

孙明明,张辰彦,林国龙,等. 生鲜农产品冷链物流配送问题及其路径优化[J]. 江苏农业科学,2017,45(11):282-285.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.11.073

# 生鲜农产品冷链物流配送问题及其路径优化

孙明明,张辰彦,林国龙,丁 一

(上海海事大学科学研究院,上海 201306)

**摘要:**近年来,随着我国生鲜市场的快速发展,冷链物流迎来了新的发展契机。由于我国冷链物流起步晚,发展慢,尚未形成体系,难以实现跨区域和反季节销售活动,从而出现了产量高、销售量小的局面,也是导致生鲜农产品价格高、品质差的重要原因。首先,对我国生鲜农产品冷链物流进行概述,分析我国冷链物流发展现状,针对生鲜农产品冷链物流的特殊性,分析和定义冷链物流配送过程中的时间、温度和货损成本,建立配送总成本最小化模型;其次,进一步探索冷链物流配送路径优化研究的方案;最后,通过节约成本法加以分析求解,验证模型和算法的可行性。结果表明,基于时温特性处理生鲜农产品冷链物流配送路径问题,节约成本法达到降低配送成本、满足客户需求时间的双重要求。随着时间的推移,生鲜农产品物流成为未来物流业发展的重要方向。

**关键词:**冷链物流;生鲜农产品;配送路径优化;节约成本法

**中图分类号:** F252      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-1302(2017)11-0282-04

随着生活水平的提高,人们对生鲜农产品的需求量和品质要求越来越高,推动了冷链相关产业的快速发展。冷藏运输是冷链物流的一个重要环节。生鲜农产品从生产者到最终消费者的过程中,有 80% 以上的时间在配送运输上<sup>[1]</sup>。适宜的运输条件,不仅能保证产品质量,同时还能节约产品资源,保持产品的影响价值,增加销售收入和减少能源消耗<sup>[2]</sup>。欧美经济发达国家由于科学技术先进,加上重视产品安全工作,其易腐产品 100% 采用冷藏保鲜运输,运输质量的完好率在 95% 以上。而中国冷链物流市场尚未形成标准的体系,由于运输过程中不规范的操作,导致产品损坏和变质的情况时有发生。1958 年,美国的阿萨德等认为温度变化会引起质量损失,及冷冻产品质量取决于产品的温度(temperature)、冷冻时间(time)、耐藏性(tolerance)的容许限度,称为“3T”理论<sup>[3]</sup>。根据“3T”理论,在流通过程中生鲜产品品质变化主要取决于温度,温度越低,其品质保持的时间越长。在流通过程中因时间、温度的经历而引起的品质降低量是累积的、不可逆的,并且与所经历的顺序无关。新鲜和易腐产品的保质期通常比较短,质量下降是连续的,只有通过合适的低温控制,才能延长其保质期,保证产品的质量<sup>[4]</sup>。Miroslaw 等提出冷链运输过

程中为了保证产品的质量、满足客户需求和服务时间的限制,将时间窗与控制温度作为车辆路径规划问题的约束,建立以成本最小化为目标的模型<sup>[5]</sup>。彭碧涛等研究多时间窗车辆路径问题,建立多时间窗车辆路径问题的数学模型,首先利用基本蚁群算法求解,然后加入变异算子,并采用 2-opt 算法和元胞自动算法对结果进行优化<sup>[6]</sup>。Dabia 等在合适的时间为客户提供配送服务,从而实现减少配送所需时间和降低配送成本的目的<sup>[7]</sup>。朱金峰研究城市冷链物流配送路径优化问题,提出 VRPTW 问题优化方法,最终发现节约成本法不仅能快速找到物流配送路径最优配送路线,同时满足客户时间窗要求,可以有效降低物流配送成本<sup>[8]</sup>。本研究的创新点是根据冷链物流配送的特殊性,充分考虑在冷链物流配送过程中时间、温度、货损因素。通过合理安排配送线路,从而缩短配送时间,减少货物损失,同时满足客户时间窗要求,提高客户满意度和冷链物流企业的竞争力,符合我国冷链物流市场未来的发展方向。

## 1 我国生鲜农产品冷链物流现状

### 1.1 冷链运输难以满足市场的需求

我国生鲜食品在季节和品种供应方面存在均衡供应的矛盾。随着我国经济增长,迫切需要解决“菜篮子工程”。在保障供给、调节时间和空间市场方面,落后的冷链物流体系难以满足市场需求,供需矛盾日益显著,特别是大型突发性事件中生鲜食品的不稳定供应、异常天气因素和不正常的市场竞争等现象。

收稿日期:2016-02-27

基金项目:国家自然科学基金(编号:71301101);上海海事大学科研基金(编号:20110048)。

作者简介:孙明明(1992—),男,河南郑州人,硕士,中级物流师,主要从事自贸区与供应链管理、物流管理研究。E-mail: smusmm@163.com。

(11):58.

[4]田传浩,陈宏辉,贾生华. 农地市场对耕地零碎化的影响——理论与来自苏浙鲁的经验[J]. 经济学(季刊),2005(2):769-784.

[5]纳尔杰·哈里斯. 第三世界的裂变[M]. 北京:改革出版社,1991.

[6]刘先江. 农村土地经营权流转的政治学分析[J]. 政治学研究,

2014(4):40-49.

[7]徐 勇. 农民理性的扩张:“中国奇迹”的创造主体分析——对既有理论的挑战及新的分析进路的提出[J]. 中国社会科学,2010(1):103-118,223.

[8]中共中央编译局. 马克思恩格斯选集(第1卷)[M]. 北京:人民出版社,1972.

## 1.2 生鲜食品损耗严重

长期以来,由于现代化冷链基础设施落后以及不适当的包装方法、材料、容器和处理方法,我国肉类、水产品、果蔬等生鲜食品从产地到餐桌的各个环节中近 80% 没有经过冷链流通,采用常温运输销售,腐坏,损失严重。欧美经济发达国家由于科学技术先进,加上重视食品安全工作,其易腐食品 100% 采用冷藏保鲜运输,其质量的完好率在 95% 以上,物流环节损失率仅 5%。我国冷链物流尚处于初级阶段,农业组织化程度低。以果蔬为例,由于果蔬采收和流通设施落后,导致果蔬优质率低。果蔬的采摘、运输、储存等物流环节上损失率达 25% ~ 30%,造成每年约 1 200 万 t 水果和 1.3 t 蔬菜的浪费,经济损失超过千亿元。同时,生鲜产品装车大多在露天环境下进行作业,而非在冷库和保温场所,80% ~ 90% 的水果、蔬菜、肉类、水产品多采用普通货车常温运输,冷藏运输率仅约为 10% ~ 20%,由此产生的巨大损耗费并不是增产技术所能弥补的。

## 1.3 冷链运输设备投入不足

农业生产集约化、规模化程度低,生鲜农产品加工基本以个体经营居多。人力、物力成本高,市场行情不稳定,造成经营者在冷链物流成本上投入不足,从而形成生鲜产品“卖难”的局面。对于温度要求不太高的果蔬产品,大多通过常温车进行运输,少量使用冷藏车进行运输也是供出口使用,冷链物流是制约生鲜农产品销储运的瓶颈,是产品无法快速安全进入销售环节的重要原因。

## 1.4 粗放式管理、缺乏健全法规

冷链物流在总体上仍采用粗放式操作,与国际标准相差很大,没有解决设施陈旧、不足、分散,成本高,技术落后,管理混乱等基本问题。此外,相应的冷链物流法律法规不健全,冷链产品的安全监管没有得到广泛的普及,我国在冷链物流区域仍处于初级建设阶段。

## 1.5 恶性市场竞争

随着生鲜农产品市场的快速增长,资本的涌入,冷链行业有向恶性竞争发展的趋势,其主要原因是经销商有压缩冷链物流成本的目的。在物流服务同质化的情况下,为了扩大营业规模,开拓市场份额,就会造成冷链物流成本急剧压缩,物流利润徘徊在盈亏之间。恶性竞争势必会造成服务水平的下降和市场的的不稳定,最终威胁食品安全和消费者的健康。

## 2 生鲜农产品冷链物流特点

生鲜农产品作为人们日常饮食的重要部分,其品质与安全直接关系到市场稳定和消费者安全。生鲜农产品具有鲜活性、易腐性,从生产供应的角度来看又具有季节性、分散性和普遍性特点,因此与一般物流产品相比,生鲜农产品对物流技术要求更高,管理更严格,具体体现在以下几个方面。

### 2.1 物流网络分散

生鲜农产品的产地多集中在郊区或农村地区,而销售地多为城乡区域,因此出现了产销分离情况,除了稳定的供应关系,大多数农产品的流量和流向都是分散的。同时,生鲜农产品的生产具有地域性和季节性特点,流量和流向呈波动性变化,为了满足人们的日常需求,需要庞大的物流网络支持。

### 2.2 配送风险高

生鲜农产品相对其他农产品更注重产品的新鲜度,在物流环节中,需要适宜的温度来保持产品的品质,同时避免在运输过程中造成非必要损害,这些都将影响到生鲜农产品的价值和销售。如何科学安全地进行物流配送,是降低生鲜农产品冷链物流风险高的重要方法。

### 2.3 物流成本高

冷链物流成本高主要是因为设备的购置成本高、投入资源多、组织工作复杂、能耗大等。相关研究表明,冷链物流成本比常温物流成本高 40% ~ 60%,随着能源价格上涨,其物流成本将呈现增长的趋势。

## 3 冷链物流配送路径的优化研究

### 3.1 问题描述与假设

本研究所创建的冷链物流运输模型,是建立在 1 个冷链配送中心为多个客户服务的基础上。在满足客户需求量、车辆载重限制、客户时间窗要求等约束条件下,通过制定合理运输路线,实现配送总成本最小,同时结合冷链物流配送特点,作以下基本假设:(1)配送只是单向送货的过程;(2)冷藏运输车的载重是确定的;(3)必须满足所有客户的货物需求,且每个客户所需货物只能由 1 台冷藏车为其配送;(4)车辆出发点和结束点必须是同一个配送中心;(5)各客户地理位置和货物需求量是已知的;(6)确定客户指定的服务时间,送货必须在规定时间内进行,车辆是客户满意时间窗内到达,不会被惩罚;车辆是客户满意时间窗外到达,则会有一定的时间惩罚,惩罚成本与车辆到达时间相关;(7)配送中心与客户之间,以及两两客户之间的最优配送线路已知;(8)产品需要一定温度来保持其品质和价值。

结合实际配送过程,本试验将深入研究冷链物流配送过程中造成时间、温度和货损成本,以配送总成本最小为目标函数建立冷链物流配送问题的基本模型。降低物流配送活动能耗成本的同时,保证产品的质量,减少流通中的损耗。

### 3.2 冷链物流配送成本定义

根据决策目标,冷链物流配送模型以总成本最低作为目标函数。冷链物流配送的成本根据冷链物流特性可分为 3 个部分,即时间成本、温度成本、货损成本。其中,时间成本包含车辆运输成本、客户时间窗成本;温度成本包括运输过程中的制冷成本,以及在卸货过程中温差变化产生的额外能耗成本;货损成本包含随着时间变化而产生的产品货损成本和装卸过程温差变化产生的货损成本。

#### 3.2.1 时间成本

3.2.1.1 运输成本 运输是配送过程中重要的部分,也是时间花费最长的部分。因此,运输成本是“3T”成本中时间成本的重要组成部分,配送车辆运输成本与车辆行驶里程数、车辆行驶时间呈正相关。对于配送车辆运输成本,采用下式来计算:

$$C_{11} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m x_{ij}^k c_{ij}^k \quad (1)$$

式中: $c_{ij}^k$ 表示第  $k$  部车辆从客户  $i$  到客户  $j$  的运输成本; $x_{ij}^k$ 为 0、1 变量,若第  $k$  部车辆完成客户  $i$  到客户  $j$  的配送,则  $x_{ij}^k = 1$ ,否则,  $x_{ij}^k = 0$ 。

3.2.1.2 时间窗成本 为了获取更高效优质的服务,客户会要求商家在规定时间内送达货物,然而实际情况中,由于配送线路的不合适,导致客户无法在规定的时间内收到货物,这种由于时间窗而产生的成本是一种隐性成本,与运输成本、温度成本和货损成本这 3 种显性成本相比,虽然不能实质改变配送过程中的成本,但是这将影响客户满意度和服务体验,并存在质量下降和丢失客户的风险。如果将隐性时间窗成本用数学模型进行显性表达,就可以作为衡量物流配送效率和成本的重要指标。所以,时间窗成本应作为物流配送成本中的重要部分。时间窗成本如下所示:

$$C_{12} = \sum_{j=1}^n p q_j F_j(s_j) \max\{(E_j - s_j), (s_j - L_j), 0\} \quad (2)$$

式中: $p$  表示产品的单价; $q_j$  表示客户  $j$  的需求量; $s_j$  表示到达  $j$  客户的时间; $E_j$  或  $L_j$  表示  $j$  客户要求的最早或最晚配送时间; $F_j(s_j)$  表示违反客户时间窗所造成的损失成本系数函数。

$$F_j(s_j) = \begin{cases} \infty & s_j < e_j \text{ 或 } s_j > l_j \\ \alpha & e_j \leq s_j < E_j \\ 0 & E_j \leq s_j \leq L_j \\ \beta & L_j < s_j \leq l_j \end{cases} \quad (3)$$

式中: $e_j$  或  $l_j$  表示  $j$  客户可接受的最早或最晚的配送时间; $\alpha$ 、 $\beta$  表示违反客户时间窗所造成的损失成本系数( $\alpha < \beta$ )。

3.2.2 货损成本 冷链物流的运输对象一般多为易腐性产品,产品的质量和价值常常受温度、湿度、时间等因素的影响。在配送过程中,为了降低产品的腐坏变质,保证其质量,通常采用低温运输的方式。但是低温运输只是控制和减缓产品腐坏的一种手段,不能完全阻断这一现象发生,因此冷链物流配送过程中产品损坏所引起的货损成本也是必须考虑的重点。影响冷链配送产品腐坏的因素很多:(1)假定在运输过程中不考虑其他的影响因素,产品仅在恒定的温度下进行运输,则产品的腐坏仅与配送时间有关;(2)在装卸过程中,由于车内外温度差,形成空气对流,导致车厢内温度变化,从而加速产品的损耗。这 2 个部分的货损成本可用如下公式表示:

$$C_2 = p \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n x_{kj}^k q_j (\theta_1 t_{0j}^k + \theta_2 t_j^k) \quad (4)$$

式中: $x_{kj}^k$  为 0、1 变量,若第  $k$  部车辆完成客户  $j$  的配送,则  $x_{kj}^k = 1$ ,否则, $x_{kj}^k = 0$ ; $t_{0j}^k$  表示第  $k$  部车辆从配送中心到客户  $j$  车辆行驶时间; $t_j^k$  表示表示第  $k$  部车辆在客户  $j$  的装卸货时间; $\theta_1$  和  $\theta_2$  表示产品货损系数。

3.2.3 温度成本 温度是维持冷藏品的决定条件,在合适的温度下,降低或减缓产品的腐坏速度,对冷链物流有重要意义。生鲜农产品的腐坏变质,主要是由微生物的作用、酶的作用、氧化作用、呼吸作用和机械损伤造成的,温度对以上 5 种腐坏变质因素具有重要的影响作用,控制温度可以有效降低腐坏。在冷链配送过程中,温度成本主要由冷藏车的制冷机能耗产生。因此,在研究时忽略其他影响因素,将生鲜品的温度成本分为 2 个部分:第一,随着车辆运输过程中的温度变化,制冷机能耗成本也随之变化,计算公式为

$$C_{31} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ij}^k \theta_3 t_{ij}^k T \quad (5)$$

式中: $t_{ij}^k$  表示第  $k$  部车辆从客户  $i$  到客户  $j$  车辆行驶时间; $\theta_3$  表示产品制冷成本系数; $T$  车内温度。

第二,装卸生鲜产品过程中,由于车内外温度差( $\Delta T$ ),形

成空气对流,导致车厢内温度发生急剧变化,从而增加制冷机的能耗成本。计算公式为

$$C_{32} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ij}^k \theta_4 t_j^k \Delta T \quad (6)$$

式中: $\theta_4$  表示产品制冷成本系数。

### 3.3 模型建立

综上,构建的冷链物流配送优化模型如下:

$$\min Z = C_{11} + C_{12} + C_2 + C_{31} + C_{32} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ij}^k c_{ij}^k + \sum_{j=1}^n p q_j F_j(s_j) \max\{(E_j - s_j), (s_j - L_j), 0\} + p \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n x_{kj}^k q_j (\theta_1 t_{0j}^k + \theta_2 t_j^k) + \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ij}^k \theta_3 t_{ij}^k T + \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ij}^k \theta_4 t_j^k \Delta T \quad (7)$$

## 4 冷链物流配送路径优化算例分析

### 4.1 节约成本法

节约成本法通过将各个单独点与源点相连,形成只具有 1 个原点的辐射线路的思想,从而通过计算各点之间可节省的最大值<sup>[9]</sup>。在此基础上,加入时间窗和温度控制等约束,结合节约成本法的特点,提出一种改进的成本节约法用来解决问题。该算法的特点是:它属于逐次逼近法的一种,具有技术步骤简单、易懂、计算速度快且易于考虑各种实际问题的优点,在求解中小企业车辆配送路径问题等小规模车辆配送路径时有自身的优势。目前,冷链物流发展的瓶颈在于配送成本高<sup>[10]</sup>,其中重要的一个方面就是配送时间的要求。而加入改进有时间窗的节约法,将会要求冷链企业在有时间约束的情况下对配送路线方案作出最优的选择。因此,加入有时间窗和温度限制的节约法将更加适合现实冷链物流企业的车辆配送情况。

根据冷链物流配送模型公式(7),考虑冷链物流配送过程中造成时间、温度和货损成本约束,使目标函数总成本最小。本研究利用节约成本法对冷链物流车辆配送路径进行优化时,涉及的相关因素包括节约的运输成本、节约的货损成本、节约的制冷成本和惩罚成本。在满足时间窗、车辆载重等约束条件下,考虑该配送路线是否可行,找出各点之间可节省的最大值,计算得到节约最多的运输路线,求解步骤归纳如下:(1)根据客户收货时间的先后顺序进行排序;(2)以最早时间窗的客户作为第 1 个配送点,根据节约总成本最大的客户确定下一个配送点,以此类推,直到达到车辆载重和时间窗的限制;(3)删除已选客户,重复以上步骤,直到完成所有客户的配送任务。

### 4.2 案例分析

为了验证模型的有效性,通过 1 个算例进行分析。已知 8 个客户需求点(编号为 1,2,⋯,8),配送中心 0 与各客户之间的距离(km),各客户的货运量  $q_i(t)$  和要求的的时间范围  $[E_i, L_i](h)$  见表 1。此外,客户可接受时间  $e_i = 0, l_i = 2.5$ ,设车辆的平均行驶速度为 40 km/h,车辆载重 4 t,产品单价  $p = 8000$  元/t,时间窗成本系数  $\alpha = 0.02, \beta = 0.04$ ,货损系数  $\theta = 0.2\%、0.4\%$ ,运输过程制冷能耗成本为 12 元/h,但温差导致的制冷成本 2.5 元( $^{\circ}C/h$ )。

根据配送的具体要求,对该问题进行求解。确定配送车辆数  $m = \sum_{i=1}^n [\frac{q_i}{q}] + 1 = [11/4] + 1 = 3$ 。利用所提出的节约成

表 1 客户信息

$d_i$	客户中心与客户之间的距离(km)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	12	18	16	8	32	15	20	40
1	12	0	20	15	13	15	15	15	20
2	18	20	0	20	18	15	20	15	20
3	16	15	20	0	20	20	30	20	15
4	8	13	18	20	0	22	8	15	10
5	32	15	15	20	22	0	18	14	18
6	15	15	20	30	8	18	0	18	10
7	20	15	15	20	15	14	18	0	14
8	40	20	20	15	10	18	10	14	0
$q_i$		0.75	1.5	1.5	1	1.25	2.25	2	0.75
$[E_i, L_i]$		[1,1.25]	[1,1.75]	[0.3,1]	[0,1]	[1.25,2]	[0,0.5]	[0.5,1.25]	[0.75,1.5]

本优化算法,得到最优配送路线为:

0→6→4→1→0  
0→3→8→5→0  
0→7→2→0

计算得到相应配送里程为 182 km,配送总成本 1 312.9 元。

若以路径最短为原则的配送车辆路径规划,目前的配送路线为:

0→6→8→4→0

0→3→5→1→0

0→7→2→0

计算得到相应配送里程为 159 km,配送总成本为 1 371.7 元。

对比发现原来的最短配送路线在降低运输成本的同时,时间窗成本却在增加,这直接影响客户对服务的满意率,其带来的效果是负面的。而新的配送路线在满足时间窗的基础上合理规划配送路线,使配送总成本达到最低,这是一种更为合理的配送方案(表 2)。

表 2 路径优化前后各项成本对比

配送路径类型	路径	总成本 (元)	运输成本 (元)	时间窗成本 (元)	货损成本 (元)	温度成本 (元)
最短配送路径	0→6→8→4→0	418.5	215	66.0	67.0	70.5
	0→3→5→1→0	560.2	265	106.5	70.9	67.8
	0→7→2→0	393.0	265	0	65.0	63.0
优化后配送路径	0→6→4→1→0	376.3	240	0	65.5	70.5
	0→3→8→5→0	543.6	405	0	71.4	67.2
	0→7→2→0	393.0	265	0	65.0	63.0

5 结束语

本研究先对我国生鲜农产品冷链物流进行概述,根据其特殊性,以冷链物流配送作为出发点,分析配送过程中时间、温度、货损成本对配送成本的影响,从而构建以总成本最小为目的的目标函数,并提出基于时间窗的改进节约成本法,以提高算法的性能和效率。通过冷链物流配送实例验证,结果表明优化的配送路径可以达到既节约配送成本,又满足客户需求时间的双重要求。冷链物流发展是一个循序渐进的过程,为了适应市场的需求,积极推进城乡结合的冷库建设,从原产地对生鲜农产品实行预冷、初加工、贮藏保鲜技术,推进低温控制的运输模式的建立,形成完整的冷链流程。构建特色产区到大中城市的冷链物流体系,形成跨区域和反季销售模式,促进我国冷链物流市场的发展。

参考文献:

[1] 缪小红,周新年,林 森,等. 第 3 方冷链物流配送路径优化研究[J]. 运筹与管理,2011(4):32-38.  
[2] Huang X, Wang F. Analysis for cold chain logistics for Chinese agricultural products[J]. Cooperative Economic and Technology, 2010,

24;52-53.  
[3] 朱 辉. 食品冷链物流配送管理研究[D]. 上海:上海交通大学,2008.  
[4] Brito J, Martinez F J, Moreno J A, et al. Fuzzy optimization for distribution of frozen food with imprecise times[J]. Fuzzy Optimization and Decision Making, 2012, 11(3):337-349.  
[5] Miroslaw G, Jerzy S, Wojciechowski B W. Vehicle routing problem with time windows, part I: route construction and local search algorithms[J]. Transportation Science, 2005, 39(1):104-118.  
[6] 彭碧涛,周永务. 多时间窗车辆路径问题的混合蚁群算法[J]. 计算机工程与应用, 2010(31):28-31.  
[7] Dabia S, Ropke S, van Woensel T, et al. Branch and price for the time-dependent vehicle routing problem with time windows[J]. Transportation Sci, 2011, 47(3):380-396.  
[8] 朱金峰. 城市冷链物流车辆路径模型优化研究[D]. 济南:山东师范大学,2009.  
[9] Tang J, Liu K, Chen Q. Study on cold chain logistics of vehicle routing problem for agricultural products[J]. IEEE Computer Society, 2013(13):317-322.  
[10] 朱金凤,裴道方,林丹萍. 基于成本约束的冷链物流配送网络规划[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(11):572-575.