

控制与决策

Control and Decision

“双碳”背景下联合配送冷链物流模型及其求解算法

陈雨蝶, 干宏程, 程亮

引用本文:

陈雨蝶, 干宏程, 程亮. “双碳”背景下联合配送冷链物流模型及其求解算法[J]. *控制与决策*, 2023, 38(7): 1951–1959.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.2192>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于配送收益均衡的多目标绿色车辆路径优化算法](#)

A multi-objective green vehicle routing optimization algorithm based on delivery benefit balance

控制与决策. 2023, 38(2): 365–371 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0669>

[考虑载重影响耗电率的电动车车辆路径问题](#)

Electric vehicle routing problem with time window and linear weight-related discharging

控制与决策. 2023, 38(2): 483–491 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1050>

[集货需求可拆分的多越库中心库门分配及车辆路径协同优化](#)

Multi-depot vehicle routing problem with split pickup and cross-dock door assignment collaborative optimization

控制与决策. 2023, 38(2): 501–509 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0298>

[考虑时变速度的多车场绿色车辆路径模型及优化算法](#)

Multi-depot green vehicle routing model and its optimization algorithm with time-varying speed

控制与决策. 2022, 37(2): 473–482 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1427>

[面向冷链物流配送路径优化的知识型蚁群算法](#)

Knowledge based ant colony algorithm for cold chain logistics distribution path optimization

控制与决策. 2022, 37(3): 545–554 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0160>

“双碳”背景下联合配送冷链物流模型及其求解算法

陈雨蝶^{1,2}, 干宏程^{1,2†}, 程亮^{1,2}

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200082; 2. 上海理工大学 超网络研究中心, 上海 200082)

摘要: 首先, 基于“双碳”战略目标的提出以及物流企业低碳转型的发展趋势, 以多中心冷链物流绿色车辆路径问题为研究对象, 以碳排放成本、配送成本和时间窗惩罚成本之和最小化为优化目标, 建立考虑联合配送和碳交易机制的冷链物流模型; 然后, 针对遗传算法局部搜索能力差、收敛速度慢等缺点, 设计一种具有变邻域搜索操作和动态灾变机制的多种群遗传算法, 以标准算例集验证该算法在寻优能力、稳定性、收敛速度等方面的优势; 最后, 通过实验验证所提出模型的有效性, 并从联合配送、决策目标、碳交易机制等多角度进行分析, 为冷链物流企业和政府提供管理启示。

关键词: 冷链物流; 联合配送; 碳交易机制; 多种群遗传算法; 变邻域搜索; 动态灾变机制

中图分类号: O224; TP301.6

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.2192

引用格式: 陈雨蝶, 干宏程, 程亮. “双碳”背景下联合配送冷链物流模型及其求解算法[J]. 控制与决策, 2023, 38(7): 1951-1959.

Cold chain logistics model based on joint distribution and its optimization algorithm under the background of double carbon

CHEN Yu-die^{1,2}, GAN Hong-cheng^{1,2†}, CHENG Liang^{1,2}

(1. School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200082, China; 2. Center for Supernetworks Research, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200082, China)

Abstract: Under the background of the “double carbon” objective and the low carbon transformation of logistics enterprises, a cold chain logistics model based on joint distribution and carbon trading mechanism is constructed. The model takes the multi-depot green vehicle routing problem in cold chain logistics as the research object, and minimizes carbon emission cost, distribution cost and time window penalty cost as the optimization objective. Then, a multiple population genetic algorithm with variable neighborhood search and dynamic catastrophe mechanism is designed to address the disadvantages of poor local search ability and slow convergence of genetic algorithms. And the advantages of the algorithm in terms of optimization ability, stability and convergence speed are confirmed by the standard instances. Finally, an example is analyzed from various perspectives such as joint distribution, objectives and carbon trading mechanism to verify the validity of the model and provide management insights for cold chain logistics enterprises and governments.

Keywords: cold chain logistics; joint distribution; carbon trading mechanism; multiple population genetic algorithm; variable neighborhood search; dynamic catastrophe mechanism

0 引言

自 2020 年中国在国际会议上承诺 2030 碳达峰、2060 碳中和以来, 政府颁布多项节能减排政策, 其中, 完善碳交易机制是政府推动“双碳目标”实现的重要抓手。碳交易机制将碳排放权视为一种商品, 政府分配给企业固定的碳配额, 若企业碳排放超出配额, 则需额外购买碳排放权; 反之, 可将剩余的碳排放权卖

出, 获得利润^[1]。2011 年以来, 中国已先后在 9 个省市成立碳交易所, 通过市场力量推动节能减排运动的实施, 加快低碳经济格局的构建。因此本文以“双碳”目标为背景, 将碳交易机制引入冷链物流模型中, 从冷链物流企业和政府的角度探讨降低碳排放的措施。

与普通物流不同, 冷链物流需要消耗更多的燃料来维持车厢内的低温环境, 保障产品的新鲜度和

收稿日期: 2021-12-19; 录用日期: 2022-05-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71871143).

†通讯作者. E-mail: hongchenggan@126.com.

*本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

质量,因此会产生更多的碳排放,对环境造成恶劣影响^[2];同时,基础设施不健全、客户分散、产品货损率高等均使得冷链运输成本居高不下.因此减少碳排放和配送成本是冷链物流企业获得竞争优势的重要途径,也是现阶段冷链物流相关研究的重点.方文婷等^[3]将油耗和碳排放成本转化为绿色成本,将其融入路径优化问题中,提出一种结合A*算法的混合蚁群算法求解模型.Zhang等^[4]将低碳经济引入冷链物流领域,并通过实例验证了其提出的模型和算法可帮助企业优化配送路线、降低运输成本.Liu等^[5]建立基于碳交易机制的冷链运输模型,采用模拟退火算法进行优化.Chen等^[6]针对电子商务企业小批量、多品种的运输需求,构建带硬时间窗的多车槽车辆路径模型,并提出变邻域搜索算法求解.任腾等^[7]建立考虑客户满意度的冷链物流模型,并设计知识型蚁群算法求解.

随着物流行业的发展,很多大型物流公司拥有多个配送中心,多中心车辆路径问题(multi-depot vehicle routing problem, MDVRP)成为新的研究热点.Montoya-Torres等^[8]系统地论述了求解MDVRP问题的精确算法、启发式算法和元启发式算法.周鲜成等^[9]通过K-means聚类方法将MDVRP转化为VRP问题,并提出改进蚁群算法求解.Kuo等^[10]针对MDVRP问题设计一种变邻域搜索算法,并引入模拟退火次解接收机制.范厚明等^[11]建立基于联合配送集货需求随机的同时配集货车车辆路径问题模型,并设计多组算例验证联合配送模式的有效性.胡静^[12]采用遗传算法求解多中心电动汽车路径优化问题,并验证了联合配送模式可提高配送效率、降低配送成本.

冷链物流是车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP)的扩展,属于典型的NP-hard问题.遗传算法(genetic algorithm, GA)作为一种常见的启发式算法,具有良好的鲁棒性和全局搜索能力,广泛应用于求解VRP及其扩展问题.Nazif等^[13]使用优化交叉算子提高遗传算法的性能,并用标准算例集验证算法的有效性.葛显龙等^[1]结合聚类分析和扫描算法设计一种混合遗传算法,用于求解带时间窗的多车型车辆路径问题.范厚明等^[14]针对时变路网下异型车辆路径优化问题设计改进自适应遗传算法,每次迭代时交叉变异概率会自适应调整,加快算法收敛速度.

上述文献为冷链物流相关理论研究做出了重要贡献,但仍然存在一些不足之处:1)由于冷链物流高能耗、高污染、产品易腐烂等特性,在模型中考虑损坏、制冷和碳排放成本是必要的,但是很多现有研究

并未综合考虑冷链物流中的各项成本^[6-7].2)部分学者将车辆早到时产生的等待成本归于惩罚成本,并将其设定为关于时间的线性函数^[4-5].然而冷藏车在等待时需要消耗燃料保持车厢内的低温环境,会产生油耗、制冷、损坏、碳排放等成本,这些成本不仅与时间有关,还会受到载重、客户点需求等因素的影响,因此将其简化为关于时间的线性函数并不合理.3)现有研究已证实了联合配送模式可有效降低物流运输成本和碳排放^[5,11-12],但鲜有文献将联合配送模式纳入冷链MDVRP问题中.随着冷链物流行业的迅速发展以及“双碳目标”的提出,研究低碳背景下的联合配送冷链物流问题具有十分重要的现实意义.

基于上述分析,本文针对冷链物流配送模型及其求解算法做出改进,主要工作和内容如下:1)建立更加完善的联合配送冷链物流模型,综合考虑碳排放成本、固定成本、油耗成本、制冷成本、损坏成本和惩罚成本,并在各项成本中合理地计算车辆等待时产生的费用,对现有研究进行完善和补充.2)提出一种具有变邻域搜索操作和动态灾变机制的多种群遗传算法,并用标准算例集验证所提出算法的有效性和稳定性.3)通过仿真实验对比分析分区配送与联合配送两种模式,为冷链物流企业的未来发展方向提供理论基础和参考建议;研究碳价格变化对碳排放量和企业运输总成本的影响,为政府制定碳交易机制相关政策提供参考.

1 问题描述和模型建立

1.1 问题描述

本文建立的冷链物流模型是由 m 个客户点和 n 个配送中心构成的二级供应链网络.每个配送中心均拥有足够多的冷藏车,冷藏车统一在规定时间内开始配送并在服务客户后返回距车辆最近的配送中心.其目标是在满足车辆载重和客户需求限制的前提下,合理规划冷藏车使用数量和运输路线,实现运输总成本最小化.

该模型可描述为一个有向图 $G = \{V, E\}$,其中 $V = \{0, 1, \dots, m-1, m, \dots, m+n-1\}$,客户点集合 $V_c = \{0, 1, \dots, m-1\}$,配送中心集合 $V_d = \{m, m+1, \dots, m+n-1\}$; E 为弧集, $E = \{(i, j) | i \neq j, i \in V, j \in V\}$;节点 i 与 j 的距离为 d_{ij} .车辆集合 $K = \{1, 2, \dots, k, \dots, k_s\}$, k_s 为车辆数,所有车辆同质,车速为 v_k ,最大载重为 Q .配送中心时间窗为 $[DET, DLT]$,客户 i 的需求量为 q_i ,软时间窗为 $[ET_i, LT_i]$, ET_i 和 LT_i 分别为客户 i 期望的最早服务时间、最晚服务时间,若车辆在 ET_i 前到达,则需等待至 ET_i 时刻才能

为客户服务. 模型假设如下: 1) 配送中心位置和客户端位置、需求、时间窗均已知. 2) 每个客户端的需求必须被满足, 且只能由一辆车一次性满足. 3) 每条路径的需求之和不得超过车辆最大载重.

决策变量定义为

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{车辆 } k \text{ 从节点 } i \text{ 行驶至节点 } j; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{客户点 } i \text{ 由车辆 } k \text{ 满足;} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

1.2 目标函数设计

1.2.1 碳排放成本

由文献[5]可知, 车辆在配送过程中的碳排放量与油耗可表示为一种线性关系. 冷链物流中的油耗又可分为2个部分: 车辆行驶时的油耗和车辆制冷时的油耗. 碳排放成本的详细计算过程如下:

$$f_1 = \sum_{i \in V_c} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} x_{ijk} \left(\rho + \frac{\rho^* - \rho}{Q} Q_{ij} \right) d_{ij}. \quad (3)$$

其中: f_1 为车辆行驶时的油耗, 与运输距离和车辆载重有关; ρ 和 ρ^* 分别为车辆空载和满载时的单位距离油耗; Q_{ij} 为车辆在节点 i 与节点 j 间的载重.

$$f_2 = \omega_2 \sum_{i \in V_c} s_i + \omega_1 \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} x_{ijk} \frac{d_{ij}}{v_k} + \omega_1 \sum_{i \in V_c} \max\{(ET_i - t_i), 0\}. \quad (4)$$

其中: f_2 为车辆制冷时的油耗, 与运输时间有关; ω_1 为运输和等待时单位时间制冷的油耗; ω_2 为服务时单位时间制冷的油耗. 运输和等待过程中车门关闭, 服务过程中车门打开, 车内的冷空气流出, 外部的热空气流入, 为保持车厢内部温度不变, 制冷设备需要消耗更多的燃料, 因此单位时间的油耗有所差异, 一般情况下, $\omega_2 > \omega_1$; s_i 为车辆在客户点 i 处的服务时间; t_i 为车辆到达节点 i 的时间; $\max\{(ET_i - t_i), 0\}$ 为车辆在客户点 i 处的等待时间.

$$F_1 = C_c \times [\eta^*(f_1 + f_2) - T_m]. \quad (5)$$

其中: F_1 为碳排放成本, η 为碳排放系数, T_m 为碳配额, C_c 为单位碳价格.

1.2.2 配送成本

1) 固定成本(FC).

$$FC = C_k \times k_s. \quad (6)$$

其中: FC为固定成本, 包括车辆的日常维护费、折旧费、司机的工资等, 与冷藏车的数量成正比关系; C_k 为每辆车的固定成本.

2) 油耗成本(OC).

$$OC = C_f \times (f_1 + f_2). \quad (7)$$

其中: OC为油耗成本(单纯计算油耗, 不包含碳排放成本), C_f 为单位燃油价格.

3) 制冷成本(RC).

冷链产品具有易腐特性, 为了保持产品新鲜度, 需要消耗制冷剂维持车厢内的低温环境, 因而会产生一定的制冷成本(制冷过程中的燃油消耗在油耗成本中已经计算, 此处不再重复考虑), 有

$$RC = \alpha_2 \sum_{i \in V_c} s_i + \alpha_1 \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} x_{ijk} \frac{d_{ij}}{v_k} + \alpha_1 \sum_{i \in V_c} \max\{(ET_i - t_i), 0\}. \quad (8)$$

其中: RC为制冷成本, α_1 为运输和等待时单位时间的制冷剂成本, α_2 为服务时单位时间的制冷剂成本.

4) 损坏成本(DC).

在配送过程中, 由于时间、微生物增长、车门开关引起的温度不稳定等因素, 货物会造成一定程度的损害, 产生损坏成本. 本文采用货物新鲜度衰减函数计算损坏成本^[3], 有

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-\delta t}. \quad (9)$$

其中: $\theta(t)$ 为 t 时刻货物新鲜度, θ_0 为货物初始新鲜度, δ 为货物新鲜度衰减系数.

$DC_1 =$

$$C_p \times \sum_{i \in V_c} \sum_{k \in K} y_{ik} q_i (1 - e^{-\delta_1 (\max\{t_i, ET_i\} - DET)}). \quad (10)$$

其中: DC_1 为运输和等待时的损坏成本, δ_1 为运输和等待时的货物新鲜度衰减系数, DET为车辆出发时间, C_p 为单位质量产品价格.

$$DC_2 = C_p \times \sum_{i \in V_c} \sum_{k \in K} y_{ik} Q_i (1 - e^{-\delta_2 s_i}). \quad (11)$$

其中: DC_2 为服务时的损坏成本, Q_i 为车辆从客户点 i 处离开时的载重, δ_2 为服务时的货物新鲜度衰减系数.

$$DC = DC_1 + DC_2, \quad (12)$$

其中DC为损坏成本.

5) 配送成本.

$$F_2 = FC + OC + RC + DC, \quad (13)$$

其中 F_2 为配送成本.

1.2.3 时间窗惩罚成本

客户对冷链产品的配送时效性有严格的要求, 为了更好地满足客户对时间窗的需求, 本文在目标函数中引入时间窗惩罚成本. 无论车辆早到或迟到, 客户满意度均会降低, 企业需额外支付惩罚成本, 即

$$F_3 = \sum_{i \in V_c} [\beta_1 \times \max\{(ET_i - t_i), 0\}] + \sum_{i \in V_c} [\beta_2 \times \max\{(t_i - LT_i), 0\}]. \quad (14)$$

其中: F_3 为时间窗惩罚成本, β_1 和 β_2 为车辆早到或晚到时的单位时间惩罚成本.

1.3 模型建立

本文具体模型如下:

$$\min F = F_1 + F_2 + F_3. \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i \in V_d} \sum_{j \in V_c} x_{ijk} = \sum_{i \in V_d} \sum_{j \in V_c} x_{jik} = 1, k \in K; \quad (16)$$

$$\sum_{i \in V_d} x_{ijk} = 0, j \in V_d, i \neq j, k \in K; \quad (17)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V} x_{ijk} = 1, i \in V_c, j \neq i; \quad (18)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{ijk} = 1, j \in V_c, i \neq j; \quad (19)$$

$$\sum_{i \in V_c} q_i y_{ik} \leq Q, k \in K; \quad (20)$$

$$DET \leq t_i \leq DLT, i \in V; \quad (21)$$

$$t_j = \sum_{k \in K} \sum_{i \in V_c} \left(\max\{t_i, ET_i\} + s_i + \frac{d_{ij}}{v_k} \right) x_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{l \in V_d} \left(DET + \frac{d_{lj}}{v_k} \right) x_{ljk}, j \in V_c; \quad (22)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, S \subseteq V_c, k \in K; \quad (23)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, i \in V, j \in V, k \in K; \quad (24)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\}, i \in V, k \in K. \quad (25)$$

其中: 式(15)为模型的目标函数, 式(16)~(25)为模型的约束条件. 约束(16)表示车辆须从配送中心出发, 服务客户后仍须返回配送中心(未必为出发时的配送中心); 约束(17)表示车辆不能连续经过2个配送中心; 约束(18)和约束(19)表示每个客户点只能被1辆车服务1次; 约束(20)表示每条路径上的客户需求之和不得超过车辆的最大载重; 约束(21)表示时间窗限制条件; 约束(22)表示车辆从一个配送中心或一个客户点行驶至另一个客户点需要满足的时间关系; 约束(23)表示防止形成子回路; 约束(24)和约束(25)表示0-1变量.

2 算法设计

本文提出一种具有变邻域搜索操作的灾变遗传算法(catastrophic genetic algorithm with variable neighborhood search, CGA-VNS)来求解模型. 遗传算

法是基于群体智能的启发式算法, 通过模拟自然界中生物进化过程寻求最优解, 拥有良好的鲁棒性和全局搜索能力. 变邻域搜索算法(VNS)是基于个体行为的启发式算法, 从一个初始解出发, 使用多种不同的邻域结构对解空间进行深度搜索, 具有很强的局部开发能力. 本文将VNS应用于GA中, 充分利用GA的全局搜索能力和VNS的局部开发能力; 并引入多种群并行进化和动态灾变机制, 避免算法陷入局部最优和早熟收敛. CGA-VNS具体流程如图1所示.

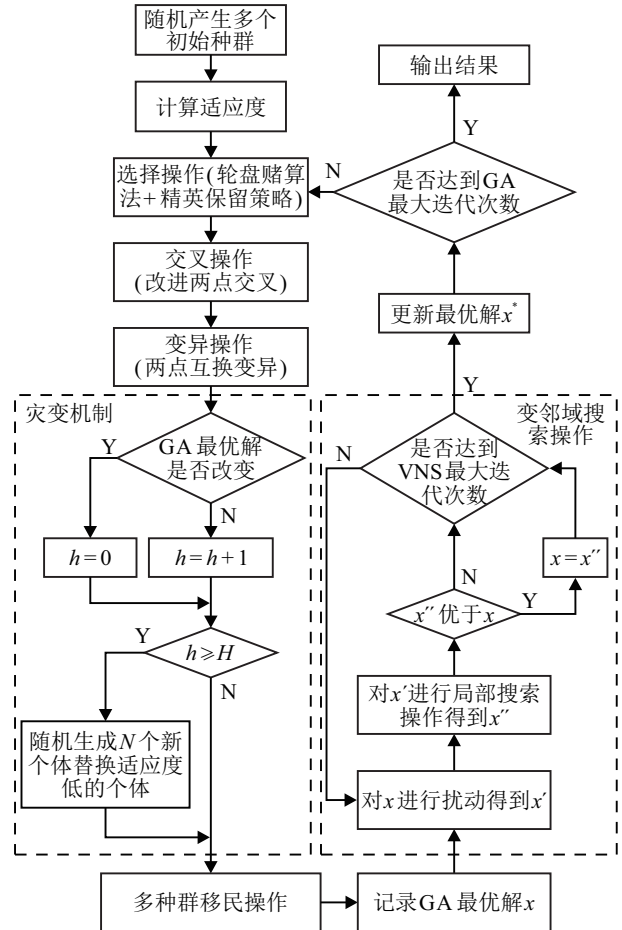


图1 CGA-VNS流程

2.1 染色体编码

本文采用自然数编码, 每条染色体均为包含 $0, 1, \dots, m - 1$ 的序列 (m 为所有客户点数量). 解码时根据载重约束将配送中心插入序列, 并分解为具体的路径. 这种编码方式确保染色体长度固定不变且每条染色体均可解码为一种可行的路径方案, 有利于算法进行后续的遗传操作和变邻域搜索操作, 提高算法运行效率.

2.2 种群初始化和适应度函数

随机生成 pop_num 个种群, 包括一个主群和 $pop_num - 1$ 个属群, 每个种群均包含 pop_size 个染色体. 每条染色体对应一个可行解, 可计算出适应度

值. 染色体的基因越优良,其适应度便越高,在遗传操作中存活下来的概率也越大. 本文的优化目标是实现运输总成本最小化,因此选择式(15)的倒数为适应度函数,即 $f=1/F$.

2.3 遗传操作

2.3.1 选择操作

本文采用轮盘赌算法和精英保留策略. 在选择操作开始前,预留一定数目的精英个体,并在遗传操作后直接替换种群中较劣的个体. 精英保留策略可确保优良个体不会丢失或损坏,帮助算法以更高概率收敛至全局最优解. 轮盘赌算法要求计算出个体适应度与种群总适应度的比值,该比值即为对应个体被选择的概率. 个体适应度越高,被选择的概率越大.

2.3.2 交叉操作

本文采用改进两点交叉,选择父代染色体 P_1 、 P_2 和交叉点位置 X 、 Y ,则 X 、 Y 中间的基因为交叉部分,将 P_2 中的交叉部分加至 P_1 前端,将 P_1 中的交叉部分加至 P_2 末尾,并删除染色体中相同的基因得到子代 C_1 和 C_2 . 最后选择 P_1 、 P_2 、 C_1 、 C_2 中最优的2个个体加入新种群. 这种交叉方法可保证产生的子代为可行解,且当2个父代染色体相同时仍然可产生新的子代,丰富种群多样性,避免算法陷入早熟收敛.

2.3.3 变异操作

本文采用两点互换变异,交换染色体2个基因的位置得到新个体. 此处的变异操作是单向的,只有当新个体的适应度值更高时才接受新个体.

2.4 动态灾变机制

当遗传算法连续迭代多次均无法产生更好的解时调用灾变机制. 灾变机制包括灾变条件和灾变方式. 灾变条件:设置灾变计数器 h 的初始值为0,灾变临界值 $H=50$,GA 最优解改变时令 $h=0$,反之令 $h=h+1$;当 $h \geq H$ 时,发生灾变. 灾变方式:淘汰种群中适应度较低的 N 个个体,随机生成 N 个新个体加入当前种群,提高种群的多样性;灾变规模 N 并不是恒定不变的,而是随着迭代次数的增加而减少,以保证算法后期的稳定性^[5].

$$N = \left[N_0 \times \exp \left\{ - \frac{\lambda \times \text{gen_GA}}{\text{gen_GA_max}} \right\} \right]. \quad (26)$$

其中: N 为灾变规模, N_0 为预设灾变规模, λ 为控制参数, gen_GA 为GA 当前迭代次数, gen_GA_max 为GA 最大迭代次数.

2.5 多种群移民操作

多种群并行进化,独立进行选择、交叉、变异、灾变操作. 之后进行种群间的移民操作,即将属群最优

的一部分个体替换主群中较差的个体,并将主群最优个体替换属群中较差的个体,帮助所有种群达到更高的平衡态,提高算法的收敛速度^[16]. 各种群设定不同的交叉变异概率,使得种群朝不同的方向演化,全面增强算法的搜索能力. 图2为以3个种群为例的移民操作.

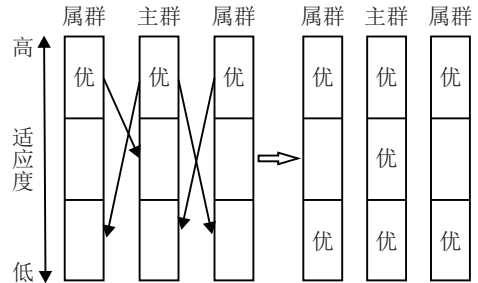


图2 移民操作示意图

2.6 变邻域搜索操作

选择GA 每次迭代后的最优解作为VNS 的初始解,以寻求更高质量的解决方案. 局部搜索操作和邻域结构的设计是VNS 的核心,对算法的性能有重要影响. 本文设计了10种路径内和路径间的邻域结构,充分发挥VNS 的局部开发能力.

2.6.1 路径内邻域结构

具体操作如下: 1) insert-1: 将一条路径中的1个客户点插入至同路径其他位置; 2) insert-2: 将一条路径中2个连续客户点插入至同路径其他位置; 3) insert-3: 将一条路径中3个连续客户点插入至同路径其他位置; 4) exchange: 将一条路径中2个客户点交换位置; 5) reverse: 将一条路径中几个连续客户点进行逆转操作.

2.6.2 路径间邻域结构

具体操作如下: 1) shift(1, 0): 将路径 r_1 中的1个客户点插入至路径 r_2 ; 2) shift(2, 0): 将路径 r_1 中的2个连续客户点插入至路径 r_2 ; 3) swap(1, 1): 交换路径 r_1 、 r_2 中的1个客户点; 4) swap(m_1 , m_2): 交换路径 r_1 、 r_2 中的部分客户点; 5) crossover(m_1 , m_2): 将路径 r_1 、 r_2 中的部分客户点逆转后交换.

3 数值实验

3.1 CVRP标准算例实验

本文选用CVRP 标准算例(算例数据来源: <http://vrp.atd-lab.inf.puc-rio.br/index.php/en/>) 来验证算法的性能. 经过多次测试,CGA-VNS 的具体参数设置如下: $\text{pop_num} = 3$, $\text{pop_size} = 300$, $\text{gen_GA_max} = 500 \sim 3000$, $\text{gen_VNS_max} = 10$, $P_c = 0.8 \sim 0.9$, $P_m = 0.1 \sim 0.2$, $N_0 = 30$, $\lambda = 0.75$. GA 是指基础的遗传算法,CGA 是指包含多种群并行进化和灾变机制的改

进遗传算法. 算法采用 Python 语言编译, 在 CPU 为 2.40 GHz, 内存为 4 GB 的计算机上运行.

本文以算例 A-n 45-k 7 为例, 通过对比 GA、CGA、VNS 与 CGA-VNS 四种算法在相同运行时间内的误差以验证算法的有效性, 结果如表 1 所示. 其中, 算

表 1 不同决策目标结果对比

	最优解	最优解误差/%	平均解	平均解误差/%
GA	1192	4.01	1201	4.80
CGA	1166	1.75	1180	2.97
VNS	1177	2.71	1193	4.10
CGA-VNS	1146	0.00	1149	0.26

法运行时间均为 1 min, 运行次数为 10. 对比 GA 与 CGA 可见, 多种群并行进化和灾变机制可使得 GA 在相同运行时间内获得更优质的解. 对比 CGA-VNS 与其他 3 种算法可见, CGA-VNS 可在 1 min 内找到算例最优解, 平均解误差仅为 0.26%, 其收敛速度比其他 3 种算法更快.

此外, 本文利用 CGA-VNS 算法求解 15 个 CVRP 标准算例, 并将其与传统遗传算法 GA 和 3 种先进的启发式算法 MC-ABC^[17]、ISA-CO^[18]、CVRP-FA^[19] 进行对比, 结果如表 2 所示. 由表 2 可见, CGA-VNS 具有良好的寻优能力和稳定性, 可有效地解决 VRP 问题.

表 2 算例仿真结果

instances	m	K_s	Q	BKS	MC-ABC		ISA-CO		CVRP-FA		GA		CGA-VNS	
					best/%	avg/%	best/%	avg/%	best/%	avg/%	best/%	avg/%	best/%	avg/%
A-n 45-k 7	44	7	100	1146	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.64	2.18	4.45	0.00	0.00
A-n 46-k 7	45	7	100	914	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.39	5.80	0.00	0.00
A-n 48-k 7	47	7	100	1073	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.19	6.71	0.00	0.00
A-n 53-k 7	52	7	100	1010	0.00	0.00	0.47	0.10	0.48	0.48	3.47	6.53	0.00	0.20
A-n 54-k 7	53	7	100	1167	0.00	0.00	0.00	0.43	0.43	0.43	3.51	6.94	0.00	0.00
A-n 55-k 9	54	9	100	1073	0.00	0.00	0.05	0.09	0.52	0.52	3.17	5.78	0.00	0.00
A-n 60-k 9	59	9	100	1354	0.00	0.00	0.22	0.07	0.79	0.79	3.62	7.39	0.00	0.07
A-n 61-k 9	60	9	100	1034	0.10	0.00	0.21	0.48	1.39	1.39	6.09	8.41	0.00	0.10
A-n 62-k 8	61	8	100	1288	0.31	0.08	0.68	0.78	1.88	1.88	7.30	9.32	0.00	0.62
A-n 63-k 9	62	9	100	1616	0.68	0.62	0.79	0.00	1.48	1.48	4.33	8.29	0.00	0.62
A-n 63-k 10	62	10	100	1314	0.46	0.00	0.26	0.87	1.78	1.78	6.32	7.69	0.23	0.38
A-n 64-k 9	63	9	100	1401	1.07	0.57	0.97	1.36	1.71	1.71	5.28	7.99	0.86	0.93
A-n 65-k 9	64	9	100	1174	0.00	0.00	0.24	0.34	0.57	0.57	4.17	8.86	0.26	0.26
A-n 69-k 9	68	9	100	1159	0.95	0.00	0.45	0.26	1.29	1.29	5.61	8.89	0.00	0.43
A-n 80-k 10	79	10	100	1763	1.30	0.91	1.27	0.57	1.37	1.37	8.91	11.46	0.06	0.68
average	-	-	-	-	0.32	0.15	0.37	0.36	0.96	0.96	4.77	7.63	0.09	0.29

注: m 为客户点数量, k_s 为车辆数, Q 为容量限制, BKS 为已知最优解, best/% 为最优解误差, avg/% 为平均解误差.

3.2 仿真实验

为了验证所提出模型的有效性, 本文参照文献 [5] 和文献 [14] 设计了一个中等规模的仿真实验. 客户点和配送中心的坐标、需求和时间窗信息如表 3 所示. 其余参数设置如下: $DET = 8$, $v_k = 50 \text{ km/h}$, $Q =$

5 t , $\rho = 0.16 \text{ L/km}$, $\rho^* = 0.25 \text{ L/km}$, $\omega_1 = 1 \text{ L/h}$, $\omega_2 = 1.5 \text{ L/h}$, 产品卸货速度 $v_p = 3.6 \text{ t/h}$, 则 $s_i = q_i/v_p$, $\eta = 2.61 \text{ kg/L}$, $C_c = 250 \text{ 元/t}$ (EUETS), $C_k = 150 \text{ 元/辆}$, $C_f = 6.68 \text{ 元/L}$, $\alpha_1 = 10 \text{ 元/h}$, $\alpha_2 = 15 \text{ 元/h}$, $\delta_1 = 0.001$, $\delta_2 = 0.002$, $C_p = 5000 \text{ 元/t}$, $\beta_1 = \beta_2 = 50 \text{ 元/h}$.

表 3 客户和物流中心基本信息

编号	X/km	Y/km	需求/t	ET	LT	编号	X/km	Y/km	需求/t	ET	LT	编号	X/km	Y/km	需求/t	ET	LT
0	56	78	0.7	8.5	11.5	14	7	27	1.4	9	11	28	41	98	1.4	9.5	11
1	84	39	1.3	9.5	11	15	92	4	0.9	9	12	29	70	77	0.7	8.5	12
2	21	5	0.9	9.5	11	16	78	94	1.1	8.5	12.5	30	19	71	0.5	8	11
3	58	65	0.9	8.5	12	17	41	59	1.2	9.5	12.5	31	85	69	0.8	8.5	12
4	46	10	1	8	12	18	10	12	0.5	10	12	32	9	60	1.1	8.5	11
5	54	27	0.9	9.5	11.5	19	1	42	0.8	9.5	12	33	73	13	1.4	9.5	11
6	24	98	1.4	8	12.5	20	25	47	1.2	9.5	11	34	43	22	0.7	10	12.5
7	40	41	1	10	12	21	27	24	0.8	8	11.5	35	7	90	0.7	9	11.5
8	71	63	0.5	9	11.5	22	60	9	1.5	9	11.5	D36	17	82	0	8	16
9	88	93	1	10	12	23	95	48	1.5	8	11	D37	81	80	0	8	16
10	99	81	0.5	9	11	24	94	22	1.3	9	11.5	D38	20	32	0	8	16
11	37	73	1.4	9.5	11.5	25	36	91	0.6	10	12.5	D39	76	25	0	8	16
12	72	46	1.5	9.5	11.5	26	63	88	1.1	10	12.5	-	-	-	-	-	-
13	46	79	1.1	9.5	11.5	27	61	40	0.7	9	11.5	-	-	-	-	-	-

注: ET、LT 中 8 为 8:00, 8.5 为 8:30, 其他可以此类推.

此外,在分区配送模式下,所有客户点分别划分至4个区域,每个配送中心只服务其所在区域的客户,此时每个配送中心的碳配额 T_m 为50 kg;在联合配送模式下,各配送中心共享产品、客户、车辆等资源,共同服务所有客户,此时碳配额 T_m 为200 kg.

3.2.1 分区配送和联合配送对比分析

采用CGA-VNS求解分区配送和联合配送两种模式下的最优路径和最低成本,结果如表4和表5所示.

表4 分区配送和联合配送最优路径

	路径	装载率/%
分区配送	[D 36, 30, 32, 17, 11, 35, D 36]	98
	[D 36, 6, 28, 25, 13, D 36]	90
	[D 37, 31, 10, 16, 9, D 37]	68
	[D 37, 29, 8, 3, 0, 26, D 37]	78
	[D 38, 21, 14, 19, 20, D 38]	84
	[D 38, 4, 2, 18, 34, 7, D 38]	82
	[D 39, 22, 33, D 39]	58
	[D 39, 23, 12, 27, 5, D 39]	92
	[D 39, 15, 24, 1, D 39]	70
联合配送	[D 36, 30, 32, 20, 17, 7, D 38]	100
	[D 36, 6, 28, 25, 35, D 36]	82
	[D 38, 21, 14, 19, 18, 2, D 38]	88
	[D 39, 24, 15, 33, D 39]	72
	[D 39, 4, 22, 5, 34, D 38]	82
	[D 37, 29, 0, 11, 13, 26, D 37]	100
	[D 39, 23, 1, 12, 27, D 39]	100
	[D 37, 3, 8, 31, 10, 9, 16, D 37]	96

表5 不同配送模式结果对比

	分区配送	联合配送
总成本 F /元	3 648.97	3 426.86
总距离/km	837.90	784.81
总时间/h	28.98	27.51
车辆数/辆	9	8
碳排放量/kg	520.69	495.77
满足时间窗客户数	27	30
惩罚成本/元	111.04	90.71

分析表4和表5可得出以下结论.

1) 分区配送并没有共享配送中心的客户和车辆资源,易造成车辆装载率低的现象,如路线[D 39, 22, 33, D 39]和[D 37, 31, 10, 16, 9, D 37]的装载率为58%和68%,而联合配送的车辆数为8,每条路线的装载率均在70%以上,其中有3辆的装载率高达100%,可见这种配送模式可充分利用车辆资源,减少运输过程中的车辆数.同时总距离、总时间和总成本相对于分区配送也分别减少了6.34%、5.07%、6.09%.对冷链物流公司而言,联合配送是一种更为经济的配送模式,可帮助企业节省物流成本.

2) 联合配送模式下碳排放量为495.77 kg,与分区配送相比减少了4.79%,可缓解碳排放对环境的恶劣

影响.其原因是联合配送减少了车辆运输的总距离和总时间,而距离和时间是影响碳排放的显著因素.

3) 联合配送的惩罚成本为90.71元,与分区配送相比减少了20.33元,即车辆早到或迟到的时间减少了约24 min,且有30个客户完全符合时间窗要求.因此,联合配送模式可在控制成本的前提下合理地规划运输路线和客户服务顺序,更有效地满足客户的时间窗需求,提高客户满意度.

通过以上分析可知,联合配送模式能够同时降低碳排放量和企业的运输成本,提高客户满意度.对于小型冷链物流公司而言,可加强公司层面的合作,联合起来共同配送,突破公司的发展瓶颈;对于大型冷链物流公司而言,可由分区配送发展为联合配送,降低企业的经营成本,以获得相对于竞争对手的优势.

3.2.2 不同决策目标对比分析

为了分析不同决策目标对路径优化的影响,本文分别以距离、 $F_2 + F_3$ (不考虑碳排放)、 $F_1 + F_2$ (不考虑惩罚成本)、 $F_1 + F_2 + F_3$ 为决策目标求解最优路径和最低成本,结果如表6所示.

表6 不同决策目标结果对比

	距离	$F_2 + F_3$	$F_1 + F_2$	$F_1 + F_2 + F_3$
总成本 F /元	3 961.65	3 428.33	3 450.82	3 426.86
碳排放成本 F_1 /元	65.82	76.61	66.21	73.94
配送成本 F_2 /元	3 447.56	3 288.21	3 205.70	3 262.20
惩罚成本 F_3 /元	448.27	63.51	178.91	90.71
总距离/km	709.51	802.16	726.21	784.81
总时间/h	32.57	27.31	28.10	27.51
车辆数/辆	9	8	8	8
碳排放量/kg	463.29	506.46	464.83	495.77
满足时间窗客户数	20	32	27	30

由表6可见:1)以距离最小化为目标时,车辆行驶距离虽然显著减少,但是总成本却增加了534.79元,由此可见运输距离与运输总成本并不是简单的正向线性关系,规划配送路线时只考虑距离是不合理的.2)当企业不考虑碳排放时,碳排放量、车辆行驶距离、运输总成本均有所增加,不利于企业的经济效益和社会的环境效益.在碳交易机制下,碳排放成本是企业实际支出的成本,考虑碳排放是必要的,不仅有利于保护环境,同时也帮助企业控制总成本.3)当企业不考虑惩罚成本时,仅有27个客户满足时间窗要求,客户满意度降低,对企业形象有很大的影响.4)当企业同时考虑碳排放、配送成本、客户满意度时,运输总成本最低,为3 426.86元,且碳排放量和惩罚成本也有显著减少.综上所述,考虑运输总成本可平衡企业、社会、客户3方面的权益,对企业而言是更经济的方式,同时以上分析也验证了所提出模型的有效性.

3.2.3 碳交易机制分析

当前我国交易市场的碳价格并不是固定不变的,会随时间变化而上升或下跌.为了分析碳价格对企业和社会环境的影响,本文求解了不同碳价格下的运输总成本和碳排放量,结果如表7和图3所示.由表7和图3可见,当碳价格由0元/t上升至50元/t时,企业的碳排放量并未发生改变;当碳价格在[50,1500]之间时,随着碳价格上涨,碳排放量逐渐下降,由506.46 kg降至464.83 kg,下降了8.22%,此时企业运输总成本呈不断上升的趋势;当碳价格大于1500元/t时,即使碳价格不断增长,企业碳排放量基本保持不变.

表7 碳价格变化结果

碳价格/(元/t)	碳排放量/kg	碳成本/元	总成本/元	碳成本占比/%
0	506.46	0.00	3351.72	0.00
50	506.46	15.32	3367.04	0.46
250	495.77	73.94	3426.86	2.16
500	495.77	147.89	3500.80	4.22
1000	484.75	284.75	3643.43	7.82
1500	464.83	397.25	3781.85	10.50
2000	464.83	529.66	3914.27	13.53
2500	464.83	662.08	4046.68	16.36
3000	464.83	794.49	4179.10	19.01

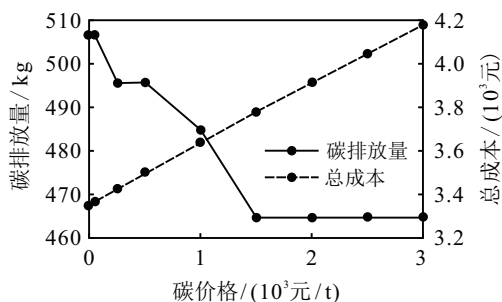


图3 不同碳价格下碳排放量和总成本变化

由分析可知,碳价格过高或过低均不能对企业的碳排放行为产生很好的约束.在本案例中[50,1500](单位:元/t)的碳价格区间是较为合理的,在该区间内,企业对碳价格更加敏感,他们会在规划配送路线时重点考虑碳排放,致力于降低油耗和碳排放量,减少成本.对于政府而言,合理控制碳交易价格,逐步完善碳交易机制,是推动节能减排运动实施的重要手段.

此外,值得一提的是,2019年和2020年我国试点碳交易均价仅为43元/t、34元/t,而2005年欧盟刚推出碳交易机制时,碳价格已达到20~25欧元/t(约合人民币150~190元/t).近年来欧盟碳价格仍然在不断增长,已超过了50欧元/t(约合人民币383元/t)^[20].与国际市场相比,国内碳价格太低,有巨大增长空间,政府应推动我国碳价格不断上升,逐渐向国

际市场靠拢;碳价格合理上涨,碳排放成本占企业总成本的比例增加,企业在决策时便会自愿考虑碳排放,对我国实现碳达峰、碳中和目标具有积极作用.

4 结论

本文以“双碳目标”为背景,建立基于联合配送和碳交易机制的低碳冷链物流路径优化模型,并设计了一种具有变邻域搜索操作和动态灾变机制的多种群遗传算法,通过标准算例集和仿真实验验证了所提出算法和模型的有效性.本文的重要研究结论如下:1)联合配送模式可兼顾企业经济效益、社会环境效益以及客户满意度,有利于实现三方互惠共赢的局面.2)对冷链物流企业而言,综合考虑运输总成本可更合理地规划配送路线,降低企业的经营成本.3)碳价格对碳排放量和企业运输总成本有很大的影响,不宜过高或过低.4)低碳经济格局的构建、“双碳目标”的实现,需要政府和企业的共同努力,企业在经营时应自觉考虑碳排放对环境的影响,政府应提倡联合配送模式,完善碳交易机制相关政策,推动我国碳价格逐渐向国际市场靠拢.

未来研究将考虑异型车辆、动态需求等特征,使得研究的问题更符合实际.同时结合多种算法的优点设计更高效的混合启发式算法以求解VRP及其扩展问题.

参考文献(References)

- [1] 葛显龙,谭百川,吴宁谦.基于碳交易机制的带时间窗车辆路径问题与算法研究[J].管理工程学报,2018,32(4):141-148.
(Ge X L, Tan B C, Wu N Q. Research on vehicle routing problem and algorithm with time window based on carbon trading mechanism[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2018, 32(4): 141-148.)
- [2] 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.
(Zhou X C, Zhou K J, Wang L, et al. Review of green vehicle routing model and its algorithm in logistics distribution[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2021, 41(1): 213-230.)
- [3] 方文婷,艾时钟,王晴,等.基于混合蚁群算法的冷链物流配送路径优化研究[J].中国管理科学,2019,27(11):107-115.
(Fang W T, Ai S Z, Wang Q, et al. Research on cold chain logistics distribution path optimization based on hybrid ant colony algorithm[J]. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27(11): 107-115.)
- [4] 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.
- [5] Liu G K, Hu J Y, Yang Y, et al. Vehicle routing problem in cold chain logistics: A joint distribution model with carbon trading mechanisms[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 156: 104715.
- [6] 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.
- [7] 任腾, 罗天羽, 李姝萱, 等. 面向冷链物流配送路径优化的知识型蚁群算法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(3): 545-554.
(Ren T, Luo T Y, Li S X, et al. Knowledge based ant colony algorithm for cold chain logistics distribution path optimization[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(3): 545-554.)
- [8] Montoya-Torres J R, López Franco J, Nieto Isaza S, et al. A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 79: 115-129.
- [9] 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.
(Zhou X C, Lv Y, He C H, 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.)
- [10] Kuo Y, Wang C C. A variable neighborhood search for the multi-depot vehicle routing problem with loading cost[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(8): 6949-6954.
- [11] 范厚明, 刘鹏程, 刘浩, 等. 多中心联合配送模式下集货需求随机的VRPSDP问题[J]. *自动化学报*, 2021, 47(7): 1646-1660.
(Fan H M, Liu P C, Liu H, et al. The multi-depot vehicle routing problem with simultaneous deterministic delivery and stochastic pickup based on joint distribution[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(7): 1646-1660.)
- [12] 胡静. 基于城市物流联合配送的电动汽车路径优化问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
(Hu J. Electric vehicle routing optimization problem based on joint distribution of urban logistics[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.)
- [13] Nazif H, Lee L S. Optimised crossover genetic algorithm for capacitated vehicle routing problem[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36(5): 2110-2117.
- [14] 范厚明, 张跃光, 田攀俊, 等. 时变路网下异型车辆动态配置与路径优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(2): 455-470.
(Fan H M, Zhang Y G, Tian P J, et al. Dynamic vehicle routing problem of heterogeneous fleets with time-dependent networks[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2022, 42(2): 455-470.)
- [15] 轩华, 刘淑燕, 王薛苑, 等. 带不相关机的可重入柔性流水车间问题的改进灾变遗传算法[J]. *工业工程与管理*, 2021, 26(5): 161-171.
(Xuan H, Liu S Y, Wang X Y, et al. An improved catastrophic genetic algorithm for re-entrant flexible flowshop problem with unrelated parallel machines[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2021, 26(5): 161-171.)
- [16] 王东. 改进多种群遗传算法的研究及其在车辆路径优化的应用[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
(Wang D. The research to improve multiple population genetic algorithm and its application in vehicle routing optimization[D]. Nanning: Guangxi University, 2016.)
- [17] Ng K K H, Lee C K M, Zhang S Z, et al. A multiple colonies artificial bee colony algorithm for a capacitated vehicle routing problem and re-routing strategies under time-dependent traffic congestion[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 109: 151-168.
- [18] İlhan İ. An improved simulated annealing algorithm with crossover operator for capacitated vehicle routing problem[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2021, 64: 100911.
- [19] Altabeeb A M, Mohsen A M, Ghallab A. An improved hybrid firefly algorithm for capacitated vehicle routing problem[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 84: 105728.
- [20] 王晨. 欧洲碳价突破56欧元全球碳定价体系呼声渐强[EB/OL]. (2021-05-19)[2021-12-05]. <https://caifuhao.eastmoney.com/news/20210519112252020823610>.
(Wang C. European carbon price tops €56 as calls for global carbon pricing system gain momentum[EB/OL]. (2021-05-19)[2021-12-05]. <https://caifuhao.eastmoney.com/news/20210519112252020823610>.)

作者简介

陈雨蝶(1999—),女,硕士生,从事物流与供应链、智能优化等研究, E-mail: chenjudie1022@126.com;

干宏程(1978—),男,教授,博士,从事交通系统工程、物流管理等研究, E-mail: hongchenggan@126.com;

程亮(1998—),男,硕士生,从事物流与供应链、智能优化等研究, E-mail: chengliang9802@126.com.