

Routes Planning of Fresh Agricultural Products Based on Multimodal Transport Combining High-Speed Railway Logistics with Road Logistics

Changshi Liu¹, Huixuan Chen¹, Liang Luo², Xiaoliang Xie³

¹School of Management, Hunan University of Technology and Business, Changsha Hunan

²Research Department, Hunan University of Technology and Business, Changsha Hunan

³School of Mathematics and Statistics, Hunan University of Technology and Business, Changsha Hunan

Email: liuchangshi964@126.com

Received: Apr. 17th, 2020; accepted: May 2nd, 2020; published: May 9th, 2020

Abstract

The distribution planning of fresh agricultural products based on multimodal transport combining high-speed railway logistics with road logistics is considered in this paper. The open vehicle routing problem (OVRP) model of “road + high-speed railway + road” joint logistics transport is constructed with the goal of minimizing the total logistics cost based on the comprehensive consideration of the vehicle pick up the demand of fresh agricultural products producing areas, the direct transport characteristic of high-speed railway logistics between the producing areas and the selling areas, and the vehicle delivery demand of selling areas. According to the characteristics of the OVRP model, a three-stage heuristic algorithm is designed. The experimental results show that the OVRP model and algorithm can effectively plan the vehicle routes of fresh agricultural products under the multimodal transport combining high-speed railway logistics with road logistics, reduce the logistics cost of fresh agricultural products, expand the circulation radius of fresh agricultural products, and ensure the freshness of fresh agricultural products when they are delivered to customers.

Keywords

High-Speed Railway Logistics, Road Distribution, Joint Logistics, Fresh Agricultural Products, Freshness

高铁与公路物流联运的生鲜农产品路径规划

刘长石¹, 陈慧璇¹, 罗亮², 谢小良³

¹湖南工商大学工商管理学院, 湖南 长沙

²湖南工商大学科研处, 湖南 长沙

³湖南工商大学数学与统计学院, 湖南 长沙

Email: liuchangshi964@126.com

收稿日期: 2020年4月17日; 录用日期: 2020年5月2日; 发布日期: 2020年5月9日

摘要

研究高铁物流与公路物流联运方式的生鲜农产品配送规划, 综合考虑生鲜农产品产地的集货配送需求、产地与销地之间的高铁物流直接运输特性、销地的送货配送需求, 以物流总成本最小为优化目标构建“公路+高铁+公路”物流联运的开放式车辆路径规划模型, 根据模型特点设计一种三阶段启发式算法求解。实验结果表明本文模型与算法能有效规划高铁物流与公路物流联运方式的生鲜农产品配送路径, 降低生鲜农产品物流成本, 拓展生鲜农产品流通半径, 确保生鲜农产品送达客户时的鲜活度。

关键词

高铁物流, 公路配送, 物流联运, 生鲜农产品, 鲜活度

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

生鲜农产品具有易损易腐性, 鲜活度在流通过程中容易受到时间、温度、湿度、装卸与搬运等因素的影响。鲜活度与生鲜农产品质量相关, 直接影响生鲜农产品销售。传统的生鲜农产品物流运输方式主要采用常温条件下的汽车运输方式, 难以满足远距离客户的鲜活度需求, 辐射半径较短[1]。如今, 我国高速铁路营业里程达到3万多公里, 已经进入高铁时代。高铁“四纵四横”干线已经全部贯通, 覆盖80%以上的大城市。高铁货运物流体系已经开通, 已经在全国设有18个区域分公司、13个省市分公司, 在1564个县级以上城市设有3200多个营业机构, “门到门”服务网络已经覆盖全国所有市与县。高铁物流具有运输速度比较快、单次运输量较大与准点率高等优势, 非常符合生鲜农产品快速流通的要求, 能有效缩短配送时间、拓展生鲜农产品流通范围。

已有关于农产品配送的文献主要研究公路物流方式的生鲜农产品配送规划。文献[2]研究生鲜农产品配送的车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP), 以总配送成本最小与顾客满意度最大为目标建立带时间窗车辆路径问题(vehicle routing problem with time windows, VRPTW)的数学模型。文献[3]研究生鲜农产品冷链物流网络节点选址和配送车辆路径调度的联合优化问题。文献[4]研究了生鲜农产品集货与配送车辆路径安排的集成优化问题, 设计改进蚁群算法求解。文献[5]研究有新鲜度限制的易腐品生产-配送协同调度问题, 以总配送成本最小、交付产品的新鲜度最大为目标建立生产-配送的协同优化模型。文献[6]以总配送成本最小为目标, 建立生鲜农产品多隔室配送的VRP优化模型, 设计粒子群算法求解。文献[7]依据不同道路状况建立车速特征模型, 分析生鲜农产品的易腐易损特征, 建立时间窗惩罚成本函

数和顾客满意度函数,综合考虑路况、客户时间窗、生鲜品损耗等因素构建生鲜农产品配送的多目标 VRP 优化模型,设计一种改进自适应遗传算法求解。文献[8]探讨生鲜品多物流中心联合配送的半开放式 VRP,以车辆运输成本、派遣成本、时间惩罚成本及生鲜品损耗成本之和最小为优化目标构建 VRP 数学模型,设计蚁群算法求解。文献[9]基于经济成本与环境成本兼顾的视角研究时变网络条件下生鲜电商配送的 VRPTW,综合考虑车辆时变行驶速度、车辆油耗、碳排放、生鲜农产品的易腐易损性、客户时间窗与最低新鲜度限制等因素,以经济成本与环境成本之和最小为目标构建具有最低新鲜度限制的 TDVRPTW 数学模型,设计一种自适应改进蚁群算法求解。这些文献为降低生鲜农产品配送成本、保障客户满意度提供方法参考。

随着我国高铁货运的开通,部分学者针对高铁物流展开研究。文献[10]研究我国高铁线路的运输能力优化问题。文献[11]研究我国高铁与快递开展联运的可行性,并提出相关发展建议。文献[12]考虑高铁运输与现代物流的融合问题。文献[13]探讨基于联合运输的高铁快运开行条件与运输组织方式,以运输总成本最小构建联合运输的车辆路径优化模型,采用启发式算法求解。文献[14]描述我国生鲜农产品高铁物流发展现状,分析生鲜农产品高铁物流的优缺点。文献[15]将高铁物流与生鲜农产品快递结合,构建生鲜农产品快递流通网络系统。文献[16]采用超网络方法构建中国高铁物流超网络模型,给出高铁物流超网络中的关键站点及线路规划。这些文献为生鲜农产品采用高铁物流方式进行运输配送提供理论借鉴。

已有成果为我们深入研究生鲜农产品配送问题奠定良好基础。梳理已有文献,发现如下研究缺口:

1) 已有成果大多仅研究公路物流配送的 VRP 数学模型与求解算法,综合考虑高铁物流与公路物流联运优化的研究文献相对较少。当前,高铁物流营业机构已经遍布全国 1564 个县级以上城市。高铁物流具有运输速度快、运输量大、覆盖面广与准点率高等显著优势,高附加值的生鲜农产品完全可以开展高铁物流与公路物流联合运输配送,拓展生鲜农产品流通半径,缩短生鲜农产品流通时间。2) 已有文献大多关注生鲜农产品配送“最后一公里”的车辆路径规划,鲜少关注其“最初一公里”的车辆路径优化。因此,本文研究生鲜农产品在高铁物流与公路物流联合运输配送情景下的车辆路径规划,既包括生鲜农产品产地的配送车辆集货的开放式路径规划,又包括销地的配送车辆送货的开放式路径规划,还考虑产地与销地之间的高铁物流运输时间、运输费用与生鲜农产品送达客户时的鲜活度等条件,以期为生鲜农产品生产与流通等相关企业降低物流成本、拓展生鲜农产品销售范围、提高客户满意度提供理论借鉴与方法参考。

2. 问题描述

某农产品专业合作社销售了一批高附加值的生鲜农产品,产地与销地之间的距离非常远。为保障生鲜农产品送达客户时的鲜活度,该专业合作社拟采用“公路 + 高铁 + 公路”的联合多方式的物流配送方式,即先采用汽车从各农户收集农产品并运送到产地高铁物流中心,经过高铁运输到销地高铁物流中心,再采用汽车在销地高铁物流中心接货并配送到各个客户(如图 1)。

为明确本文适用范围,提出如下假设: 1) 该批生鲜农产品有多个生产者与多个客户,地理位置已知,且各生产者的销售量与各客户的需求量都小于车辆容量; 2) 各生产者与各客户都只能由 1 辆配送车辆服务一次; 3) 在产地,车辆从配送中心出发,完成生鲜农产品收集任务后直接运达产地高铁物流中心,属于开放式路径; 4) 产地配送车辆必须在拟采用班次高铁出发前到达产地高铁物流中心; 5) 在销地,车辆在高铁物流中心接收生鲜农产品,完成配送任务后回到销地配送中心,属于开放式路径; 6) 生鲜农产品送达客户时必须满足客户的最低鲜活度要求; 7) 产地配送中心的车辆均为同一类型,销地配送中心的车辆均为同一类型。决策问题: 该专业合作社如何进行生鲜农产品配送规划,满足客户需求并使得总成本最小?

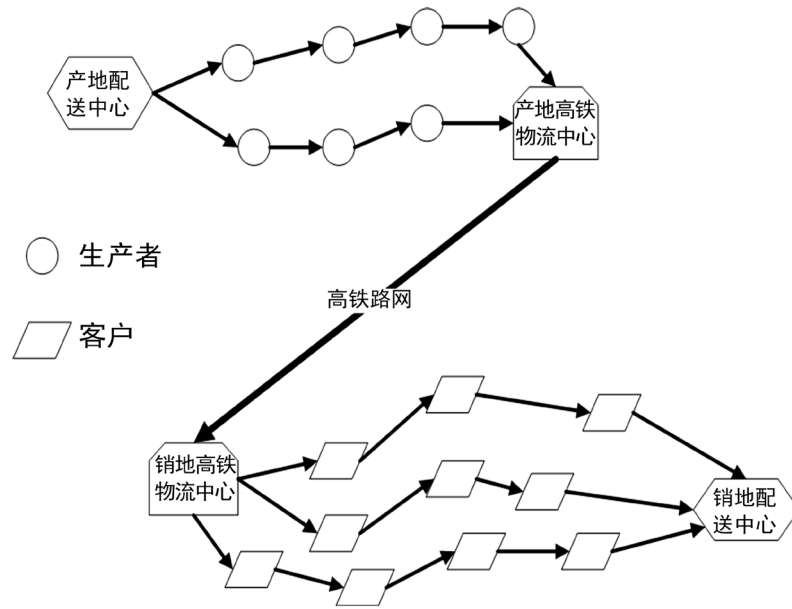


Figure 1. The joint distribution of fresh agricultural products by high-speed railway logistics and highway logistics
图 1. 生鲜农产品高铁物流与公路物流联合配送

3. 数学模型

3.1. 生鲜农产品的鲜活度量函数

已经有部分学者研究了农产品的新鲜度问题。文献[2]给出了生鲜农产品随着时间变化的新鲜度损耗系数。文献[5]提出的常温条件下生鲜农产品的新鲜度量函数，并定义了多种农产品情形下的平均新鲜度。文献[17]构建了生命周期服从负指数分布的易腐食品的损失函数。文献[18]定义了农产品新鲜度随运输时间的单调连续减函数。文献[19]运用指数函数模型刻画农产品的新鲜度随运输时间的衰减关系。本文采用文献[5]提出的常温条件下生鲜农产品的新鲜度量函数

$$H(t_i) = 1 - (t_i/T)^2 \tag{1}$$

其中， t_i 表示生鲜农产品送达客户的时间， T 表示生鲜农产品的最大保质时间，1 为生鲜农产品在生产者处发货时的鲜活度。

3.2. 符号与变量

产地物流符号： P 为生鲜农产品生产者集合； p_i 为生产者 i 的发货量； V 为产地配送车辆集合； Q_k 为车辆容量； D_1 为产地配送中心； G_1 为产地高铁物流中心； A 为产地物流网络节点集合， $A = D_1 \cup P \cup G_1$ ； l_{ij} 为产地物流网络内节点 i 与节点 j 之间的距离， $i \in A, j \in A, i \neq j$ ； c_1 为车辆行驶单位距离的费用； t_{ik} 为车辆 k 到达节点 i 的时间，如果 i 为 D_1 则 $t_{ik} = 0$ ； s_1 为车辆行驶速度； t_{ijk} 为车辆 k 从节点 i 行驶到节点 j 的使用时间。

决策变量： q_k 为 0~1 变量，如果车辆 k 被启用，值为 1，否则为 0； y_{ik} 为 0~1 变量，如果生产者 i 由车辆 k 取货，值为 1，否则为 0； x_{ijk} 为 0~1 变量，如果车辆 k 从节点 i 行驶到节点 j ，值为 1，否则为 0。

高铁物流符号： $J_{G_1G_2}$ 为产地高铁物流中心 G_1 与销地高铁物流中心 G_2 之间的距离； s_2 为高铁行驶速度； t_{G_1} 为企业拟采用的高铁班次从站点 G_1 的出发时间； t_{G_2} 为运输农产品的高铁到达站点 G_2 的时间； c_2 为高铁物流的单位重量费用。

销地物流符号： C 为客户集合； d_i 为客户 i 的需求量； D_2 为销地配送中心； G_2 为销地高铁物流中心； B 为销地物流网络节点集合， $B = D_2 \cup C \cup G_2$ ； K 为销地配送车辆集合； Q_2 为车辆容量； s_3 为车辆行驶速度； L_{ij} 为销地物流网络内节点 i 与节点 j 之间的距离， $i \in B, j \in B, i \neq j$ ； $T_{ik'}$ 为车辆 k' 到达节点 i 的时间，如果 i 为 G_2 则 $T_{ik'} = t_{G_2}$ ； $T_{ij'k'}$ 为车辆 k' 从节点 i 行驶到节点 j 的使用时间； c_3 为车辆行驶单位距离的费用； X 为客户对生鲜农产品的最低鲜活度要求。

决策变量： $\mu_{k'}$ 为 0~1 变量，如果车辆 k' 被启用，值为 1，否则为 0； $\lambda_{i'k'}$ 为 0~1 变量，如果客户 i' 由车辆 k' 配送，值为 1，否则为 0； $z_{ij'k'}$ 为 0~1 变量，如果车辆 k' 从节点 i' 行驶到节点 j' ，值为 1，否则为 0。

3.3. 数学模型

由于生鲜农产品物流“最初一公里”的 VRP 属于开放式 VRP (open vehicle routing problem, OVRP)，“最初一公里”也属于 OVRP，本文以总成本最小为目标构建“公路 + 高铁 + 公路”物流联运的 OVRP 模型，具体如下：

$$\min c_1 \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} \sum_{k \in V} x_{ijk} l_{ij} + c_2 \sum_{i \in P} p_i + c_3 \sum_{i' \in B} \sum_{j' \in B} \sum_{k' \in K} z_{ij'k'} L_{ij'} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in P} \sum_{k \in V} x_{D_1jk} = q_k \quad (3)$$

$$\sum_{i \in P} \sum_{k \in V} x_{iG_1k} = q_k \quad (4)$$

$$\sum_{i \in P} y_{ik} p_i \leq Q_1, \forall k \in V \quad (5)$$

$$\sum_{k \in V} y_{ik} = 1, \forall i \in P \quad (6)$$

$$t_{jk} = t_{ik} + t_{ijk}, \forall i \in A, j \in A, i \neq j, k \in V \quad (7)$$

$$t_{jk} \leq t_{G_1}, \forall j \in A, k \in V \quad (8)$$

$$t_{G_2} = t_{G_1} + J_{G_1G_2} / s_2 \quad (9)$$

$$\sum_{j' \in C} \sum_{k' \in K} z_{G_2j'k'} = \mu_{k'} \quad (10)$$

$$\sum_{i' \in C} \sum_{k' \in K} z_{i'D_2k'} = \mu_{k'} \quad (11)$$

$$\sum_{i' \in C} \lambda_{i'k'} d_{i'} \leq Q_2, \forall k' \in K \quad (12)$$

$$\sum_{k' \in K} \lambda_{i'k'} = 1, \forall i' \in C \quad (13)$$

$$t_{j'k'} = t_{i'k'} + t_{ij'k'}, \forall i' \in B, j' \in B, i' \neq j', k' \in K \quad (14)$$

$$H(t_{i'k'}) = 1 - (t_{i'k'} / T)^2, \forall i' \in C, k' \in K \quad (15)$$

$$H(t_{j'k'}) \leq X, \forall j' \in C, k' \in K \quad (16)$$

$$t_{j'k'} \leq T, \forall j' \in C, k' \in K \quad (17)$$

$$\sum_{i' \in C} d_{i'} = \sum_{i \in P} p_i \quad (18)$$

式(2)为目标函数,表示最小化生鲜农产品物流配送的总成本(即“最初一公里”配送费用、高铁物流费用与“最后一公里”配送费用之和)。约束式(3)至约束式(8)为生鲜农产品产地配送约束条件。约束式(3)表示车辆必须从产地配送中心出发。约束式(4)表示车辆在生鲜农产品集货任务完成之后,必须前往产地高铁物流中心送货。约束式(5)表示产地配送车辆的容量限制条件。约束式(6)表示各生产者只能有一辆车服务一次。约束式(7)表示产地配送车辆从上一个节点到达下一个节点的时间计算方法。约束式(8)表示产地的配送车辆必须在拟采用班次的高铁出发时间之前到达产地高铁物流中心。约束式(9)表示高铁物流中心之间的行驶时间计算方法。约束式(10)至约束式(18)为生鲜农产品销地配送约束条件。约束式(10)表示所有配送车辆必须从销地高铁物流中心出发。约束式(11)表示所有车辆完成任务后必须回到销地配送中心。约束式(12)表示销地配送车辆的容量限制条件。约束式(13)表示各客户只能有一辆车服务一次。约束式(14)表示销地配送车辆从上一个节点到达下一个节点的时间计算方法。约束式(15)表示农产品送达客户时的鲜活度计算方法。约束式(16)表示生鲜农产品送达客户时必须满足鲜活度限制条件。约束式(17)表示生鲜农产品物流配送时间不能超过其最大保质时间限制。约束式(18)表示销地的客户需求总数量等于产地的生产者发货总数量。

4. 三阶段启发式算法设计

VRP 属于 NP-hard 问题,难以求得最优解,通常采用启发式算法求得满意解。“公路 + 高铁 + 公路”联运的 OVRP 比 VRP 更复杂,求解更加困难。蚁群算法具有分布计算、信息正反馈与启发式搜索等特征,已经成功求解不同领域的组合优化问题[20]。依据问题特点,本文设计一种三阶段启发式算法,第一阶段设计改进蚁群算法(improved ant colony algorithm, IACA)求解生鲜农产品配送“最初一公里”的 OVRP,第二阶段计算生鲜农产品的高铁运输费用与运输时间,第三阶段采用第一阶段的 IACA 求解生鲜农产品配送“最后一公里”的 OVRP。IACA 的设计思路如下: 1) 将每只蚂蚁依次从起点派出,每只蚂蚁的行驶路径作为一个可行解; 2) 为扩大蚂蚁的搜索范围,增加种群的多样性,设计一种确定性选择与随机性选择相结合的转移策略; 3) 为提高蚁群算法局部搜索能力与全局收敛能力,引入自适应启发式因子和期望启发式因子。

三阶段启发式算法具体设计如下:

第一阶段: 求解“最初一公里” OVRP 的 IACA

步骤 1: 初始化。输入产地配送中心坐标、生产者坐标与发货量、车辆容量、单位行驶距离成本、高铁物流中心坐标、拟采用高铁班次的开车时间,令 $maxiter$ 为算法最大迭代次数、当前迭代次数 $iter = 1$ 、最优总配送成本 $bestcost_1 = +\infty$ 。令产地配送中心作为车辆出发点、产地高铁物流中心作为车辆行驶路线终点。

步骤 2: 蚂蚁转移策略。Step 1: 将 M 只蚂蚁全部放在出发点,令 $m = 1$; Step 2: 派出蚂蚁 m ; Step 3: 给蚂蚁 m 分配一辆配送车辆; Step 4: 蚂蚁 m 从当前节点 i 转移到下一个节点 j 时,采用确定性选择与随机性选择相结合的转移策略[21],即

$$j = \begin{cases} \max \left\{ \left[\tau_{ij} \right]^\alpha \left[\varrho_{ij} \right]^\beta \right\} \text{ for } j \in allowed_m, & \text{if } \xi \leq \xi_0 \\ \text{依据状态转移概率并应用轮盘赌法选择节点 } j, & \text{即} \\ p_{ij} = \frac{\left[\tau_{ij} \right]^\alpha \left[\varrho_{ij} \right]^\beta}{\sum_{s \in allowed_m} \left(\left[\tau_{is} \right]^\alpha \left[\varrho_{is} \right]^\beta \right)}, & \text{否则} \end{cases} \quad (19)$$

其中, τ_{ij} 为信息素浓度。 g_{ij} 为能见度, 取路段 (i, j) 距离的倒数。 α, β 分别表示信息素启发式因子和期望启发式因子的重要程度。 $allowed_m$ 为蚂蚁 m 的所有未访问节点集合。 ξ 为一个随机数, 服从 $(0,1)$ 区间上的均匀分布。 ξ_0 的值可以随算法的进化进程在 0 至 1 的范围内动态调整, 依据文献[20], ξ_0 取值 0.5 可有效平衡算法效果及收敛速度之间的关系。 **Step 5:** 如果节点 j 满足车辆容量、行驶时间、鲜活度等约束条件, $j \notin allowed_m$, 转 Step 4, 否则, 蚂蚁 m 行驶到终点, 转 Step 3, 直到所有客户访问完毕。 **Step 6:** $m = m + 1$, 如果 $m \leq M$, 转 Step 2。

步骤 3: 当前迭代的最优结果计算。如果 $itercost_1 < bestcost_1$, $bestcost_1 = itercost_1$ 。

步骤 4: 自适应信息素启发式因子和期望启发式因子。参考文献[20]与文献[21]的方法, 设定 $\alpha = 1 + 2(iter/maxiter)$, $\beta = 3 - 2(iter/maxiter)$ 。

步骤 5: 更新信息素。更新最优路径组成路段的信息素。即

$$\tau_{ij}^{new} = \tau_{ij}^{old} (1 - \rho) + \sum_{m=1}^M \Delta \tau_{ij}^m \quad (20)$$

$$\Delta \tau_{ij}^m = \begin{cases} W/f_m, & \text{如果蚂蚁 } m \text{ 在此次迭代中经过路段 } (i, j) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (21)$$

其中, ρ 为信息素挥发性, $0 \leq \rho < 1$; $\Delta \tau_{ij}^m$ 为蚂蚁 m 在路段 (i, j) 上信息素增加量; W 为常数; f_m 表示蚂蚁 m 配送所有客户的总配送成本。

步骤 6: 算法结束判断。如果 $iter \leq maxiter$, 转步骤 2, 否则, 算法结束。

第二阶段: 计算生鲜农产品高铁物流的运输时间与运输费用

步骤 1: 初始化。输入产地高铁物流中心与销地高铁物流中心坐标、拟采用高铁班次, 根据距离选择配送价格。

步骤 2: 运输时间与运输费用计算。 **Step 1:** 根据拟采用高铁班次查阅高铁运行时刻表, 得出农产品的高铁运输时间 $t_{G_1G_2}$ 。 **Step 2:** 计算农产品配送总重量, 根据配送价格得出农产品的高铁运输费用 $bestcost_2$ 。

第三阶段: 求解“最后一公里”OVRP的IACA

步骤 1: 初始化。输入销地配送中心坐标、客户坐标与需求量、车辆容量、单位行驶距离成本、销地高铁物流中心坐标、生鲜农产品最低鲜活度, 令 $maxiter$ 为算法最大迭代次数、当前迭代次数 $iter = 1$ 、最优总配送成本 $bestcost_3 = +\infty$ 。令销地高铁物流中心作为车辆出发点、销地配送中心作为车辆行驶路线终点。

步骤 2: 至步骤 6 采用第一阶段的算法步骤。

根据以上三个阶段的计算结果, 得出生鲜农产品配送的总成本。

5. 算例实验

5.1. 实验设置

由于目前没有生鲜农产品高铁与公路物流联运的测试数据库, 本文拟根据问题特性构建一个仿真实验算例, 数据如下: 1) 产地配送数据。考虑到特色生鲜农产品生产者一般是集中生产, 采用 Solomon 提供的 Benchmark Problems [22]的集中分布型算例 C105 数据, 第 1 个节点的坐标作为产地配送中心的坐标, 从第 2 个节点到第 41 个节点的第 1 列数据作为生产者序号、第 2 列与第 3 列数据作为生产者坐标、第 4 列数据作为生产者发货量。另外, 设定车辆从配送中心出发时间为早上 7 点, 产地高铁物流中心坐标为 $(80, 80)$, 高铁出发时间为 8 点 30 分。2) 高铁物流数据。设定高铁运输时间为 2 小时, $c_2 = 5$ 元/公斤。3) 销地配送数据。考虑到生鲜电商的客户普遍属于随机分布, 采用 Benchmark Problems [22]的随机分布

型算例 R201 数据, 第 1 个节点的坐标加上 500 作为销地配送中心的坐标, 从第 2 个节点到第 101 个节点的第 1 列数据作为客户序号、第 2 列与第 3 列数据分别加上 500 作为客户坐标、第 4 列数据乘以比例(产地总发货量与销地总需求量的比例, 确保产地与销地的农产品数量相等)作为客户需求量, 另外, 设定销地高铁物流中心坐标为(500, 500)。

三阶段启发式算法采用 Matlab 2016a 编程, 程序运行环境: 处理器 Intel(R) Core(TM) i7-6700 CPU @3.40GHz 3.41GHz, RAM 8.00GB。算法参数设置如下: $Q_1=1500$ 公斤, $c_1=3$ 元/公里, $s_1=55$ 公里/小时, $Q_2=1000$ 公斤, $s_3=50$ 公里/小时, $c_3=4$ 元/公里, $X=0.8$, $T=900$ 分钟。依据文献[20]与[21], 将蚁群算法的相关参数设置为: $maxiter=600$, $M=30$, $W=20$, $\rho=0.2$ 。

5.2. 实验结果

5.2.1. 高铁与公路物流联运的生鲜农产品配送规划结果分析

经过仿真实验, 高铁与公路物流联运的生鲜农产品配送规划结果如图 2 所示。图 2 中的黑色长方形表示高铁物流中心, 黑色平行四边形表示配送中心。从图 2 可知: 1) 农产品生产者呈集中分布, 同一区域内的生产者由同一配送车辆集货; 产地配送总共需要 2 辆车, 车辆从配送中心出发, 完成集货任务后直接驶达产地高铁物流中心送货。2) 农产品从产地高铁物流中心直接运达销地高铁物流中心。3) 销地的客户呈随机分布, 一共需要 5 辆配送车辆, 车辆从销地高铁物流中心出发, 完成配送任务后回到销地配送中心。说明本文数学模型与三阶段启发式算法能有效实现决策者目标, 既可以降低物流成本, 又能保障生鲜农产品送达客户时的鲜活度, 拓展生鲜农产品销售范围, 促进农产品上行。

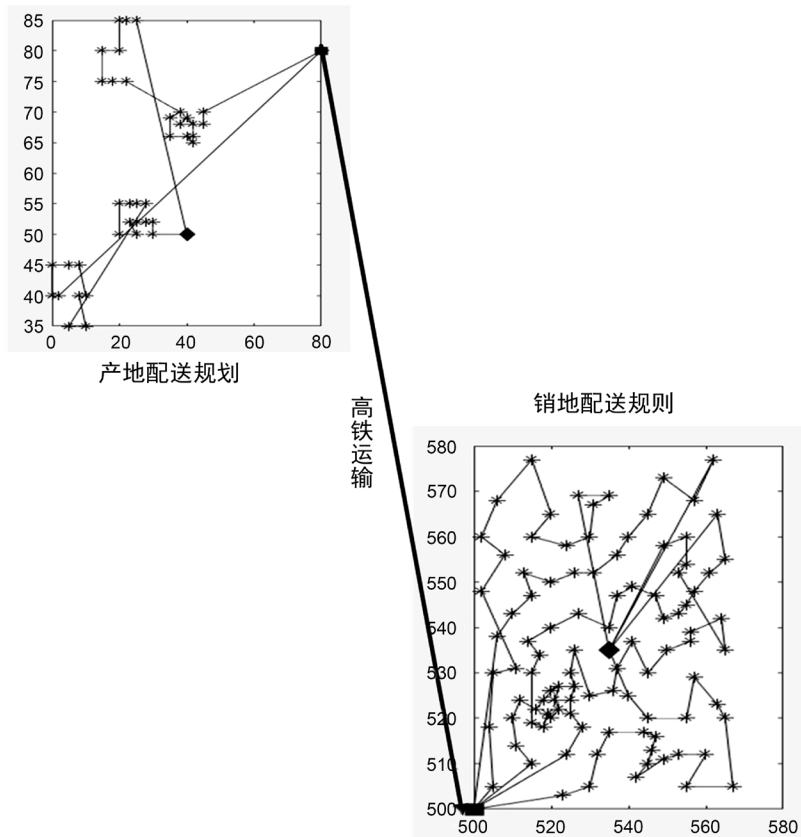


Figure 2. The joint plan of fresh agricultural products distributed by high-speed railway logistics and highway logistics
图 2. 生鲜农产品高铁与公路物流联运的配送规划

图 2 所示配送规划的计算结果如表 1。表 1 中，配送成本的单位：元，车辆数量的单位：辆，行驶距离的单位：公里，配送时间的单位：分钟。

Table 1. The results of fresh agricultural products distributed by high-speed railway logistics and highway logistics
表 1. 高铁与公路物流联运的生鲜农产品配送规划结果

物流阶段	配送成本	车辆数量	行驶距离	配送时间
产地配送	753.57	2	251.19	274.02
高铁物流	14,400	1 个班次	593.97	120
销地配送	3461.4	5	865.35	1038.4
合计	18,614.97	7 辆汽车 + 1 个班次高铁	1710.51	1432.42

从表 1 可知：1) 产地配送成本最小，仅 753.57 元，占总成本的 4.05%；高铁物流费用最大，为 14400 元，占总成本的 77.36%；销地配送费用为 3461.4 元，占总成本的 18.59%。原因在于特色农产品普遍采用集中生产方式，有利于形成规模效应、打造具有地域特色的生鲜农产品知名品牌。例如图 2，生产者位置呈集中分布，生产者之间的距离非常短、发货量比较大，有利于开展物流配送。同时也说明高铁物流费用是生鲜农产品突破传统流通半径、拓展销售范围的关键，只有真正降低了农产品流通的物流成本，才能有效促进农产品上行、突破生鲜农产品“买难卖难”困境。2) 产地配送需要 2 辆车辆，行驶距离为 251.19 公里，配送时间为 274.02 分钟。高铁物流只采用一个班次高铁列车，行驶距离为 593.97 公里，运输时间为 120 分钟。销地配送需要 5 辆车辆，行驶距离为 865.35 公里，配送时间为 1038.4 分钟。虽然产地发货量与销地配送量相等，但是销地车辆使用数量是产地车辆数量的 2.5 倍，销地车辆行驶距离是产地车辆行驶距离的 3.45 倍，销地配送时间是产地配送时间的 3.79 倍，销地配送费用是产地配送费用的 4.59 倍。原因在于生鲜农产品生产者位置呈集中分布、生产者数量相对较少、发货量较大，而客户需求量小、客户数量较多且呈随机分布。生鲜农产品“最后一公里”的配送规划比较复杂，既要考虑物流成本因素，又要考虑生鲜农产品送达客户时的鲜活度等因素，决策者需要根据实际情况科学规划。

5.2.2. 鲜活度对生鲜农产品“最后一公里”的影响分析

鲜活度直接影响生鲜农产品的品质，是决定消费者是否购买生鲜农产品的首要影响因素。生鲜电商企业既要保证生鲜农产品送达客户时的鲜活度，又要尽可能地降低配送成本。为揭示鲜活度对农产品“最后一公里”配送成本的影响，本文将鲜活度以 0.05 为一个梯度，设定农产品最低鲜活度为 0.7，按照从小到大的顺序进行销地配送实验(本实验中，生鲜农产品从产地运达销地高铁物流中心已经使用 210 分钟)，计算结果如表 2 所示。表 2 中，“-”表示无可行解，算法运行时间单位：秒，其余计算结果的单位同表 1 所示。

Table 2. The influence of fresh agricultural products freshness on “last kilometer” vehicle path planning

表 2. 鲜活度对生鲜农产品“最后一公里”车辆路径规划的影响

鲜活度	总成本	车辆数量	行驶距离	配送时间	算法运行时间
0.7	3091.6	4	772.88	927.46	218.38
0.75	3144.3	4	786.07	943.29	220.87
0.8	3461.4	5	865.35	1038.4	221.59
0.85	3776.7	6	944.17	1133	227.69
0.9	-	-	-	-	-
0.95	-	-	-	-	-

从表 2 的计算结果可知：1) 当鲜活度为 0.9 及其以上时，算法无法求解。原因在于本实验中，生鲜农产品从产地运达销地高铁物流中心已经使用 210 分钟。2) 随着鲜活度值的上升，车辆使用数量、行驶距离与配送时间呈逐渐上升状态。例如总成本，当鲜活度从 0.7 上升到 0.75 时，总成本增加 1.71%；当鲜活度从 0.75 上升到 0.8 时，总成本增加 10.08%；当鲜活度从 0.8 上升到 0.85 时，总成本增加 9.11%。说明鲜活度的变化，对车辆路径规划造成了相当大的影响。鲜活度是影响生鲜农产品配送成本的关键因素之一。为拓展农产品销售范围、延长农产品保质时间，高附加值的生鲜农产品应该采用冷链物流与冷链储存方式。3) 算法最大运行时间仅 227.69 秒，说明本文设计的算法运行效率较高，能在较短时间内给出满意解。

5.2.3. 不同物流方式的生鲜农产品流通半径分析

为分析不同物流方式的生鲜农产品流通半径，本文将鲜活度以 0.05 为一个梯度，设定农产品最低鲜活度为 0.7，按照从小到大的顺序进行实验，分别计算不同鲜活度限制下基于公路物流方式的生鲜农产品流通半径、基于“公路 + 高铁 + 公路”物流联运方式的生鲜农产品流通半径，计算结果如表 3 所示。基于公路物流方式的生鲜农产品流通半径计算条件设定如下：1) 生鲜农产品集货时间为 60 分钟之内完成，集货阶段内车辆行驶速度设定为 55 公里/小时；2) 集货完毕，配送车辆从产地配送中心出发，通过高速公路直接驶达销地配送中心，设定车辆在高速公路行驶速度为 100 公里/小时。3) 销地配送时间限定为 90 分钟之内完成。基于“公路 + 高铁 + 公路”物流联运方式的生鲜农产品流通半径计算条件设定如下：1) 生鲜农产品集货时间为 60 分钟之内完成，送达产地高铁物流中心；2) 集货完毕，农产品通过高铁物流运达销地高铁物流中心，设定高铁行驶速度为 250 公里/小时。3) 销地配送时间限定为 90 分钟之内完成，配送阶段内车辆行驶速度设定为 50 公里/小时。

表 3 中，最大流通半径指满载直配，单位：公里，比率为公路流通方式的最大流通半径与“公路 + 高铁 + 公路”物流联运方式的流通半径的比率。由表 3 的计算结果可知：1) 基于公路物流方式的最大流通半径远远小于基于“公路 + 高铁 + 公路”物流联运方式的最大流通半径，二者的比率最低为 45.01%，最高为 62.71%，平均比率为 49.91%。说明基于“公路 + 高铁 + 公路”物流联运方式更加有利于拓展生鲜农产品流通范围，有利于进一步促进高附加值的生鲜农产品销售。2) 随着鲜活度值的上升，两种物流方式的最大流通半径都逐渐变小，二者之间的差距逐渐缩小。

Table 3. The fresh agricultural products circulation radius of different logistics models

表 3. 不同物流方式的生鲜农产品流通半径

鲜活度	公路物流方式	高铁与公路物流联运方式	比率(%)
	最大流通半径	最大流通半径	
0.7	701.58	1558.95	45.01
0.75	630	1380	45.65
0.8	546.67	1171.67	46.65
0.85	460.93	957.33	48.14
0.9	354.33	690.83	51.29
0.95	215.4	343.5	62.71

6. 结论

为拓展生鲜农产品流通范围、缩短流通时间、降低物流成本，研究基于“公路 + 高铁 + 公路”物流联运方式的生鲜农产品配送规划。综合考虑生鲜农产品的产地配送需求、高铁物流需求与销地配送需求，以总成本最小为目标构建“公路 + 高铁 + 公路”物流联运的 OVRP 模型，并根据模型特点设计三阶段

启发式算法求解。仿真实验结果证明：1) 鲜活度是影响生鲜农产品销售范围与物流成本的关键因素之一。2) 高铁物流费用是生鲜农产品突破传统流通半径、拓展销售范围的关键，只有真正降低了农产品流通的物流成本，才能有效促进农产品上行、突破生鲜农产品“买难卖难”困境；3) 生鲜农产品“最后一公里”的配送规划比较复杂，既要考虑物流成本因素，又要考虑生鲜农产品送达客户时的鲜活度等因素，需要决策者根据实际情况科学规划；4) 基于“公路 + 高铁 + 公路”物流联运方式有利于保障生鲜农产品送达客户时的鲜活度，拓展生鲜农产品流通范围，有利于进一步促进高附加值的生鲜农产品销售。

基金项目

国家社科基金一般项目(高铁网络与信息网络双重作用视角下的我国农产品流通困局与破解对策研究“17BJL091”)。

参考文献

- [1] 吴瑶, 马祖军. 时变路网下带时间窗的易腐食品生产-配送问题[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(1): 172-181.
- [2] 邵举平, 曹倩, 沈敏燕, 孙延安. 生鲜农产品配送中带时窗的 VRP 模型与算法[J]. 工业工程与管理, 2015, 20(1): 122-127.
- [3] 张文峰, 梁凯豪. 生鲜农产品冷链物流网络节点和配送的优化[J]. 系统工程, 2017, 35(1): 119-123.
- [4] Ma, Z.J., Wu, Y. and Dai, Y. (2017) A Combined Order Selection and Time-Dependent Vehicle Routing Problem with Time Widows for Perishable Product Delivery. *Computers & Industrial Engineering*, **114**, 101-113. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.10.010>
- [5] 吴瑶, 马祖军, 郑斌. 有新鲜度限制的易腐品生产-配送协同调度[J]. 计算机应用, 2018, 38(4): 1181-1188.
- [6] 陈久梅, 周楠, 王勇. 生鲜农产品多隔室冷链配送车辆路径优化[J]. 系统工程, 2018, 36(8): 106-113.
- [7] 王恒, 徐亚星, 王振锋, 周天鹏, 田德春. 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.
- [8] 范厚明, 杨翔, 李阳. 基于生鲜品多中心联合配送的半开放式车辆路径问题[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 256-266.
- [9] 刘长石, 周鲜成, 盛虎宜, 罗亮. 生鲜电商配送的 TDVRPTW 研究: 基于经济成本与环境成本兼顾的视角[J]. 控制与决策, 2020, 35(5): 1273-1280.
- [10] Zhang, J. (2015) Analysis on Line Capacity Usage for China High Speed Railway with Optimization Approach. *Transportation Research Part A*, **77**, 336-349. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.022>
- [11] Bi, M., He, S. and Xu, W. (2019) Express Delivery with High-Speed Railway: Definitely Feasible or Just a Publicity Stunt. *Transportation Research Part A*, **120**, 165-187. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.12.011>
- [12] 肖翔, 肖雪悦, 李晓月, 贾丽桓. 新型高铁列车推进高铁运输与现代物流的融合问题[J]. 长安大学学报(社会科学版), 2018, 20(1): 18-27.
- [13] 程娅辉. 基于联合运输的高铁快运相关问题研究-以高铁公路联合运输为例[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [14] 张述敬. 生鲜农产品高铁物流发展现状及对策研究[J]. 江苏科技信息, 2018, 35(31): 78-80.
- [15] 张媛. 基于高铁技术的生鲜农产品冷链物流配送研究[D]: [硕士学位论文]. 日照: 曲阜师范大学, 2016.
- [16] 王福红, 万能, 王林, 郭进利. 基于超网络的货运高铁的选址与鲁棒性研究[J]. 技术经济与管理研究, 2017(10): 17-23.
- [17] 马雪丽, 王淑云, 刘晓冰, 邵喜高. 易腐食品二级供应链生产调度与配送路线的协同优化[J]. 工业工程与管理, 2017, 22(2): 46-52.
- [18] 吴忠和, 陈宏, 赵千, 吴晓志. 时间约束下鲜活农产品供应链应急协调契约[J]. 系统管理学报, 2014, 23(1): 49-61.
- [19] 王磊, 但斌. 考虑保鲜影响消费者时变效用的生鲜农产品多品种订货模型[J]. 系统管理学报, 2013, 22(5): 647-654.
- [20] 刘志硕, 申金升, 关伟. 车辆路径问题的混合蚁群算法设计与实现[J]. 管理科学学报, 2007, 10(3): 15-22.
- [21] 李琳, 刘士新, 唐加福. 改进的蚁群算法求解带时间窗的车辆路径问题[J]. 控制与决策, 2010, 25(9): 1379-1383.
- [22] Solomon, M.M. (1987) Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Time Windows Constrains. *Operations Research*, **35**, 254-265. <https://doi.org/10.1287/opre.35.2.254>