

中欧生鲜农产品冷链运输方案研究

王露

(大连海事大学交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 本文针对生鲜品易腐性和冷链物流高能耗特点, 综合考虑运输途中制冷温度以及各地区外界气温差异性的影响, 以运输、制冷和碳排放成本最小为目标构建优化模型, 对运输路线、方式和各环节制冷温度进行决策。基于中欧生鲜农产品冷链运输进行研究, 并对比分析了中欧间几大运输路线。

关键词: 生鲜农产品; 冷链物流; 多式联运; 质量衰减; 低碳

中图分类号: U695

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973 (2020) 07—0097—03

冷链物流在生鲜农产品流通过程中的作用日益突出, 并由于人们对品质的更高层次要求而有了更高的时效性要求。对于跨国长距离冷链物流而言, 需要经过欧洲、亚洲等多个复杂的温区, 合理的温控与运输路线将影响冷链物流成本, 给冷链运输调度工作带来更大挑战。

关于冷链物流研究, Rong 等^[1]考虑食品质量受存储温度影响, 对易腐食品配送进行研究。Gallo 等^[2]从能量消耗角度, 考虑产品质量下降以及制冷温度设定对制冷能耗的影响。Wang 等^[3]假定冷藏温度和质量下降速度一定, 分析不同碳税政策和碳排放下配送路径对总费用的影响。

王晶^[4]考虑蔬菜类食品质量衰减与温度呈线性函数, 并用特定温度下单位时间冷却成本表示制冷成本, 对网络节点、配送路线和各环节温度进行优化。康凯等^[5]假设运输途中环境温度恒定, 腐败率为常数, 产品质量随时间变化呈现指数变化趋势。刘松等^[6]用单位时间冷藏费用和货损费用表示制冷和货损成本, 并考虑碳排放量限制, 对冷藏集装箱多式联运进行优化。

综上, 国内现有研究多将质量衰减与制冷能耗作为恒定参数或是线性函数处理, 忽略了制冷温度与外界环境温度的影响或是考虑不全。Hu 等^[7]考虑不同时段外界温度变化, 研究冷藏车辆不同出发时间对制冷成本的影响。为此, 本文综合考虑上述因素构建优化模型, 对运输路线、方式与各环节温度进行决策, 并对中欧生鲜品冷链多式联运方案进行研究。

1 问题描述

有一批生鲜农产品从国外一起运点运至国内一目的点, 途径国内外若干中间节点, 各节点和路段存在各自外界环境温度, 且节点间存在公路、铁路、海运和航空运输中一种或多种方式可供选择。考虑制冷能耗主要由箱体传热与漏热导致, 与集装箱内外表面积、箱体内外温差、传热系数和时间相关; 生鲜农产品质量下降速率与温度、时间相关, 遵循阿伦尼乌斯方程, 并呈指数衰减趋势。在满足最低质量需求约束下, 以运输、制冷和碳排放成本之和最小为目标求解最优运输方案。

2 模型构建

2.1 假设条件

- (1) 假设一批货物不可分批运输;
- (2) 假设冷藏集装箱内温度均衡, 生鲜农产品各部分质量衰减速率一致;
- (3) 假设航空专用冷藏集装箱制冷能耗按常规冷藏集装箱计算方法计算。

2.2 符号说明

常量与参数: O 、 H 、 D 、 V 分别表示起始节点、中间节点、目的节点和所有节点集合; AO 、 AD 、 A 分别表示起始弧、终止弧和所有弧的集合; M 表示运输方式集合; W 表示可选温度集合, $T \in W$; Q 表示需求量; q_0 表示最初产品质量; q_{min} 表示最低产品质量要求; d_{ij}^m 表示路段 (i, j) 上, 通过运输方式 m 进行运输的距离; t_{ij}^m 表示路段 (i, j) 以运输方式 m 进行运输的时间; t_i^m 表示在节点 i 由运输方式 m 转至 n 所需中转运输时间; w_i 表示节点 i 的中转等待时间; fc_m 、 λ_m 分别表示以运输方式 m 运输单位货物单位距离的运输成本和碳排放量; ET_i 表示节点 i 的平均外界环境温度 (K); ET_{ij} 表示弧 (i, j) 上的平均外界环境温度 (K); $k(T)$ 表示温度 T 下的质量衰减速率; δ 表示传热系数; S 表示箱体的平均传热面积; β 表示单位能源可提供的制冷量; f 表示单位能源价格; λ 表示消耗单位能源产生的碳排放量; gc 、 ac 分别表示中转时单位货物单位时间的运输成本和碳排放量; ω 表示单位碳排放成本。

决策变量: $x_{i,j,T}^m$ 表示路段 (i, j) 是否选择运输方式 m , 温度 T ; $y_{i,T}^m$ 表示节点 i 是否由从运输方式 m 转至 n , 并选择温度 T 。

状态变量: q_i 表示节点 i 的产品质量。

2.3 数学模型

2.3.1 目标函数

$$\text{Min} C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (1)$$

$$C_1 = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{m \in M} \sum_{T \in W} fc_m \cdot d_{ij}^m \cdot x_{i,j,T}^m \cdot Q + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{m \in M} \sum_{T \in W} gc \cdot t_{ij}^m \cdot y_{i,T}^m \cdot Q \quad (2)$$

$$C_2 = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{m \in M} \sum_{T \in W} \omega \cdot \lambda_m \cdot d_{ij}^m \cdot x_{i,j,T}^m \cdot Q + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{m \in M} \sum_{T \in W} \omega \cdot ac \cdot t_{ij}^m \cdot y_{i,T}^m \cdot Q \quad (3)$$

$$C_3 = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{m \in M} \sum_{T \in W} \frac{3.6 \cdot \delta \cdot S \cdot (ET_{ij} - T)}{\beta} \cdot x_{i,j,T}^m \cdot Q + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{m \in M} \sum_{T \in W} \frac{3.6 \cdot \delta \cdot S \cdot (ET_{ij} - T)}{\beta} \cdot (w_i^m + w_j^m) \cdot y_{i,T}^m \cdot Q \quad (4)$$

$$C_4 = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{m \in M} \sum_{T \in W} \omega \cdot \lambda \cdot \frac{3.6 \cdot \delta \cdot S \cdot (ET_{ij} - T)}{\beta} \cdot x_{i,j,T}^m \cdot Q + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{m \in M} \sum_{T \in W} \omega \cdot \lambda \cdot \frac{3.6 \cdot \delta \cdot S \cdot (ET_{ij} - T)}{\beta} \cdot (w_i^m + w_j^m) \cdot y_{i,T}^m \cdot Q \quad (5)$$

2.3.2 约束条件

$$\sum_{(i,j) \in O} \sum_{m \in M} x_{i,j,T}^m = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} \sum_{m \in M} x_{i,j,T}^m - \sum_{(i,j) \in A} \sum_{m \in M} x_{i,j,T}^m = 0 \quad \forall i \in H \quad (7)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} \sum_{m \in M} x_{i,j,T}^m = 1 \quad (8)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} \sum_{m \in M} x_{i,j,T}^m \leq 1 \quad \forall i \in H \quad (9)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{T \in W} y_{i,T}^m \leq 1 \quad \forall i \in H \quad (10)$$

$$\sum_{(j,i) \in A} x_{j,i,T}^m + \sum_{(i,j) \in A} x_{i,j,T}^m \geq 2y_{i,T}^m \quad \forall i \in H, \forall m, n \in M \quad (11)$$

$$\sum_{n \in M} y_{i,T}^n + \sum_{n \in M} y_{i,T}^m \geq 2x_{i,j,T}^m \quad \forall i, j \in H, i \neq j, \forall m \in M \quad (12)$$

$$q_i = q_0 \quad (13)$$

$$\ln q_{i+1} = \ln q_i - \left(\sum_{j \in A} \sum_{m \in M} k(T)_{j,i+1}^m \cdot x_{j,i+1,T}^m + \sum_{n \in M} k(T)_{(i+1)}^{(m)} + w_{i+1}^m \right) y_{i+1,T}^m \quad \forall i \in O \cup H \quad (14)$$

$$\ln q_i \geq \ln q_{\min} \quad \forall i \in V \quad (15)$$

$$x_{i,j,T}^m \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in A, \forall m \in M, \forall T \in W \quad (16)$$

$$y_{i,T}^m \in \{0,1\} \quad \forall i \in V, \forall m, n \in M, \forall T \in W \quad (17)$$

C 表示总运输费用, C_1 、 C_3 分别表示运输和制冷成本, C_2 、 C_4 分别表示运输和制冷产生的碳排放成本。式(6)表示必选一条起始弧, 且该弧上只可选择一种运输方式和一种制冷温度; 式(7)表示任一中间节点流入流出相等; 式(8)表示必选一条终止弧, 且该弧上只可选择一种运输方式和一种制冷温度; 式(9)表示任意一条弧最多可选择一种运输方式; 式(10)表示任一中间节点最多只有一种转运方式; 式(11)和式(12)保证运输路线与运输方式的连贯性; 式(13)对产品初始质量赋值, 式(14)表示节点 $i+1$ 处的产品质量; 式(15)表示任一节点的产品质量要满足最低质量要求; 式(16)和式(17)表示决策变量为 0-1 变量。

3 算例分析

3.1 算例描述

1 个满载生鲜农产品的 20ft 冷藏集装箱从德国汉堡运往河南郑州, 产品初始质量为 100, 最低质量要求为 70, 可选制冷温度有 -2°C 、 -1°C 、 0°C 、 1°C 、 2°C 。考虑选取中欧间主要运输线路如图 1 所示, 选取节点及其外



图 1 运输线路示意图

界环境温度如表 1 所示, 路段温度以两节点平均温度计。

线路 1: 1-2-3-10-11-16-27-33-39-41; 线路 2: 1-2-3-10-11-16-27-34-40-41; 线路 3: 1-2-3-10-11-17-18-25-31-38-41; 线路 4: 1-2-3-10-12-19-20-26-32-38-41; 线路 5: 1-4-6-7-9-14-24-30-37-41; 线路 6: 1-4-6-7-9-15-22-23-29-36-41; 线路 7: 1-5-8-13-21-28-35-40-41; 线路 8: 1-40-41;

表 1 城市节点编号与环境温度

编号	节点	环境温度	编号	节点	环境温度	编号	节点	环境温度
1	汉堡	25°C	15	新加坡	31°C	29	宁波	36°C
2	华沙	26°C	16	叶卡捷琳堡	20°C	30	喀什	36°C
3	布列斯特	24°C	17	奥伦堡	24°C	31	霍尔果斯	38°C
4	鹿特丹	22°C	18	阿克托别	25°C	32	阿拉山口	36°C
5	卑尔根	20°C	19	乌法	24°C	33	满洲里	24°C
6	南安普敦	20°C	20	阿斯塔纳	34°C	34	二连浩特	30°C
7	阿尔赫西拉斯	30°C	21	雅内	26°C	35	天津	32°C
8	摩尔曼斯克	12°C	22	盐田	34°C	36	上海	36°C
9	苏伊士	35°C	23	中国台北	36°C	37	吐鲁番	44°C
10	莫斯科	24°C	24	瓜达尔	29°C	38	乌鲁木齐	40°C
11	喀山	24°C	25	阿拉木图	40°C	39	沈阳	30°C
12	萨马拉	22°C	26	阿克斗卡	26°C	40	北京	36°C
13	佩韦克	10°C	27	新西伯利亚	24°C	41	郑州	34°C
14	吉布提	42°C	28	釜山	28°C			

3.2 算例结果

对模型求解, 得出最优方案线路 2, 全程铁路运输, 各路段与节点制冷温度均为 2°C , 总成本为 38751.85, 最终产品质量为 83.397。

3.3 运输线路对比分析

设公路、铁路、海路和航空运输编号为 1、2、3、4, 各线路最优运输方案如表 2 所示。线路 8 最佳运输方案总成本为 242461.31 元, 运输、制冷和碳排放成本分别为 227725 元、1615.2 元、13121.106 元; 运距 8225 千米, 运输时间 35.75 小时, 最终产品质量为 97.7148。线路 1-7 成本对比如图 2, 运输距离、时间和质量如图 3。

对结果进行对比分析可知, 在陆运线路中, 线路 2 与线路 1、4 的总成本相近, 途径高纬度地区, 外界环境温度低, 且运输时间较短因而制冷成本较低; 线路 3

表 2 各线路最优运输方案

线路	运输方式	路段温度 ($^\circ\text{C}$)	节点温度 ($^\circ\text{C}$)
1	2	2	2
2	2	2	2
3	2-2-2-2-1-1-1-1-2-2	2	2
4	2	2	2
5	3-3-3-3-3-3-2-2	1-1-1-1-1-1-1-(-1)-1	1-1-1-1-1-1-1-0
6	3-3-3-3-3-3-3-3-2	0-0-(-1)-(-1)-(-1)-(-1)-0-0-0-0	(-1)0-0(-1)-(-1)0-0(-1)-(-1)
7	3-3-3-3-3-3-2-2	1-2-1-1-1-1-2-1	2-1-1-1-1-1-2
8	2-4	2	2

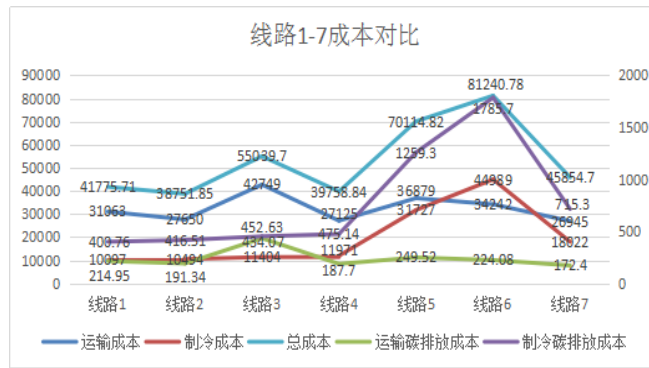


图2 线路1-7成本对比

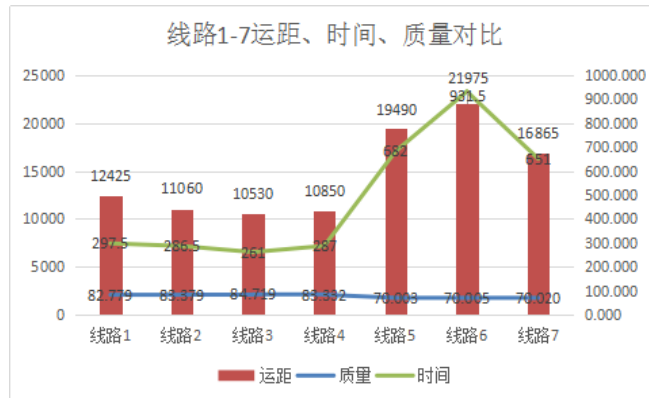


图3 线路1-7运距、时间与质量对比

运输距离与时间最短，且运输质量最高，体现了公路运输的速度优势。在海运线路中，线路5和7相比传统线路6，各类成本均更优，未来有望成为替补路线；且线路7运距最短、时间最少、成本最低，环境温度更低，比其他海运线路的制冷成本减少约50%~60%，对冷藏冷冻等易腐物品运输而言经济性优势显著。总体上看，制冷成本在总成本中占比较大，约为1/4，与外界环境温度和ación有重要关系；对于长时间冷链运输，通过调控制冷温度可有效满足产品质量需求。

4 总结

本文综合考虑制冷温度与外界环境温度对生鲜品质量与制冷成本的影响，对冷链运输进行优化。中欧间生鲜品运输算例分析表明，经第一亚欧大陆桥的运输路线具有一定经济优势，同时在海运线路中，北冰洋航线运输费用最低，其与经陆运至瓜达尔港入海的路线具有良好发展潜力。此外，对制冷温度进行优化可有效保障产品质量，且制冷成本与箱内外温差与运输时间密切相关，在总成本中占重要比重。因而，在冷链物流中对制冷温度与外界环境温度及其差异性进行考量具有重要意义。

参考文献：

[1]Rong A, Akkerman R, Grunow M. An optimization approach for managing fresh food quality throughout the supply

chain[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 131(1):421-429.

[2]Andrea Gallo, Riccardo Accorsi, Giulia Baruffaldi, Riccardo Manzini. Designing Sustainable Cold Chains for Long-Range Food Distribution: Energy-Effective Corridors on the Silk Road Belt[J]. Sustainability, 2017, 9, 2044.

[3]Wang S, Tao F, Shi Y, et al. Optimization of Vehicle Routing Problem with Time Windows for Cold Chain Logistics Based on Carbon Tax[J]. Sustainability, 2017, 9, 694.

[4]王晶,刘昊天,赵然.基于食品安全的生鲜食品冷链运营优化研究[J].系统工程理论与实践,2018,38(01):122-134.

[5]康凯,韩杰,普玮,马艳芳.生鲜农产品冷链物流低碳配送路径优化研究[J].计算机工程与应用,2019,55(02):259-265.

[6]刘松,邵毅明,彭勇.碳排放限制下的冷藏集装箱多式联运路径优化[J].应用数学和力学,2020,41(02):204-215.

[7]Hongtao Hu, Ye Zhang, Lu Zhen. A two-stage decomposition method on fresh product distribution problem[J]. International Journal of Production Research, 2017, 2, 4729-4752.