δ^6	4	4	4	4		3	3	3	3	δ^{18}	1000	1000	1000	1000

注: 表中各参数的所有上下标按 $ijklh$ 编定的先后顺序递延排列, 单行参数标为 11 12 21 22, 双行参数第一行标为 111 112 121 122, 第二行标为 211 212 221 222.

本文利用上述算法, 运用 Matlab7.1 软件包对上述例子进行求解 (其中步长 $\alpha = 0.005$, 计算精度 $\epsilon = 0.0005$), 对于不变的成本参数值情形, 计算所得的均衡解如表 2 所示.

从表 1 可以看出: 两仓储商在单位储存成本、配送交付成本方面存在差别, 这可能来自于区位条件或土地等因素, 同时乙由于储存等条件的限制, A 商品的单位储存成本要高于 B 商品, 而且供应商方面, 供应商 2 关于 B 商品的供应成本相对较高. 表 2 给出了以上网络算例得到的主要均衡结果, 可以看出: 由于给定网络的成本与需求函数对于同类商品参数部分是对称的, 而经过节点与节点之间均衡调整的供应量、仓储量、销售量等是相同的, 从结果可验证模型的正确性及合理性; 商品供需市场中, 受供应商成本等因素的影响, A 商品的需求量是 B 商品的 91%; 仓储设施层里, 甲的市场竞争能力明显较强, 其两种商品的服务需求稳定, 且由于拥有对于 B 商品的专业化服务或成本控制能力, B 商品的仓储量略高于 A 商品, 使其抵消了 B 商品市场相对萎缩的影响, 同时垄断了此市场, 乙关于 A、B 商品的仓储量分别为 3.7 和 0, 即只拥有 B 商品仓储物流市场份额的 14%. 商品供需层与仓储设施层的相互影响和制约, 网络中某个环节的成本差异都会导致其它环节截然不同的经营状况.

表 2 基于商品供需网络的城市物流仓储设施均衡的主要结果

变量	1	2	3	4	变量	1	2	3	4
q_{ik}^h	11.10	11.83	11.10	11.83	q_{ik}^h	6.47	9.11	6.47	9.11
	1.85	0	1.85	0		6.47	2.73	6.47	2.73
q_{kl}^h	6.47	5.92	6.47	5.92	q_l^h	321.56	322.55	321.56	322.55
	6.47	5.92	6.47	5.92					

注: 表中各变量的所有上下标按 $ijklh$ 编定的先后顺序递延排列, 单行参数标为 11 12 21 22, 双行参数第一行标为 111 112 121 122, 第二行标为 211 212 221 222.

按照现代物流的发展规律, 通过建立制定供应链解决方案, 资源共享, 订单处理信息化, 可提高设施运作效率, 减少前置时间和不确定性, 从而降低仓储周期. 为分析它对整个网络的影响, 下面对相应参数进行敏感性分析. 在前面分析的基础上, 其他条件不变, 仅考虑相对落后的乙设施因此改进而带来的参数 T_i^h 变化对商品供需层与仓储设施层的影响. 效率改进越多, T_i^h 下降比例越大, 直至下降到 0.1 时, 可视为直接进行“越库”作业, 它的递减带来均衡数量的变动, 乙设施的两种商品流量向右上方倾斜, T_i^h 降低 30%, A、B 的流量就分别达到了 10.07 和 5.9, 甲设施流量则朝反方向变化, 后者的市场份额逐渐被前者取代, 当下降到约 40% 到 50% 左右时, 甲、乙的市场份额基本持平, 其具体流量变化见图 3. 商品的客户需求量与它呈反方向变动, 它能带来了行业需求的增加. 出乎意料的是, 随着乙设施效率的改进, 市场总剩余即社会福利先降低后增加, 在降低 40% 处出现最小值 6357, 到 90% 时有最大值 7170.7, 实际上, 消费者剩余和网络收入是不断增加的, 只是由于在竞争越激烈的市场格局中, 付出的总成本越高导致的, 具体如表 3 所示.

由于城市化过程中设施容易受到规划或人为决策的作用, 如我国经常采用的“城区限行政策”, 导致它的不断向外迁移. 同样, 在前述分析基础上, 采用单变量法, 考虑甲、乙设施参数 L_{ik}^h 同步变化的影响. 其他条件不变的情况下, L_{ik}^h 增加比例越大, 意味着与客户空间距离越来越远, 配送距离变长, 运算的具体结果如表 4 和图 4 所示. 可明显看出: 设施迁移导致商品交付成本的变化, 从而引起均衡数量的反方向变动即需求减少, 使均衡价格上升, 商品供应减少, 市场总剩余同时相应减少, 即企业和客户对城市的满意度均会下降; 为了弥补这一后果, 可适当开辟物流通道, 缩短交付在途时间, 或重视“软”的管理水平, 提高作业效率, 或充分挖掘节点的组合功能与集成作用, 降低单位成本, 这都有助于社会福利的增加. 正如文献 [22] 等所提出来的, 随着向外的膨胀, 大城市的单层物流设施系统满足不了社会经济的要求, 城市中需要布局适量中小节点形成两层设施系统, 使城市物流的社会效率与效益极大化, 本文从新的角度证明并解释了它.

表 3 降低仓储周期关于成本和社会福利的敏感性分析结果

变动比例	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
网络总成本	9276	9411.5	9764.4	10013.1	10148	10190.9	10160.9	10074.7	9947.4	9792.2
网络总利润	6689	6594.5	6335	6183.2	6143	6192.7	6313.5	6488.5	6703.3	6944.4
消费者剩余	205.3	206.4	208.9	211.5	214	216.6	219	221.5	223.9	226.3
市场总剩余	6894.3	6800.9	6543.9	6394.7	6357	6409.3	6532.5	6710	6927.2	7170.7

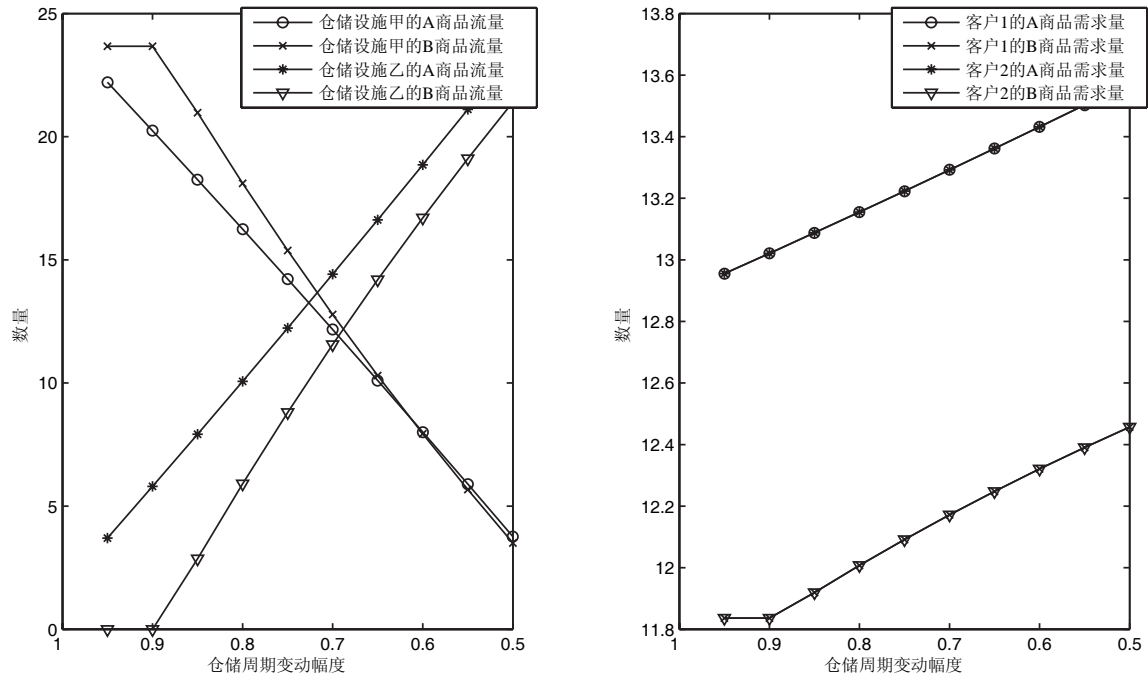


图 3 降低仓储周期关于不同网络成员的流量敏感性分析结果

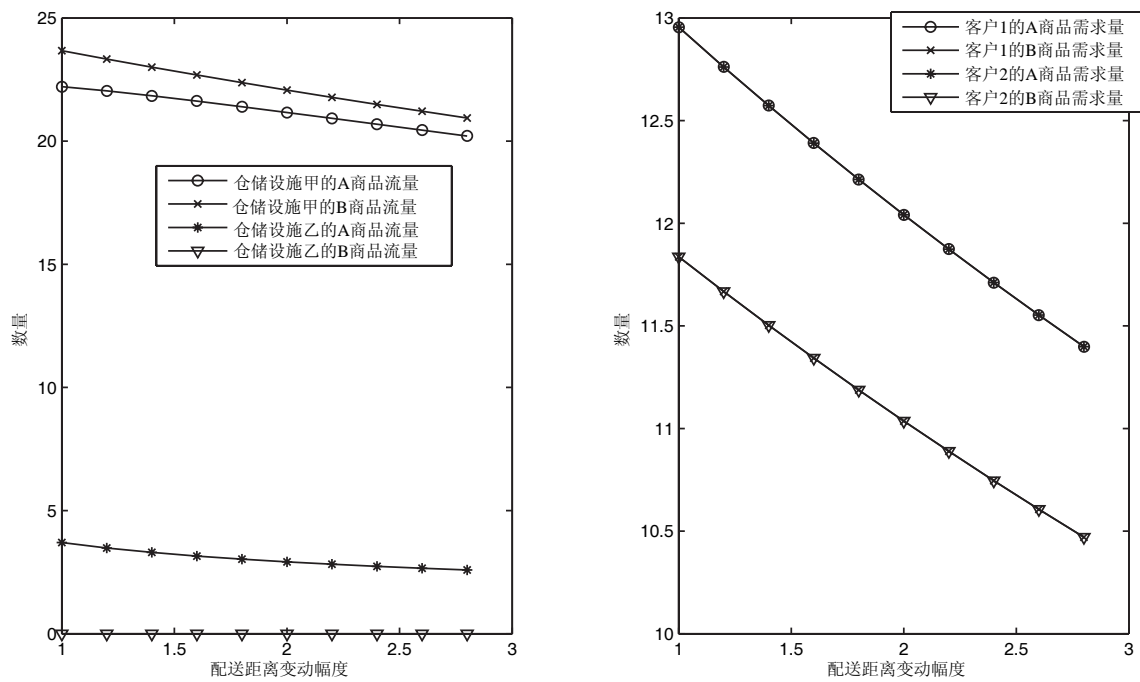


图 4 设施迁移关于不同网络成员的流量敏感性分析结果

表 4 设施迁移关于成本和社会福利的敏感性分析结果

变动比例	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8
网络总成本	9276	9125.5	8981.5	8843.2	8709.9	8581.1	8456.7	8336.1	8219.2	8105.8
网络总利润	6689	6613	6537	6461.5	6386.7	6313	6240.5	6169.1	6099.1	6030.3
消费者剩余	205.3	199.3	193.6	188.1	182.9	177.9	173	168.4	164	159.7
市场总剩余	6894.3	6812.3	6730.6	6649.6	6569.6	6490.9	6413.5	6337.5	6263.1	6190

5 结语

物流仓储设施规划或决策涉及城市商品供需网络的众多相互独立的决策,它决策的正确与否不仅影响到本部分的成本费用,而且影响到其它部分的成本费用,具有鲜明的网络特性.本文利用变分不等式建立了包含物流仓储设施和商品供需成员的城市供应链物流竞争超网络均衡模型,主要的工作和贡献在于:①相对于以前的模型,本文的模型是集成性的,这个框架的主要特点是考虑相互作用的基于商品的消费者行为、供应商行为、中间商行为和物流经营者行为,均衡的思想也符合各物流仓储设施的博弈行为;②本文得到了系统达到均衡的条件,给出了经济解释和求解算法,最后结合具体算例提供了验证求解和决策应用;③现实中仓储周期、配送距离等这些参数往往是变化的,故对这些参数进行了敏感性分析,并给出了相应的管理启示.研究表明,仓储设施层与商品供需层相互影响和制约,设施效率改进、场址迁移等行为可能导致市场格局、商品流量和价格以及社会福利的有规律变动,建议围绕商品供需对各层次城市物流仓储设施进行科学谋划、整体布局,形成短期、中期和长期相互协调、相互均衡的规划方案.

本文还有较大的扩展研究空间,需进一步精确和改进,其动态性和时滞性方面缺少刻画,不同的运营机制对网络均衡行为的影响也值得探究.

参考文献

- [1] 普洛斯中国. 中国物流(仓储)基础设施发展现状和趋势[J]. 物流工程与管理, 2008, 30(10): 15–21.
Prologis. The development status and trends of logistics (storage) infrastructure in China[J]. Logistics Engineering and Management, 2008, 30(10): 15–21.
- [2] 后锐, 张毕西. 基于城市空间演化的物流设施布局与规划[J]. 城市问题, 2006(4): 32–35.
Hou R, Zhang B X. Logistics infrastructure's locating and planning based on urban spatial evolution[J]. Urban Problems, 2006(4): 32–35.
- [3] Bookbinder J H, Reece K E. Vehicle routing considerations in distribution system design[J]. European Journal of Operation Research, 1988, 37(2): 204–213.
- [4] Taniguchi E, Noritake M, Yamada T, et al. Optimal size and location planning of public logistics terminals[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 1999, 35(3): 207–222.
- [5] Ahmadi Javid A, Azad N. Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2010, 46(5): 582–597.
- [6] 高自友, 孙会君. 现代物流与交通运输系统[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 194–203.
Gao Z Y, Sun H J. Modern Logistics and Transportation System[M]. Beijing: China Communication Press, 2003: 194–203.
- [7] 李尔涛, 唐孝飞, 胡思继. 一个物流网络的双层规划模型[J]. 系统工程学报, 2004, 19(1): 8–13.
Li E T, Tang X F, Hu S J. Bilevel programming model for logistics network[J]. Journal of Systems Engineering, 2004, 19(1): 8–13.
- [8] 王淑琴, 刘伟. 城市双层配送网络布局模型[J]. 上海海事大学学报, 2009, 30(4): 36–39.
Wang S Q, Liu W. Location model for city double hierarchy distribution network[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2009, 30(4): 36–39.
- [9] 阎利军, 杨志振, 刘冲, 等. 城市物流网络中中间节点分布与规模优化研究[J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(3): 414–418.
Yan L J, Yang Z Z, Liu C, et al. Study of optimization of scale and distribution of intermediate nodes in city logistics network[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2007, 47(3): 414–418.
- [10] 秦进, 史峰, 缪立新, 等. 考虑随机需求和库存决策的商品物流网络设计的优化模型与算法[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(4): 176–183.
Qin J, Shi F, Miao L X, et al. Optimal model and algorithm for multi-commodity logistics network design considering stochastic demand and inventory control[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2009, 29(4): 176–183.
- [11] Nagurney A, Dong J, Zhang D. A supply chain network equilibrium model[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2002, 38(5): 281–303.
- [12] Porter M E. Competitive Advantage[M]. New York: The Free Press, 1985.
- [13] Nagurney A, Dong J. Supernetworks: Decision-Making for the Information Age[M]. Cheltenham, England: Edward Elgar Publishers, 2002.
- [14] 王众托, 王志平. 超网络初探[J]. 管理学报, 2008, 5(1): 1–8.
Wang Z T, Wang Z P. Elementary study of supernetworks[J]. Chinese Journal of Management, 2008, 5(1): 1–8.
- [15] 张铁柱, 刘志勇, 滕春贤, 等. 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.
Zhang T Z, Liu Z Y, Teng C X, et al. A multi-commodity flow supply chain network equilibrium model[J]. Systems

Engineering — Theory & Practice, 2005, 25(7): 61–66.

[16] 徐兵, 朱道立. 产品随机选择下多商品流供应链网络均衡模型研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(3): 82–90.
Xu B, Zhu D L. A multi-commodity flow supply chain network equilibrium model with stochastic choice[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2007, 27(3): 82–90.

[17] 邢伟, 汪寿阳, 赵秋红, 等. 考虑渠道公平的双渠道供应链均衡策略 [J]. 系统工程理论实践, 2011, 31(7): 1249–1256.
Xing W, Wang S Y, Zhao Q H, et al. Impact of fairness on strategies in dual-channel supply chain[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2011, 31(7): 1249–1256.

[18] Gabay D, Moulin H. On the uniqueness and stability of Nash equilibria in noncooperative games[Z]. Applied Stochastic Control of Econometrics and Management Science, Amsterdam: North-Holland, 1980.

[19] Dafermos S, Nagurney A. Oligopolistic and competitive behavior of spatially separated markets[J]. Regional Science and Urban Economics, 1987, 17(2): 245–254.

[20] Nagurney A, Zhang D. Projected Dynamical Systems and Variational Inequalities with Applications[M]. Boston: Kluwer Academia Publishers, 1996.

[21] Noor M A. Modified projection method for pseudomonotone variational inequalities[J]. Applied Mathematics Letters, 2002, 15(3): 315–320.

[22] Crainic T G, Ricciardi N, Storchi G. Advanced freight transportation systems for congested urban areas[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2004, 12(2): 119–137.

附录

首先证明仓储商、供应商、中间商和客户的均衡条件里隐含了变分不等式 (15), 将变分不等式 (6), (12), (13) 和 (14) 相加, 移项并抵消 p_{ik}^{h*} 项、 p_{jk}^{h*} 项和 p_{kl}^{h*} 项, 移项并合并关于 $(q_{ik}^h - q_{ik}^{h*})$ 、 $(q_{jk}^h - q_{jk}^{h*})$ 和 $(q_{kl}^h - q_{kl}^{h*})$ 的同类项, 经过整理可得到以上变分不等式 (15).

其次证明变分不等式 (15) 的解满足变分不等式 (6), (12), (13) 和 (14). 将变分不等式 (15) 中增加

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H (-p_{ik}^{h*} + p_{ik}^{h*}) \times (q_{ik}^h - q_{ik}^{h*}), \quad \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H (-p_{jk}^{h*} + p_{jk}^{h*}) \times (q_{jk}^h - q_{jk}^{h*})$$

和

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H (-p_{kl}^{h*} + p_{kl}^{h*}) \times (q_{kl}^h - q_{kl}^{h*}),$$

那么变分不等式 (15) 就变为:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \left\{ T_i^h \vartheta_i^h(Q^{1*}) + T_i^h q_i^h \frac{\partial \vartheta_i^h(Q^{1*})}{\partial q_{ik}^h} + \frac{\partial d_{ik}^h(q_{ik}^{h*})}{\partial q_{ik}^h} \right. \\ & \quad \left. + \frac{L_{ik}^h}{\phi \varsigma \nu_{ik}^h} \left[\omega_{ik}^h(Q^{1*}) + q_{ik}^h \frac{\partial \omega_{ik}^h(Q^{1*})}{\partial q_{ik}^h} \right] - \pi_k^{h*} + \sigma_k^{h*} \right\} \times (q_{ik}^h - q_{ik}^{h*}) \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \left[\frac{\partial f_j^h(Q^{1*})}{\partial q_{jk}^h} + \frac{\partial g_{jk}^h(q_{jk}^{h*})}{\partial q_{jk}^h} - u_k^{h*} - \sigma_k^{h*} \right] \times (q_{jk}^h - q_{jk}^{h*}) \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H \left[u_k^{h*} + \frac{\partial \nu_k^h(Q^{3*})}{\partial q_{kl}^h} + \pi_k^{h*} + c_{kl}^h(Q^{3*}) - p_l^{h*} \right] \times (q_{kl}^h - q_{kl}^{h*}) \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \left(\sum_{j=1}^I q_{jk}^{h*} - \sum_{l=1}^L q_{kl}^{h*} \right) \times (u_k^h - u_k^{h*}) + \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \left(\sum_{i=1}^I q_{ik}^{h*} - \sum_{l=1}^L q_{kl}^{h*} \right) \times (\pi_k^h - \pi_k^{h*}) \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \left(\sum_{j=1}^J q_{jk}^{h*} - \sum_{i=1}^I q_{ik}^{h*} \right) \times (\sigma_k^h - \sigma_k^{h*}) + \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H \left[\sum_{k=1}^K q_{kl}^{h*} - z_l^h(p^*) \right] \times (p_l^h - p_l^{h*}) \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H (-p_{ik}^{h*} + p_{ik}^{h*}) \times (q_{ik}^h - q_{ik}^{h*}) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H (-p_{jk}^{h*} + p_{jk}^{h*}) \times (q_{jk}^h - q_{jk}^{h*}) \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H (-p_{kl}^{h*} + p_{kl}^{h*}) \times (q_{kl}^h - q_{kl}^{h*}) \geq 0, \quad \forall (Q^1, Q^2, Q^3, u, \pi, \sigma, p) \in \Omega. \end{aligned}$$

对所增加项进行适当拆分, 且与相应同类项合并, 可得变分不等式 (6), (12), (13) 和 (14) 四项和的形式, 即变分不等式 (15) 的解 (服务量、交易量与价格) 等价于以上四式共同决定的解.