

基于蚁群算法的荔枝冷链物流配送成本模型优化

曾志雄^{1,2}, 邹炽导^{1,3}, 韦鉴峰^{1,4}, 陆华忠^{1,2}, 吕恩利^{1,2}, 阮清松¹

(1.华南农业大学 工程学院, 广州 510642;

2.国家农产品冷链物流装备研发专业中心, 广州 510642;

3.广东省教育考试院, 广州 510631; 4.桂林航天工业学院, 桂林 541004)

摘要: **目的** 为了确保荔枝的采摘、预冷、贮藏、配送和销售等环节能在短时间内完成, 以提高品质安全和新鲜度, 降低物流成本。**方法** 以配送车运输、冷链能耗、荔枝损耗、时间窗惩罚等 4 个主要因素为研究对象, 构建各因素成本模型, 并确定荔枝冷链物流配送过程中成本最优的目标优化函数。利用蚁群算法对荔枝冷链物流配送过程中成本最优目标函数算例进行求解, 得到荔枝冷链物流配送路径网络优化路线图。**结果** 当算法启发因子 $\alpha=1$, 期望启发式因子 $\beta=4$, 信息素的挥发程度系数 $\rho=0.75$, 蚁群数量 $m=600$, 信息素强度系数 $Q=0.9$, 最大迭代次数 $N_{\max}=600$, 迭代次数超过 300 时, 迭代趋于稳定。**结论** 当算法运算的迭代次数越多, 其优化结果越趋于稳定。该优化模型能够实现对荔枝冷链物流配送成本的优化设计, 提高荔枝配送效率, 并降低物流成本, 为荔枝的冷链物流配送提供参考。

关键词: 荔枝; 冷链物流; 模型构建; 优化模型; 蚁群算法

中图分类号: S377 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)11-0058-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.11.008

Optimization of Distribution Cost Model of Cold Chain Logistics for Litchi Based on Ant Colony Algorithm

ZENG Zhi-xiong^{1,2}, ZOU Chi-dao^{1,3}, WEI Jian-feng^{1,4}, LU Hua-zhong^{1,2},
LYU En-li^{1,2}, RUAN Qing-song¹

(1.College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2.National Research Center of Cold Chain Logistics Equipment of Agricultural Product, Guangzhou 510640, China;

3.Education Examinations Authority of Guangdong Province, Guangzhou 510631, China;

4.Guilin University of Aerospace Technology, Guilin 541004, China)

ABSTRACT: The work aims to ensure that the picking, pre-cooling, storage, distribution and sales of litchi can be completed in a short time, so as to improve quality safety and freshness, and reduce logistics costs. With the four main factors like distribution vehicle transportation, cold chain energy consumption, litchi loss and time window penalty as study objects, the cost model of each factor was constructed and the cost optimal objective optimization function in the process of litchi cold chain logistics distribution was determined. The ant colony algorithm was used to solve the cost optimal objective function example in the process of litchi cold chain logistics distribution, so as to obtain the network optimization

收稿日期: 2018-11-07

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0701002); 现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-33-13); 广东省科技计划 (2017B020206005); 广东省省级 (基础研究及应用研究) 重大项目 (2016KZDXM028); 广州市科技计划 (201704020067); 广东大学生科技创新培育专项资金 (PDJHA0072)

作者简介: 曾志雄 (1989—), 男, 华南农业大学博士生, 主攻农产品冷链物流技术。

通信作者: 吕恩利 (1979—), 男, 华南农业大学副教授、博导, 主要研究方向为农业工程。

roadmap of litchi cold chain logistics distribution path. The experimental results showed that when the algorithm heuristic factor $\alpha=1$, the expected heuristic factor $\beta=4$, the pheromone volatilization coefficient $\rho=0.75$, the ant colony number $m=600$, the pheromone intensity coefficient $Q=0.9$, the maximum iteration number $N_{\max}=600$, and the number of iterations exceeded 300, the iteration tended to be stable. The more the number of iterations of the algorithm is, the more stable the optimization result is. The optimization model can optimize the distribution cost of litchi cold chain logistics, improve the distribution efficiency of litchi and reduce the logistics cost, and provide reference for litchi cold chain logistics distribution.

KEY WORDS: litchi; cold chain logistics; model building; optimization model; ant colony algorithm

我国现阶段冷链物流存在物流模式落后、损耗大、成本高等问题,与发达国家相比,其发展水平处于落后状态^[1-4]。数据显示,我国在冷链物流的配送过程中,水果损耗率超过 20%,造成损耗的原因较多,其中包括配送模式、配送路径优化不足,导致易腐品的配送过程耗时过长^[4-7]。

荔枝由于其易腐的生理特性,具有明显时效性,在没有做好相应冷链运输情况下会造成严重损耗,因此,要保证荔枝的品质安全,需要冷链物流的持续投入,这也造成了荔枝运输成本较高^[8-10]。综上,对现有的荔枝冷链物流配送网络进行优化,选择合适的路径和冷藏车服务节点,可缩短荔枝冷链运输环节的时间,对提高荔枝的新鲜度和品质安全、降低配送成本均有着重要意义。

荔枝冷链物流运输及配送是荔枝冷链物流的重要环节,主要包括荔枝冷链物流的长途运输、中短途批发配送等运输环节^[5,7-13]。国内外通过新鲜度检测、质量安全分析、品质变化规律、故障树分析、解释结构分析等方法,研究荔枝等生鲜农产品的贮运效果及理化指标特征^[5-17]。蚁群算法在路径优化方面效率较高。采用改进的蚁群算法,可有效规避动态威胁,避免算法陷入局部最优,在解决单一路径规划方面举得了较好的研究成果^[18-23]。再结合蚁群算法,开展生鲜荔枝冷链物流配送成本模型的相关研究鲜有报道,文中结合荔枝冷链物流的实际情况,拟基于荔枝冷链物流的各类成本,建立目标函数,以成本最小为优化目标对荔枝冷链物流配送路径网络进行研究。随后设计荔枝冷链物流配送算例,采用蚁群算法对目标优化模型进行计算求解,得到荔枝冷链物流路径优化路线。

1 存在的问题和描述

荔枝配送模型为 1 个冷链物流配送中心和多个需求配送点构成的供需系统,可解决低温运输方式的路径优化问题。一般而言,优化目标是在一定的约束条件下,实现目标的优化^[14-17,24-27]。假设荔枝冷链物流配送中心有 m 辆载质量为 V 的冷藏配送车辆(简称配送车),每辆配送车从配送中心(n_0)出发,经过

各个需求点($n_i, i=1,2,\dots,g$)后返回配送中心,其具体的配送流程和配送体系见图 1—2。配送车配送过程存在时间窗约束,时间窗是指最早配送时间 t_e 和最晚服务时间 t_l 表示组成的一个时间服务区间。时间窗分为 3 种类型,第 1 种类型是硬时间窗,即若配送车到达需求点的时刻在时间窗之前(即 t_e 之前),必须等待至时间窗后才能卸货,若配送车在时间窗之后(即 t_l)到达,则客户拒绝接收货,配送失败;第 2 个是软时间窗,即若配送车无法在需求点指定的时间窗之内完成配送,虽然客户仍收货,但配送方必须支付一定的惩罚成本;第 3 种是混合时间窗,即软时间窗和硬时间窗的混合,当配送车到达需求点时处在软时间区间外时,需求点客户拒绝收货;如果配送时间在 $[t_e, t_l]$ 时间内时,正常配送,没有额外惩罚成本,其他时间段也正常收货,但是存在惩罚成本,以上 3 种配送时间窗模式见图 3,表示 3 种不同的配送时间窗货物接收情况。对同一个需求点,存在硬、软时间窗的混合即混合时间窗。文中以第 3 种时间窗为时间窗约束标准,在满足不超过每辆配送车载重和配送满足全

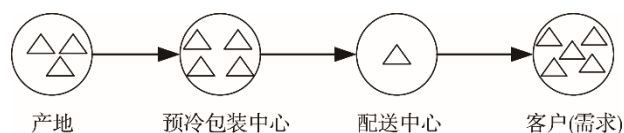


图 1 荔枝配送流程
Fig.1 Litchi distribution process

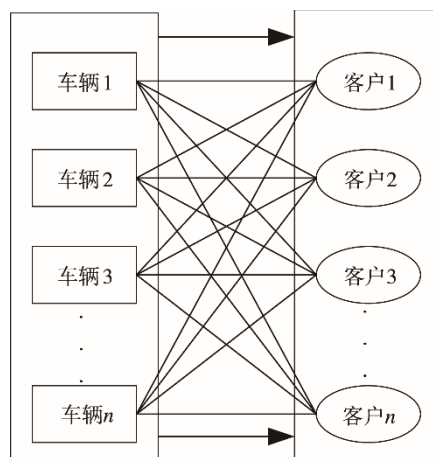


图 2 荔枝配送体系
Fig.2 Litchi distribution system

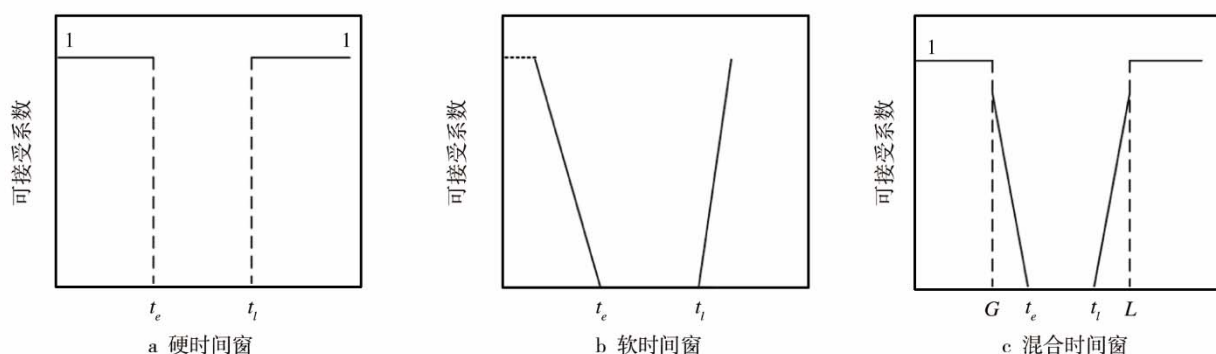


图3 3种配送时间窗模式

Fig.3 Three modes of distribution time window

部需求点的约束条件下,考虑荔枝从冷链物流配送中心出发,从配送车配送的顺序、配送车总数、配送时间、行走的路径等方面综合考虑其配送成本,采用智能蚁群算法,使得配送目标函数成本最小。

2 荔枝冷链物流配送路径模型构建

以荔枝冷链物流的配送成本最小为优化目标,所构建的目标函数成本中包含配送车运输成本、冷链能耗成本、荔枝损耗成本、时间窗惩罚成本等4个部分^[18-20,24-27]。在成本分析中,汽车油耗往往容易统计,但每一辆车制冷的能耗往往难于精确统计,且装卸过程中的损耗受环境、人为等因素影响,也难于量化。在模型的构建过程中,将各辆车单位里程的运输成本、车辆的制冷能耗评估调节系数、装卸场所的货损比例评估调节系数作为反映具体车辆的差异的因子,其中车辆的制冷能耗评估调节系数和装卸场所的货损比例评估调节系数在运输和装卸后进行人工评价,确保更能贴近实际情况。假设所构建模型中每辆车的3个评估系数值一致,即配送车技术状况、装卸点水平等外部条件一致,可构建以下模型。

2.1 模型的假设

文中假设模型只有1个冷链物流配送中心,且配送中心的位置已知;荔枝冷链配送中心有足够的配送车辆,每辆车的额定载质量一致,车辆有里程限制;荔枝配送中心对需求点的位置、需求量、时间窗等信息已知且固定不变;每辆配送车在配送过程中单位路程运输成本和单位时间冷藏能耗成本可知。

2.2 配送成本目标函数

假设配送中心拥有的车辆数为 m ,客户需求点的数量为 n , k 表示车辆 $k \in [1, m]$, V_k 表示第 k 辆车的额定载质量, L_k 为第 k 辆车的最大配送里程, a, b 分别是需求点, $a, b \in [1, n]$; d_{ab} 表示 a 到 b 的路程;每个服务点的需求量记为 q_a ; x_{ab}^k ($n=0, 1, 2, \dots$) 为0或1,当 x_{ab}^k 为1时表示第 k 辆车通过 a, b 之间,否则 x_{ab}^k 为0。

1) 配送车运输成本。荔枝冷链物流配送车的运输成本由固定成本和可变成本等2部分组成,固定成本包括车辆的维护、折旧和人工等成本组成。假设该成本不随运输的距离和时间变化,为定值 S 。可变成本主要为车辆的燃料消耗,其与车辆的行驶距离呈正比。在实际的运输过程中,由于车况、驾驶技术等因素的影响,不同车辆单位里程的运输成本有所不同。其公式如下所示:

$$C_{YS} = S + \sum_{k=1}^m \sum_{a=0}^n \sum_{b=0}^n d_{ab} c_k x_{ab}^k \quad (1)$$

式中: C_{YS} 表示运输成本; c_k 表示第 k 辆车的单位里程运输成本; S 表示固定成本。

2) 冷链能耗成本。在荔枝冷链物流过程中,冷链能耗成本主要包括车辆行驶过程中的制冷成本及车辆装卸时间的制冷成本。假设在荔枝的配送过程中不断冷,为保持冷藏车厢内部的低温环境,需要消耗能源。在客户需求点,荔枝装卸和冷藏车门打开会导致额外的制冷成本。为了更好地模拟实际运行情况及方便操作,该模型考虑了不同车辆的能耗参数差异,采用了能耗评估调节系数进行调节。

$$C_{ZL} = \sum_{k=1}^m \lambda_k (\mu_1 (t_0^k - t_p^k) + \sum_{a=0}^n x_a^k \mu_2 \Delta t_a) \quad (2)$$

式中: C_{ZL} 为冷链能耗成本, μ_1 为行驶过程中单位时间的能源消耗量; μ_2 为装卸时单位时间的能耗; t_0^k 为配送结束时间; t_p^k 为第 k 辆车从荔枝配送中心出发的时间; Δt_a 为需求点 a 的装卸时间; λ_k 为第 k 辆车的实际能耗评估调节系数。

3) 荔枝损耗成本。荔枝在配送运输过程中的损耗主要集中在行驶过程与装卸过程中的损耗。荔枝属于易腐水果,具有易损和时效性,荔枝在运输过程中,随着时间推移,会有部分损坏,产生损耗成本;在装卸点由于装卸场所的设施及工人技术水平的差异,对荔枝造成的货损是可以评估的,为此模型引入了 δ_b 作为装卸场所的货损比例评估调节系数。考虑荔枝的损耗程度只与配送时间有关系,且荔枝损耗程度随时间推移不断增加,因此有如下模型。

$$C_{HS} = R \sum_{k=1}^m \sum_{a=1}^n x_a^k w_a (\mu_3(t_a^k - t_{a-1}^k) + \delta_a \mu_4 \Delta t_a) \quad (3)$$

式中： C_{HS} 表示荔枝冷链运输的损耗成本； R 为荔枝的单价； w_a 为配送车辆到客户需求点 a 时，车上剩余的荔枝量； μ_3 为配送过程中荔枝单位时间的货损率； μ_4 为装卸过程荔枝单位时间的货损率； t_a^k 为第 k 辆车到达客户需求点 a 的时刻； t_{a-1}^k 为第 k 辆车在 a 点上一节点的出发时间点； δ_a 为第 a 个装卸点的货损比例评估调节系数。

4) 时间窗惩罚成本。在实际配送过程中，必须考虑其易损和时效特性，保证送到客户手中时尽可能高质量和新鲜的荔枝，因此文中采用混合时间窗模式，见图 3c。为简化及结合实际模型，用一个多段函数表示，在软时间窗内加收一定的惩罚费用。其惩罚成本可式 (4) 表示。

$$U(t_a) = \begin{cases} \infty & t_a < G \\ \lambda R q_a & G \leq t_a \leq t_e \\ 0 & t_e \leq t_a \leq t_l \\ \lambda R q_a & t_l \leq t_a \leq L \\ \infty & t_a \geq L \end{cases} \quad (4)$$

$$C_{punish} = \sum_{a=1}^n U(t_a) \quad (5)$$

式中： t_e 为硬时间窗的上界； t_l 为硬时间窗的下界； G 为需求点客户可以接受的时间下限； t_a 为到达 a 点的时间； q_a 为第 a 个点的需求量； L 为需求点客户可以接受的时间上限； λ 为惩罚系数。

2.3 优化模型构建

以荔枝冷链物流运输网络配送成本最小为目标，通过考察配送车运输成本、冷链能耗成本、荔枝损耗成本、时间窗惩罚成本等，对配送路径进行优化，安排合理的配送路线。为较好描述配送车辆的最低目标成本模型，需考虑模型的各类前提条件^[20,28—31]，如配送中心荔枝量充足，能满足各个需求点的需求量；每个需求点只能由 1 辆车配送；每辆车规划配送路径上需求点的需求量总和不超过车辆额定载质量；配送车完成配送任务后回到配送中心；车辆配送里程不超过其最大配送里程；荔枝需在制定的时间窗内送到，则模型构建如下所示。

$$C = \min(S + \sum_{k=1}^m \sum_{a=0}^n \sum_{b=0}^n d_{ab} c_k x_{ab}^k + \sum_{k=1}^m \lambda_k (\mu_1(t_0^k - t_p^k) + \sum_{a=0}^n x_a^k \mu_2 \Delta t_a) + R \sum_{k=1}^m \sum_{a=1}^n x_a^k w_a (\mu_3(t_a^k - t_{a-1}^k) + \delta_a \mu_4 \Delta t_a) + \sum_{a=1}^n U(t_a)) \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^m x_b^k q_b \leq V_k \quad b = 0, 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$\sum_{a=0}^n x_{ab} = 1 \quad b = 0, 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$\sum_{a=0}^n \sum_{b=0}^n x_{ab} = n \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^m x_b^k = 1 \quad b = 0, 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{b=0}^n x_b^k = m \quad (11)$$

$$\sum_{b=0}^n \sum_{a=0}^n x_{ab}^k d_{ab} \leq L_k \quad a, b = 0, 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$G \leq t_a \leq L \quad (13)$$

其中，式 (6) 为总成本目标函数，可求得目标函数最小值；式 (7) 表示每辆车的载质量不超过额定载质量；式 (8) 表示每个需求点只配送 1 次，不重复配送；式 (9) 表示每个需求网点都配送；式 (10) 表示每个需求点只被 1 辆车服务；式 (11) 表示每辆车都被利用；式 (12) 表示配送车辆不能超过车自身的最大配送里程；式 (13) 表示车的配送时间窗需满足客户可接受的时间范围。

3 基于蚁群算法的配送成本模型优化

张维泽等^[32]建立了物流配送路径模型，并使用文献^[33]中的算例数据，通过对比蚁群算法和遗传算法在解决物流配送路径优化问题的计算结果后，得出蚁群算法在解决该问题的效率和准确性高于遗传算法。基于此结果和结论，文中采用蚁群算法解决荔枝冷链物流配送路径优化问题。

利用 MATLAB 软件，开展了基于蚁群算法的荔枝冷链物流配送成本模型优化及研究。文中目标函数中存在配送车辆的载质量和需求点时间窗约束，所以在选择 allowed 集合的时候首先保证配送车辆的载质量不能超过额定载质量，即 b 点的需求量加上 b 点之前所有点的需求量不能大于配送车本身允许的最大载质量。再次就是保证配送车到达需求点的时候是处于客户可接受的时间窗范围内，即配送车从开始服务 a 点到开始服务 b 点的这个时间段，处于客户能接受的时间窗。这里用禁忌表 $\text{tabu}_k(k=1, 2, \dots, m)$ 来记录蚂蚁 k 当前所走过的城市。

充分考虑荔枝冷链物流配送的特点，进而确定配送点的转移概率，转移概率可表示为：

$$p_{ab}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ab}(t)]^\alpha [\eta_{ab}(t)]^\beta}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} [\tau_{as}(t)]^\alpha [\eta_{as}(t)]^\beta} & \text{若 } b \in \text{allowed}_k \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (14)$$

式中： allowed_k 为蚂蚁 k 下一步能够选择的所有节点， $\text{allowed}_k = \{c - \text{tabu}_k\}$ ； α 为信息启发式因子，表示路径轨迹中信息量对蚂蚁选择路径环节的影响程度，数值越大，群体的协作性越强； β 是期望启发式因子，表示能见度的相对重要性。 η_{ab} 是启发函数，即

由节点 a 转移到节点 b 的期望程度, η_{as} 同理。其中 $\eta_{ab}=1/T_F$, T_F 表示荔枝冷链物流的总成本, 其公式可表示为 $T_F=\min F=1/\eta_{ab}$, F 为全部节点集合。由式(14)可知, F 越小, η_{ab} 则越大, $p_{ab}^k(t)$ 越大, 从 a 点到 b 点的信息浓度就越高, 被选择的概率就越大。

在解决荔枝冷链物流配送路径优化问题的过程中, 采用“蚁周系统”(Ant-Cycle)模型^[29—30]来更新信息素, 其表达式为:

$$\Delta\tau_{ab}(t)=\begin{cases} Q/L_k(t) & \text{第 } k \text{ 只蚂蚁在该次循环中经过}(a,b) \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (15)$$

$$\Delta\tau_{ab}(t)=\sum_k^m \tau_{ab}^k(t) \quad (16)$$

$$\tau_{ab}(t+n)=(1-\rho)\tau_{ab}(t)+\Delta\tau_{ab}(t) \quad (17)$$

式中: $\Delta\tau_{ab}^k(t)$ 表示第 k 只蚂蚁在该遍历结束后路径 (a,b) 的信息素增量; L_k 表示第 k 只蚂蚁在该循环中移动总长度; Q 表示信息素强度系数; ρ 表示信息素的挥发程度系数。其中, 式(17)为信息素增量的更新公式。

为使蚁群算法前期就能快速地搜索和解出较优解, 需要对蚁群算法中的动态参数做调整, 比如“蚁周系统”模型中的 Q 参数, 配送点转移概率中的 α 和 β 参数。

假设需要配送需求点客户数用 n 表示, 有 m 只蚂蚁。节点集合迭代循环次数用 N_f 表示, $N_{\max}$ 表示最大迭代循环计算次数。其一般的计算步骤如下^[23,34—35]所述。

1) 进行参数初始化。令 $t=0$, 循环次数 $N_f=0$, 设置最大循环次数 $N_{\max}$, 每条路径 (a,b) 的初始化信息

量 $\Delta\tau_{ab}(t)=0$ 。计算节点间的距离, 用 D_{ab} 表示, 并将各个节点之间的距离用距离矩阵表示。

2) 将 m 只蚂蚁置于配送中心位置。

3) 循环次数 $N_f=N_f+1$ 。

4) 令蚂蚁禁忌表索引号 $k=1$ 。

5) $k=k+1$ 。

6) 依据式(14)计算蚂蚁选择下一未访问配送节点 b 的转移概率 P , 通过比较之后, 选择下一个访问节点, 并将节点放到 tabu_k 已访问列表中。重复第 5 步, 直到所有节点访问完成为止。

7) 计算所有蚂蚁走过的路径长度, 根据式(16)及式(17)更新每条路径上的信息素量。

8) 若迭代次数 $N_f>N_{\max}$, 算法停止, 输出程序计算结果, 否则继续执行第 3 步。

4 算例分析

设有 1 个冷链配送中心和 18 个客户需求点, 配送中心有配送冷链车 4 辆, 每辆车的最大载质量为 4.0 t, 每辆配送车的最大行驶距离为 50 km。为了简化起见, 设定各辆车及装卸点技术装备水平一致且仅考虑线路的优化。配送中心的坐标是 (9.5, 6.0), 配送过程中荔枝单位时间的货损率为 0.3%, 装卸过程荔枝单位时间的货损率为 0.5%^[8,13], 单位里程运输成本为 2 元/km, 配送车行驶速度假定为 20 km/h。假设凌晨 5 点从配送中心出发, 配送后返回。荔枝的单位平均价格为 18 元/kg。惩罚成本为需求量的 0.2%, 运输过程单位制冷成本为 1.5 元, 开车厢门单位制冷成本为 2 元, 同时配送时间也受到时间窗的限制, 具体见表 1。

表 1 各个需求点荔枝的需求量及服务时间窗限制
Tab.1 Demand and service time window limitation of litchi of each demand point

客户编号	客户需求量/t	客户需求点坐标/km		卸货停留时间/min	约定服务时间窗 (t_e, t_l)	可接受时间窗 (E, L)
		x坐标	y坐标			
1 [#]	0.7	10	19.3	10	[5:00,9:00]	[4:30,9:30]
2 [#]	0.9	3.0	13.4	12	[5:20,9:20]	[4:50,9:30]
3 [#]	0.5	19.8	14.4	7	[5:20,9:00]	[5:00,9:30]
4 [#]	0.6	6.5	18.8	8	[5:20,9:20]	[5:00,9:30]
5 [#]	0.7	7.3	5.3	10	[5:00,9:00]	[5:30,6:30]
6 [#]	1	14.9	16.5	12	[5:20,9:00]	[5:00,9:30]
7 [#]	0.9	7.0	14.3	12	[5:20,9:20]	[5:00,9:30]
8 [#]	1	6.0	5.0	14	[5:00,9:00]	[4:30,9:30]
9 [#]	0.4	0.6	14.8	7	[5:20,9:00]	[4:50,9:30]
10 [#]	1.1	14.5	12.1	15	[5:00,9:00]	[4:30,9:30]
11 [#]	0.4	1.3	1.4	7	[5:20,9:20]	[5:00,9:50]
12 [#]	0.9	3.9	9.1	12	[5:00,9:00]	[4:30,9:30]
13 [#]	0.5	15.1	18	8	[5:20,9:00]	[5:00,9:30]
14 [#]	0.6	0.3	11.5	9	[5:20,9:20]	[5:00,9:50]
15 [#]	0.7	12.3	0.4	9	[5:20,9:00]	[4:50,9:30]
16 [#]	0.8	2.3	15.9	10	[5:00,9:00]	[4:30,9:30]
17 [#]	0.7	12	13.1	9	[5:20,9:00]	[5:00,9:20]
18 [#]	0.6	10.5	10.8	8	[5:00,9:00]	[4:30,9:30]

由于算例中设定每辆车及装卸点技术装备水平一致且仅考虑线路的优化, 因此各辆车的单位里程运输成本 c_k 一致; 各辆车的实际能耗评估调节系数 λ_k 默认均为 1; 各装卸点的货损调节系数 δ_b 默认均为 1; 固定成本为缺省状态, S 设置为 0。在蚁群算法中, 算法的寻优能力和收敛效果主要受到参数的影响, 好的路径信息能够在提高蚁群算法能力的同时也扩大搜索解的范围。路径选择的参数中包括信息素启发因子、信息强度等参数。根据经验取信息素启发因子 $\alpha=1$, 期望启发式因子 $\beta=4$, 信息素的挥发程度系数 $\rho=0.75$, 蚁群数量 $m=600$, 信息素强度系数 $Q=0.9$, 最大迭代次数 $N_{\max}=600$ 。MATLAB 算法得到的冷链物流车辆配送路线见图 4。用节点 0 表示配送中心, 配送的路径有 4 条, 路线 1 为 0—12—8—5—15—0; 路线 2 为 0—10—17—3—13—6—0; 路线 3 为 0—9—2—7—14—11—0; 路线 4 为 0—18—1—16—4—0。

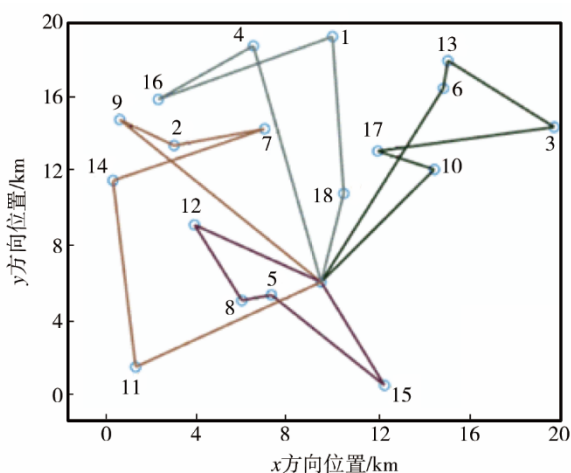


图 4 仿真路线
Fig.4 Simulation roadmap

蚁群算法优化目标函数曲线见图 5。由图 5 可知, 该次迭代次数为 600, 此外从第 300 次附近开始, 目标优化函数值稳定在一个固定值。由此可见, 对于荔

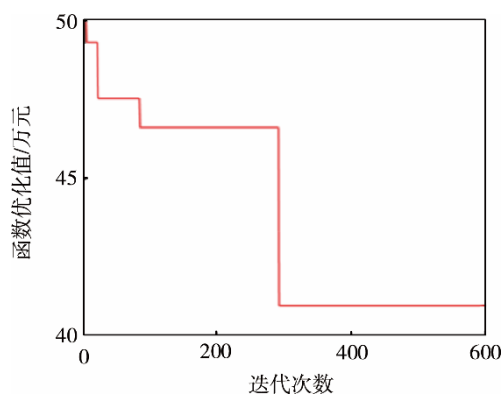


图 5 蚁群算法优化目标函数曲线
Fig.5 Optimization objective function curve of ant colony algorithm

枝冷链物流配送路径优化问题, 运用蚁群算法能够计算近似最优解。

5 结语

对荔枝冷链运输过程中存在的问题进行了详细描述, 对荔枝在配送过程中产生的成本进行了分析, 其成本主要包括配送车运输成本、冷链能耗成本、荔枝损耗成本。

针对荔枝冷链物流中的 3 类运输成本及混合时间窗的惩罚成本, 建立了运输优化数学模型。结合荔枝特性, 运输成本可分为配送车运输成本、冷链能耗成本、荔枝损耗成本等 3 类。配送车运输成本主要包括固定运输成本和变动运输成本, 固定成本又包含车辆的磨损、人工和租金等成本, 该成本是一个定值, 在车辆数固定的情况下, 且仅求解路径优化线路时, 可以缺省设置; 变动成本主要包括车辆的燃料消耗, 与车辆的行驶距离呈正比。冷链能耗成本主要包含运输车运输过程中的制冷成本和客户需求点服务时的制冷成本。荔枝损耗成本主要包括运输过程中的损耗成本和服务过程中装卸造成的损耗成本。荔枝具有易损和时效性, 在运输过程中, 荔枝会腐烂、变质或者发霉等, 这些损坏的荔枝得不到消费者的认可, 不能流通于市场, 只能做废弃处理, 损耗程度随时间推移不断增加, 损耗成本与时间成正比。

结合蚁群算法的原理及建模步骤, 提出了荔枝冷链物流配送案例。采用蚁群算法, 对配送案例进行优化计算, 得到荔枝冷链物流配送路径网络优化路线图, 说明建立的优化模型对荔枝冷链物流配送网络优化有实际意义。

参考文献:

- [1] 邱楠. 我国农产品冷链物流发展的问题及对策[J]. 物流技术, 2016, 35(4): 22—25.
QIU Nan. Countermeasures for Problems in Agricultural Produce Cold Chain Logistics System in China[J]. Logistics Technology, 2016, 35(4): 22—25.
- [2] 杨胜平, 谢晶, 高志立, 等. 冷链物流过程中温度和时间对冰鲜带鱼品质的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 302—310.
YANG Sheng-ping, XIE Jing, GAO Zhi-li, et al. Effect of Temperature and Time Fluctuations on Quality Changes of Iced Trichiurus Haumela in Cold Chain Logistics Process[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24): 302—310.
- [3] 陈镜羽, 黄辉. 我国生鲜农产品电子商务冷链物流现状与发展研究[J]. 科技管理研究, 2015, 34(6): 179—184.
CHEN Jing-yu, HUANG Hui. Study on Current Status

- and Countermeasures of Cold Chain for Fresh Agricultural Products Based on Ecommerce[J]. Science and Technology Management Research, 2015, 34(6): 179—184.
- [4] 袁学国, 邹平, 朱军, 等. 我国冷链物流业发展态势、问题与对策[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(1): 7—14.
YUAN Xue-guo, ZOU Ping, ZHU Jun, et al. Development Trend, Problems and Countermeasures for Cold Chain Logistics Industry in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(1): 7—14.
- [5] 杨松夏, 吕恩利, 陆华忠, 等. 不同保鲜运输方式对荔枝果实品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 225—232.
YANG Song-xia, LYU En-li, LU Hua-zhong, et al. Effects of Different Fresh-keeping Transportation Modes on Quality of Litchi Fruit[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 225—232.
- [6] XIE R H, LIU G H, ZOU Y F, et al. Influence on Litchi Quality in Different Logistics Conditions[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2013, 12(1): 81—86.
- [7] GUO J M, LYU E L, LU H Z, et al. Numerical Simulation of Gas Exchange in Fresh-keeping Transportation Containers with a Controlled Atmosphere[J]. Japanese Society for Food Science and Technology, 2016, 22(4): 429—441.
- [8] 郭嘉明, 吕恩利, 陆华忠, 等. 几种保鲜模式对荔枝贮藏效果对比[J]. 现代食品科技, 2015, 31(2): 164—172.
GUO Jia-ming, LYU En-li, LU Hua-zhong, et al. Effects of Various Fresh-keeping Techniques on the Quality of Litchi Chinensis Sonn. during Storage[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(2): 164—172.
- [9] 徐赛, 陆华忠, 周志艳, 等. 不同保鲜环境荔枝褐变的理化指标识别方法研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 221—227.
XU Sai, LU Hua-zhong, ZHOU Zhi-yan, et al. Physico-chemical Indexes of Browning Identification of Litchi under Different Storing Environments[J]. Transactions of the CSAM, 2016, 47(3): 221—227.
- [10] 邹炽导, 吕恩利, 陆华忠, 等. 基于 ISM 的荔枝冷链物流发展影响因素分析[J]. 保鲜与加工, 2017, 17(2): 114—119.
ZOU Chi-dao, LYU En-li, LU Hua-zhong, et al. Influence Factors Analysis on the Cold Chain Logistics of Litchi Based on ISM[J]. Storage and Process, 2017, 17(2): 114—119.
- [11] 郭嘉明, 吕恩利, 陆华忠, 等. 盒装荔枝果实降温特性数值分析与验证[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 218—224.
GUO Jia-ming, LYU En-li, LU Hua-zhong, et al. Numerical Analysis and Verification on Characteristics of Temperature Decreasing of Litchi Fruits with Packages[J]. Transactions of the CSAM, 2016, 47(5): 218—224.
- [12] 曾志雄, 邹炽导, 吕恩利, 等. 基于 FTA 模型的荔枝冷藏运输环节风险分析[J]. 2018, 39(17): 84—89.
ZENG Zhi-xiong, ZOU Chi-dao, LYU En-li, et al. Risk of Refrigerated Transportation of Litchi Based on FTA Model[J]. PACKAGING ENGINEERING, 2018, 39(17): 84—89.
- [13] 张松涛, 张盼盼, 张敏. 基于冷链物流的荔枝质量安全控制研究[J]. 保鲜与加工, 2018, 18(2): 114—119.
ZHANG Song-tao, ZHANG Pan-pan, ZHANG Min. Research on Quality and Safety Control of Lichi Based on Cold Chain Logistics[J]. Storage and Process, 2018, 18(2): 114—119.
- [14] XU S, LYU E L, LU H Z, et al. Quality Detection of Litchi Stored in Different Environments Using an Electronic Nose[J]. Sensors, 2016, 16(6), 1—14.
- [15] 夏晶晶, 虞新新, 吕恩利, 等. 不同贮藏温度下荔枝呼吸速率模型的对比与验证[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 267—273.
XIA Jing-jing, YU Xin-xin, LYU En-li, et al. Comparison and Verification of Respiratory Rate Models of Litchi under Different Storage Temperatures[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(10): 267—273.
- [16] WALTER J, GUTJAHR N D. Bi-objective Bilevel Optimization of Distribution Center Locations Considering User Equilibria[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 85(1): 1—22.
- [17] 杨晓芳, 姚宇, 付强. 基于新鲜度的冷链物流配送多目标优化模型[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(4): 1050—1053.
YANG Xiao-fang, YAO Yu, FU Qiang. Multi-objective Optimization Model of Cold Chain Logistics Distribution Based on Freshness[J]. Application Research of Computers, 2016, 33(4): 1050—1053.
- [18] 李擎, 张超, 陈鹏, 等. 一种基于粒子群参数优化的改进蚁群算法[J]. 控制与决策, 2013, 28(6): 873—883.
LI Qing, ZHANG Chao, CHEN Peng, et al. Improved and Colony Optimization Algorithm Based on Particle Swarm Optimization[J]. Control and Decision, 2013, 28(6): 873—883.
- [19] 刘振, 胡云安. 一种多粒度模式蚁群算法及其在路径规划中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(9): 3713—3722.
LIU Zhen, HU Yun-an. Multi-granularity Pattern and Colony Optimization Algorithm and Its Application in Path Planning[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(9): 3713—3722.
- [20] 何小锋, 马良. 带时间窗车辆路径问题的量子蚁群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(5): 1255—1261.
HE Xiao-feng, MA Liang. Quantum-inspired Ant Colony Algorithm for Vehicle Routing Problem with Time

- Windows[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2013, 33(5): 1255—1261.
- [21] 段海滨, 王道波, 于秀芬, 等. 蚁群算法的研究现状及其展望[J]. *中国工程科学*, 2007, 9(2): 98—102.
DUAN Hai-bin, WANG Dao-bo, YU Xiu-fen. Ant Colony Algorithm: Survey and Prospect[J]. *Engineering Science*, 2007, 9(2): 98—102.
- [22] 夏亚梅, 程渤, 陈俊亮, 等. 基于改进蚁群算法的服务组合优化[J]. *计算机学报*, 2012, 32(2): 270—281.
XIA Ya-mei, CHENG Bo, CHEN Jun-liang, et al. Optimizing Services Composition Based on Improved Ant Colony Algorithm[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2012, 32(2): 270—281.
- [23] 段海滨, 马冠军, 王道波, 等. 一种求解连续空间优化问题的改进蚁群算法[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(5): 974—977.
DUAN Hai-bin, MA Guan-jun, WANG Dao-bo, et al. Improved Ant Colony Algorithm for Solving Continuous Space Optimization Problems[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(5): 974—977.
- [24] 杨忠振, 穆雪, 朱晓聪. 交通流变化下的多配送中心-多需求点配送网络优化模型[J]. *交通运输工程学报*, 2015, 15(1): 100—107.
YANG Zhong-zhen, MU Xue, ZHU Xiao-cong. Optimization Model of Distribution Network with Multiple Distribution Centers and Multiple Demand Points Considering Traffic Flow Change[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2015, 15(1): 100—107.
- [25] 谷炜, 张群, 卫李蓉. 基于GIS的物流配送中心末端大规模车辆路径优化问题研究[J]. *中国管理科学*, 2013, 21(S1): 379—389.
GU Wei, ZHANG Qun, WEI Li-rong. Method of Large-scale Vehicle Routing Problem Based on GIS[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2013, 21(S1): 379—389.
- [26] 李苏苏, 谢如鹤. 基于食品安全的冷链物流成本优化分析[J]. *系统工程*, 2014, 32(12): 29—34.
LI Su-su, XIE Ru-he. Study on Cost Optimization of Cold-chain Logistics in Food Safety[J]. *Systems Engineering*, 2014, 32(12): 29—34.
- [27] 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, 20(4): 32—38.
MIAO Xiao-hong, ZHOU Xin-nian, LIN Sen, et al. Study on Routing Optimization for Cold-chain Logistics Distribution of 3PL[J]. *Operations Research and Management Science*, 2011, 20(4): 32—38.
- [28] 樊雪梅, 谢媛, 卓健, 等. B2C模式下城市配送方式及其效率评价[J]. *铁道运输与经济*, 2013, 35(7): 65—70.
FAN Xue-mei, XIE Yuan, ZHUO Jian, et al. Urban Distribution Mode under B2C Model and Its Efficiency Evaluation[J]. *Railway Transport and Economy*, 2013, 35(7): 65—70.
- [29] DORIGO M, MANIEZZO V, COLNMI A. Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents[J]. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics-part B*, 1996, 26(1): 29—41.
- [30] KUO R J, CHIU C Y, LIN Y J. Integration of Fuzzy Theory and Ant Algorithm for Vehicle Routing Problem with Time Window[C]// Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society, Pi Scat away, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2004, 925—930.
- [31] SALIN V, NAYGA R M. A Cold Chain Network for Food Exports to Developing Countries[J]. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 2003, 33(10): 918—933.
- [32] 张维泽, 林剑波, 吴洪森, 等. 基于改进蚁群算法的物流配送路径优化[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2008, 42(4): 574—579.
ZHANG Wei-ze, LIN Jian-bo, WU Hong-sen, et al. Optimizing Logistic Distribution Routing Problem Based on Improved Ant Colony Algorithm[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2008, 42(4): 574—579.
- [33] 柳林, 朱建荣. 基于遗传算法的物流配送路径优化问题的研究[J]. *计算机工程与应用*, 2005, 41(27): 227—229.
LIU Lin, ZHU Jian-rong. The Research of Optimizing Physical Distribution Routing Based on Genetic Algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005, 41(27): 227—229.
- [34] OSVALD A, STIRN L Z. A Vehicle Routing Algorithm for the Distribution of Fresh Vegetables and Similar Perishable Food[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 85(2): 285—295.
- [35] DUAN Hai-bin, YU Ya-xiang, ZHANG Xiang-yin, et al. Three Dimension Path Planning for UCAV Using Hybrid Meta-heuristic ACO-DE Algorithm[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2010, 18(3): 1104—1115.