

疫情防控背景下生鲜物资运输路径优化

张首昊^{1,2}, 韩玮³, 李玟玟^{1,2}, 刘国佳^{2,4}, 陈安^{1*}

1. 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国电子科技集团公司发展战略研究中心, 北京 100041

4. 中国科学院大学公共政策与管理学院, 北京 100049

摘要 疫情防控背景下, 消费者居家隔离导致以小区为单位的生鲜物资需求激增, 而复工不足导致生鲜企业配送能力有限, 生鲜物资运输受到更多挑战。基于生鲜企业配送时间限制, 考虑生鲜物资的保存时间与防疫用品的防护时间, 以消费者所在小区为需求点, 构建疫情防控背景下生鲜物资运输路径优化模型, 并根据模型设计了一种遗传算法进行快速求解, 在完成配送任务的前提下, 得到最优运输方案, 最小化企业配送成本。同时, 分析了不同需求情况下所需车辆数的变化, 计算结果表明所需车辆数并未随需求同倍增加。

关键词 新冠疫情防控; 生鲜物资运输; 路径优化模型; 遗传算法

经济的发展带来电子商务的迅速发展, 同时电子商务的发展促进了网络经济的发展, 生鲜电商市场成为人民生活重要的组成部分。由于疫情和节假日的影响, 以及民众对疫情的恐慌心理, 居家民众对日常必需品尤其是生鲜类产品的需求暴增。京东、美菜网、美团买菜等电商平台相关数据显示, 生鲜商品成交量实现迅猛增长^[1], 消费者对蔬菜瓜果和肉类的订单量与同期相比翻番^[2-3]。网上

购物量的激增导致末端配送面临巨大压力, 但是由于人员隔离、开工延迟、部分复工企业生产力恢复不足, 很多物流企业受供应链的影响, 运输的货物数量亦是有限^[4], 为企业生产经营带来更大挑战。当生鲜需求增多时, 为实现物资快速供应, 需要关注生鲜物资运输路径优化的问题, 即在最优方案下, 以最少的配送车辆和最少的成本满足居家民众的生鲜物资需求。

收稿日期: 2021-07-14; 修回日期: 2022-02-27

基金项目: 国家社会科学基金重点项目(19AZD019); 国家语委“十三五”科研规划重点项目(ZD1135-119)

作者简介: 张首昊, 博士研究生, 研究方向为安全与应急管理, 电子信箱: zhangshouhao19@mails.ucas.ac.cn; 陈安 (通信作者), 研究方向为现代应急管理、智库理论与方法, 电子信箱: anchen@casisd.cn

引用格式: 张首昊, 韩玮, 李玟玟, 等. 疫情防控背景下生鲜物资运输路径优化[J]. 科技导报, 2022, 40(9): 60-66; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.09.007

针对生鲜类物资配送路径及路径优化的相关理论与实践问题,国内外研究人员已有初步研究,通常是结合时间因素,考虑固定成本和燃油成本。沈丽等^[5]以固定成本、货损成本、燃油成本、碳排放成本和时间惩罚成本之和最小为目标,构建生鲜产品配送路径优化模型,并用遗传算法进行求解。王成林等^[6]构建了基于服务质量最优化、物流节点建造成本及物流运营服务成本最小化的多目标两级物流配送网络选址-路径优化问题数学模型,并通过改进遗传算法求解最优方案。何婷等^[7]以配送车辆数和配送成本最少为目标,结合新推出的组合式套餐商品特点和以小区为单位的家庭团购需求特点,对配送车辆路径进行优化。郭建宏等^[8]构建了城市水果物流分区配送模型,并利用遗传算法优化方法,开发了基于地理信息系统(geographic information system, GIS)的分区配送辅助决策系统。

研究人员针对军事等时间要求高的情景进行了研究。赵文飞等^[9]针对战场军事物资配送中带时间窗的路径优化问题,以运输距离、运输费用和风险性为目标,建立了带有时间窗的多目标网络运输模型,提出了一种改进的非支配遗传(non-dominated sorting genetic algorithms II, NSGA-II)算法。Archetti等^[10]研究具有到期日的多周期车辆路径问题(multi-period vehicle routing problem with due dates, MVRPD),客户必须在发布日期和到期日之间得到服务,有能力的车辆可在规划期间的每一天进行分配,使得每天的车辆路线总费用(包括运输费用、库存费用和延期服务的罚款费用)减至最低。孟小玲等^[11]针对战后军事基地遗留的武器装备回收的车辆最短路径和运输成本最低的问题,考虑到基本蚁群算法容易陷入局部寻优的缺陷,提出了一种适用于求解路径优化的改进蚁群算法。

在突发事件下,多为一般性应急物资运输路径优化研究,目前还没有针对突发事件情景下的生鲜物资运输的研究。康斌等^[12]基于配送中心唯一的情况下,考虑道路对车型限制、道路阻断修复和道路可靠性对路径的影响,建立多目标应急救援物资配送路径优化模型,设计优先邻点交叉算子来改进基于非支配解排序的遗传算法,通过仿真实验验证

了算法和模型的有效性。李卓等^[13]基于应急前期运输商自有车辆不足的实际背景,采用自有车辆和第三方租用车辆共同配送的运输模式,对混合车辆路径的组合优化问题进行研究,采用NSGA-II算法求解该类问题。Fang等^[14]从应急物资配送路径选择的角度,考虑分配效率平衡和需求满足,建立了基于旅行业务员问题的配送路径选择模型,采用启发式规则法对所建立的数学模型进行求解和分析。何珊珊等^[15]针对在紧急救援期最短完成时间对救援物资运输的重要性,建立了基于最短完成时间的多目标0-1混合整数规划模型,考虑运输工具有限等约束条件,采用二分法搜索最优的选址-路径方案及相应的调运量。Wohlgemuth等^[16]以最小化时间延误并提高车辆利用率为目标,建立了确定性需求下的动态车辆路径优化模型。Zhang等^[17]建立了配送车辆数量小于需求区域的配送路线优化模型,并采用鱼群蚁群优化(fish-swarm ant colony optimization, FSACO)算法对其进行了求解。刘晨帆等^[18]研究自然灾害发生后,如何利用有限车辆、在较短时间内使物资运抵目的地的一个优化算法。针对疫情期间物资配送的问题,刘娜等^[19]将疫情期间社区商超生活物资配送路径问题转化为旅行商问题(traveling salesman problem, TSP),即利用自组织映射网络(self-organizing maps, SOM)算法与遗传算法求解车辆路径规划中的特例问题,以湖北省黄石港区社区物资配送路径为例,对2种算法的优化结果进行对比。

本研究针对疫情防控背景下生鲜物资运输路径优化问题,考虑生鲜物资保存时长以及防护物资时长限制,建立数学模型,构造遗传算法进行求解,分析不同需求量的情景对运输车辆的需求变化。

1 模型构建

1.1 问题描述

新冠疫情突发,生鲜电商企业为消费者推出了应急系列套餐,消费者通过网络提交订单,电商企业进行统计并安排运输方案。囿于顾客需求暴增、生鲜物资存放不易、运输条件有限、疫情下配送人

员数量和人员安全防护等因素,生鲜电商企业对快速安全地开展配送服务提出了更高的要求。为了能够在最短时间内满足各地区尤其是疫区居民的日常需求,生鲜电商企业需要对配送车辆的路径进行优化,使其在一系列限制条件下实现最小化运输成本。

研究假设如下:(1)装卸货时间相对较短,不考虑装卸货时间;(2)疫情期间道路上车辆较少,不考虑道路拥堵;(3)假定所有小区的需求量均不大于车辆装载容量,此假设可使模型简洁,若小区的需求量均大于车辆装载容量,可将1个小区拆解为多个小区,使其符合该假设;(4)不同空车率下,车辆成本不变;(5)不考虑配送中心货物不足;(6)单位距离运输成本不变。

1.2 符号说明

参数:

$G=\{V, E\}$,表示配送网络集合;

$V=\{0, 1, 2, \dots, n, n+1\}$,表示所有节点的集合,其中0作为起始节点, $n+1$ 作为结束节点, $V'=\{1, 2, \dots, n\}$,表示需求点集合,再延伸出 $V_1=\{0, 1, 2, \dots, n\}$ 和 $V_2=\{1, 2, \dots, n, n+1\}$;

$E=\{(i, j) \mid i \in V_1, j \in V_2, i \neq j\}$,表示节点间的弧集合;

$K=\{1, 2, \dots, m\}$,表示可用车辆的集合;

$A=\{1, 2, \dots, l\}$,表示套餐种类的集合;

q_{ia} 表示小区*i*对于套餐*a*的需求;

c_1 表示使用车辆的固定成本;

c_2 表示车辆单位时间的运输成本;

Q 表示车辆的最大载重;

d_{ij} 表示车辆从节点*i*到节点*j*经过的距离;

D 表示车辆的最大配送距离;

M 是一个很大的数。

决策变量:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{当车辆} k \text{从节点} i \text{到节点} j \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$y_k = \begin{cases} 1 & \text{车辆} k \text{被使用} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

u_{ik} 用于约束子回路。

1.3 数学模型

由上述问题描述,建立如下模型:

$$\min z_v = \sum_{k=1}^m y_k \quad (1)$$

$$\min z_c = c_0 \sum_{k=1}^m y_k + c_1 \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} d_{ij} x_{ijk} \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ijk} = 1, \forall j \in V_2, i \neq j \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{n+1} x_{ijk} = \sum_{j=1}^{n+1} x_{jik}, \forall i \in V_1, k \in K, i \neq j \quad (4)$$

$$u_{ik} - u_{jk} + nx_{ijk} \leq n - 1, \forall i \in V_1, j \in V_2, i \neq j, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{a=1}^l \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} q_{ia} x_{ijk} \leq Q, \forall k \in K, i \neq j \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} d_{ij} x_{ijk} \leq vT, \forall k \in K, i \neq j \quad (7)$$

$$x_{ijk} = \{0, 1\}, \forall i \in V_1, j \in V_2, k \in K \quad (8)$$

$$y_k = \{0, 1\}, \forall k \in K \quad (9)$$

$$y_k \geq \frac{1}{M} \sum_{j=1}^n x_{0jk}, \forall k \in K \quad (10)$$

其中,式(1)表示车辆使用最少的目标函数;式(2)表示成本最小的目标函数;式(3)表示小区访问唯一性约束;式(4)表示流量守恒约束;式(5)表示消除子回路约束;式(6)表示车辆载重约束;式(7)表示配送时长约束;式(8)和式(9)表示0~1变量约束;式(10)表示车辆使用约束。

2 求解方法

车辆路径问题是NP-hard问题,规模较大时很难短时间通过精确算法得到结果,而启发式算法可以较快求解。采用遗传算法,设计了相应的编码解码、适应度函数、遗传变异等规则。

2.1 编码解码方式

编码采用直接排序的自然数编码方式,将小区设为1, 2, ..., n ,自然数的排列。

解码时,将小区依次分配到车次,遇到限制无法分配时,分配至下一车次,直到所有小区都被分配。然后将车次分配至车辆,遇到限制无法分配时,分配至下一车辆,直到所有车次都被分配。

2.2 适应度函数

疫情背景下生鲜物资运输路径优化问题以车

辆数最小、成本最小为目标,解码操作以最小车次为目的,然后计算成本,作为适应度。适应度越高,意味着车辆数小、成本小,对应个体更好。

2.3 遗传变异规则

遗传:每次迭代舍弃适应度小的个体。

交叉:选取2个个体进行交叉操作,则将选中

个体的同一区域对调,然后处理重复点。如表1所示, $p1=(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9)$ 和 $p2=(9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1)$ 交叉,交叉位置为第2列、第3列, $p1'=(1, 8, 7, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 2, 3)$ 和 $p2'=(9, 2, 3, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 8, 7)$,去掉重复点后, $p1'=(1, 8, 7, 4, 5, 6, 9, 2, 3)$ 和 $p2'=(9, 2, 3, 6, 5, 4, 1, 8, 7)$ 。

表1 交叉示意

原始	$p1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
	$p2$	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
交叉	$p1'$	1	8	7	4	5	6	7	8	9	2	3
	$p2'$	9	2	3	6	5	4	3	2	1	8	7
去重	$p1'$	1	8	7	4	5	6	9	2	3		
	$p2'$	9	2	3	6	5	4	1	8	7		

变异:对某个体采取变异操作,则随机选取该个体2个基因值进行交换。

2.4 算法流程

算法步骤如图1所示。

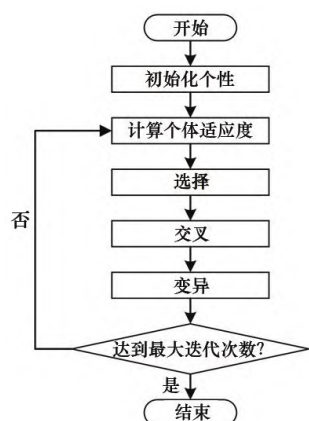


图1 算法步骤

算法经过不断迭代,目的是找到最优个体。首先初始化个体,按照随机选择服务顺序的方式生成每个个体,构成整个个体群;然后计算每个个体的适应度,进行选择、交叉、变异等操作,通过判断是否达到最大迭代次数决定是否终止。

3 算例分析

以北京市为例,经过调查和访谈,综合疫情期间配送量、配送力量等考虑,选定了某生鲜配送站

以及周边99个小区(编号为1~99)为研究对象,该99个小区在疫情期间与配送站有配送关系,其地理信息以高德地图为准。设定每个小区需求范围为100~300 kg,车辆最大载重为3000 kg,车辆行驶速度为25 km/h。每辆车的固定成本为200元/辆,单位距离的运输成本为10元/m。为保证生鲜物资的状态以及运输人员配备防疫用品的有效使用期,配送时长不超过2 h。算法参数选取种群规模为200,迭代次数1000,交叉率60%,变异率60%。经过求解后,最优方案如表2所示。表中,第 n 行表示第 n 辆车依次前往的小区,如第3辆车依次前往小区68、67、46、92、94、41、11。

表2 最优方案

车辆	依次前往的小区
1	[44,83,13,31,63,43,42,65,76,89,54,72,9,82]
2	[23,19,28,93,25,78,99,51,66,88,57]
3	[68,67,46,92,94,41,11]
4	[50,60,58,87,2,15,14,10,22,48,38,18,95,73,30]
5	[21,17,34,61,70,47,53,85,7]
6	[8,84,4,32,27,33,79,56,62,71,52,36,29,86,20]
7	[37,40,1,39,80,26,64,77,6,3,55,81]
8	[69,5,90,75,35,12,16,24,96,74,45,97,59,91,49,98]

通过算法求解得到最优方案的所需车辆为8辆,每天所需的总成本为4468.23元。图2和图3为优化过程和最优方案。最优方案图横纵坐标为相对经纬度(以仓库经度为0°,维度为0°)。

图5与图6分别为初始需求和10倍需求的最优方案。单次车程服务小区数量的减少、货物的补充意味着每次的路程变短。在图6中的直观表现为车辆装载货物后,只能服务较少数量的小区。1

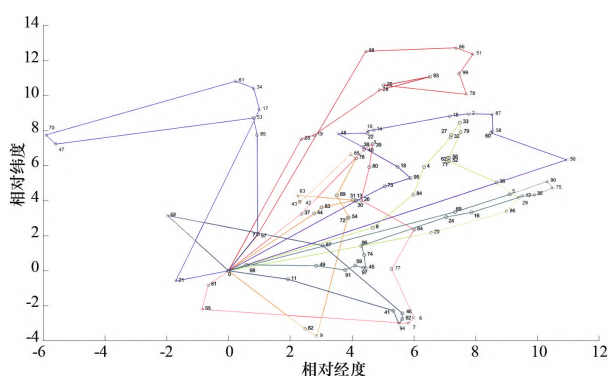


图5 初始需求最优方案

倍生鲜物资需求下,每辆车每次出发至少能服务7个小区,而10倍需求下,车辆每次出发,携带的货物往往只能服务1~2个小区。

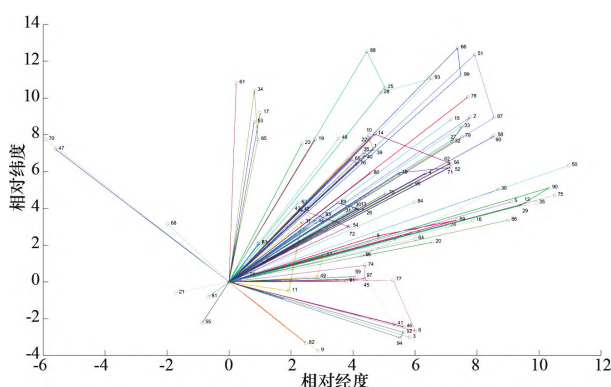


图6 10倍需求最优方案

4 结论

基于疫情背景下生鲜物资运输路径优化问题,考虑生鲜物资保存时长以及防护物资时长限制建立数学模型,构造遗传算法进行求解,分析不同需求量情景对方案的影响。结果表明,由于规模效应,总成本随需求量增加逐步上升但未同倍增加。其中,车辆数并不会随着需求量同倍增加,10倍需求需要约4倍车辆,并且平均每辆车都需返回仓库补货,所服务的小区数量相应减少。这表明当需求暴增时,企业不需要根据需求增加量同比例增加车辆数量;同时,同一车辆在负责某几个指定小区时的运输效率要大于负责全流程的运输效率。通过算法求解及结果分析,可在疫情或其他突发事件发生时,帮助企业更好应对生鲜物资需求激增的紧急情况,为企业优化运输方案、提升运输效率提供决策支持,从而达到用最少的配送车辆完成配送任务目标的同时实现配送总成本最小化。

进一步研究可以从以下方面开展:(1) 将装卸货时间考虑在内,包括在配送中心装货以及在小区卸货的时间;(2) 考虑多个仓库同时使用的情景;(3) 考虑小区需求量大于单个车辆的最大容量,即服务小区的车辆不止1个。

参考文献(References)

- [1] 阙丽娟. 新冠肺炎疫情下城市物流末端配送问题及对策分析[J]. 中国市场, 2021(8): 157-158.
- [2] 周学文. 新冠肺炎疫情对生鲜电商的影响[J]. 商场现代化, 2020(17): 17-19.
- [3] 李谷成. 新冠肺炎疫情对武汉农产品供应链的影响及对策[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2020(3): 7-13, 168-169.
- [4] 楼玉霄. 后疫情时期物流企业生鲜运输策略研究[J]. 中国物流与采购, 2020(17): 59-61.
- [5] 沈丽, 李成玉, 甘彦, 等. 考虑货损和碳排放的生鲜产品配送路径优化[J]. 上海海事大学学报, 2021, 42(1): 44-49.
- [6] 王成林, 郑颖, 皇甫宜龙, 等. 生鲜类物流配送网络选址-路径优化问题研究[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(10): 33-43.
- [7] 何婷, 侯汉平, 杨建亮. 疫情背景下生鲜电商企业车辆路径优化研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(7): 183-188.
- [8] 郭建宏, 钱莲文, 欧阳钟辉, 等. 基于GIS的城市水果物流分区配送辅助系统[J]. 中南林业科技大学学报, 2007(4): 119-122.
- [9] 赵文飞, 周刚, 杨树杰, 等. 带时间窗军事物资配送问题的NSGA-II算法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(11): 2513-2519.
- [10] Archetti C, Jabali O, Speranza M G. Multi-period vehicle routing problem with due dates[J]. Computers & Op-

- erations Research, 2015, 61: 122–134.
- [11] 孟小玲, 温海骏, 曾艾婧, 等. 基于改进 ACO 的战后物资回收车辆路径优化[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(9): 47–51.
- [12] 康斌, 刘权, 黄健, 等. 突发事件下多目标应急救援物资配送路径规划[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(4): 1521–1527.
- [13] 李卓, 李引珍, 李文霞. 应急物资运输路径多目标优化模型及求解算法[J]. 计算机应用, 2019, 39(9): 2765–2771.
- [14] Fang Y, Zhang J. Based on fairness criterion for multi-objective emergency logistics distribution path selection [C]//Proceedings of the 6th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation. Paris: Atlantis Press, 2016: 713–720.
- [15] 何珊珊, 任晴晴, 张艳芳, 等. 救援物资运输最短时间优化模型[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2013, 32(9): 1293–1296.
- [16] Wohlgemuth S, Oloruntoba R, Clausen U. Dynamic vehicle routing with anticipation in disaster relief[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2012, 46(4): 261–271.
- [17] Zhang L, F Teng, Liu T, et al. Emergency logistics routing optimization algorithm based on FSACO[C]//International Conference on Artificial Intelligence & Computational Intelligence. Berlin Heidelberg: Springer, 2011: 163–170.
- [18] 刘晨帆, 陈焕新, 徐振. 一种利用网络分析实现高效救灾物资运输的方法[J]. 测绘与空间地理信息, 2009, 32(5): 121–123.
- [19] 刘娜, 张玺, 石超峰. 疫情期间社区商超物资配送路径优化研究[J]. 交通科技与经济, 2020, 22(5): 39–44.

Study on the optimization of transportation path of fresh materials under COVID-19 epidemic

ZHANG Shouhao^{1,2}, HAN Wei³, LI Wenwen^{1,2}, LIU Guojia^{2,4}, CHEN An^{1*}

1. Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Development Strategy Research Center, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100041, China
4. School of Public Policy and Management, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Under the background of COVID-19 epidemic, the domestic quarantine policy has led to a surge in demand for fresh supplies in the community. The insufficiency of resuming work has led to the limited distribution capacity of fresh food enterprises, and the transportation of fresh materials has faced more challenges. Based on the distribution time limit of fresh food enterprises, considering the preservation time of fresh supplies and the protection time of epidemic prevention supplies, this paper takes the community where consumers are located as the demand point and builds up an optimization model for the transportation path of fresh supplies under the background of pandemic. According to the model, a genetic algorithm is designed to solve the problem quickly. On the premise of completing the distribution task, an optimal transportation plan is obtained so as to minimize the enterprise's distribution cost. At the same time, changes of the number of vehicles required under different demand conditions are analyzed and it is shown that the number of vehicles required does not increase with the demand.

Keywords COVID-19 epidemic; transport of fresh supplies; path optimization model; genetic algorithm ●



(责任编辑 傅雪)