

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202212152023101971

文章编号:1674-599X(2023)05-0149-10

引用格式:刘鹏飞,张玲芳,王杰.低碳理念下生鲜品多温共配路径优化研究[J].交通科学与工程,2023,39(5):149-158.

Citation: LIU Pengfei, ZHANG Lingfang, WANG jie. Research on optimization of multi-temperature distribution routing of fresh products under the concept of low-carbon[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(5): 149-158.

低碳理念下生鲜品多温共配路径优化研究

刘鹏飞,张玲芳,王杰

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:为有效降低生鲜品配送过程中产生的高能耗和高碳排放,考虑车辆行驶速度、车辆距离和负重对碳排放的影响,以配送总成本最小为目标,在时间窗、车辆额定载重等约束下,建立生鲜品多温低碳共配路径的优化模型;并基于遗传算法,应用改进的顺序交叉法对模型进行求解,通过算例验证模型和算法的有效性。研究结果表明:多温低碳变速共配路径更优,较均速共配,变速共配的总配送成本降低11.2%,碳排放成本降低了5.2%。生鲜品多温低碳变速共配模式相比均速共配模式具有明显优势,可为其他物流配送研究提供借鉴。

关键词:生鲜品;多温共配;低碳;变速;改进遗传算法

中图分类号:U116.2

文献标志码:A

Research on optimization of multi-temperature distribution routing of fresh products under the concept of low-carbon emissions

LIU Pengfei, ZHANG Lingfang, WANG jie

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To effectively reduce the high energy consumption and high carbon emission generated in the fresh produce distribution process, a fresh product multi-temperature low-carbon co-distribution path optimization model is constructed under the constraints of the time window and vehicle-rated load to minimize the total cost of distribution, and the impact of vehicle travel speed, distance, and weight on carbon emission is comprehensively considered in the model. Based on the genetic algorithm, the model is solved by applying the improved sequential crossover method. The validity of the model and algorithm is verified by the example, and the comparative analysis shows that the multi-temperature low-carbon variable-speed co-distribution path is better, and the total distribution cost is reduced by 11.2%, among which, the carbon emission cost is reduced by 5.2%. The multi-temperature low-carbon variable speed co-allocation model for fresh produce has obvious advantages compared with the average speed, which can provide a methodological reference for other logistics distribution studies.

Key words: fresh products; multi-temperature co-distribution; carbon emissions; variable-speed; improved genetic algorithm

随着生鲜品多样化需求的日益增长,对其品质要求也越来越高。如何有针对地在保证其品质要求的同时减少碳排放和降低配送成本进行配送路

径优化十分必要。生鲜品单品温配送路径优化研究较常见。侯宇超等^[1]采用精英蚁群算法进行多目标生鲜品配送路径求解优化。SARBIJAN等^[2]考虑

收稿日期:2022-12-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52102406);湖南省教育厅重点项目(19A010)

作者简介:刘鹏飞(1971—),男,长沙理工大学副教授,博士。E-mail:pengfei71@163.com。

灵活时间窗构建了整数线性规划模型。LIU等^[3]验证了混合车辆配送生鲜品的优越性。

单品温配送已无法满足生鲜品“多品种、小批量、高质量”的多温共配需求。针对同一辆车配送不同温层生鲜品多温共配路径的优化, OSTERMEIER等^[4]进行了多温配送路径优化综述分析。CHEN等^[5]考虑时间窗,研究了城市生鲜品多温共配路径。HEBLER等^[6]分析了不固定车厢尺寸与固定车厢尺寸进行多温共配,验证了不固定车厢尺寸更适合生鲜品多温共配。PAAM等^[7]考虑能源成本、需求及收获要求,构建了新鲜农产品多温共配模型。王淑云等^[8-9]将碳税成本引入生鲜品多温低碳共配路径优化模型中,但没考虑碳排放受车辆速度、配送距离和车辆负载的影响。唐燕等^[10]在温区细化生鲜品多温低碳共配路径优化研究中,计算碳排放时忽略了配送距离和车辆速度的影响。王旭坪等^[11-12]引入时间和空间距离计算碳排放,构建了冷链多温低碳共配模型,但未考虑车辆负载等对碳排放的影响。CHEN等^[13]针对电商生鲜品多温低碳共配路径进行了研究,但仅考虑了车辆负载对碳排放的影响。李四兰等^[14]针对生鲜品多温低碳共配路径进行优化,分析了配送距离和车辆负载对碳排放的影响,却忽略碳排放中对速度的影响。目前,针对多温低碳共配路径进行优化的模型中主要考虑车辆载重或配送距离对碳排放的影响,考虑车辆速度对碳排放影响少见。因此,本研究拟以配送总成本最小为目标,构建考虑车辆速度、行驶距离和车辆负重等因素的生鲜品多温低碳共配路径优化模型,并采用改进遗传算法进行求解,为生鲜品多温低碳共配寻求更贴近实际的最优路径,实现节能减排。

1 问题描述

针对一个配送中心配送多个客户不同温层的生鲜品进行多温共配进行研究。假定配送中心提供冰温、冷藏和冷冻3种不同温度的生鲜品,所用车辆为同种车型的机械式冷冻多隔区车;客户需求、配送距离和时间窗均已知;车辆从配送中心出发,完成配送任务后返回配送中心。配送网络如图1所示。

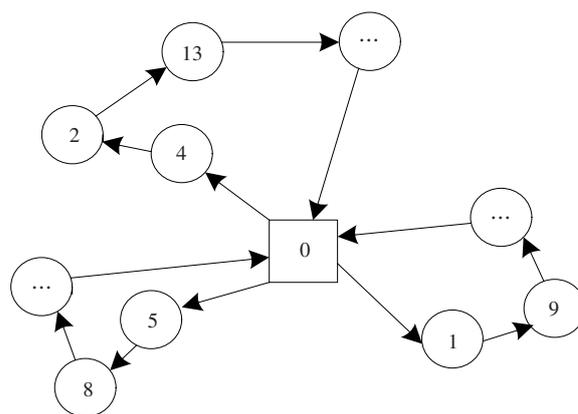


图1 配送网络

Fig. 1 Distribution network diagram

模型假设:①碳排放与车辆速度、配送距离及车辆负重呈正相关;②同一客户不同温层的生鲜品需求必须由同一辆车配送,每位客户仅由一辆车服务;③各温层生鲜品同时卸货,且卸货时间相同;④同一条路径上客户不同种类生鲜品的需求量不能超过不同温层的额定载重;⑤同一温层生鲜品温度恒定腐败率相同,腐败率只与时间有关;⑥制冷成本只随配送时间而变化。

2 模型的建立

2.1 符号和变量

本研究建立的模型中, V 为配送网络节点集合, $V = \{0, 1, 2, \dots, N\}$,0表示配送中心; V_0 为客户点集合; i, j 分别为客户点, $i, j \in V_0, V_0 = V \setminus \{0\}$; A 为节点弧集合, $A = \{(i, j) | i, j \in V, i \neq j\}$; K 为车辆集合, $k \in K$; W 为温层集合, $w \in W, W = \{1, 2, 3\}$; d_{ij} 为客户 i 与客户 j 之间的距离; v_{ij} 为客户 i 与客户 j 之间的行驶速度; δ_1 为发动机模块参数; δ_2 为载重模块参数; δ_3 为速度模块参数; G 为空车自身质量, kg; e 为单位油耗的二氧化碳排放量; λ 为单位碳排放成本, 元/kg; t_i 为到达客户 i 的时间; s_i 为服务客户 i 的时间, min; $[E_i, T_i]$ 为客户 i 的服务时间窗; f_{iw} 为客户 i 对温层 w 生鲜品的需求量; f_{ink} 为车辆 k 服务客户 i 温层 w 后的剩余载重量; Q_w 为温层 w 的最大载货量, kg; p_w 为温层 w 单位生鲜品腐烂成本, 元; μ_{1w}, μ_{2w} 分别为温层 w 单位生鲜品运输、卸货货损率; r_{1w}, r_{2w} 为温层 w 单位生鲜品运输、卸货制冷成本, 元/h; c_k 为车辆 k 的使用成本, 元/辆; a 为单位油耗成本, 元/L; α_1, α_2 分

别为等待、延迟时间单位惩罚成本,元/h; x_{ijk} 为0-1变量,当车辆 k 从客户 i 驶向客户 j ,值为1,否则为0; y_{iwk} 为0-1变量,当车辆 k 对客户 i 配送温层 w 生鲜品,值为1;否则为0。

2.2 成本分析

生鲜品多温低碳共配成本包括碳排放成本、车辆使用成本、生鲜品腐损成本、制冷成本和惩罚成本。

2.2.1 碳排放成本

在本研究中碳排放成本不仅考虑行驶距离和负重等影响因素,还考虑速度变化的影响。碳排放与车辆油耗和碳排放因子相关,采用CMEM (comprehensive modal emission model, CMEM) 排放模型计算车辆油耗,能够反映速度、行驶距离和负重等对碳排放的影响^[15-16]。其中,车辆速度与道路拥堵和空气阻力等有关,车辆负重包括自身的质量和负载,负载随客户数减少而减少。车辆路径 (i, j) 上的油耗 F_{ij} 为:

$$F_{ij} = \delta_1 d_{ij}/v_{ij} + \delta_2 (f_{iwk} + G)d_{ij} + \delta_3 d_{ij} v_{ij}^2 \quad (1)$$

车辆碳排放量与路径 (i, j) 上油耗和车辆碳排放因子 e 有关,而排放因子 e 与车辆类型和油耗率有关,特定冷链物流配送中为常数,设 e 为2.621 kg/L^[17]。碳排放量 E_{ij} :

$$E_{ij} = eF_{ij} \quad (2)$$

碳排放成本=单位碳排放成本×碳排放量,则碳排放成本 C_1 :

$$C_1 = \lambda \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} E_{ij} x_{ijk} \quad (3)$$

2.2.2 车辆使用成本

车辆使用成本主要包括运输成本和固定成本。

1) 运输成本

运输成本主要考虑由油耗所产生,车辆单位油耗成本为 a ,运输成本 C_{21} 为:

$$C_{21} = a \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} F_{ij} x_{ijk} \quad (4)$$

2) 固定成本

生鲜品冷链配送车辆固定成本主要包括驾驶员工资、车辆维修费及折旧费,通常为恒定常数。配送固定成本 C_{22} 为:

$$C_{22} = \sum_{k \in K} c_k \quad (5)$$

由式(4)~(5)可知,车辆使用成本 C_2 为:

$$C_2 = C_{21} + C_{22} = a \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} F_{ij} x_{ijk} + \sum_{k \in K} c_k \quad (6)$$

2.2.3 生鲜品腐损成本

生鲜品腐损主要因环境温度和时间的变化而产生,假设车内各温层环境温度能够达到生鲜品保险条件,则腐损成本主要考虑为随时间变化的指数函数^[18]。假设生鲜品在整个运输过程中各温层货损率恒定,运输过程中腐损成本主要受配送时间影响,配送时间由路径 (i, j) 实际距离除以该路径的行驶速度求得,则运输时腐损成本 C_{31} 为:

$$C_{31} = \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{w \in W} p_w y_{iwk} f_{iw} (1 - e^{-\mu_w d_{ij}/v_{ij}}) \quad (7)$$

卸货时车门打开,内外环境温度骤变,货损增加,货损率提高。假设装卸过程中各温层货损率保持不变,卸货时的腐损成本主要受服务时间影响,则卸货时腐损成本 C_{32} 为:

$$C_{32} = \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{w \in W} p_w y_{iwk} f_{iw} (1 - e^{-\mu_w s_i}) \quad (8)$$

由(7)、(8)可知,生鲜品腐损总成本 C_3 为:

$$C_3 = \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{w \in W} p_w y_{iwk} f_{iw} (1 - e^{-\mu_w d_{ij}/v_{ij}}) + \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{w \in W} p_w y_{iwk} f_{iw} (1 - e^{-\mu_w s_i}) \quad (9)$$

2.2.4 制冷成本

多温共配机械式冷藏车制冷成本包括生鲜品配送和卸货两部分,假设配送车辆规格相同、不同时段温度变化忽略不计,配送过程中制冷成本仅与配送时间有关^[19],配送时间由路径 (i, j) 实际距离除以该路径的行驶速度求得,则配送时制冷成本 C_{41} 为:

$$C_{41} = \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{w \in W} r_{1w} d_{ij}/v_{ij} x_{ijk} \quad (10)$$

卸货制冷成本考虑主要与服务时间有关,故卸货制冷成本 C_{42} 为:

$$C_{42} = \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{w \in W} r_{2w} s_i y_{iwk} \quad (11)$$

由(10)、(11)可知,制冷总成本 C_4 :

$$C_4 = \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{w \in W} r_{1w} d_{ij}/v_{ij} x_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{w \in W} r_{2w} s_i y_{iwk} \quad (12)$$

2.2.5 惩罚成本

惩罚成本为配送过程中未满足客户服务时间窗要求而产生的额外成本,包括车辆等待成本(预期最早时间前到达客户产生的成本)和车辆延迟成

本(预期最迟时间后到达客户产生的成本)^[20]。惩罚成本 C_5 为:

$$C_5 = \begin{cases} \sum_{i \in V_0} f_{iw} \alpha_1 (E_i - t_i), & t_i < E_i \\ 0, & E_i \leq t_i \leq L_i \\ \sum_{i \in V_0} f_{iw} \alpha_2 (t_i - L_i), & L_i < t_i \end{cases} \quad (13)$$

2.3 模型的建立

以配送总成本最小为目标建立生鲜品多温低碳共配路径优化模型:

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \quad (14)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} = 1, \forall i, j \in V_0 \quad (15)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{ijk} = 1, \forall j \in V \quad (16)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V} x_{ijk} = 1, \forall i \in V \quad (17)$$

$$\text{s.t.} \left\{ \begin{aligned} \sum_{i \in V} \sum_{w \in W} f_{iw} y_{iwk} &\leq Q_{wk}, \forall k \in K, w \in W \end{aligned} \right. \quad (18)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ijk} - \sum_{j \in V} x_{jik} = 0, \forall k \in K \quad (19)$$

$$t_i + s_i + d_{ij}/v_{ij} \leq t_j, \forall (i, j) \in A \quad (20)$$

$$f_{iw} \geq 0, \forall i \in V_0, w \in W \quad (21)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, y_{iwk} \in \{0, 1\} \quad (22)$$

其中,式(14)为最小配送总成本;式(15)为每个客户仅有一辆车服务;式(16)~(17)为车辆从配送中心出发,完成配送任务后回到配送中心;式(18)为同一路径的客户所需的各类生鲜品不能超过车辆各温层的最大载货量;式(19)为车辆完成配送任务后即从客户点离开;式(20)为服务客户时间的连续性;式(21)为客户各温层生鲜品需求为非负;式(22)为决策变量取值约束。

3 改进遗传算法设计

生鲜品多温低碳共配路径的优化属于NP-hard范畴,即所有非确定性多项式NP(non-deterministic polynomial)都能在多项式时间复杂度内归约到的问题,采用具有鲁棒性和全局搜索能力的改进遗传算法求解模型。改进遗传算法步骤为:

1) 编码:采用自然数编码方式,染色体等于客户数目和使用车辆最多数的和再减去1。

2) 初始化种群:采用最小成本最邻近法算法(nearest neighbor algorithm base on minimum cost, NNC)初始化种群PS(population size);NNC算法可以产生较高质量初始可行解,并加快收敛速度。

3) 计算适应度:采用目标函数的倒数计算适应度。

4) 选择:采用随机遍历抽样法(stochastic universal sampling, SUS)以代沟 GGAP 进行选择操作。主要是为了使用多个选择点,且每个选择点之间等距。如图2所示, A, B, \dots, G 为不同个体,个体适应度不同, F 为累积适应度, N 为选择的个体数量, F/N 表示等距,等距为累积适应度除以选择的个体数量, r 为在0到 F/N 之间随机产生的起始点,根据等距选择出其他的点,根据产生的点选择出个体。与轮盘赌选择相比,此方法执行一次就可确定整个种群,极大地缩短了算法运行时间。

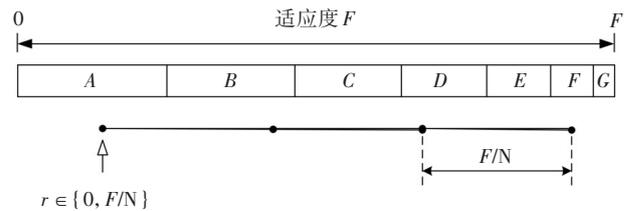


图2 随机遍历抽样操作

Fig. 2 Random ergodic sampling operation diagram

5) 交叉:保持种群多样化,提高算法全局搜索能力,对顺序交叉(order crossover, OX)进行改进,以交叉概率 P_c 进行操作;通过前置或后置、互换所选基因片段和删除重复基因等操作构成全新子代,若父代不同,则把O到S片段均放置父代前端,删除重复基因,如图3所示。若父代相同,则分别将O到S片段放置父代前端和后端位置进行操作,删除重复基因,如图4所示。

		O			S			
父代1	2	6	3	5	7	1	4	8
父代2	3	5	8	1	2	6	7	4
子代1	5	8	1	3	2	6	3	5
子代1	5	8	1	3	2	6	7	4
子代2	6	3	5	7	3	5	8	1
子代2	6	3	5	7	8	1	2	4

图3 父代不同交叉

Fig. 3 Crossing diagram with different parent

表2 服从三角分布的速度矩阵

Table 2 Velocity matrix subjected to triangular distribution

客户	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1		58	70	51	73	61	77	49	44	71	52	47	64	49	64	48	73	73	46	43	59	77	70	64	70
2			47	45	79	78	49	44	64	60	61	54	74	57	66	71	43	43	61	44	55	48	42	73	48
3				60	47	43	40	48	76	66	44	58	55	77	50	54	63	64	40	61	52	41	45	61	71
4					79	53	73	68	44	67	70	75	46	46	75	67	78	63	77	76	77	48	71	75	57
5						73	72	44	61	70	53	68	41	80	79	51	62	41	58	55	50	68	65	64	51
6							59	77	42	46	66	45	75	74	53	47	60	62	59	41	63	62	60	58	54
7								47	57	42	53	67	44	74	43	72	40	71	56	79	68	61	56	60	73
8									47	43	47	56	51	51	41	52	72	51	58	42	66	70	62	72	42
9										44	73	47	50	70	61	74	70	73	60	48	75	60	64	68	44
10											71	52	71	64	60	51	50	54	59	47	69	71	59	53	74
11												63	67	51	70	60	40	51	80	51	41	42	63	58	70
12													69	49	62	70	74	58	74	77	72	46	53	65	48
13														60	79	76	44	43	67	51	73	59	57	62	45
14															54	55	45	51	42	42	61	52	68	65	40
15																62	63	57	54	44	44	53	60	48	42
16																	45	48	66	59	78	74	48	59	48
17																		75	51	79	71	69	60	57	76
18																			59	41	58	40	76	65	52
19																				54	77	72	76	77	79
20																					74	46	51	67	53
21																						60	48	46	41
22																							52	73	68
23																								42	42
24																									56
25																									

表3 模型参数

Table 3 Model parameters

参数	参数值	参数	参数值	参数	参数值		
$c_k / (\text{元} \cdot \text{辆}^{-1})$	300	s / min	10	$p_w / \text{元}$	1 000	2 000	3 000
$a / (\text{元} \cdot \text{L}^{-1})$	8	G / kg	3 200	μ_{1w}	0.000 5	0.001 2	0.001
δ_1	5×10^{-2}	$\alpha_1 / (\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	20	μ_{2w}	0.000 5	0.001 4	0.001 5
δ_2	2.19×10^{-4}	$\alpha_2 / (\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	30	$r_{1w} / (\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	5	10	15
δ_3	1.29×10^{-6}	$\lambda / (\text{元} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.053	$r_{2w} / (\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	10	15	20
Q_w / kg	200						

4.2 结果分析

4.2.1 优化结果

导入相关数据,在 Matlab 中,采用改进遗传算法求解模型,在确保其他条件不变,只改变车辆速度时,通过 20 次迭代,取其中最优的 1 次迭代结果为模型最优解。迭代示意图如图 5 所示。生鲜品多温低碳变速共配模型算法在迭代 110 次后,结果趋于稳定;而均速共配算法在迭代 140 次后,结果才趋于稳定,表明:生鲜品多温低碳变速共配算法的收

敛速度快于均速共配算法的收敛速度。

经生鲜品多温低碳均速共配路径优化模型优化后的配送路径如图 6 所示。从图 6 可以看出,生鲜品多温低碳均速共配路径的优化模型共有 7 条配送路径,需 7 辆配送车辆,配送总距离为 685.97 km,配送总成本为 6 390.34 元。

经生鲜品多温低碳变速共配路径的优化模型优化后的配送路径如图 7 所示。从图 7 可以看出,生鲜品多温低碳均速共配路径优化模型共有 6 条配

送路径,需6辆配送车辆,配送总距离为571.22 km,配送总成本为5 675.33元。

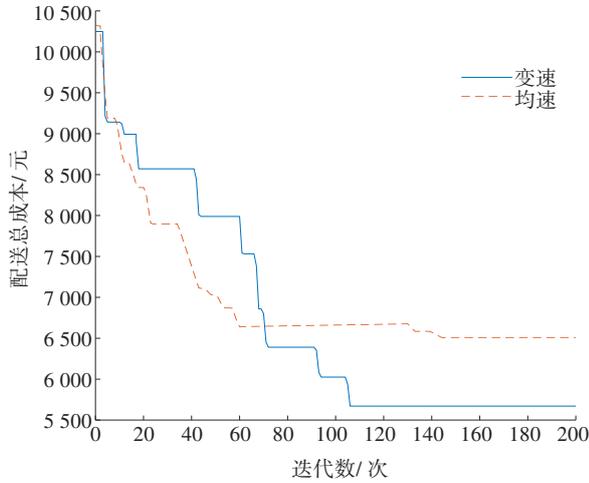


图5 多温低碳变(均)速共配迭代

Fig. 5 Multi-temperature joint distribution with low carbon variable (average) speed iteration diagram

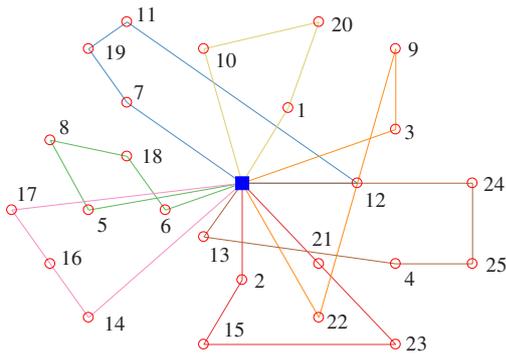


图6 多温低碳均速共配最优配送路径

Fig. 6 Optimal delivery path diagram for multi-temperature joint distribution with low carbon average speed

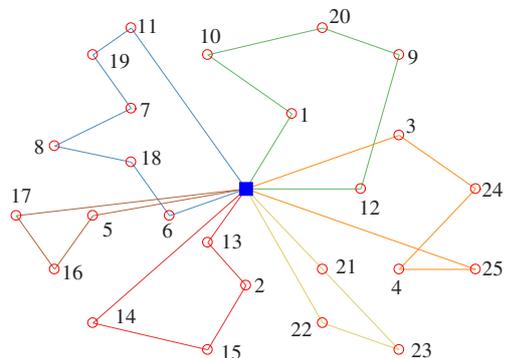


图7 多温低碳变速共配最优配送路径

Fig. 7 Optimal delivery path diagram for multi-temperature joint distribution with low carbon variable speed

4.2.2 优化结果分析

经生鲜品多温低碳变速配送路径的优化模型优化后,车辆配送路径见表4。由表4可知,最高

满载率的车辆为车辆1,满载率达到88.33%,最低满载率的车辆为车辆5,满载率为53.33%,其余车辆满载率为60%~85%。

表4 多温低碳均速配送路径优化结果

Table 4 Fresh product multi-temperature low-carbon mean speed distribution path optimization model distribution path results

车辆序号	配送路径	车辆载重/t	车辆满载率/%
1	0-2-15-23-21-0	0.53	88.33
2	0-12-11-19-7-0	0.48	80.00
3	0-5-8-18-6-0	0.50	83.33
4	0-22-9-3-0	0.40	66.67
5	0-10-20-1-0	0.32	53.33
6	0-13-4-25-24-0	0.51	85.00
7	0-14-16-17-0	0.41	68.33

经生鲜品多温低碳变速配送路径的优化模型优化后,车辆配送路径见表5。由表5可知,最高满载率的车辆为车辆3,满载率达到100%,最低满载率的车辆为车辆4,满载率为68.33%,除车辆4、6的满载率低于80%,其余车辆的满载率都在85%以上。

表5 多温低碳变速配送路径优化结果

Table 5 Fresh product multi-temperature low-carbon variable speed distribution path optimization model distribution path results

车辆序号	配送路径	车辆载重/t	车辆满载率/%
1	0-14-15-2-13-0	0.56	93.33
2	0-11-19-7-8-18-6-0	0.53	88.33
3	0-12-9-20-10-1-0	0.60	100.00
4	0-3-24-4-25-0	0.41	68.33
5	0-21-23-22-0	0.58	96.67
6	0-5-16-17-0	0.47	78.33

4.2.3 效益分析

1) 算法检验分析。

在生鲜品多温低碳均速共配路径优化和生鲜品多温低碳变速共配路径优化两种不同速度条件下,采用遗传算法和改进遗传算法计算车辆的总配送距离,结果见表6。由表6可知,改进遗传算法计算出的总配送距离要大于遗传算法的,表明:用改进的遗传算法对求解生鲜品多温低碳共配路径优化具有一定可行性。

表6 不同算法的总行驶距离

Table 6 Algorithm testing km

不同速度共配路径	总行驶距离	
	遗传算法	改进遗传算法
均速共配路径	723.63	685.97
变速共配路径	649.18	571.22

2) 成本分析。

生鲜品多温低碳均速共配路径优化和生鲜品多温低碳变速共配路径优化2种不同速度条件下的各项配送成本见表7。

表7 生鲜品多温低碳变(均)速共配下各成本

Table 7 The cost of different items multi-temperature low carbon variable (average) speed co-allocation for fresh products 元

成本	生鲜品多温低碳均速共配	生鲜品多温低碳变速共配
碳排放成本	1 549.31	1 468.93
腐损成本	625.77	593.21
制冷成本	1 138.70	1 023.80
车辆使用成本	2 890.27	2 458.85
惩罚成本	186.29	130.54
总配送成本	6 390.34	5 675.33

由表7可知,在碳排放成本方面,生鲜品多温低碳变速共配比生鲜品多温低碳均速共配的碳排放成本降低了5.2%,这是因为生鲜品多温低碳变速共配路径更优,缩短了配送总距离。在车辆使用成本方面,与生鲜品多温低碳均速共配相比,生鲜品多温低碳变速共配车辆数量由原来的7辆变为6辆,车辆使用成本降低了14.93%,采用该配送模式不但能较好地服从客户时间窗约束,而且惩罚成本也降低了29.9%。表明:生鲜品多温低碳变速共配能更好地提高客户满意度。从客户角度分析,配送时间越短,生鲜品的货损量就越少,生鲜品的新鲜度就越高,从而能够提高客户满意度,与生鲜品多温低碳均速共配算法相比,生鲜品多温低碳变速共配腐损成本降低了12.2%。从配送企业角度分析,生鲜品多温低碳变速共配算法不仅在配送总成本降低了11.2%,并且可以给客户带来更好的服务体验,继而增加产品销量。

3) 各温层满载率分析。

生鲜品多温低碳均速、变速共配各车辆不同温

层装载率的结果见表8~9。由表8~9可知,生鲜品多温低碳均速共配比均速共配算法的车辆装载率更高,经本模型优化后,不仅可以最大限度提高车辆利用率,同时可以减少配送成本,向客户提供多种类、高质量的生鲜品,提高客户满意度。

表8 多温低碳均速共配车辆装载率

Table 8 Loading rate of multi-temperature joint distribution with low carbon average speed vehicles %

车辆序号	冰温	冷藏	冷冻
1	75	99	90
2	65	80	95
3	90	85	75
4	80	60	80
5	60	45	55
6	80	95	80
7	75	60	70

表9 多温低碳变速共配车辆装载率

Table 9 Loading rate of multi-temperature joint distribution with low carbon variable speed vehicles %

车辆序号	冰温	冷藏	冷冻
1	85	99	95
2	90	90	90
3	95	90	95
4	70	65	70
5	90	99	99
6	90	75	70

5 结论

针对优化生鲜品多温低碳共配路径问题,考虑配送速度、行驶距离和重量等因素对碳排放的影响,用改进遗传算法求解所构建的生鲜品多温低碳共配路径优化模型,优化结果表明:生鲜品多温低碳变速共配比均速共配路径更优,能有效降低配送成本,减少碳排放,缩减一条路径,可为生鲜品高效配送提供借鉴。

多温低碳共配车辆路径研究中碳排放考虑的为时变速度,未来研究可以采用更加符合实际的车辆速度,同时也可以对道路坡度、制冷设备等现实因素对碳排放的影响进行探讨。

参考文献(References):

[1] 侯宇超,白艳萍,胡红萍,等.基于精英蚁群算法的多

- 目标生鲜配送路径优化研究[J]. 数学的实践与认识, 2018, 48(20):50-57.
- HOU Yuchao, BAI Yanping, HU Hongping, et al. Study of multi-objective fresh food distribution route optimization based on elite ant colony algorithm [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2018, 48(20): 50-57.
- [2] SARBIJAN M S, BEHNAMIAN J. Real-time collaborative feeder vehicle routing problem with flexible time windows [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2022:1012 01.
- [3] LIU D, KAISAR E I, YANG Y, et al. Physical Internet-enabled E-grocery delivery Network: a load-dependent two-echelon vehicle routing problem with mixed vehicles [J]. International Journal of Production Economics, 2022, 254: 108632. DOI: 10.1016/j.ijpe.2022.108632.
- [4] OSTERMEIER M, HENKE T, HÜBNER A, et al. Multi-compartment vehicle routing problems: state-of-the-art, modeling framework and future directions [J]. European Journal of Operational Research, 2021, 292 (3): 799-817. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.11.009.
- [5] CHEN J M, SHI J. A multi-compartment vehicle routing problem with time windows for urban distribution - A comparison study on particle swarm optimization algorithms [J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 133: 95-106. DOI: 10.1016/j.cie.2019.05.008.
- [6] HEßLER K. Exact algorithms for the multi-compartment vehicle routing problem with flexible compartment sizes [J]. European Journal of Operational Research, 2021, 294(1): 188-205. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.01.037.
- [7] Paam P , Berretta R ,Rodolfo García-Flores, et al. Multi-warehouse, multi-product inventory control model for agri-fresh products - A case study [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 194: 106783-. DOI: 10.1016/j.compag.2022.106783.
- [8] 王淑云,孙虹,牟进进. 随机需求下蓄冷式多温共配优化模型[J]. 系统管理学报, 2018, 27(4):712-721.
- WANG Shuyun, SUN Hong, MOU Jinjin. Optimization of cold-storage multi-temperature joint distribution based on stochastic demands [J]. Journal of Systems & Management, 2018, 27(4): 712-721.
- [9] CHEN W T, HSU C I. Optimal scheduling for multi-temperature joint distribution under carbon tax [J]. Int. J. Oper. Res, 2019,16:45-62.
- [10] 唐燕,许睿,黄锴迪,等. 基于温区细化的多温共配车辆路径优化[J]. 公路交通科技, 2021, 38(3):136-143. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.03.017.
- TANG Yan, XU Rui, HUANG Kaidi, et al. Optimization of multi-temperature co-distribution vehicle route based on temperature zone refining [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (3) : 136-143. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-0268.2021.03.017.
- [11] 王旭坪,董杰,韩涛,等. 考虑碳排放与时空距离的冷链配送路径优化研究[J]. 系统工程学报, 2019, 34 (4): 555-565. DOI: 10.13383/j.cnki.jse.2019.04.010.
- WANG Xuping, DONG Jie, HAN Tao, et al. The optimization of cold chain delivery routes considering carbon emission and temporal-spatial distance [J]. Journal of Systems Engineering, 2019, 34(4): 555-565. DOI: 10.13383/j.cnki.jse.2019.04.010.
- [12] 王陆平,肖伟,魏庆琦. 考虑速度与拥堵的多式联运路径优化研究[J]. 交通科学与工程, 2013, 29(1): 71-75. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2013.01.010.
- WANG Luping, XIAO Wei, WEI Qingqi. Study on multimodal transport path optimization considering speed and congestion [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2013, 29 (1) : 71-75. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2013.01.010.
- [13] CHEN J M, DAN B, SHI J. A variable neighborhood search approach for the multi-compartment vehicle routing problem with time windows considering carbon emission [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 123932. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123932.
- [14] 李四兰,宋孟珂,郭伟钰. 基于低碳排放的冷链物流多温共配路径优化研究[J]. 物流科技, 2021, 44(8): 152-156. DOI: 10.13714/j.cnki.1002-3100.2021.08.025.
- LI Silan, SONG Mengke, GUO Weiyu. Study on optimization of multi-temperature co-distribution path of cold chain logistics based on low carbon emissions [J]. Logistics Sci-Tech, 2021, 44 (8) : 152-156. DOI: 10.13714/j.cnki.1002-3100.2021.08.025.
- [15] 周鲜成,周开军,王莉,等. 物流配送中的绿色车辆路径模型与求解算法研究综述[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(1): 213-230. DOI: 10.12011/SETP2020-2300.
- ZHOU Xiancheng, ZHOU Kaijun, WANG Li, et al.

- Review of green vehicle routing model and its algorithm in logistics distribution [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2021, 41 (1): 213-230. DOI: 10.12011/SETP2020-2300.
- [16] 周鲜成, 吕阳, 贺彩虹, 等. 考虑时变速度的多车场绿色车辆路径模型及优化算法[J]. *控制与决策*, 2022, 37 (2): 473-482. DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1427.
- ZHOU Xiancheng, LV Yang, HE Caihong, et al. Multi-depot green vehicle routing model and its optimization algorithm with time-varying speed [J]. *Control and Decision*, 2022, 37 (2): 473-482. DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1427.
- [17] 丁秋雷, 胡祥培, 位娟, 等. 动态需求下蓄冷式多温共配多目标优化模型及算法[J]. *运筹与管理*, 2021, 30 (12): 13-19. DOI: 10.12005/orms.2021.0378.
- DING Qiulei, HU Xiangpei, WEI Juan, et al. Research on multi-objective optimization model and algorithm of cold storage multi-temperature joint delivery under dynamic demand [J]. *Operations Research and Management Science*, 2021, 30 (12): 13-19. DOI: 10.12005/orms.2021.0378.
- [18] ZHANG L Y, TSENG M L, WANG C H, et al. Low-carbon cold chain logistics using ribonucleic acid-ant colony optimization algorithm [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 233: 169-180. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.306.
- [19] 王淑云, 孙虹, 牟进进, 等. 冷链品多温共配优化及效益: 基于蓄冷式和机械式的比较研究[J]. *公路交通科技*, 2016, 33 (3): 146-153. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.03.024.
- WANG Shuyun, SUN Hong, MOU Jinjin, et al. Optimization and efficiency of multi-temperature joint distribution of cold chain products: comparative study based on cold accumulation mode and mechanical refrigeration mode [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2016, 33 (3): 146-153. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.03.024.
- [20] 李文霞, 张春民, 马昌喜. 多目标低碳车辆路径优化模型及求解算法[J]. *交通信息与安全*, 2020, 38 (1): 118-126, 144. DOI: 10.3963/j.jssn.1674-4861.2020.01.015.
- LI Wenxia, ZHANG Chunmin, MA Changxi. An optimization model and solution algorithm of multi-objective vehicle path under low carbon conditions [J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2020, 38 (1): 118-126, 144. DOI: 10.3963/j.jssn.1674-4861.2020.01.015.

(责任编辑:欧兆虎;校对:李脉;英文编辑:刘至真)