

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202212132024081979

文章编号: 1674-599X(2024)04-0136-09

引用格式: 李利华, 夏春平, 普国东, 等. 需求可拆分下生鲜农产品集货路径优化[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(4): 136-144.

Citation: LI Lihua, XIA Chunping, PU Guodong, et al. Split delivery route optimization about the gather of fresh agricultural products [J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(4): 136-144.

需求可拆分下生鲜农产品集货路径优化

李利华^{1,2}, 夏春平¹, 普国东¹, 冯谦¹

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 长沙理工大学 智能道路与车路协同湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 针对生鲜农产品集货中点多量散、车载限制、货物易腐等特点, 研究需求可拆分下生鲜农产品集货的路径优化。通过网点布局与网络需求、车辆路径与载量要求、产品特征与成本消耗等描述生鲜农产品集货基本问题, 从制冷、货损、油耗三个方面构造总的集货成本, 考虑需求拆分、流量均衡、车辆起始与服务等约束, 建立集货路径优化模型; 基于遗传算法, 以序号排序标定适应度函数, 改进轮盘赌选择, 用精英策略进行算子分析与遗传操作, 设计问题求解模式; 最后, 以湖南省某乡镇脐橙集货为例进行实证分析。案例分析结果表明: 优化后, 总集货成本下降19.34%, 货损成本减少最多, 达1 550.86元; 集货路径总数减少1条, 拆分点由5个变为3个, 且按需求进行深度拆分; 总行驶里程与时间分别减少72.4 km、2.06 h, 整体优化效果明显。研究结果对生鲜农产品集货管理的效率提升有借鉴意义。

关键词: 需求可拆分; 生鲜农产品; 集货路径优化; 遗传算法

中图分类号: U13

文献标志码: A

Split delivery route optimization about the gather of fresh agricultural products

LI Lihua^{1,2}, XIA Chunping¹, PU Guodong¹, FENG Qian¹

(1. School of Traffic and Transport Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Hunan Key Laboratory of Smart Roadway and Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The characteristics of gathering fresh agricultural products, such as multiple nodes, scattered demands, cargo restrictions, and product perishability, are considered in studying split delivery route optimization. The basic problem of the gather of fresh agricultural products are described through node layout, network demand, vehicle routing and load requirements, product characteristics, and cost factors. The total gathering cost is modeled based on three aspects: refrigeration, cargo damage, and fuel consumption. Constraints are designed around split delivery, flow balancing, and vehicle scheduling to construct an optimized gathering route model. Using a genetic algorithm, the fitness function is calibrated by serial number sorting, and roulette wheel selection is improved. An elite strategy is employed for operator analysis and genetic operations, leading to a proposed solution method. An empirical analysis of orange gathering in a township in Hunan Province demonstrates the

收稿日期: 2022-12-13

基金项目: 湖南省哲学社会科学基金项目(22WTC12); 长沙理工大学智能道路与车路协同湖南省重点实验室开放基金资助项目(KFJ210702); 长沙理工大学研究生科研创新项目(CX2021SS03)

通信作者: 李利华(1979—), 男, 副教授, 主要从事智能运输与物流方面的研究工作。E-mail: hbxiaoli98@csust.edu.cn

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

results: the optimized total gathering cost decreases by 19.34%, with the cargo damage cost reducing the most, by 1550.86 yuan. The total number of gathering routes is reduced by 1, and the number of splitting nodes decreases from 5 to 3, reflecting a deeper split by demand. The total driving distance and time are reduced by 72.4 km and 2.06 hours, respectively, showing a significant overall optimization effect. The research provides valuable insights for improving the efficiency of fresh agricultural product collection.

Key words: split delivery; fresh agricultural product; gathered route optimization; genetic algorithm

近年来,在乡村振兴等政策支持下,农村物流发展迅速,网络设施逐渐完善,需求规模不断扩大,农产品流通加快,货物集散需求快速增长^[1-2]。然而,受农村自然条件的影响,尤其是中西部地区,在生鲜农产品流通过程中,集货成本高、物流效率低、资源浪费多的问题突出,严重制约了农村物流现代化与高质量发展。因此,考虑新环境下生鲜农产品物流的实际需求,研究集货路径优化具有较大的现实意义。

集货是生鲜农产品物流的最先环节,即“最先一公里”环节,其模式直接决定了配送成本和效率。生鲜农产品的集货模式主要体现在集货中心的数量上,有一元与多元的区别。对于单集货中心,需考虑农产品特征及其保鲜保质保量需求,在车辆路径选择上多以成本最小及需求量与运量运力相匹配为目标^[3],以顾客满意度与服务时长^[4]等为导向进行建模,对于这种情况混合整数规划是最为常见的集货模型。对于多集货中心,考虑的因素、节点、网络更为复杂,生鲜农产品集货的多产品、多车辆、多温度、多路线特征被广泛关注,各种特定问题、场景及对应的限制条件被提出,如响应时间窗与运输资源约束^[5]、取送时间窗与选址优化同步约束^[6]等,决策模型以总成本最小为目标函数。在集货模式上,学者们的研究聚焦于农产品特征、客户需求、时间约束等的作用领域。

在生鲜农产品集货路径问题上,相关研究主要从以下两个方面展开:1) 车辆集货系统构造与路径优化建模,主要集中在农产品作用因素、集货问题描述、优化目标与约束等方面。在因素分析上,农产品物流需求及集配特征被关注,尤其是作用于货物集配与车辆运行上的不同类因素的匹配与协调,如车辆行驶时间与货物保鲜度等形成的双目标模型^[7]、集货物流总成本与客户满意度的主次目标优化^[8]、农村交通基础设施因素作用下时间窗惩罚与顾客满意度的多目标协同^[9]等。在问题描述上,将

生鲜农产品集货问题看作车辆路径、多节点回路问题得到了共识。如何寻求最优最可靠的车辆行驶路径,节点对的选择最为关键,如陈治亚等^[10]对车辆行驶距离最短与运输均衡进行匹配;GUO等^[11]对生鲜农产品的易腐性及车辆集货碳排放进行了研究。在目标约束上,总成本最小一般被作为主体目标,油耗、制冷、货损等形成的损失最小为基础导向^[12],也有多目标同时考虑的,如路径最短同时成本最小^[13]、费用最小同时顾客满意^[8]等。对于约束,考虑保鲜期的时间窗限制^[7,14]、取送货时间窗^[6]、碳排放限定^[8,11]等较多。2) 在集货模型求解与算法设计上,研究者们较多关注算法选择、寻优策略与效率比较。农产品集货属于典型的车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP),也是一类非确定性多项式(nondeterministic polynomially, NP)问题。在算法选择上,结合问题特征及具体场景,各种现代启发式算法被大量应用,并在组合求解、深度优化上得到了加强,主要体现在运行速度、收敛效果、环境适应等方面,如Q-Learning深度强化学习路径寻优^[15]、随机聚类算法解决易腐产品集成决策优化^[16]、粒子群算法优化客户点配送顺序^[17]等。在寻优策略上,以减少干扰、便捷求解与提升效率为导向,对生鲜农产品集货路径进行规划,如夏扬坤等^[18]基于离散拆分与自适应惩罚,构造了一种组合动态禁忌搜索策略;范厚明等^[19]基于遗传算法,以扰动与领域规模减小为搜索策略,以精英比较与轮盘赌混合为选择策略等。在效率比较上,主要体现在研究设计算法相对于传统算法的优势,如PRATAP等^[20]比较了集货参数扰动对花授粉算法与布谷鸟算法的响应;张得志等^[21]以帕累托策略支撑改进遗传算法对车辆路径的多目标决策进行寻优;郭琪等^[22]以轮盘赌法则及标识适应度改进遗传算法进行路径优化等。

生鲜农产品的集货与车辆路径是物流与运输领域的热点问题,相关研究一般从场景描述与系统

构造、模型构建与算法设计等方面展开。一方面研究者们从考虑需求状态、车辆载货、易腐易损特性的生鲜农产品集货问题中得到研究结论,所建模型的多目标性、车辆路径最优、货损最小等体现明确,但针对农村地区生鲜农产品集货点多量少、车型车载限制、点线货损差异等的研究不多,且需求可拆分研究的深度也还不够。另一方面研究者们将注意力集中于问题求解的寻优策略与搜索效率上,且以现代启发式算法为主导的种群设计、适应度标识、算子决策等受到了重视,结合问题特征改进传统算法的研究也比较常见。因此,本文以需求可拆分为导向,深度考虑影响生鲜农产品集货的多作用因素,建立考虑制冷、货损、油耗等总集货成本最小的路径优化模型,设计求解问题的改进遗传算法,结合案例进行数值分析与试验仿真,并进行可行性与有效性验证。

1 问题描述

1.1 基本特征分析

本文的研究对象地处农村地区。在当前城乡需求快速增长的格局下,生鲜农产品的进城与集货广受关注,既要分析农村地区交通网络、载货车辆、运输环境的影响,又要考虑生鲜农产品的时令、易腐易损、分布广泛的特征,因此,从需求视角探究深度拆分至关重要。农村地区生鲜农产品集货表现出的基本特征有:

1) 需求点多量少。生鲜农产品集货以广大农户农产品收获地作为需求点,表现为数量多,分布广,单点量少。车辆的集货要考虑点到点之间的路径选择,寻找最优的路径以节约运输成本。同时,由于多数需求点具有需求量小的特点,点的配货问题对于整个集货系统影响较大。

2) 交通与车辆限制。农村地区受村道、低级别交通网络的制约,对货运车辆的车型、载货量都有一定的影响(一般为中小型冷藏箱型货车),其直接作用于各需求点的集配货,具有较强的限制性,对点线的货损也有一定的影响。

3) 货物易腐易损。生鲜农产品具有很强的时令性与季节性,其窗口期可能就几天甚至更短,导致在集货及货物运输途中会发生货损,在节点配货中也会发生货损。尤其在农村地区,受条件限制,货损占比较高。因此,运输车辆宜为冷藏车(有制

冷成本),以最大限度地降低点线货损,而需求深度高效拆分对需求点静态货损的降低有强支撑性。

1.2 集货路径问题

基于上述特征,可将需求可拆分下生鲜农产品集货路径问题描述为:在农村地区,农户农产品产地代表不同需求点,在既定区域内形成一个总的集货系统,需求点的分布处于一种离散和有序状态,需求点彼此间关联性不强。集货收购商将运输车辆从集货中心空驶至某一需求点,并开始集配货。在车辆载货限制的约束下,对所选择的需求点进行有效拆分,并寻求最优集货路径,最后将农产品运送至集货中心完成单次集货。车辆集货路径如图1所示。

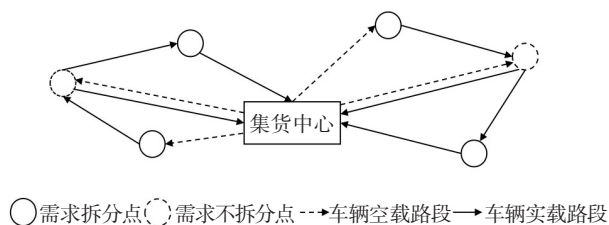


图1 车辆集货路径示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vehicle gathering route

2 模型构建

2.1 假设条件

本文从多角度研究深度需求可拆分下生鲜农产品的集货路径优化问题,基本前提如下:

- 1) 各需求点需求量已知,且可根据集配货车辆的限制进行任何状态下的拆分;
- 2) 车型统一为中型冷藏箱型货车,最大载重量已知,集配货与路径选择不受交通网络的限制;
- 3) 每辆车对应一条集货路径,允许多车对同一需求点进行访问,但一个需求点仅允许同一辆车访问一次;
- 4) 集货中心唯一,其为所有集货车辆的起点和终点;
- 5) 车辆的单位油耗只与车辆是否空载有关,不考虑装载程度的影响。

2.2 参数定义

相关参数含义如下: $N = \{0, 1, 2, \dots, i, j, \dots, n\}$, 代表集货区域内所有点的集合,其中 $i, j (i \neq j \neq 0)$ 为集合中任意两个不同的需求点,0为集货点, n 为需求点总数; $N_i \subseteq N$ 为需求量超过车辆额定载货量

的需求点的集合; $W = \{1, 2, 3, \dots, w\}$ 为集合 N 的非空真子集, 有 $W \subseteq N$ 且 $W \neq \emptyset$, 其中 $w (2 \leq w \leq n)$ 为集合 W 中需求点的总数; $K = \{1, 2, \dots, k, \dots, m\}$ 为载货车辆的集合, m 为可使用车辆的总数; Z 为总集货成本, 元; Z_1 为制冷成本, 元; Z_2 为货损成本, 元; Z_3 为油耗成本, 元; a_1 为车辆行驶过程中的制冷成本, 元/h; a_2 为车辆装卸时的制冷成本, 元/h; b_1 为车辆行驶过程中生鲜农产品的货损系数; b_2 为车辆装卸时生鲜农产品的货损系数; c_1 为车辆空载时的油耗成本, 元/km; c_2 为车辆载货时的油耗成本, 元/km; Q 为车辆额定载货量, kg; q_i 为 $i (i = 0, 1, 2, \dots, n)$ 点的需求量, kg, 当 $i = 0$ 时, 表示此点为集货点, 且 $q_0 = 0$; q_{ik} 为第 k 辆车在需求点 i 的货物装载量, kg; p 为生鲜农产品的市场收购价, 元/kg; v_1 为车辆的路径行驶速度, km/h; v_2 为生鲜农产品在需求点的装卸速度, kg/h; t_{ik}, t_{jk} 为第 k 辆车到达需求点 $i, j (i \neq j)$ 的时刻; d_{ijk} 为第 k 辆车从需求点 i 到需求点 j 的行驶里程, km; d_{i0k} 为第 k 辆车从需求点 i 回到集货点的行驶里程, km; d_{0ik} 为第 k 辆车从集货点到需求点 i 的行驶里程, km; x_{ik} 为车辆节点决策变量, 0-1 型, 当第 k 辆车服务于需求点 i 时, $x_{ik} = 1$, 否则 $x_{ik} = 0$; x_{ijk} 为车辆路径选择变量, 0-1 型, 当第 k 辆车从需求点 i 到需求点 j 时 $x_{ijk} = 1$, 否则为 $x_{ijk} = 0$; x_{i0k} 为第 k 辆车从需求点 i 回到集货点的路径选择; x_{0ik} 为第 k 辆车从集货点到需求点 i 的路径选择。

2.3 数学模型

2.3.1 优化目标

对于考虑需求点、车辆载货限制、货损等的生鲜农产品集货路径问题, 需要考虑三者相融情景下的需求深度拆分。本文将制冷、货损、油耗等成本相结合, 构建集货总成本模型:

$$\min Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 \quad (1)$$

其中, Z_1 为制冷成本。在集货中, 为保持农产品新鲜, 降低货损, 需采用冷藏箱型车辆, 因此将产生制冷成本, 其由行驶制冷成本与装卸制冷成本组成。由于车辆路径选择是一个包含不同需求点、集货点的回路问题, 在优化决策中, 车辆行驶过程中的制冷成本可分为需求点之间的行驶制冷成本及完成集货路径选优后从需求点到集货点的行驶制冷成本, 这两个成本均受车辆路径选择变量、各点对间的距离、车辆行驶速度等因素的影响, 但前者以需求点为导向, 后者则依赖于集货点, 可分别表

示为 $a_1 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} \frac{d_{ijk}}{v_1}$ 与 $a_1 \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{i0k} \frac{d_{i0k}}{v_1}$ 。装卸制冷成本指在物流节点装卸配货时, 车辆开关车门外界热量进入, 为调节车厢内外温差而产生的成本, 与节点选择、配货量、装卸速度有关, 装卸制冷成本可表示为 $a_2 \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ik} \frac{q_{ik}}{v_2}$ 。因此, 总的制冷成本为:

$$Z_1 = a_1 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} \frac{d_{ijk}}{v_1} + a_1 \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{i0k} \frac{d_{i0k}}{v_1} + a_2 \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ik} \frac{q_{ik}}{v_2} \quad (2)$$

Z_2 为货损成本。生鲜农产品集货中的货损受时间影响, 可用需求点配货装卸及行驶路段中的消耗来体现, 同时需要考虑货损率。根据文献[23], 对于生鲜农产品的集货问题, 货损率可表示为:

$$\lambda = 1 - e^{-bt} \quad (3)$$

式中: λ 为货损率; b 为货损系数; t 为作业时长。

考虑生鲜农产品的集货特性, 其货损主要发生在节点配货与运输过程中。而对于车辆路径的回路问题, 运输路径又分为需求点对间的行驶路径与集货点间的返回路径, 在路径选择、配货量、货损率等变量的支撑下, 总的货损成本 Z_2 由需求点对间选优行驶货损成本 $p \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} q_{ik} (1 - e^{-b_1 \frac{d_{ijk}}{v_1}})$ 、完成集货后需求点到集货点的运输货损成本 $p \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{i0k} q_{ik} (1 - e^{-b_1 \frac{d_{i0k}}{v_1}})$ 以及节点装卸配货货损成本 $p \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ik} q_{ik} (1 - e^{-b_2 \frac{q_{ik}}{v_2}})$ 三部分组成。则总的货损成本 Z_2 可表示为:

$$Z_2 = p \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} q_{ik} (1 - e^{-b_1 \frac{d_{ijk}}{v_1}}) + p \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{i0k} q_{ik} (1 - e^{-b_1 \frac{d_{i0k}}{v_1}}) + p \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ik} q_{ik} (1 - e^{-b_2 \frac{q_{ik}}{v_2}}) \quad (4)$$

Z_3 为油耗成本。生鲜农产品集货是一个路径择优的回路问题, 车辆首先从集货点空载出发, 在需求点对间实载路径择优, 完成配货后实载返回集货点, 受节点、路径、载货状态的影响, 在整个过程中, 各部分的油耗成本有差异, 但均受路径选择变量、点对间距离等的作用, 故总的油耗成本由车辆从集货点至需求点的空驶油耗成本 $c_1 \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{0ik} d_{0ik}$ 、

需求点对间选优路径载货运输油耗成本 $c_2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} d_{ijk}$ 、完成集货路径选优后从需求点到集货点的运输油耗成本 $c_2 \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{i0k} d_{i0k}$ 三部分组成。则总的油耗成本 Z_3 可表示为:

$$Z_3 = c_1 \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{i0k} d_{i0k} + c_2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} d_{ijk} + c_2 \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{i0k} d_{i0k} \quad (5)$$

2.3.2 约束条件

生鲜农产品集货优化属于车辆路径问题,基于此类问题的特点,考虑需求深度拆分、流量均衡以及车辆服务等,得到如下约束条件:

$$\sum_{i=1}^n x_{i0k} = \sum_{i=1}^n x_{0ik} \quad (6)$$

$$\sum_{i \in W} \sum_{j \in W} x_{ijk} \leq w - 1 \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ijk} = \sum_{j=0}^n x_{ijk} \quad (8)$$

$$2 \leq \sum_{k=1}^m x_{ik} \leq m, q_i > Q, i \in N_1 \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n q_{ik} \leq Q \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^m q_{ik} = q_i \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^m x_{ik} \geq 1 \quad (12)$$

$$t_{jk} - t_{ik} = \frac{d_{ijk}}{v_1} + \frac{q_{ik}}{v_2} \quad (13)$$

其中,式(6)为车辆起始点约束,表示所有服务车辆均从集货中心出发,空载至某一需求点,在完成配货后,经过其所选节点与最优路径,返回集货中心。式(7)为消除子回路约束,车辆路径问题一般存在多条回路,本文假设每一辆车仅选择一条集货路径,故需要消除其他子回路。式(8)为车辆流量均衡约束,表示到达某一需求点的集货车辆数等于离开该点的车辆数。式(9)为需求量拆分次数约束,在集货过程中,当需求点的需求量大于车辆额定载货量时,单点无法一次完成集货任务,需考虑对需求量进行拆分,故该需求点的集货表现为多车辆多车次访问,在同一辆车对同一需求点仅访问一次的假定条件下,最大拆分次数不能大于集货车辆总数。式(10)为车辆载重约束,要求每辆车在所有需求点的实际装载量之和不大于其额定载货量。

式(11)为需求量约束,表示在某一需求点所有访问车辆实际装载量之和与该需求点的需求量相等。式(12)为车辆服务约束,表示所有需求点必须被车辆访问,完成集货服务需求,即任一需求点至少被车辆访问一次。式(13)为时间点约束,表示车辆到达前后两个需求点的时间差为前一需求点的货物装载时间与车辆在两个需求点之间行驶时间的和。

3 求解算法

需求拆分下的生鲜农产品集货优化属于车辆路径问题,其求解具有 NP 特性。遗传算法是一类仿自然体算法,具有启发式群体搜索特征,适用于此类问题的求解。本文以 x_{ik} 与 x_{ijk} 为决策变量,采用遗传算法,以序号排序标定适应度函数,改进轮盘赌^[19]选择以避免随机差异。算法实现流程如图2所示。求解过程如下:

Step 1: 染色体编码。首先,将集合 N 内的所有点对应序号,即集货点为 0,各需求点依次为 1, 2, ..., n 。然后,采用自然数编码,用决策变量 x_{ik} 与 x_{ijk} 进行基因位编码,定义染色体 e_g (表示某辆车经过需求点 i, j 的集货方案),并标定集货的第 g 条选择路径。例如, $i=3, j=4$, 此时由决策变量 $(x_{3k}, x_{4k}, x_{34k})$ 形成的染色体为 $e_g = \{0-3-4-0\}$ 。

Step 2: 种群初始化。随机生成符合编码所要求的染色体,以此构成初始种群 E , 种群规模设为 s , 则 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_h, \dots, e_g, \dots, e_s\}, 1 \leq h \leq g \leq s$ 。

Step 3: 初始适应度计算。定义目标函数的倒数为适应度函数,即:

$$f(g) = \frac{1}{\min Z} \quad (14)$$

Step 4: 轮盘赌选择。为了在后续迭代过程中函数值较大的个体能继续被选中,以进一步优化进化方向与速度为导向,先对适应度序号进行排序,然后再标定。具体操作步骤如下:

1) 个体适应度值的计算。得到一组按序号排序的适应度函数 $f(1), \dots, f(h), \dots, f(g), \dots, f(s)$, 其对应的初始序值 r_g 按 $1 \leq h \leq g \leq s$ 的顺序确定。

2) 序值重新排序。将适应度值按由小到大的顺序排列,对其采用序号标度法,并得到一组新的序值 r'_g 。

$$r'_g = \frac{1}{\sqrt{g}} \quad (15)$$

3) 个体遗传概率 $p(r'_g)$ 的计算。

$$p(r'_g) = \frac{r'_g}{\sum_{g=1}^s r'_g} = \frac{\frac{1}{\sqrt{g}}}{\sum_{g=1}^s \frac{1}{\sqrt{g}}}$$

(16)

4) 计算下一代累积概率 $P(r'_g)$ 。

$$P(r'_g) = \sum_{h=1}^g p(r'_h)$$

(17)

5) 父代的产生。遗传变异,并在区间 $[0,1]$ 中交叉生成父代个体随机数,以精英策略选择算子,并保留最优个体的比例。

6) 确定轮盘赌步长及点位,选择后续交叉变异所需的父代个体。

Step 5: 子路径交叉,染色体交换,生成新的个体。

Step 6: 遗传变异。采用逆转规则,将父子两代染色体重新排列,变异后形成新的子代个体。

Step 7: 迭代判断。进行收敛性判断,达到迭代次数,算法终止,否则,转到Step 4。

Step 8: 输出结果。

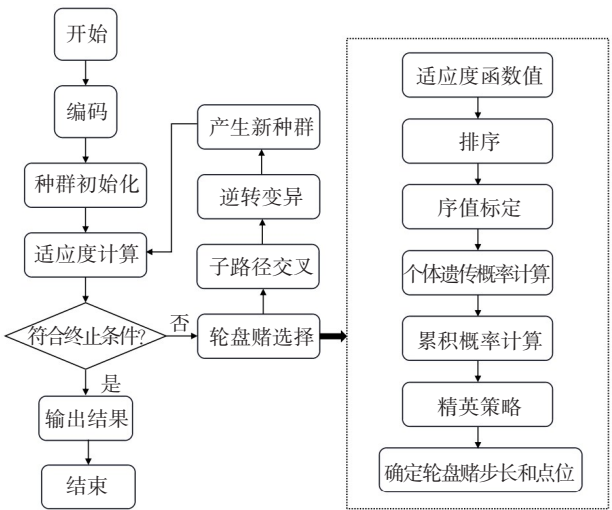


图2 算法实现流程

Fig. 2 Algorithm implementation process

4 案例分析

本文以湖南省某乡镇的脐橙收集为例进行分析。该乡镇地处山区,交通条件有限,脐橙是其重要的经济来源,脐橙的收购期约15 d。以该乡镇现有的19个行政村为需求点,1个集货中心位于镇上,所有脐橙均统一收集至此。该乡镇目前已实现村

村通,节点间的道路满足载货量为5 t的中型冷藏箱型货车通行。各点对的位置关系如图3所示。

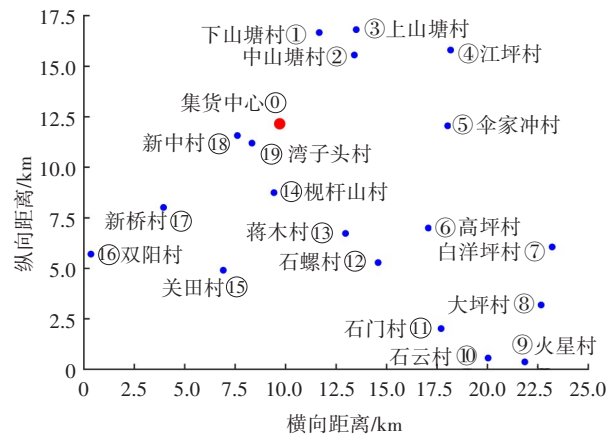


图3 各点对的位置关系

Fig. 3 Location relationship of each point

4.1 基础数据

结合案例所在地区的实际情况,将各参数设定为:需求点 $n=19$,非空子集需求数 $w \leq 19$,可使用车辆数 $m=14$,制冷成本 $a_1=50$ 元/h, $a_2=80$ 元/h,货损系数 $b_1=0.02$, $b_2=0.03$,油耗成本 $c_1=2.5$ 元/km, $c_2=4$ 元/km,车辆额定载货量 $Q=5\,000$ kg,脐橙收购价格 $p=6$ 元/kg,行驶速度 $v_1=35$ km/h,装卸速度 $v_2=6\,000$ kg/h,19个需求点的脐橙集货需求量见表1。

表1 各点的集货需求量

Table 1 Demand for gathering goods at each point kg					
编号	地名	需求量	编号	地名	需求量
0	集货中心	0	10	石云村	3 700
1	下山塘村	1 900	11	石门村	4 000
2	中山塘村	4 000	12	石螺村	1 900
3	上山塘村	2 000	13	蒋木村	2 200
4	江坪村	1 800	14	枫杆山村	6 800
5	伞家冲村	1 700	15	关田村	2 000
6	高坪村	2 100	16	双阳村	7 100
7	白洋坪村	3 500	17	新桥村	2 000
8	大坪村	1 900	18	新中村	4 600
9	火星村	500	19	湾子头村	2 000

4.2 优化分析

4.2.1 算法运行

基于MATLAB的程序设计与试验仿真,用本文构建的优化模型、求解算法对该案例进行计算。迭代求解结果如图4所示。由图4可知,当算法迭代

运行28次,时长4.57 s后,仿真结果达到稳定收敛状态,此时得到了最优解,表明该优化模型与求解算法运行速度快,效果较好。

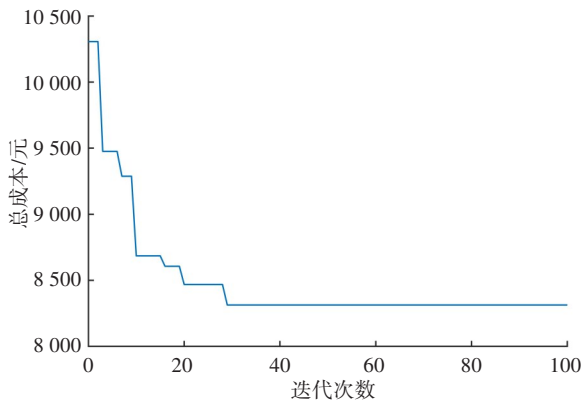


图4 迭代求解结果

Fig. 4 Iteration operation results

4.2.2 目标优化

目标优化结果的比较见表2。由表2可知,系统总成本由10 306.23元下降至8 313.44元,下降了19.34%,表明优化效果明显。其中,制冷、货损、油耗成本均有所下降,下降幅度分别为12.46%、18.71%、31.59%,油耗成本下降得最为明显。货损成本减少了1 550.86元,是制冷、油耗成本减少值的12.18倍与4.93倍,可见在这三项成本中,货损的影响最大。总的集货路径也由14条变为13条,减少了1条,表明在数量上集货路径也得到了优化,车辆出勤次数有所减少。车辆行驶总里程与总时间也均有所下降,分别减少了72.4 km与2.06 h,下降幅度均超过了25%。所以,优化效果整体较好,车辆路径问题得到了较好的改善。

表2 目标优化结果比较

Table 2 Comparison of target optimization results

项目	总成本/元	制冷成本/元	货损成本/元	油耗成本/元	集货路径数/条	总里程/km	总时间/h
优化前	10 306.23	1 021.81	8 288.32	996.10	14	281.2	8.03
优化后	8 313.44	894.53	6 737.46	681.45	13	208.8	5.97
下降/%	19.34	12.46	18.71	31.59	7.14	25.75	25.65

4.2.3 方案比较

初始路径选择方案如图5所示,路径优化选择方案如图6所示,路径选择结果比较见表3。

优化前,19个需求点共有55 700 kg脐橙的集货需求,在不考虑需求拆分时,14条路径对应14车次,4车次满载,总体载货率为79.57%。共有5个点

需要10次拆分,其中需求点14与16均为满载拆分,即14号点拆分为5 000、1 800 kg,16号点拆分为5 000、2 100 kg,5号点与10号点各拆分1次,分别拆分为1 000、700 kg与2 900、800 kg,各对应1条满载路径,4号点随机拆分,拆分为746、1 054 kg。优化后,车辆行驶路径数、里程、时间均有所减少,总成本优化效果较好。集货路径为13条,比优化前减少了1条。3车次满载,比优化前减少了1车次。总体载货率为85.69%。需对3个点进行拆分,其中14、16号点由于需求量大于车辆额定载货量,必须拆分,14号点按需求拆分为3 000、3 800 kg,16号点按需求拆分为4 100、3 000 kg,各对应1条满载路径。同时按需求对总量仅有1 900 kg的12号点进行拆分,拆分为1 500、400 kg,拆分后的12号点可构成1条满载路径。优化前后仅有2条路径不变,即2号点与18号点各自形成的单独集货路径,其集货满载率均在80%以上。可见,新方案的路径优化效果较好,各项指标整体上有较大改善。

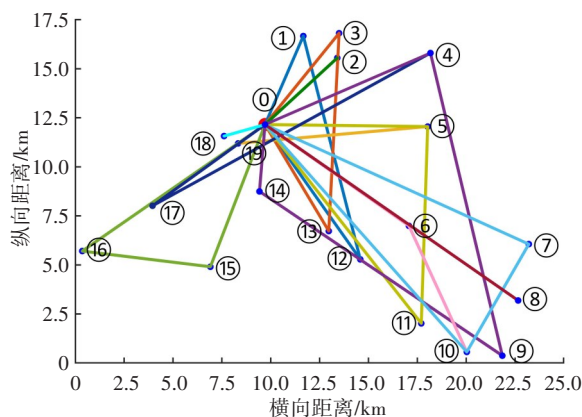


图5 初始路径选择方案

Fig. 5 Initial route selection scheme

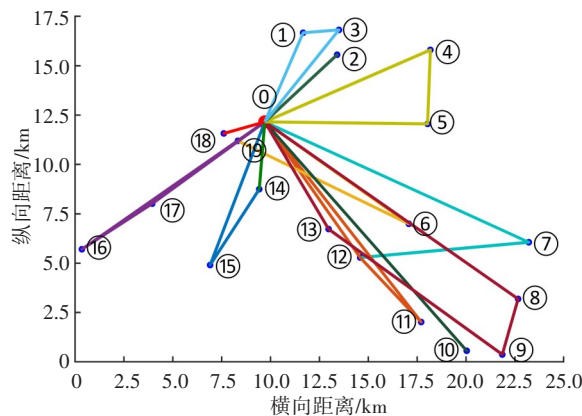


图6 路径优化选择方案

Fig. 6 Optimized route selection scheme

表3 路径选择结果比较
Table 3 Comparison of route selection results

优化前				优化后			
行驶路径	载货量/kg	是否满载	拆分情况	行驶路径	载货量/kg	是否满载	拆分情况
①-⑭-④-①	2 000+746=2 746	否	4号点拆分 746 kg	①-⑦-⑫-①	3 500+1 500=5 000	是	12号点拆分 1 500 kg
①-⑱-⑤-①	2 000+700=2 700	否	5号点拆分 700 kg	①-⑩-①	4 100	否	16号点拆分 4 100 kg
①-⑩-⑦-①	800+3 500=4 300	否	10号点拆分 800 kg	①-⑮-⑭-①	2 000+3 000=5 000	是	14号点拆分 3 000 kg
①-⑭-①	5 000	是	14号点拆分 5 000 kg	①-⑩-①	3 700	否	无
①-⑮-⑯-①	2 000+2 100=4 100	否	16号点拆分 2 100 kg	①-⑧-⑨-⑬-①	1 900+500+2 200=4 600	否	无
①-⑬-①	4 600	否	无	①-③-①-①	2 000+1 900=3 900	否	无
①-②-①	4 000	否	无	①-⑬-①	4 600	否	无
①-④-⑨-⑭-①	1 054+500+1 800=3 354	否	4号点拆分 1 054 kg, 14号点拆分 1 800 kg	①-⑪-⑫-①	4 000+400=4 400	否	12号点拆分 400 kg
①-⑤-⑪-①	1 000+4 000=5 000	是	5号点拆分 1 000 kg	①-⑯-⑰-①	3 000+2 000=5 000	是	16号点拆分 3 000 kg
①-⑥-⑩-①	2 100+2 900=5 000	是	10号点拆分 2 900 kg	①-⑭-①	3 800	否	14号点拆分 3 800 kg
①-⑯-①	5 000	是	16号点拆分 5 000 kg	①-⑥-⑱-①	2 100+2 000=4 100	否	无
①-①-⑫-①	1 900+1 900=3 800	否	无	①-⑤-④-①	1 700+1 800=3 500	否	无
①-⑬-③-①	2 200+2 000=4 200	否	无	①-②-①	4 000	否	无
①-⑧-①	1 900	否	无				

5 结论

1) 本文分析了农村地区生鲜农产品集货需求点多量小、交通与车辆限制以及货物易腐易损特征,考虑深度需求可拆分,以制冷、货损与油耗等总成本最小为目标,构建路径优化模型,并设计了基于序号排序轮盘赌选择的改进遗传求解算法。

2) 试验仿真与案例分析验证了模型与算法的可行性与有效性,即能实现集货成本降低与运输效率提升的目的,也可规范当前生鲜农产品集货流程,实现农村物流资源的合理配置。本文研究成果对生鲜农产品集货管理有一定的实用价值。

参考文献(References):

[1] 张诚,张广胜,王艳玲.政府减贫的农村电商与农村物流协同演化及政策优化[J].北京交通大学学报(社会科学版),2020,19(1):98-105. DOI: 10.16797/j.cnki.11-5224/c.20200106.001.
ZHANG Cheng, ZHANG Guangsheng, WANG Yanling. Co-evolution and policy optimization of rural e-commerce and rural logistics under government poverty alleviation [J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2020, 19(1): 98-105. DOI: 10.16797/j.cnki.11-5224/c.20200106.001.

[2] HAN X P, BAI S Z, YU H. Pre-sale strategy for fresh agricultural products under the consideration of logistics

services [J]. IEEE Access, 2021, 9: 127742-127752. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3112111.

[3] CHEN J, DONG M, XU L. A perishable product shipment consolidation model considering freshness-keeping effort [J]. Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review, 2018, 115: 56-86.

[4] LEE S Y, HAN S R, SONG B D. Simultaneous cooperation of refrigerated ground vehicle (RGV) and unmanned aerial vehicle (UAV) for rapid delivery with perishable food [J]. Applied Mathematical Modelling, 2022, 106: 844-866.

[5] JIANG Y P, BIAN B, LIU Y. Integrated multi-item packaging and vehicle routing with split delivery problem for fresh agri-product emergency supply at large-scale epidemic disease context [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2021, 2: 196-208. DOI: 10.1016/j.jtte.2020.08.003.

[6] 李冰,党佳俊.多配送中心下生鲜农产品同步取送选址-路径优化[J].智能系统学报,2020,15(1):50-58. DOI: 10.11992/tis.201905042.
LI Bing, DANG Jiajun. Fresh agricultural cargoes location-routing optimization with simultaneous pickup and delivery for multiple distribution centers[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2020, 15(1): 50-58. DOI: 10.11992/tis.201905042.

[7] RAHBARI A, NASIRI M M, WERNER F, et al. The vehicle routing and scheduling problem with cross-docking for perishable products under uncertainty: two robust bi-objective models [J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 70: 605-625. DOI: 10.1016/j.apm.2019.01.047.

- [8] LENG L L, ZHANG C M, ZHAO Y W, et al. Biobjective low-carbon location-routing problem for cold chain logistics: formulation and heuristic approaches[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 273: 122801. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122801.
- [9] 王恒, 徐亚星, 王振锋, 等. 基于道路状况的生鲜农产品配送路径优化[J]. *系统仿真学报*, 2019, 31(1): 126-135. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0161. WANG Heng, XU Yaxing, WANG Zhenfeng, et al. Distribution routing optimization of fresh agricultural products based on road conditions[J]. *Journal of System Simulation*, 2019, 31(1): 126-135. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0161.
- [10] 陈治亚, 高辉, 徐光明, 等. 考虑随机需求和硬时间窗的多目标车辆路径优化方法[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(12): 3110-3120. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20210026. CHEN Zhiya, GAO Hui, XU Guangming, et al. A multi-objective vehicle routing optimization method based on stochastic demand and hard time window[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(12): 3110-3120. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20210026.
- [11] GUO J Q, WANG X Y, FAN S Y, et al. Forward and reverse logistics network and route planning under the environment of low-carbon emissions[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2017, 106: 351-360. DOI: 10.1016/j.cie.2017.02.002.
- [12] QI C M, HU L S. Optimization of vehicle routing problem for emergency cold chain logistics based on minimum loss[J]. *Physical Communication*, 2020, 40: 101085. DOI: 10.1016/j.phycom.2020.101085.
- [13] GUO F, HUANG Z H, HUANG W L. Heuristic approaches for a vehicle routing problem with an incompatible loading constraint and splitting deliveries by order[J]. *Computers & Operations Research*, 2021, 134: 105379. DOI: 10.1016/j.cor.2021.105379.
- [14] LIU L, WANG H, XING S H. Optimization of distribution planning for agricultural products in logistics based on degree of maturity [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 160: 1-7. DOI: 10.1016/j.compag.2019.02.030.
- [15] 李懿, 韩春华, 钱熙, 等. 基于深度强化学习的公路初始路径寻优方法[J]. *交通科学与工程*, 2020, 36(1): 98-103. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.017. LI Yi, HAN Chunhua, QIAN Xi, et al. An optimal path generation method based on deep reinforcement learning [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2020, 36(1): 98-103. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.017.
- [16] MOUSAVI R, BASHIRI M, NIKZAD E. Stochastic production routing problem for perishable products: modeling and a solution algorithm [J]. *Computers & Operations Research*, 2022, 142: 105725. DOI: 10.1016/j.cor.2022.105725.
- [17] 卿东升, 邓巧玲, 李建军, 等. 基于粒子群算法的满载需求可拆分车辆路径规划[J]. *控制与决策*, 2021, 36(6): 1397-1406. DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1323. QING Dongsheng, DENG Qiaoling, LI Jianjun, et al. Split vehicle route planning with full load demand based on particle swarm optimization [J]. *Control and Decision*, 2021, 36(6): 1397-1406. DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1323.
- [18] 夏扬坤, 邓永东, 庞燕, 等. 带客户分级和需求可拆分的生鲜车辆路径问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(4): 1238-1248. DOI: 10.13196/j.cims.2021.04.027. XIA Yangkun, DENG Yongdong, PANG Yan, et al. Fresh food vehicle routing problem with split deliveries and customer classification [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(4): 1238-1248. DOI: 10.13196/j.cims.2021.04.027.
- [19] 范厚明, 张轩, 任晓雪, 等. 多中心开放且需求可拆分的VRPSDP问题优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(6): 1521-1534. DOI: 10.12011/SETP2019-1465. FAN Houming, ZHANG Xuan, REN Xiaoxue, et al. Optimization of multi-depot open split delivery vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2021, 41(6): 1521-1534. DOI: 10.12011/SETP2019-1465.
- [20] PRATAP S, JAUHAR S K, PAUL S K, et al. Stochastic optimization approach for green routing and planning in perishable food production [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 333: 130063. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130063.
- [21] 张得志, 乔馨, 肖博文, 等. 基于低碳与随机需求的多目标车辆路径优化[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(8): 2165-2174. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20200883. ZHANG Dezhi, QIAO Xin, XIAO Bowen, et al. Multi-objective vehicle routing optimization based on low carbon perspective and random demand [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(8): 2165-2174. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20200883.
- [22] 郭琪, 郑长江, 李锐. 基于客户软时间窗的地下物流配送路径优化[J]. *公路与汽运*, 2022(2): 43-46. GUO Qi, ZHENG Changjiang, LI Rui. Optimization of underground logistics distribution route based on customer soft time window [J]. *Highways & Automotive Applications*, 2022(2): 43-46.
- [23] 陈婧怡, 邱荣祖. 基于ArcGIS的多温区冷藏车辆路径优化[J]. *上海海事大学学报*, 2019, 40(1): 8-13. DOI: 10.13340/j.jsmu.2019.01.002. CHEN Jingyi, QIU Rongzu. Route optimization of multi-temperature refrigerated vehicles based on ArcGIS [J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2019, 40(1): 8-13. DOI: 10.13340/j.jsmu.2019.01.002.

(责任编辑:石月珍;英文编辑:张洪)