



宾厚,张路行,王素杰,王欢芳.基于改进多目标遗传算法的农村低碳物流配送路径优化[J].中国农业大学学报,2023,28(07):224-237.  
BIN Hou, ZHANG Luhang, WANG Sujie, WANG Huanfang. Route optimization of rural low-carbon logistics based on improved multi-objective genetic algorithm [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(07): 224-237.  
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2023.07.20

## 基于改进多目标遗传算法的农村低碳物流配送路径优化

宾厚 张路行 王素杰 王欢芳

(湖南工业大学 商学院,湖南 株洲 412008)

**摘要** 针对我国县、乡、村物流配送成本居高不下,需求覆盖率严重不足以及碳排放量较高的现实问题,构建考虑需求不确定和碳排放约束的农村物流配送路径优化模型,并提出了适用于多车型的改进多目标遗传算法。结合农村物流配送数据,运用 MatlabR2014a 软件进行仿真试验,最终得出在需求不确定和碳排放约束下农村物流的最优配送路径方案。仿真试验结果表明:设计的改进多目标遗传算法对于求解农村物流配送路径优化问题具有较好的有效性和适用性;在需求不确定和碳排放约束下,改进多目标遗传算法能够有效降低农村物流配送成本,提高需求覆盖率;与单车型配送方案相比,多车型配送方案在农村物流配送中更具优越性。

**关键词** 改进多目标遗传算法; 农村物流; 路径优化; 需求不确定; 碳排放约束

**中图分类号** F542 **文章编号** 1007-4333(2023)07-0224-14 **文献标志码** A

## Route optimization of rural low-carbon logistics based on improved multi-objective genetic algorithm

BIN Hou, ZHANG Luhang, WANG Sujie, WANG Huanfang

(School of Business, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China)

**Abstract** Aiming at the practical problems of high cost, insufficient demand coverage and high carbon emissions existed in the logistics distribution of counties, townships and villages in China, a rural logistics distribution routing optimization model considering demand uncertainty and carbon emissions constraints was constructed. An improved multi-objective genetic algorithm suitable for multiple vehicles was proposed. Combined with the rural logistics distribution data, MatlabR2014a software was used to carry out simulation experiments, and the optimal distribution route scheme of rural logistics under the demand uncertainty and carbon emission constraints was finally obtained. The simulation results show that: The proposed improved multi-objective genetic algorithm has better effectiveness and applicability for solving the rural logistics distribution routing problem; Under the demand uncertainty and carbon emission constraints, the improved multi-objective genetic algorithm can effectively reduce the cost of rural logistics distribution and improve the demand coverage rate; Compared with the single-vehicle distribution scheme, the multi-vehicle distribution scheme has more advantages in rural logistics distribution.

**Keywords** improved multi-objective genetic algorithm; rural logistics; route optimization; demand uncertainty; carbon emission constraints

随着国家乡村振兴战略的深入推进,农村物流日益成为推动农村经济社会发展的关键要素。《2021年中国快递发展指数报告》<sup>[1]</sup>调查数据显示:

2021年,我国农村地区收投物流快件量超过370亿件,带动农村经济增长超过1.85万亿元,农村物流市场的发展日益繁荣。《商务部、国家邮政局等八部

门关于加快贯通县乡村电子商务体系和快递物流配送体系有关工作的通知》<sup>[2]</sup>指出：要加快形成以县级物流配送中心、具有集散功能的乡镇网点和村级寄递物流综合服务站为主体的农村快递物流配送体系。然而，由于我国农村地区具有地形和地势复杂，物流基础设施不健全，交通跨度大，物流需求不确定且主体分布分散等一系列发展特征，农村物流配送尤其是乡镇到各村落的末端配送问题十分突出，“最后一公里”物流配送产生的成本占比整个物流环节的35%~60%<sup>[3]</sup>。与此同时，农村物流企业也面临着物流网络不健全、配送路径规划不合理、信息化水平低、服务质量较差、快件的时效性难以保证等一系列问题，这为我国农村物流企业的高质量发展提出了新挑战<sup>[4]</sup>。此外，农村物流作为连接“农产品上行”和“工业品下行”的双向流通渠道，也面临着高污染、高能耗、配送效率低下等问题，如何实现农村物流的低碳发展和降本增效成为当前亟需解决的关键问题。在国家“碳达峰、碳中和”战略背景下，农村物流配送路径优化对于降低物流能耗、提升物流运作效率以及减少CO<sub>2</sub>排放量至关重要。基于此，深入研究需求不确定和碳排放约束的农村物流配送路径优化问题对于促进我国农村经济向低碳化转型、实现高质量发展具有重要现实意义。

近年来，国内外相关研究主要涉及以下3个方面：1)需求不确定的物流配送路径优化问题。赵燕伟等<sup>[5-7]</sup>分别构建一系列物流配送路径优化模型，并分别采用量子进化算法、遗传算法、杂草优化算法等对模型进行求解。姚源果等<sup>[8]</sup>应用交通大数据，以总成本最小化为目标，采用蚁群算法对农产品冷链物流配送路径优化问题进行深入探究。Yao<sup>[9]</sup>以降低物流配送成本、减少物流配送车辆数量为目标，构建了带时间窗的农村物流路径优化模型，并采用遗传算法对模型进行求解。Teodorovic等<sup>[10-11]</sup>结合模糊集合理论，分别构建需求不确定和有追索权的随机物流配送路径优化模型，并采用模拟退火算法、遗传算法和局部搜索算法对模型进行求解分析。Lorini等<sup>[12-15]</sup>针对具有动态需求和动态行驶时间的车辆路径问题，提出对新客户优先设计配送路径的原则，分别构建了随机需求和随机服务时间的车辆路径优化模型，并设计出禁忌搜索算法和蚁群算法进行求解。2)碳排放约束的物流配送路径优化问题。Kim等<sup>[16]</sup>、Çimen等<sup>[17]</sup>和Brandstatter等<sup>[18]</sup>结合碳排放约束与物流配送路径优化之间的关系，

构建相应的物流路径优化模型，并分别采用蚁群算法、模拟退火算法以及粒子群算法对模型进行求解。Marcel<sup>[19]</sup>则是以车辆路径问题(Vehicle routing problem, VRP)为原型，以降低物流配送油耗和碳排放规模为目标，建立生鲜农产品低碳物流路径优化模型。方文婷等<sup>[20]</sup>构建综合考虑低碳、时效和成本节约的带时间窗动态需求物流路径优化模型，并设计蚁群启发式算法对模型进行优化求解。任腾等<sup>[21-22]</sup>分别构建包含碳排放成本、货损成本、时间成本和客户满意度等要素的农产品冷链物流路径优化模型，并分别采用蚁群算法和混合遗传—禁忌搜索算法对模型进行求解分析。李军涛等<sup>[23]</sup>针对冷链物流配送成本较高和车辆利用率低的问题，利用投入产出法计算出车辆运输过程中的碳排放量，构建了带时间窗的冷链物流路径优化模型，并采用自适应遗传模拟退火算法对模型进行求解。3)同时考虑需求不确定和碳排放问题。其中，裴利奇等<sup>[24-25]</sup>分别对不确定需求下的快递中转站和低碳物流配送中心选址问题进行研究，发现用户的需求不确定对物流选址和碳排放量具有显著影响。张倩等<sup>[26]</sup>综合考虑配送成本、生鲜产品生鲜度、碳排放和客户的随机需求等因素之间的关系构建了生鲜电商配送路径规划模型，并应用主要目标法和果蝇算法对模型进行求解。张旭等<sup>[27]</sup>则是从需求和碳交易价格双重不确定的多式联运路径优化问题出发，建立了混合鲁棒随机优化模型，研究发现需求不确定的最大遗憾值与成本之间的关系是提升双重不确定下多式联运运输效率与环保效益的有效方式。邓学平等<sup>[28]</sup>采用混合时间窗约束以成本和碳排放量最小化为目标构建了不确定需求下的多式联运路径优化模型，并采用基于模拟退火的粒子群算法对模型进行求解。

综上，关于物流配送路径优化问题的研究成果主要存在以下不足：第一，已有研究大都基于城市地区物流配送路径优化问题展开，同时考虑需求不确定和碳排放约束的农村物流配送路径优化问题的研究成果相对匮乏。第二，相关研究大多集中于单一车型的配送路径优化问题，与农村物流企业多车型配送的现实应用场景有偏差。第三，已有研究中对模型的求解大多采用传统的遗传算法、蚁群算法、模拟退火算法等算法，而这些算法由于全局搜索能力不足容易陷入局部最优解。针对以上问题，本研究旨在考虑需求不确定和碳排放双重约束下构建包含需求覆盖率、距离成本、时间惩罚成本、碳排放成本、

固定成本等要素的农村物流配送路径优化模型,设计适用于多车型的改进多目标遗传算法,同时应用农村物流配送数据进行仿真试验,将传统遗传算法和改进多目标遗传算法的结果进行对比分析,最终得出农村物流的最优配送方案,以期实现需求覆盖率最大化、碳排放和配送成本最小化的目标。

## 1 问题描述与假设条件

### 1.1 问题描述

结合农村物流运作的实际情况,主要研究分布在县城区域的农村物流配送中心给各个乡镇及村落的多个配送网点配送快递包裹的农村物流配送路径优化问题。设定农村物流配送中心拥有  $n$  辆多种型号的物流配送车辆,专门为多个物流配送网点提供生鲜农产品和物流快件的配送服务,配送车辆每天统一从配送中心出发,完成对各个配送网点配送作业的同时,并揽收需要上行的快件后再返回到配送中心。物流配送路径优化的目标是按照现有的资源条件和客户需求情况,构建满足需求不确定和碳排放约束的农村物流配送路径优化模型,并设计出适用于多车型的多目标遗传算法对模型进行求解,进而获取需求不确定和碳排放约束的农村物流最优配送路径,使得各配送车辆能够以最少的配送成本和最低的碳排放量完成配送任务,实现需求覆盖率最大化、碳排放和配送成本最小化的目标。

### 1.2 假设条件

为进一步说明农村物流配送路径优化问题,真实反映农村物流配送的现实情况,特设定以下假设条件:1)只有1个物流配送中心且具有多种车型的配送车辆。2)配送中心位置已知。3)各种车型的配送车辆核定载重量、配送成本不同。4)配送车辆从配送中心出发,在完成相关作业流程后返回到配送中心。5)已知各农村物流配送网点的位置、物流需求量、服务时间窗以及具体所需的服务时间。6)配送车辆的载重量不能超过其核定载重量。7)每辆配送车辆可服务多个配送网点但每个网点只能被1辆配送车辆服务1次。8)配送车辆超过配送网点的服务时间窗到达需支付一定的时间惩罚成本。9)所有配送车辆在配送过程中均匀速行驶。10)配送车辆的碳排放量和载重量、配送距离之间成正比。11)每条配送路径上的路况保持一致,不影响配送时间。

## 2 农村物流配送路径优化模型构建

本研究在考虑需求不确定和碳排放的双重约束下,以需求覆盖率最大化、碳排放和配送成本最小化为目标构建了包含需求覆盖率、碳排放成本、距离成本、时间惩罚成本等多要素的目标函数模型,同时设定满足车辆载重量限制、配送车辆限制以及配送时间限制等约束条件,使得多种不同型号的配送车辆从配送中心出发,向各个物流配送网点提供配送服务,完成配送任务后返回配送中心。

### 2.1 参数设定

为将农村物流的现实配送过程转化为具体的数理模型,需要对部分参数进行注释说明,本研究在构建需求不确定和碳排放约束的农村物流配送路径优化模型所使用的参数符号及定义见表1。

### 2.2 变量分析

#### 2.2.1 碳排放成本

为追求碳排放最小化的配送路径优化目标,本研究考虑将碳排放成本作为物流配送路径优化模型的重要组成部分,其中,碳排放成本主要包含配送过程中产生的燃油成本和碳税成本,由于碳排放成本和配送距离、载重量之间成正比,不同车型的碳排放量之间也有所差异,本研究配送车辆的碳排放量采用负载估计法计算得出。当  $m$  型配送车辆载重量为  $Q$  时,单位距离的碳排放量  $\rho(Q)$  为<sup>[20]</sup>:

$$\begin{cases} \rho(Q) = \rho_0 + \frac{\rho_s - \rho_0}{C_m} \cdot Q, m \in M \\ p_s = c \cdot \rho(Q) \\ p_n = \delta \cdot \rho(Q) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\rho_0$  表示配送车辆的载重量为0时,单位距离的碳排放量;  $\rho_s$  表示满载时配送车辆的碳排放量;  $C_m$  表示  $m$  型配送车辆的最大承载量;  $c$  为燃油价格;  $\delta$  为碳税价格。

碳排放成本  $C_1$  具体可用单位距离的燃油成本  $p_s$  与单位距离的碳税成本  $p_n$  之和乘以配送网点  $i$  与  $j$  之间的配送距离  $d_{i,j}$  表示:

$$C_1 = \sum_{m=1}^h \sum_{k=1}^{K_n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (p_s + p_n) \cdot d_{i,j} \cdot x_{i,j}^{m,k} \quad (2)$$

#### 2.2.2 时间惩罚成本

结合农村物流配送过程现实情况,由于配送时效性对于农村物流企业的服务质量和客户满意度均有所影响<sup>[5]</sup>,因此本研究考虑将时间惩罚成本作为目标函数,以此来增强农村物流配送的时效性,提升

表 1 本研究的参数符号及定义

Table 1 Parameter symbols and definitions in this study

参数符号 Parameter symbol	定义 Definition
$D$	配送中心和网点集合, $D = \{1, 2, \dots, n\}$ , 1 表示配送中心, $n$ 为配送网点。
$M$	配送车型集合, $M = \{1, 2, \dots, h\}$ , $h$ 表示配送车辆的车型。
$K$	配送车辆集合, $K = \{1, 2, \dots, K_n\}$ , $K_n$ 表示可调配的配送车辆数量。
$S_k$	配送车辆 $k$ 服务的配送网点, $k \in K$
$\epsilon_k$	配送车辆 $k$ 的单位距离成本, $k \in K$
$\rho_k$	配送车辆 $k$ 的固定成本, $k \in K$
$d_{i,j}$	配送网点 $i$ 到配送网点 $j$ 的配送距离, $i, j \in D$
$p_i$	配送网点 $i$ 的取货量, $i \in D$
$q_i$	配送网点 $i$ 的配送量, $i \in D$
$g_i$	配送网点 $i$ 的需求量, $i \in D$
$\beta$	时间惩罚系数
$t_i$	配送车辆到达配送网点 $i$ 的时间, $i \in D$
$a_i$	配送网点 $i$ 的服务时间, $i \in D$
$\omega_i$	配送网点 $i$ 的开始服务时刻, $i \in D$
$[e_i, l_i]$	配送网点 $i$ 的服务时间窗, $i \in D$
$Z$	配送网点的需求覆盖率
$C_m$	$m$ 型配送车辆的最大承载量, $m \in M$
$T$	每条配送路径服务时间的最大值
$v$	配送车辆行驶速度
$p_s$	单位距离燃油成本
$p_n$	单位距离碳税成本

农村物流企业的服务质量和客户满意度。假定配送网点  $i$  的服务时间窗为  $[e_i, l_i]$ , 配送网点  $i$  的时间惩罚成本  $C_2$  的表达式为:

$$C_2 = \beta \sum_{m=1}^h \sum_{k=1}^{K_n} \sum_{i=1}^n \max(\omega_i - l_i, 0) \quad (3)$$

式中:  $\beta$  为时间惩罚系数;  $\omega_i$  为配送车辆在配送网点  $i$  的开始服务时刻;  $l_i$  为配送网点  $i$  的时间窗结束时刻。

### 2.2.3 需求覆盖率

需求覆盖率可表示为每条配送路径上的需求量和配送网点总需求量的比值, 需求覆盖率越大说明配送路径的规划越合理, 对客户需求的满足程度也就越高, 提高农村物流的需求覆盖率可以有效提升

农村物流运作效率, 增强客户满意度。配送网点  $i$  的需求覆盖率  $Z$  的表达式为:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_n} (p_i + q_i) y_{i,k}}{\sum_{i=1}^n (p_i + q_i)} \quad (4)$$

式中:  $p_i$  为配送网点  $i$  的配送量;  $q_i$  为配送网点  $i$  的取货量;  $y_{i,k}$  为决策变量。

## 2.3 模型公式

### 2.3.1 目标函数

由于农村物流具有“长配送链+低消费需求”的特征, 本研究主要结合农村物流配送现实情况, 以需求覆盖率最大化、碳排放和配送成本最小化为目标并考虑需求覆盖率和碳排放成本、固定成本、时间惩

罚成本、距离成本等要素对农村物流配送路径优化的影响效应,构建了考虑需求不确定和碳排放约束

的农村物流配送路径优化模型。其中,农村物流路径优化模型目标函数的表达式为:

$$\begin{cases} F(x_1) = \max \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_n} (p_i + q_i) y_{i,k}}{\sum_{i=1}^n (p_i + q_i)} \right] \\ F(x_2) = \min \left[ \sum_{m=1}^h \sum_{k=1}^{K_n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (p_s + p_n) \cdot d_{i,j} \cdot x_{i,j}^{m,k} + \sum_{m=1}^h \sum_{k=1}^{K_n} \sum_{j=1}^n \rho_k \cdot x_{i,j}^{m,k} + \right. \\ \left. \beta \sum_{m=1}^h \sum_{k=1}^{K_n} \sum_{i=1}^n \max(\tau \omega_i - l_i, 0) + \sum_{m=1}^h \sum_{k=1}^{K_n} \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \epsilon_k \cdot d_{i,j} \cdot x_{i,j}^{m,k} \right) \right] \\ x_{i,j}^{m,k} = \begin{cases} 1 & \text{型号为 } m \text{ 的配送车辆 } k \text{ 从配送网点 } i \text{ 到配送网点 } j, i, j \in \mathbf{D}, m \in \mathbf{M}, k \in \mathbf{K} \\ 0 & \text{否} \end{cases} \\ y_{i,k} = \begin{cases} 1 & \text{配送车辆 } k \text{ 为配送网点 } i \text{ 提供配送服务}, i \in \mathbf{D}, k \in \mathbf{K} \\ 0 & \text{否} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $F(x_1)$  为需求覆盖率的极大值;  $F(x_2)$  为包含碳排放成本、固定成本、时间惩罚成本和距离成本构成的配送总成本最小值;  $x_{i,j}^{m,k}$  和  $y_{i,k}$  为决策变量。

### 2.3.2 约束条件

结合农村物流配送的实际运作情况,本研究分别从配送车辆限制、载重量限制、配送时间窗约束等多方面设计了农村物流配送路径优化的约束条件。

1) 保证配送中心每种类型配送车辆使用数量不超过此类型车辆可用数量的约束条件为:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{K_n} x_{1,j}^{m,k} \leq K_n, m \in \mathbf{M} \quad (6)$$

2) 所有配送车辆均从配送中心出发并且返回配送中心的约束条件为:

$$\sum_{j=1}^n x_{1,j}^{m,k} = \sum_{j=1}^n x_{i,1}^{m,k} \leq 1, m \in \mathbf{M}, k \in \mathbf{K} \quad (7)$$

3) 保证每个配送网点只被服务 1 次的约束条件为:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^h \sum_{k=1}^{K_n} x_{i,j}^{m,k} = 1, j \in \mathbf{D} \quad (8)$$

4) 配送车辆在服务配送网点  $i$  后,到达下一个配送网点或回到配送中心的约束条件为:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^h \sum_{k=1}^{K_n} x_{i,j}^{m,k} = 1, i \in \mathbf{D} \quad (9)$$

5) 每条配送路径上的需求量不高于此路径上配送车辆最大载重量的约束条件为:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n g_i \cdot x_{i,j}^{m,k} \leq C_m, m \in \mathbf{M}, k \in \mathbf{K} \quad (10)$$

6) 配送车辆运作时间不超过服务时间最大值的约束条件为:

$$\sum_{i=1}^n t_i y_{i,k} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{d_{i,j} x_{i,j}^{m,k}}{v} \leq T, m \in \mathbf{M}, k \in \mathbf{K} \quad (11)$$

7) 消除子路径约束的约束条件为:

$$\sum_{i \in S_k} \sum_{j \in S_k} x_{i,j}^{m,k} \leq |S_k| - 1, S_k \subset \mathbf{D}, m \in \mathbf{M}, k \in \mathbf{K} \quad (12)$$

8) 配送服务时间窗的约束条件为:

$$e_i \leq t_i \leq l_i, i \in \mathbf{D} \quad (13)$$

## 3 改进多目标遗传算法设计

由于农村物流配送路径优化问题属于 NP-Hard 难题,传统遗传算法对于求解单目标路径优化问题具有较好的适用性,但在求解多目标路径优化问题、尤其是要考虑到需求不确定和碳排放约束等多个约束条件时,求解效果会受到一定程度的影响。本研究主要参考李丹莲等<sup>[29]</sup>、赵赫等<sup>[30]</sup>的研究成果,基于遗传算法原理设计出适用于多车型的改进多目标遗传算法以求解需求不确定和碳排放约束的农村物流配送路径优化模型,可以有效避免无效解和非法解的产生,进而使得算法具有更优的求解效果,改进多目标遗传算法具体流程见图 1。

### 3.1 染色体编码及初始化种群

本研究限制每辆配送车辆匹配 1 条配送路径,每个配送网点仅有 1 辆配送车辆进行配送服务,因此需要将配送网点、配送车辆以及配送路径进行编码处理。配送车辆序列初始染色体编码为:  $\mathbf{S}_v = \{1, 2, \dots, K_n\}$ ,  $K_n$  表示可以使用的多车型物流配送车辆。配送路径的染色体编码为  $\mathbf{S}_c = \{1, 2, \dots, n\}$ , 1 表示农村物流配送中心, 2, 3, ...,  $n$  表示各个配送

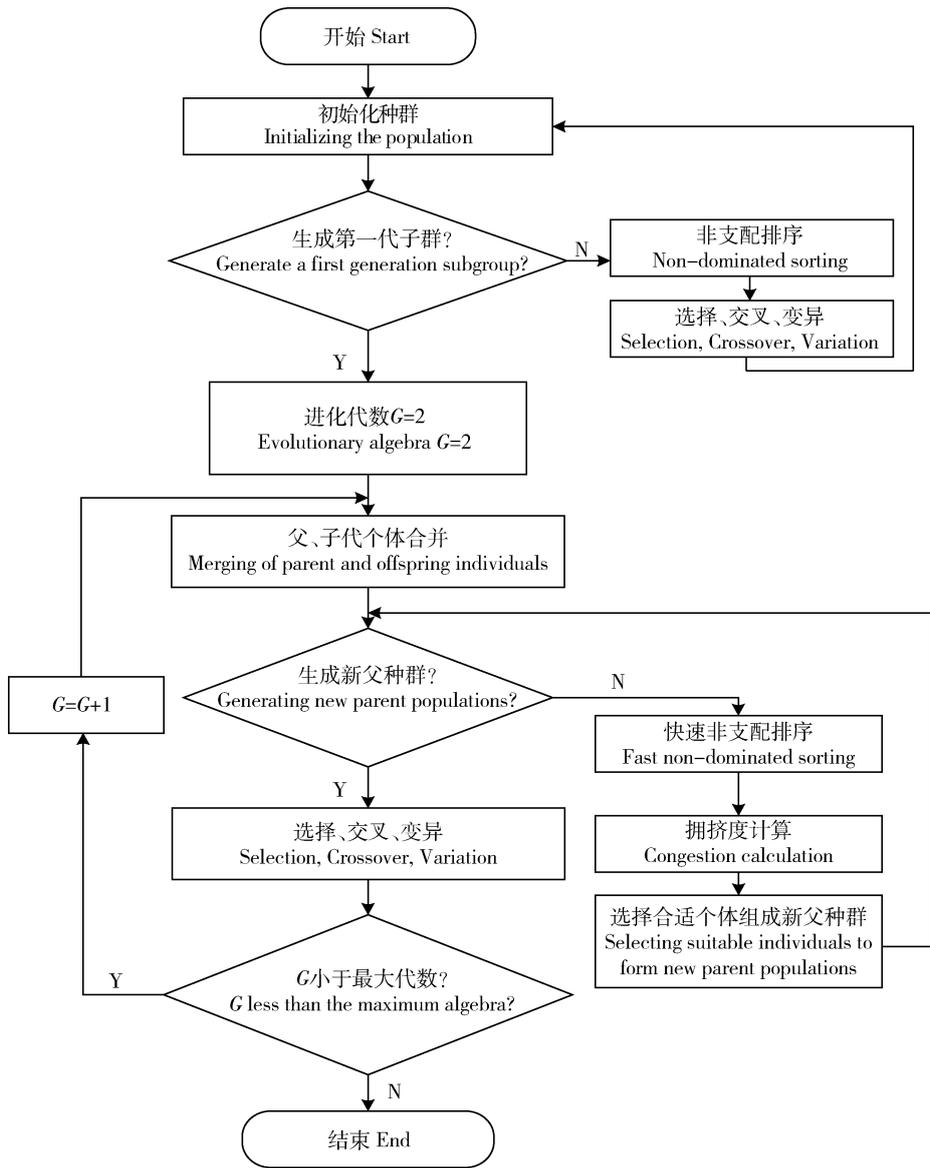


图 1 改进多目标遗传算法流程

Fig. 1 Improved multi-objective genetic algorithm process

网点。配送车辆染色体的序号表示可使用的配送车辆及其使用顺序，配送路径染色体序号表示需要提供配送服务的网点及其服务顺序。随后，将配送车辆染色体序列和配送路径染色体序列进行随机初始化，生成初始化种群，并以此为起点设置相关参数，进行遗传迭代。本研究配送车辆染色体和配送路径的染色体编码见图 2。

### 3.2 适应度函数设定

适应度可以反映出种群中染色体的生存能力，适应度越大，代表染色体的生存能力越强，在遗传迭代过程中更容易被保留；当适应度越小时，代表染色

2	5	8	7	4	6	3	1	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---

配送车辆染色体  
Distribution of vehicle chromosomes

7	3	2	6	9	4	5	8	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---

配送路径染色体  
Distribution routechromosomes

图 2 配送车辆和配送路径染色体编码

Fig. 2 Chromosomal coding of distribution vehicles and distribution route

体的生存能力较弱且容易在遗传迭代过程中被剔除。由于在农村物流配送路径优化模型中目标函数是求得需求覆盖率最大值和物流配送成本最小值,因此,本研究在设定适应度函数时选取需求覆盖率与配送成本的倒数之和作为适应度函数  $f_i$ , 适应度函数  $f_i$  的具体公式为:

$$f_i = F(x_1) + \frac{1}{F(x_2)} \quad (14)$$

### 3.3 算法描述

#### 3.3.1 快速非支配排序

改进多目标遗传算法求解的关键是求取 Pareto 最优解集,通过快速非支配排序可以引导搜索过程不断向 Pareto 最优解集的方向靠近。对于种群  $P$  中的个体  $P_i, i = 1, 2, \dots, n$ , 假设  $n_i$  为种群中各支配个体  $P_i$  的个体数量,集合  $S$  代表被个体  $P_i$  支配的个体集合,  $\phi_r$  为个体  $P_i$  的非支配序值,快速非支配排序的过程如下:

1) 将种群中所有  $n_i = 0$  的个体放入到非支配集合  $F_1$  中,并将其赋予相同的非支配序  $\phi_r$ ;

2) 考察非支配集合  $F_1$  中的每个个体  $P_i$  所支配的个体集合  $S$ , 将集合  $S$  中每个个体  $P_j$  的  $n_j$  都减去 1, 如果  $n_j - 1 = 0, j = 1, 2, \dots, n$ , 说明个体  $P_j$  是  $S$  中的非支配个体,则将个体  $P_j$  放入另一个集合  $Q$  中,并对  $Q$  进行分层并赋予相应的非支配序;

3) 对集合  $Q$  重复上述分层操作直到整个种群都被分层,并赋予不同分层相应的非支配序,同一分层内的个体非支配序  $\phi_r$  相同。

#### 3.3.2 拥挤度

拥挤度代表种群中指定染色体周围其他染色体的密度,具体表示为指定点前后 2 条染色体之间目标函数差值之和。拥挤度越大,则染色体周围密度越小,染色体的多样性越好,反之拥挤度越小,则染色体周围密度越大,染色体的多样性越差。假定种群  $P$  中有  $n$  个个体和  $\lambda$  个目标函数,其拥挤度的计算过程如下:

1) 设每条染色体  $i$  的拥挤度  $i_d = 0, i = 1, 2, \dots, n$ ;

2) 对于每个目标函数  $F(x_k)(k = 1, 2, \dots, \lambda)$ , 将种群中的所有个体按照目标函数值的大小排序;

3) 计算种群中位于中间的非边界染色体拥挤度,拥挤度  $i_d$  的计算公式为:

$$i_d = \sum_{k=1}^{\lambda} \frac{|F(x_k)(i-1) - F(x_k)(i+1)|}{F(x_k)_{\max} - F(x_k)_{\min}} \quad (15)$$

式中:  $F(x_k)_{\max}$  和  $F(x_k)_{\min}$  分别表示第  $k$  个目标函数的最大值和最小值;  $F(x_k)(i-1)$  和  $F(x_k)(i+1)$  为染色体  $i$  前后两条染色体的第  $k$  个目标函数值。

#### 3.3.3 精英策略

改进多目标遗传算法的精英策略是为了保留父代种群中的优秀染色体,防止其在种群遗传迭代的过程中流失,从而提升算法的收敛性能。精英策略的具体步骤为:

1) 将产生的子代种群  $Q_t$  与父代种群  $P_t$  进行混合,形成新的种群  $U_t$ , 种群大小为  $2n$ ;

2) 对种群  $U_t$  进行快速非支配排序,求出所有的非支配集  $F_i$  并分别计算每个非支配解集的个体拥挤度;

3) 将  $F_1$  放到新的父代种群  $P_{t+1}$  中,若此时种群  $P_{t+1}$  中个体数小于  $n$ , 那么将非支配集  $F_2$  放入种群  $P_{t+1}$  中,如果添加到非支配集  $F_n$  时,种群  $P_{t+1}$  个体数量超出  $n$ , 则利用拥挤度对  $F_n$  中的个体选择,取前  $\{\text{num}(F_n) - (\text{num}(P_{t+1}) - 1)\}$  个体,此时种群  $P$  的规模达到  $n$ ;

4) 采用遗传算法操作,从而产生新种群  $Q_{t+1}$ 。

### 3.4 染色体选择、交叉和变异

本研究染色体选择操作主要依据非支配排序  $\phi_r$  和拥挤度  $i_d$  进行锦标赛选择,首先比较非支配排序  $\phi_r$ , 选择较小者。若  $\phi_r$  相同,则比较拥挤度  $i_d$ , 取较大者进入到下一部分的操作。染色体交叉操作主要采用部分映射交叉方法,具体流程见图 3。

根据染色体变异概率对染色体进行变异操作,本研究主要采用 2-opt 算法分别对配送车辆和配送路径染色体进行变异操作,配送车辆染色体变异操作与配送路径染色体的变异操作方式相同,配送路径染色体的变异操作方式见图 4。

## 4 仿真试验分析

### 4.1 数据来源

为了验证农村物流配送路径优化模型和改进多目标遗传算法的有效性,本研究随机选取了中国湘莲之乡、长株潭“两型社会”建设综合配套改革试验区—湖南省湘潭县所辖的 1 个农村物流配送中心和 30 个农村物流配送网点进行实地走访调研和电话访谈获取相关数据(配送网点的经纬度坐标、物流需求量、时间窗及服务时间信息见表 2),并利用导航类程序测量农村物流配送中心到各配送网点、各配送网点之间的距离和完成配送任务所需的时间,反

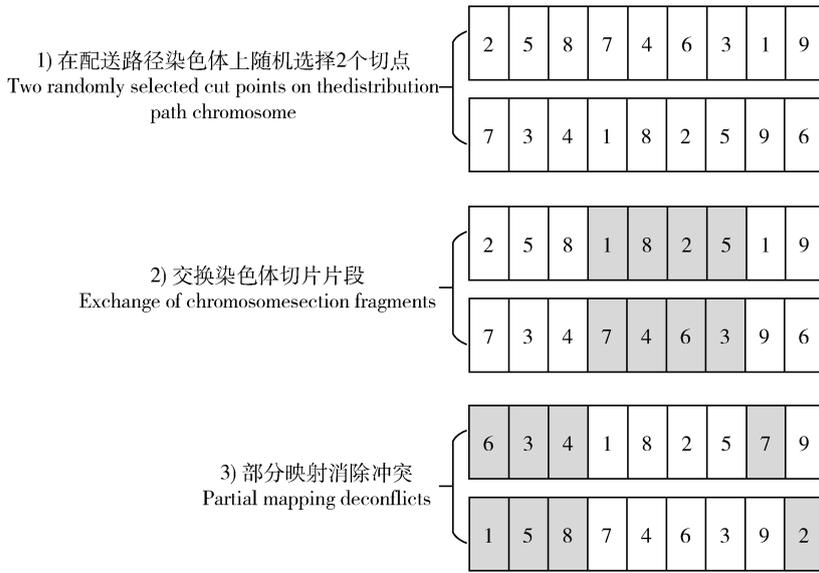


图 3 染色体交叉流程

Fig. 3 Chromosomal crossover process

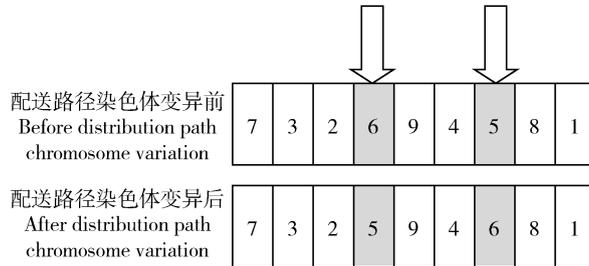


图 4 配送路径染色体变异操作方式

Fig. 4 Distribution route chromosome mutation operation process

映出农村物流配送的真实运作场景,有利于使研究成果能够指导农村物流配送作业过程,解决农村物流配送的现实问题,助推农村物流实现降本增效和低碳化发展。此外,本研究采用 MatlabR2014a 软件对有关参数进行仿真试验,采用改进多目标遗传算法与传统遗传算法进行对比分析,以此来验证改进多目标遗传算法对于求解农村物流配送路径优化问题的有效性和适用性。仿真试验的运行环境为 Intel(R) Core(TM) i5-9300H 2.40 GHz CPU,8 G 运行内存,Windows10 操作系统。为了验证需求不确定对农村物流配送路径的影响并剔除原始调研数

据中的粗差点,本研究采用了数据驱动下的需求预测方法对农村物流需求数据进行处理,使得用户需求数据更加符合农村物流实际应用情况。(为了更好地满足用户的随机需求,选取预测需求量和实际需求量较大者作为本研究的需求数据)需求预测的具体方法为:假设  $n$  个配送网点的描述矩阵  $\mathbf{A} = (a_1^1, a_2^1, \dots, a_x^1; a_1^2, a_2^2, \dots, a_x^2; \dots; a_1^n, a_2^n, \dots, a_x^n)$ 。物流企业对配送网点  $i$  的属性维度  $x$  的预测值为  $p_i^x$ , 该属性维度在多个配送周期内的实测均值为  $m_i^x$ , 则当前预测值与多期实测均值的逻辑距离  $ld_i^x$  表示<sup>[31]</sup>为:

$$ld_i^x = \begin{cases} p_i^x - m_i^x, & x \in x_D \\ \sqrt{\frac{|(p_{i1}^x - m_{i1}^x)|^2 + |(p_{i2}^x - m_{i2}^x)|^2 + |(p_{i3}^x - m_{i3}^x)|^2}{3}}, & x \in x_F \end{cases} \quad (16)$$

$$p_i^x = \left( \max\left(\frac{l-1}{n}, 0\right), \frac{l}{n}, \min\left(\frac{l+1}{n}, 1\right) \right), \quad l \in [1, n] \quad (17)$$

表2 配送网点的经纬度坐标、物流需求量、时间窗及服务时间

Table 2 Latitude and longitude coordinates of distribution network, logistics demand, time windows and service times

配送网点序号 Distribution network serial number	经度/(°) Latitude	纬度/(°) Longitude	物流需求量/kg Logistics demand	起始时刻 $e_i$ Start time	结束时刻 $l_i$ End time	服务时间/min Service time
1	112.961	27.682	0	8:30	17:30	0
2	112.922	27.761	175	9:15	10:20	10
3	112.951	27.734	93	9:35	10:30	15
4	112.962	27.691	106	8:30	9:20	18
5	112.874	27.741	121	9:15	10:30	11
6	112.911	27.710	135	9:20	11:00	17
7	113.068	27.730	175	9:15	10:55	15
8	113.097	27.744	98	9:30	11:40	23
9	113.027	27.743	176	10:20	11:30	12
10	112.979	27.755	78	10:15	11:20	8
11	112.986	27.750	92	8:30	9:20	10
12	112.968	27.744	105	9:00	10:40	8
13	112.942	27.756	151	10:00	11:00	15
14	112.928	27.746	72	8:40	10:20	17
15	112.910	27.750	91	8:45	9:25	12
16	112.911	27.751	199	9:20	10:00	16
17	112.915	27.759	108	9:30	11:00	13
18	112.930	27.752	162	9:20	10:20	8
19	112.928	27.746	98	9:30	11:30	12
20	112.934	27.746	186	9:15	10:00	15
21	112.930	27.741	141	10:00	10:40	17
22	112.926	27.738	172	8:50	9:40	19
23	112.914	27.716	201	9:20	10:20	12
24	112.946	27.713	102	9:30	10:40	10
25	112.995	27.722	135	9:10	10:10	6
26	112.979	27.741	108	9:40	10:20	15
27	112.968	27.744	179	9:30	10:30	20
28	112.974	27.724	71	9:00	10:00	15
29	112.952	27.734	131	8:50	10:00	12
30	112.927	27.732	119	8:40	10:20	16
31	112.944	27.757	163	9:00	10:00	11

式中： $x_D$  为客户需求属性中可以准确描述的部分； $x_F$  表示客户需求属性中只能采用模糊语言值衡量的部分； $(p_{i1}^x, p_{i2}^x, p_{i3}^x)$  表示采用三角模糊数的客户属性预测值； $(m_{i1}^x, m_{i2}^x, m_{i3}^x)$  表示三角模糊数的客户属性多期均值。

#### 4.2 仿真试验结果分析

本研究仿真试验中的配送车辆共分为 A、B 和 C 3 种车型，对应的车辆数分别为 2、2 和 3，共 7 辆车。3 种车型配送车辆的载重量分别为 700、800 和 1 000 kg；固定成本分别为 600、800 和 1 000 元；单位距离成本分别为 10、12 和 15 元/km；单位距离的油耗分别为 0.16、0.18 和 0.22 L/km；油价为 8.52 元/L；

碳税价格为 2.36 元/kg；配送车辆匀速行驶的速度为 40 km/h；超出时间窗的惩罚成本为 300 元/h。采用 MatlabR2014a 软件进行仿真，运用同样的试验条件和配送数据分别测试了 20 次。迭代轮数  $R$  取 500，种群大小  $S$  取 200，交叉概率  $P_c$  取 0.75，变异概率  $P_m$  取 0.2，测试后发现，与传统遗传算法相比，改进多目标遗传算法能够有效减少农村物流配送车辆使用数量，降低配送成本，提高需求覆盖率。因此，满足客户需求和降低碳排放并不冲突，寻求需求覆盖率和碳排放规模的平衡有利于促进农村物流实现高质量发展，传统遗传算法和改进多目标遗传算法对目标参数的仿真结果见表 3。

表 3 传统遗传算法和改进多目标遗传算法对目标参数的仿真结果

Table 3 Simulation results of traditional genetic algorithm and improved multi-objective genetic algorithm on target parameters

算法 Algorithm	配送成本 Distribution cost		需求覆盖率 Distribution cost		配送车辆 Distribution vehicle	
	仿真值/元 Simulation value	变动幅度 <sup>①</sup> / % Range of change	仿真值/ % Simulation value	变动幅度/ % Range of change	仿真值/辆 Simulation value	变动幅度/ % Range of change
	传统遗传算法 Traditional genetic algorithm	8 576.36	—	78.25	—	7
改进多目标遗传算法 Improved multi-objective genetic algorithm	8 362.25	-2.49	83.63	6.43	5	-28.57

注：①变化幅度指改进多目标算法相比于传统遗传算法目标参数仿真值的变化。

Note: ① The magnitude of change indicates the change in the simulation values of the target parameters of the improved multi-objective algorithm compared to the traditional genetic algorithm.

##### 4.2.1 单车型与多车型结果对比分析

为验证多车型配送方案在农村物流配送过程中的有效性和适用性，本研究分别对 A、B、C 3 种车型单独完成配送任务和 3 种车型同时完成配送任务进行了对比分析，研究发现采用多车型的配送方案比分别采用 A、B 车型的配送方案在配送成本分别降低了 273.17 元和 585.88 元，需求覆盖率分别提升了 7.25% 和 0.87%，虽然单独采用 C 车型配送方案的需求覆盖率比多车型联合配送方案高 1.62%，但是配送成本却高了 1 141.12 元，无法有效降低农村物流配送成本，与本研究追求的需求覆盖率最大化、碳排放和配送成本最小化的目标有所相悖。由

此可见，采用多车型联合配送方案在需求不确定和碳排放约束的农村物流配送中具有显著优势，单车型和多车型配送方案对目标函数值的影响见表 4。

##### 4.2.2 需求覆盖率分析

为进一步探究需求不确定和碳排放约束下的农村物流配送路径优化问题，本研究分别采用传统遗传算法和改进多目标遗传算法对农村物流的需求覆盖率水平进行仿真试验。研究发现，采用改进多目标遗传算法与传统遗传算法相比，农村物流的需求覆盖率实现较大幅度增长。因此，本研究设计的改进多目标遗传算法对于求解需求不确定和碳排放约束的农村物流配送路径优化问题具有较强的适用性，

表4 单车型和多车型配送方案对目标函数值的影响

Table 4 The impact of single and multi-vehicle distribution options on the objective function value

配送方案 Distribution solution	车型 Vehicle type	配送成本/元 Distribution costs	需求覆盖率/% Demand coverage
单车型 Single type	A	8 635.42	76.38
	B	8 948.13	82.76
	C	9 503.37	84.25
多车型 Multi-type	A、B、C	8 362.25	83.63

注：A、B、C表示3种不同型号的配送车辆，表5同。

Note: A, B and C indicates three different models of distribution vehicles. The same as Table 5.

能够有效提升农村物流的需求覆盖率水平。同时在仿真试验过程中发现，采用改进多目标遗传算法对模型进行求解比传统遗传算法提前120次左右目标函数达到收敛状态，有效节省了运算时间，算法的求解效率得到提升。由此可知，相对于传统遗传算法，本研究设计的改进多目标遗传算法对于求解需求不确定和碳排放约束下的农村物流配送路径优化问题具有更好的收敛效果，传统遗传算法和改进多目标遗传算法的需求覆盖率迭代过程见图5。

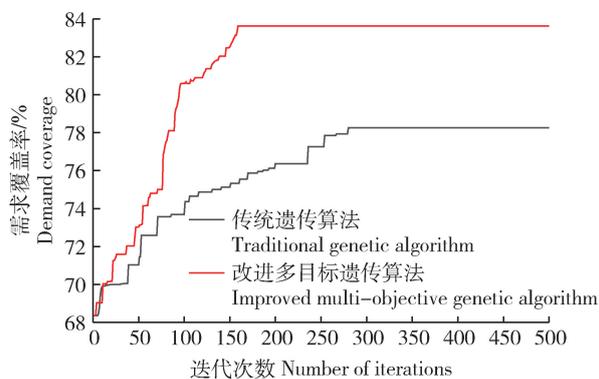


图5 传统遗传算法和改进多目标遗传算法的需求覆盖率迭代过程

Fig. 5 Iterative process of demand coverage for traditional genetic algorithm and improved multi-objective genetic algorithm

#### 4.2.3 配送成本分析

本研究涉及的农村物流配送成本主要包括碳排放成本、固定成本、时间惩罚成本以及距离成本(其他成本计算在固定成本中)。与传统遗传算法相比，应用本研究设计的改进多目标遗传算法进行仿真试

验时目标函数配送成本的仿真值大幅度减少。因此，改进多目标遗传算法在求解农村物流配送路径优化问题时，能够有效降低农村物流配送成本，对解决农村物流配送问题具有较好的适用性和实际应用价值。同时在仿真试验过程中发现，在以配送成本最小化为优化目标时，采用改进多目标遗传算法比传统遗传算法目标函数达到收敛状态的时间有所提前。相比于传统遗传算法，改进多目标遗传算法对于求解考虑需求不确定和碳排放约束的农村物流配送路径优化模型具有更好的收敛效果，邻域搜索能力、求解稳定性以及算法性能也更优，传统遗传算法和改进多目标遗传算法的配送成本迭代过程见图6。

为了进一步验证改进多目标遗传算法对于求解

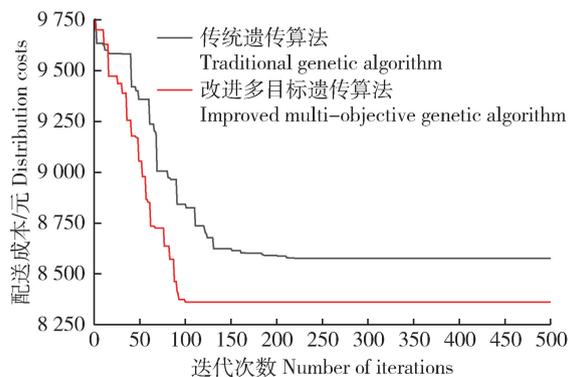


图6 传统遗传算法和改进多目标遗传算法的配送成本迭代过程

Fig. 6 Iterative process of distribution cost for traditional genetic algorithm and improved multi-objective genetic algorithm

需求不确定和碳排放约束下农村物流配送路径优化问题的有效性和适用性,本研究经过 20 次仿真试验最终得出了需求覆盖率最大化、碳排放和配送成本

最小化的最优配送方案和配送路径。改进多目标遗传算法下最优配送方案及成本构成见表 5,改进多目标遗传算法下最优配送路径见图 7。

表 5 改进多目标遗传算法下最优配送方案及成本构成

Table 5 Optimal distribution scheme and cost components under improved multi-objective genetic algorithm 元

配送方案 <sup>①</sup> Distribution scheme	固定成本 Fixed cost	距离成本 Distance cost	碳排放成本 Carbon cost	时间惩罚成本 Time penalty cost
A1:1→4→25→9→8→7→1	600	433.28	167.30	221.45
A2:1→24→29→12→10→11→26→28→1	600	481.21	258.25	278.37
B1:1→3→18→13→27→21→14→1	800	473.57	256.37	165.28
B2:1→23→22→30→19→20→1	800	401.25	272.28	246.45
C1:1→6→5→17→2→31→16→15→1	1 000	478.59	299.47	199.13

注:①配送方案中的序号 1 表示配送中心,4、25、9、8、7 等序号表示各配送网点。

Note: ① The serial number 1 in the distribution scheme indicates the distribution center, and the serial numbers 4, 25, 9, 8, 7, etc. indicate each distribution network.

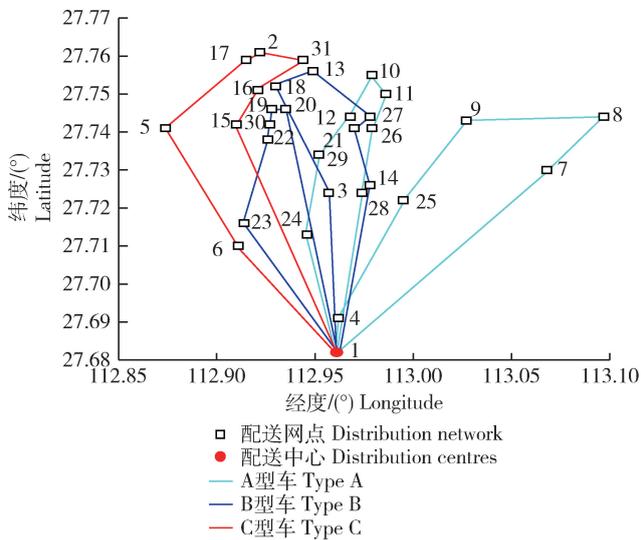


图 7 改进多目标遗传算法下的最优配送路径

Fig. 7 Optimal distribution route under improved multi-objective genetic algorithm

## 5 结论与对策建议

针对需求不确定和碳排放约束的农村物流配送路径优化问题,本研究以需求覆盖率最大化、碳排放和配送成本最小化为目标构建了包含碳排放成本、固定成本、距离成本以及时间惩罚成本的农村物流配送路径优化模型,并设计了适用于多车型的改进多目标遗传算法对模型进行求解。仿真试验结果表明:1)与传统遗传算法相比,设计的改进多目标遗传

算法对于求解需求不确定和碳排放约束的农村低碳物流配送路径优化问题具有更好的适用性和收敛性,其需求覆盖率、碳排放量和配送成本也优于传统遗传算法。2)满足客户需求和降低碳排放并不冲突,基于改进多目标遗传算法对农村物流配送路径进行优化求解,所得路径优化方案能有效提升农村物流需求覆盖率和降低物流碳排放。3)相对于单车型的配送方案而言,多车型的配送方案对于同时考虑需求不确定和碳排放约束的农村物流配送具有明显的优势。

基于以上研究结论,本研究提出以下 4 个方面的对策建议:1)完善农村物流基础设施,加快农村地区道路、仓储设施、配送中心等物流基础设施建设步伐,打通农村物流末端配送“最后一公里”,进而提升农村物流的运作效率和需求覆盖率。2)科学合理布局农村物流网点,物流网点的设置要充分考虑用户需求量、配送距离、区域人流量等因素,积极寻求降低物流运作成本与提升物流需求覆盖率以及降低物流碳排放之间的平衡。3)大力推进共同配送模式在农村物流的应用,积极引导农村物流企业之间加强资源共享、信息互通和人员交流等,提升农村物流发展质量。4)完善农村物流碳排放监督机制,加快多车型新能源配送车辆的推广应用,从而降低农村物流的碳排放规模,促进农村物流的绿色健康发展。

另外,在未来的研究中将进一步研究地形和气候因素对我国农村物流配送路径优化的影响,针对

不同地区的地形和气候条件分别构建更加完善的农村物流配送路径优化方案,为增强农村物流企业配送效率提供决策参考。

## 参考文献 References

- [1] 国家邮政局. 2021年中国快递发展指数报告[R]. 北京: 国家邮政局, 2022  
State Post Bureau of The People's Republic of China. China express development index report in 2022[R]. Beijing: State Post Bureau of The People's Republic of China, 2022 (in Chinese)
- [2] 商务部等. 商务部、国家邮政局等八部门关于加快贯通县乡村电子商务体系和快递物流配送体系有关工作的通知[EB/OL]. [2022-06-03]. <http://www.mofcom.gov.cn/article/zwgk/gkgztz/202206/20220603315744.shtml>  
Ministry of Commerce of The People's Republic of China, etc. Notice from Ministry of Commerce of The People's Republic of China, State Post Bureau of The People's Republic of China and other eight departments on accelerating the work related to the penetration of county and rural e-commerce systems and express logistics and distribution systems[EB/OL]. [2022-06-03]. <http://www.mofcom.gov.cn/article/zwgk/gkgztz/202206/20220603315744.shtml> (in Chinese)
- [3] 郭放, 黄志红, 黄卫来, 杨超. 考虑自取服务和门到门服务的电动汽车物流网络优化策略研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(2): 264-275  
Guo F, Huang Z H, Huang W L, Yang C. Optimal planning of the electric vehicle routing and battery charging problem with self-pickup and door-to-door distribution service[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 30(2): 264-275 (in Chinese)
- [4] 张晓林. 乡村振兴战略下的农村物流发展路径研究[J]. 当代经济管理, 2019, 41(4): 46-51  
Zhang X L. Research on the route of rural logistics development under the rural revitalization strategy[J]. *Contemporary Economic Management*, 2019, 41(4): 46-51 (in Chinese)
- [5] 赵燕伟, 彭典军, 张景玲, 吴斌. 有能力约束车辆路径问题的量子进化算法[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(2): 159-166  
Zhao Y W, Peng D J, Zhang J L, Wu B. A Quantum evolutionary algorithm for capacitated vehicle routing problems [J]. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2009, 29(2): 159-166 (in Chinese)
- [6] 张景玲, 赵燕伟, 王海燕, 介婧, 王万良. 多车型动态需求车辆路径问题建模及优化[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(3): 543-550  
Zhang J L, Zhao Y W, Wang H Y, Jie J, Wang W L. Modeling and algorithms for a dynamic multi-vehicle routing problem with Customers' dynamic requests [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(3): 543-550 (in Chinese)
- [7] 王万良, 黄海鹏, 赵燕伟, 张景玲. 基于车辆共享的软时间窗动态需求车辆路径问题[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(5): 1056-1063  
Wang W L, Huang H P, Zhao Y W, Zhang J L. Dynamic customer demand VRP with soft time windows based on vehicle sharing [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(5): 1056-1063 (in Chinese)
- [8] 姚源果, 贺盛瑜. 基于交通大数据的农产品冷链物流配送路径优化研究[J]. 管理评论, 2019, 31(4): 240-253  
Yao Y G, He S Y. Research on optimization of distribution route for cold chain logistics of agricultural products based on traffic big data [J]. *Management Review*, 2019, 31(4): 240-253 (in Chinese)
- [9] Yao C P. Research on logistics distribution route analysis based on artificial intelligence algorithms[J]. *International Journal of Biometrics*, 2020, 12(1): 100-108
- [10] Teodorovic D, Pavkovic G. A simulated annealing technique approach to the vehicle routing problem in the case of stochastic demand [J]. *Transportation Planning and Technology*, 1992, 16(4): 261-273
- [11] Mendoza J E, Castanier B, Gueret C, Medaglia A L, Velasco N. A memetic algorithm for the multi-compartment vehicle routing problem with stochastic demands[J]. *Computers & Operations Research*, 2010, 37(11): 1886-1898
- [12] Lorini S, Potvin J Y, Zufferey N. Online vehicle routing and scheduling with dynamic travel times[J]. *Computers & Operations Research*, 2011, 38(7): 1086-1090
- [13] 马向国, 刘同娟, 杨平哲, 蒋荣芬. 基于随机需求的冷链物流车辆路径优化模型[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(8): 1824-1832  
Ma X G, Liu T J, Yang P Z, Jiang R F. Vehicle routing optimization model of cold chain logistics based on stochastic demand[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(8): 1824-1832 (in Chinese)
- [14] Ge X, Xue G. Improved Genetic Algorithm for Pro-active Dynamic Vehicle Routing Problem[J]. *Computer Engineering and Application*, 2019, 55(12): 237-244
- [15] 李国明, 李军华. 基于混合禁忌搜索算法的随机车辆路径问题[J]. 控制与决策, 2021, 36(9): 2161-2169  
Li G M, Li J H. Stochastic vehicle routing problem based on hybrid tabu search algorithm[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(9): 2161-2169 (in Chinese)
- [16] Kim K C, Sun J U, Lee S W. A hierarchical approach to vehicle routing and scheduling with sequential services using the genetic algorithm[J]. *International Journal of Industrial Engineering Theory Applications & Practice*, 2013, 20(1): 99-113
- [17] Çimen M, Soysal M. Time-dependent green vehicle routing problem with stochastic vehicle speeds: An approximate dynamic programming algorithm[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 54: 82-98
- [18] Brandstatter C, Reimann M. The Line-haul Feeder Vehicle Routing Problem: Mathematical model formulation and heuristic approaches[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 270(1): 157-170
- [19] Marcel T. The accuracy of carbon emission and fuel consumption computations in green vehicle routing [J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 262(2): 647-659
- [20] 方文婷, 艾时钟, 王晴, 范君博. 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, Fan J B. Research on cold chain logistics distribution route optimization based on hybrid ant colony algorithm[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2019, 27(11): 107-115 (in Chinese)
- [21] 任腾, 陈玥, 向迎春, 邢立宁, 李思迪. 考虑客户满意度的低碳冷链车辆路径优化[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(4): 1108-1117  
Ren T, Chen Y, Xiang Y C, Xing L N, Li S D. Optimization of low-carbon cold chain vehicle route considering customer satisfaction [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(4): 1108-1117 (in Chinese)
- [22] 葛显龙, 冉小芬. 基于时间窗指派的污染路径问题[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(4): 1178-1187  
Ge X L, Ran X F. Pollution routing problem based on time window assignment[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(4): 1178-1187 (in Chinese)
- [23] 李军涛, 刘明月, 刘朋飞. 生鲜农产品多车型冷链物流车辆路径优化

- [J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(7): 115-123  
Li J T, Liu M Y, Liu P F. Route optimization of multi-vehicle cold chain logistics for fresh agricultural products [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(7): 115-123 (in Chinese)
- [24] 裴利奇, 刘晓. 不确定需求下快递枢纽中转站选址模型问题[J]. 工业工程与管理, 2020, 25(2): 24-29, 43  
Pei L Q, Liu X. Location model of express Hub transfer station under uncertain demand[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2020, 25(2): 24-29, 43 (in Chinese)
- [25] 林殿盛, 张智勇, 王佳欣, 梁希, 石永强. 需求不确定下的低碳物流配送中心选址[J]. 控制与决策, 2020, 35(2): 492-500  
Lin D S, Zhang Z Y, Wang J X, Liang X, Shi Y Q. Low-carbon logistics distribution center location with uncertain demand[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(2): 492-500 (in Chinese)
- [26] 张倩, 熊英, 何明珂, 张浩. 不确定需求生鲜电商配送路径规划多目标模型[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(08): 1582-1590  
Zhang Q, Xiong Y, He M K, Zhang H. Multi-objective model of distribution route problem for fresh electricity commerce under uncertain demand[J]. *Journal of System Simulation*, 2019, 31(8): 1582-1590 (in Chinese)
- [27] 张旭, 袁旭梅, 降亚迪. 需求与碳交易价格不确定下多式联运路径优化[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(10): 2609-2620  
Zhang X, Yuan X M, Jiang Y D. Optimization of multimodal transportation under uncertain demand and stochastic carbon trading price [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2021, 41(10): 2609-2620 (in Chinese)
- [28] 邓学平, 陈露, 田帅辉. 不确定需求下考虑混合时间窗的多式联运路径优化[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2021, 33(4): 689-698  
Deng X P, Chen L, Tian S H. Multimodal transport route optimization considering mixed time windows under uncertain demand[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 2021, 33(4): 689-698 (in Chinese)
- [29] 李丹莲, 曹倩, 徐菲. 基于改进遗传算法的连锁便利店配送路径优化[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42(11): 2096-2102  
Li D L, Cao Q, Xu F. Distribution route optimization of chain convenience stores based on improved genetic algorithm[J]. *Computer Engineering & Science*, 2020, 42(11): 2096-2102 (in Chinese)
- [30] 赵赫, 杜端甫. TSP的邻域搜索算法的分析和改进[J]. 中国管理科学, 1997(1): 35-39  
Zhao H, Du D F. Analysis and improvement of the neighbouring search algorithm for FSP[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 1997(1): 35-39 (in Chinese)
- [31] 葛显龙, 温鹏哲, 薛桂琴. 基于需求预测的两级动态配送路径优化研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(8): 210-220  
Ge X L, Wen P Z, Xue G Q. Two-echelon dynamic vehicle routing problem with request forecasting[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 30(8): 210-220 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



**第一及通讯作者简介:** 宾厚, 博士, 教授, 湖南大学管理科学与工程博士后, 英国大学访问学者, 湖南工业大学物流工程研究所副所长, 广东省农村电子商务研究院专家顾问委员, 湖南省工商管理学会常务理事, 湖南工业大学工商管理国家级一流专业负责人。主要从事物流与供应链管理相关研究, 先后在《管理评论》、《软科学》等国内外核心期刊上发表学术论文 70 余篇, 出版学术著作和教材 7 部, 主持国家社科基金和教育部社科基金各 1 项, 主持省级科研项目 10 余项, 已获国家专利 2 项, 多项成果获省、市厅级社会科学成果奖。