

# 考虑车辆等待的应急物资调配方案优化研究

宋英华, 葛 艳, 杜丽敬<sup>†</sup>, 吕 伟

(1. 武汉理工大学 管理学院, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 中国应急管理研究中心, 武汉 430070;  
3. 安全预警与应急联动技术湖北省协同创新中心, 武汉 430070)

**摘 要:** 为了提高应急救援效率, 结合震后灾民对应急物资的需求特征以及应急物资进行两级调配的特点, 提出一种考虑应急车辆在应急配送中心等待情况的多物资、多级配送的应急物资调配方案优化模型. 结合所研究模型的特征, 提出利用基于实数编码的遗传算法对模型进行求解, 并依据具体算例将所提出的考虑已到达配送中心处的应急车辆是否需要等到下批应急物资运达该地后再开始下级配送的新决策方式与两种传统方式进行比较分析, 验证所提出模型的有效性和可行性. 结果表明: 所提出的优化模型结合了两种传统方式的优点, 在提高灾民对运达应急物资的数量及时间的综合满意度的同时, 降低了运输费用.

**关键词:** 遗传算法; 实数编码; 多目标优化; 应急物资调配; 满意度; 方案优化

中图分类号: X913.4; C934

文献标志码: A

## Optimization of emergency materials allocation plan considering vehicle waiting

SONG Ying-hua, GE Yan, DU Li-jing<sup>†</sup>, LYU Wei

(1. School of Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Research Center for Chain Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Hubei Collaborative Innovation Center for Early Warning and Emergency Response Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of emergency rescue, considering the characteristics of the two-level deployment of emergency materials and the demand of victims, this paper proposes an optimization model for emergency materials allocation scheme considering multi-material and multi-level distribution of emergency vehicles in the emergency distribution center. Combining the characteristics of the research model, the genetic algorithm based on real coding is developed to solve the model. A specific example is provided to analyze whether the emergency vehicle that has reached the distribution center needs to wait until the next batch of emergency materials arrives or not. This new decision-making method is compared with two traditional methods to verify the validity and feasibility of the model. The results show that the proposed optimization model combines the advantages of the two traditional methods, and reduces the transportation costs while improving the overall satisfaction of the victims on the amount and time of delivery of emergency materials.

**Keywords:** genetic algorithm; real number encoding; multi-objective optimization; emergency supplies-deployment; satisfaction; program optimization

## 0 引 言

突发事件发生后, 应急中心的选址、车辆及应急物资的分配以及对运输路线的选择等成为影响救援行动、减少人员伤亡和损失的重要环节. 目前, 国内外学者对应急配送中心的选址问题已做了大量研究, 代颖等<sup>[1]</sup>、王绍仁等<sup>[2]</sup>均对应急设施的定位-路径问题进行了研究, 以解决应急配送中心定位与配送车辆路径安排的联合决策问题; Zhang 等<sup>[3]</sup>利用不确定

性理论解决不确定条件下应急服务设施的选址问题; 郑斌等<sup>[4]</sup>针对震后物资的配送特征, 对震后应急物资配送的动态选址-联运问题进行研究, 建立了双层规划动态模型; 宋英华等<sup>[5]</sup>运用逼近理想解排序法 (TOPSIS) 将受灾点按救援需求紧迫程度进行排序, 确定各受灾点的需求紧迫程度, 考虑商业物流是否参与应急救援行动建立应急物流设施定位-分配 (LAP) 模型, 以达到提高救援效率和节约物流成本的目的;

收稿日期: 2018-02-28; 修回日期: 2018-10-18.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0802500); 国家自然科学基金项目 (51604204, 71501151); 国家社会科学基金项目 (16CTQ022); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2016VI003).

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: 13243326568@163.com.

Boonmee等<sup>[6]</sup>根据数据建模类型和问题类型对紧急人道主义物流相关的设施选址问题进行了调查。

同时也有大量关于应急物资和车辆分配及路径选择方面的研究. Xian<sup>[7]</sup>通过分析救援应急物流的特点,提出应急物流配送的体系结构,并建立了应急物流配送优化模型对应急物流中的车辆进行合理安排,以减少车辆配置时间和物流成本;庞海云等<sup>[8]</sup>在两级应急物资配送网络中,在考虑公平和应急响应时间约束的前提下,建立了以系统损失最小为目标的应急物资分配决策模型;张国富等<sup>[9]</sup>针对包含有多储备点、多发放点、多种救援物资的分配与调度问题建立了多目标模型;曲冲冲等<sup>[10]</sup>在两级配送网络中以应急物资保障时效性与分配公平性为目标,建立了考虑多种运输方式、多时段动态的应急物资配送中心选址与运输配送路径优化的多目标规划模型;Edrissi等<sup>[11]</sup>提出了一种基于救援行动效率的新的可靠性操作方法,用于评估交通运输网络的性能,提高网络可靠性,最大限度地减少死亡人数;Zhang等<sup>[12]</sup>通过构造两个无量纲索引来估计可选路径,确定最佳路径,从而解决应急物流管理的路线选择问题;Najafi等<sup>[13]</sup>针对地震响应阶段中的救灾物资和受伤人员的运输问题,提出一个多目标、多模式、多商品和多期随机模型;Nikoo等<sup>[14]</sup>针对应急交通网络问题提出了一个基于优化的模型,用以找到覆盖主要灾难中心的旅行时间和脆弱性最低的应急车辆路线. 对于这类问题的求解主要包括非支配排序差分进化算法<sup>[15]</sup>、遗传算法<sup>[16-17]</sup>和两阶段启发式算法<sup>[18]</sup>等.

在包含中转设施的两级应急物资配送网络中,文献[4]设到达配送中心的应急物资开始向下级配送的时间为上级物资运输的最晚到达时间,这会延长物资到达受灾点的时间. 文献[2]和文献[8]将从供应点经由配送中心运往受灾点的物资的运输时间表示为车辆的运输时间,即应急物资到达配送中心后便开始向下级配送,这样增加了运输次数,也大大增加了运输配送的成本. 鉴于此,本文对于已运达配送中心的应急物资是否选择等待下批物资到达后再进行向下级配送的问题,提出一种新的决策模型,并与传统的两种情形进行比较. 建立以物资到达受灾点后灾民对物资量及时间的满意度最大以及系统总成本最小为目标的多物资、多级配送的车辆分配装载优化模型,并利用基于实数编码的遗传算法进行求解. 新模型所具有的优点:一是较传统的决策方式而言更具有实际意义,可根据实际情况来决定配送中心处应急物资开始向下级配送的时间,从而综合了传统决策方式的优点,在获得较高灾民对于物资和时间的满意度的

同时,减少运输成本;二是能够为决策者提供系统的决策方案,具体到各时段各地点处车辆的发车时刻以及使用数量等.

## 1 模型建立

### 1.1 问题描述

在应急物流中,应急物资运送的状况将对灾区人民产生直接影响,如何从灾区之外的地方调配应急物资使其满足受灾点的需求成为目前研究的热点. 建立具有“供应点-配送中心-受灾点”的两级应急物资配送网络,如图1所示. 其中包含 $i$ 个供应点 $I_1, I_2, \dots, I_i$ ,  $j$ 个已选定的配送中心 $J_1, J_2, \dots, J_j$ ,  $k$ 个受灾点 $K_1, K_2, \dots, K_k$ . 主要考虑灾区需求量较大的帐篷和食品的配送,并针对应急物资从供应点发出到达配送中心后是否立即发出的问题进行决策.

传统方法1,各配送中心需等到所有从供应点运来的物资到达后,再进行下一级的配送,将会延长应急物资到达受灾点的时间;

传统方法2,各配送中心一旦有从供应点的物资送达,便开始进行下一级的配送,将大大增加运输车辆的消耗,从而大大提高了运输的成本.

本文提出一种新的决定何时从配送中心发车的决策方式,可以避免前两种传统方式的缺点,在提高灾民对物资到达的量及时间的综合满意度的同时,降低运输费用.

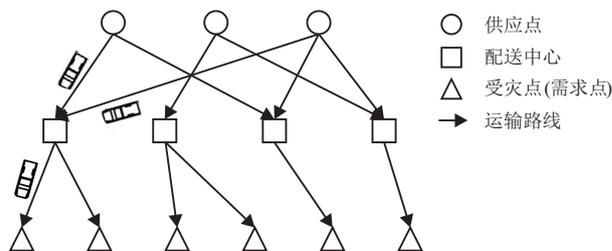


图1 应急物流系统物资配送示意图

基本假设:

- 1) 供应点和配送中心的救援车辆均为同种类型的车辆,允许两种物资进行混装;
- 2) 各受灾点对两种物资的需求量已知;
- 3) 考虑到需求点物资需求量大,一个受灾点可由来自同一配送中心的多辆车配送;
- 4) 配送中心是临时建立的,因此不考虑其建造成本;
- 5) 鉴于物资在运输至临时配送中心时,并不需要全部卸载后进行重新装载,因此不考虑物资在配送中心的装载时间;
- 6) 供应点的车辆均同时出发,且两个不同供应点到达同一个配送中心的时间不存在相同的情况.

变量及符号说明如下:

$G = \{1_1, \dots, 1_g\}$  为集散点处运输车辆的集合;

$H = \{2_1, \dots, 2_h\}$  为配送中心处运输车辆的集合;

合;

$t_0$  为车辆单位距离的行使时间;

$d_{ij}$  和  $d_{jk}$  为由供应点到临时配送中心, 及从配送中心到受灾点的最短距离;

$P$  为车辆的容量上限;

$M$  为应急物资种类的集合,  $m = 1$  为帐篷,  $m = 2$  为食品;

$Q_k^m$  为受灾点  $k$  对物资  $m$  的需求量;

$B_i^m$  为集散点  $i$  的物资  $m$  的供应量;

$t_{1k}^m$ 、 $t_{2k}^m$  表示受灾点  $k$  的灾民对物资  $m$  的到达时间感到非常满意和不满意的时间;

$C_1$ 、 $C_2$  为单位距离车辆的行驶成本和单位车辆的租用成本;

$W^m$  为单位物资  $m$  所占的容量;

$\delta^m$  为受灾点对第  $m$  种物资的最低满足率;

$T_{ij}$  为从物资配送中心  $j$  开始发车的时间;

$T_{ijk}^m$  为物资  $m$  在  $t_{ij}$  时刻从配送中心  $j$  出发到达受灾点  $k$  的时间;

$p_{gij}^m$ 、 $q_{hjk}^m$  为由集散点到配送中心以及从配送中心到受灾点运输物资  $m$  的数量;

$p_{ij}^m(t_{ij}^a)$  为  $t_{ij}^a$  时刻从集散点  $i$  运到配送中心  $j$  的物资  $m$  的量;

$p_j^m(t_{ij}^a)$  为  $t_{ij}^a$  时刻配送中心  $j$  拥有的物资  $m$  的量;

$x_{ij}$  为 0-1 变量, 若有车从集散点  $i$  运物资到配送中心  $j$  则为 1, 否则为 0;

$y_{jk}(t_{ij})$  为 0-1 变量, 若  $t_{ij}$  时刻有车从配送中心  $j$  出发运送物资到受灾点  $k$  则为 1, 否则为 0;

$y_{jk}^m(t_{ij})$  为 0-1 变量, 若  $t_{ij}$  时刻有车从配送中心  $j$  出发将物资  $m$  运送到受灾点  $k$  则为 1, 否则为 0;

$R^a$  为 0-1 变量, 若  $t_{ij}^a$  时刻要等待  $t_{i,j}^{a+1}$  时刻的物资到来则为 1, 否则为 0;

$x_{gij}$  为 0-1 变量, 若车辆  $g$  被分配给集散点  $i$ , 并将物资运到配送中心  $j$  则为 1, 否则为 0;

$y_{hjk}$  为 0-1 变量, 若车辆  $h$  被分配给配送中心  $j$ , 并将物资运到需求点  $k$  则为 1, 否则为 0;

$K_j$  为配送中心  $j$  所负责的受灾点。

### 1.2 模型的构建

考虑到受灾点对运达物资的满意度与物资到达

时间及物资到达的数量均有关系, 因此将灾民对物资到达时间的满意度和此时所到应急物资量的满意度的乘积作为第一目标, 以成本为第二目标, 即

$$\max Z_1 = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} F_k^m(T_{ijk}^m) \times \left( \left( \sum_{h \in H} q_{hjk}^m(T_{ij}) y_{hjk} \right) / Q_k^m \right), \quad (1)$$

$$\min Z_2 = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{g \in G} (C_1 + C_2 d_{ij}) x_{gij} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \left( (C_1 + C_2 d_{jk}) \sum_{h \in H} y_{hjk}(T_{ij}) \right). \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \sum_{g \in G} \sum_{j \in J} p_{gij}^m x_{gij} = B_i^m, \quad \forall m \in M, i \in I. \quad (3)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{g \in G} \sum_{i \in I} p_{gij}^m x_{gij} \leq A_j, \quad \forall j \in J. \quad (4)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} q_{hjk}^m(T_{ij}) y_{hjk}(T_{ij}) \leq Q_k^m, \quad \forall m \in M. \quad (5)$$

$$\sum_{g \in G} \sum_{i \in I} p_{gij}^m x_{gij} \geq \delta^m \left( \sum_{k \in K} Q_k^m \right), \quad \forall j \in J, m \in M. \quad (6)$$

$$y_{jk}^m(T_{ij}) = \begin{cases} 1, & q_{hjk}^m(T_{ij}) y_{hjk}(T_{ij}) > 0; \\ 0, & \text{else}; \end{cases} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, m \in M. \quad (7)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \sum_{g \in G} x_{gij} > 0; \\ 0, & \text{else}; \end{cases} \quad \forall i \in I, j \in J. \quad (8)$$

$$y_{jk}(T_{ij}) = \begin{cases} 1, & \sum_{h \in H} y_{hjk}(T_{ij}) > 0; \\ 0, & \text{else}; \end{cases} \quad \forall j \in J, k \in K. \quad (9)$$

$$T_{ijk}^m = T_{ij} y_{jk}(T_{ij}) + d_{jk} t_0 y_{jk}(T_{ij}), \quad \forall j \in J, k \in K, m \in M, i \in I. \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} y_{jk}^m(T_{ij}) \geq 1, \quad \forall m \in M, k \in K. \quad (11)$$

$$\sum_{m \in M} W_m p_{gij}^m x_{gij} \geq P, \quad \forall g \in G, i \in I, j \in J. \quad (12)$$

$$\sum_{m \in M} W_m q_{hjk}^m(T_{ij}) y_{hjk}(T_{ij}) \leq P,$$

$$\forall i \in I, j \in J, h \in H, j \in J, k \in K. \quad (13)$$

$$p_{ij}^m(t_{ij}^a) = \sum_{g \in G} p_{gij}^m x_{gij}, \forall i \in I, m \in M, a \in I. \quad (14)$$

$$p_j^m(t_{i,j}^{a+1}) = p_{i,j}^m(t_{i,j}^{a+1}) + p_j^m(t_{ij}^a)R^a, \forall j \in J. \quad (15)$$

$$p_j^m(T_{ij}) = \sum_{j \in J} \sum_{h \in H} q_{hjk}^m(T_{ij}) y_{hjk}(T_{ij}), \quad \forall i \in I, k \in K. \quad (16)$$

$$p_{gij}^m \geq 0, q_{hjk}^m \geq 0, \quad i \in I, j \in J, k \in K, m \in M. \quad (17)$$

$$x_{gij}, y_{hjk} = \{0, 1\}, \forall g \in G, h \in H. \quad (18)$$

在上述模型中,目标函数(1)表示所有受灾点对物资到达时间和物资量的满意度最大,将该满意度表示为受灾点对物资到达时间的满意度与受灾点对该时刻内到达物资量的满意度的乘积  $z = F_k^m(t)(q_k^m/Q_k^m)$ . 其中

$$F_k^m(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < t_{1k}^m; \\ (t_{2k}^m - t)/(t_{2k}^m - t_{1k}^m), & t_{1k}^m \leq t < t_{2k}^m; \\ 0, & t_{2k}^m \leq t; \end{cases} \quad k \in K, m \in M.$$

目标函数(2)表示运输过程中耗费成本最小化;式(3)表示从集散点*i*运出的物资*m*的数量不大于该集散点物资的供应量;式(4)表示到达配送中心*j*的物资总量在其容量限制内;式(5)表示从配送中心到受灾点*k*的物资*m*的数量不大于对该物资的需求量;式(6)表示运往各受灾点的物资*m*不低于其最低需求量;式(7)表示*t<sub>ij</sub>*时刻是否有车辆将物资*m*运到受灾点*k*;式(8)表示有车辆将物资从集散点*i*运到配送中心*j*;式(9)表示*t<sub>ij</sub>*时刻是否有车辆将物资从配送中心*j*运到受灾点*k*;式(10)表示物资*m*在*t<sub>ij</sub>*时刻从配送中心*j*运达受灾点*k*的时间;式(11)表示有车辆将物资*m*运到受灾点*k*;式(12)、(13)表示为每辆车所容纳物资的量不超过其容量上限;式(14)表示*t<sub>ij</sub><sup>a</sup>*时刻从集散点*i*运到配送中心*j*的物资*m*的量;式(15)表示*t<sub>ij</sub><sup>a+1</sup>*时刻配送中心*j*所拥有的物资*m*的量;式(16)表示*t<sub>ij</sub>*时刻从配送点*j*运出的物资*m*的量等于此时该配送中心对该物资的拥有量;式(17)表示非负约束;式(18)表示0-1变量约束.

针对运输物资的车辆到达配送中心后是否等待其他车辆到达后再进行下一级的物资配送,提出一种新的决策方式作为第3种方式,将传统的两种决策方

式作为第1种、第2种方式,下面为3种决策方式的具体形式.

1) 选择等待时间的极端状态,即从各供应点到该配送中心的物资均到达后,再将该配送中心的物资进行重新装载分配到受灾点,此时  $T_{ij} = \max_{i \in I} (t_{ij}^a x_{ij})$  且  $R^a = 1$ ,如图2所示.

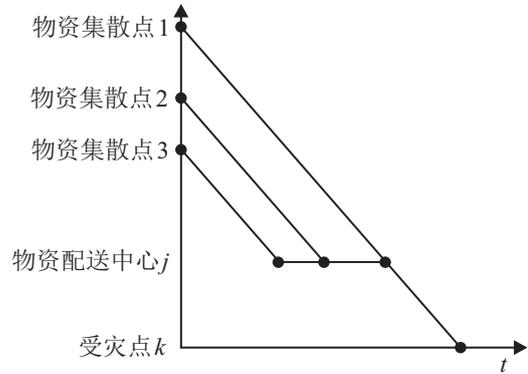


图2 极端状态下进行等待时的运输时间/h

2) 不需要进行等待,即有物资到达配送中心就开始发车,则  $T_{ij} = t_{ij}^a x_{ij}$  且  $R^a = 0$ ,如图3所示.

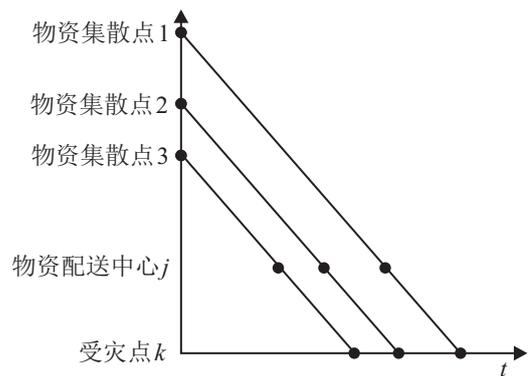


图3 完全不进行等待时的运输时间/h

3) 先不考虑有的车辆需要等待而有的车辆不需要等待的情况,若该时刻选择等待,则要求该时刻内到达该配送中心的所有车辆必须等到下一个时刻的应急物资到达后才能进行下一步的抉择,此时

$$R^a = \begin{cases} 1, & \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \left[ F_k^m(t_{i,j}^{a+1}) \sum_{h \in H} q_{hjk}^m(t_{i,j}^{a+1}) y_{hjk} / Q_k^m \right] > \\ & \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \left[ F_k^m(t_{i,j}^a) \sum_{h \in H} q_{hjk}^m(t_{i,j}^a) y_{hjk} / Q_k^m \right]; \\ 0, & \text{else.} \end{cases}$$

当  $R^a = 0$ ,即不进行等待时,开始从配送中心*j*发车,则发车时间

$$T_{ij} = \begin{cases} t_{ij}^a, & R^a = 0; \\ D, & R^a = 1. \end{cases}$$

如图4所示.

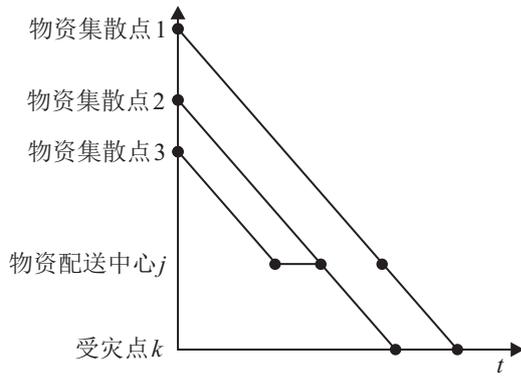


图 4 合理选择是否进行等待时的运输时间 /h

## 2 模型的求解与分析

### 2.1 多目标问题的处理

利用 min-max 对多目标问题进行标准化处理, 第 1 个目标函数变为  $Z_1^* = (Z_1 - Z_1^{\min}) / (Z_1^{\max} - Z_1^{\min})$ , 第 2 个目标函数变为  $Z_2^* = (Z_2 - Z_2^{\min}) / (Z_2^{\max} - Z_2^{\min})$ ; 然后利用线性加权组合法, 结合各子目标的重要程度给予相应的权数, 再用各子目标分别乘以对应的权数后相加, 便将原多目标问题转化为单目标函数

$$Z = \max(\omega_1 \times Z_1^* - \omega_2 \times Z_2^*),$$

其中  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  表示决策者对于目标函数的选择倾向所占的比重。

### 2.2 遗传算法

遗传算法是一类借助生物界的进化规律演化而来的随机化搜索方法。遗传算法能够直接对结构对象进行操作, 不存在求导和函数连续性的限定, 主要采用概率化的寻优方法, 能够自动获取和指导优化的搜索空间, 并自适应地调整搜索方向, 因此本文采用实数编码的遗传算法进行求解。

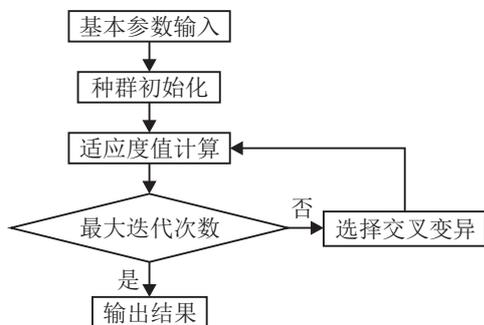


图 5 遗传算法流程

### 2.3 染色体编码、解码及其种群初始化

子串 I: 采用实数编码, 长度为  $|M||J|$ , 第  $m$  个分子串的第  $j$  个基因位为配送中心  $j$  所分得的物资  $m$  的量。首先满足各配送中心所负责区域的最低需求

量, 使得式 (4) 成立; 然后将剩余的物资随机分给各配送中心, 第  $m$  个分子串之和为  $\sum_{i \in I} B_i^m - \delta^m \sum_{k \in K_j} Q_k^m$ , 最低需求量与染色体各分子串之和为  $\sum_{i \in I} B_i^m$ , 保证式 (3) 成立。

解码子串 I 获得各受灾点物资的分配量, 以及各供应点向配送中心分配物资的情况。

Step 1: 用  $D_j^m$  表示配送中心  $j$  应分的应急物资  $m$  的量, 首先满足各配送中心所负责的各受灾点的最低需求量, 令  $D_j^m = \delta^m \sum_{k \in K_j} Q_k^m, \forall j \in J, \forall m \in M$ ;

Step 2:  $q_k^m$  为受灾点  $k$  应分的物资  $m$  的量,  $p_{ij}^m$  为供应点  $i$  分到配送中心  $j$  物资  $m$  的量, 令  $q_k^m = 0, p_{ij}^m = 0, T_j = 0, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall m \in M$ ;

Step 3: 令  $j = 1, m = 1$ ;

Step 4: 根据子串 I 确定配送中心  $j$  分得的物资  $m$  的量,  $D_j^m = D_j^m + \text{sub1}(j + (m - 1) \cdot |J|)$ ;

Step 5: 按各配送中心的需求, 对应急物资  $m$  进行按比例分配, 令  $q_k^m = \left[ Q_k^m \cdot D_j^m / \sum_{k \in K_j} Q_k^m \right]$ ;

Step 6: 剩余未分配的物资  $m$  的量为  $D_j^m - \sum_{k \in K_j} q_k^m$ , 优先选择当前满意度最小的灾点进行再分配, 即  $k^* = \arg \min \{q_k^m / Q_k^m | k \in K_{j^*}\}$ , 为该受灾点进行分配 1 个单位的物资  $m$ , 即  $q_{k^*}^m = q_{k^*}^m + 1$ , 重复 Step 6, 直至剩余物资分配完毕;

Step 7: 选择为配送中心提供应急物资的供应点  $i^* = \arg \min \{t_{ij} | B_i^m > 0\}$ ;

Step 8: 物资的分配量  $p_{i^*j^*}^m = \min \{B_{i^*}^m, D_{j^*}^m\}$ , 更新供应点处剩余物资量  $B_{i^*}^{m*} = B_{i^*}^m - p_{i^*j^*}^m$ , 更新配送中心还需配送的物资量  $D_{j^*}^{m*} = D_{j^*}^m - p_{i^*j^*}^m$ ;

Step 9: 如果  $m^* < |M|$ , 则令  $m^* = m^* + 1$ , 转到 Step 4, 否则执行 Step 10;

Step 10: 若  $j^* = |J|$ , 则结束, 否则更新  $j^* = j^* + 1$ , 转到 Step 4, 否则执行 Step 11;

Step 11: 如果  $p_{ij}^m > 0$ , 则  $x_{ij} = 1, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall m \in M$ , 根据上述 3 种决策方式, 计算从配送中心开始发车向受灾点运送物资的时间  $T_j, \forall j \in J$ 。

对不满足约束条件的情况, 直接在适应度函数上加一无穷小数进行惩罚。根据染色体编码规则随机生成种群规模为 popsize 的初始种群。

### 2.4 适应度值的计算

通过对染色体解码后, 计算每个染色体对应的经过转化后的目标函数值来表示染色体适应度值。根

据  $T_j$  求出物资到达灾区的时间  $T_{jk}^m$ , 利用目标函数值表示染色体的适应度值, 则第  $i$  条染色体的适应度值为

$$Z_1 = \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} F_k^m(t_{jk}^m)(q_k^m / Q_k^m),$$

$$Z_2 = \left[ \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \left( \left[ \sum_{m \in M} W^m p_{ij}^m / P \right] (C_1 + C_2 d_{ij}) \right) + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K_j} \left( \left[ \left( \sum_{m \in M} W^m p_{jk}^m \right) / P \right] (C_1 + C_2 d_{jk}) \right) \right],$$

$$Z(i) = \omega_1 Z_1 - \omega_2 Z_2.$$

2.5 遗传操作

1) 选择. 从旧种群中以一定概率选择个体到新的种群中, 个体被选中的概率与适应度值有关, 个体适应度值越大, 被选中的概率越大.

2) 交叉. 由于染色体为实数编码, 且子串 I 中第  $m$  个分子串之和为定值, 为保证交叉变异后的分子串基因和不变, 采用算术交叉法, 通过两个个体的线性组合产生新的个体.

3) 变异. 采用边界变异, 即对于子串 I 随机选择一个基因位, 取可行范围内的最大值或最小值, 并将其他基因位的值进行按比例缩减, 同时为保证符合实际问题, 将每个基因位进行向下取整, 并将和值与定值之差随机加到某个基因位上, 从而保证分子串中基因位之和为定值.

2.6 终止规则

遗传算法的运算迭代次数达到 maxgen 后, 停止运算, 输出结果.

3 算例分析

以 5.12 汶川地震中的数据作为算例, 通过 Google Map 获得道路数据信息, 供应点选择为军用机场、成都双流国际机场以及火车北站, 应急物资配送中心选择为江油、汶川、茂县和广元, 并按照到配送中心距离的邻近分配原则, 确定各应急配送中心需要负责配送的受灾点. 按照邻近分配原则, 茂县所负责的受灾点为茂县、黑水镇和太平乡; 汶川所负责的受灾点为汶川、理县和卧龙镇; 江油所负责的受灾点为盐亭、永昌镇和梓潼镇; 广元所负责的受灾点为广元、朝天区和苍溪县. 各供应点的物质拥有量以及各受灾点的物资需求量情况如表 1 所示. 各受灾点对两种物资的最低满足率分别为  $\delta^1 = 0.4, \delta^2 = 0.3$ ; 两种物资每份的重量为  $W^1 = 0.82 \text{ kg} / \text{份}, W^2 = 5 \text{ kg} / \text{份}$ ; 将所有起始救援时刻当作 0 时刻看待.

表 1 供应点和受灾点处应急物资供应和需求量 份

受灾点	食品	日用品
军用机场	65 000	6 600
成都双流国际机场	62 000	6 400
火车北站	76 000	7 200
盐亭县	20 830	2 090
永昌镇	6 700	690
梓潼县	23 680	2 370
理县	33 200	3 230
卧龙镇	5 300	550
汶川	46 480	4 650
茂县	32 680	3 270
黑水县	9 500	980
太平乡	5 300	550
广元市	19 670	1 930
朝天区	12 650	1 230
苍溪县	23 680	2 320

算法参数设置为 popsize = 200, maxgen = 400, pc = 0.8, pm = 0.05. 在 Matlab R2014 a 上进行编程, 并在处理器为 Intel(R) Core(TM) i3-4150 cpu @3.50 GHz 以及运行内存为 3.71 GB 的计算机上进行运行. 目标权重分别取  $\omega_1 = 0.6, \omega_2 = 0.4$  和  $\omega_1 = 0.7, \omega_2 = 0.3$ . 运行结果如表 2 所示.

表 2 不同目标权重对应的最优目标值

目标权重	决策方式	综合目标 函数值 Z	第 1 个目标 函数值 Z <sub>1</sub>	第 2 个目标 函数值 Z <sub>2</sub>
$\lambda_1 = 0.6,$ $\lambda_2 = 0.4$	第 1 种	0.412 1	20.479 9	69 782.4
	第 2 种	0.418 0	20.731 6	78 070.8
	第 3 种	0.389 2	20.697 7	73 926.6
$\lambda_1 = 0.7,$ $\lambda_2 = 0.3$	第 1 种	0.560 3	20.639 2	72 212.4
	第 2 种	0.562 3	20.875 6	80 500.8
	第 3 种	0.489 1	20.725 2	76 482.6

如表 2 所示, 将 3 种方式在各取值的最大值与最小值的可变范围内进行比较, 当目标权重取  $\omega_1 = 0.6, \omega_2 = 0.4$  时, 第 3 种情况较第 1 种情况而言, 灾民对物资到达的量及时间的综合满意度提升了 15.25%, 运输成本提高了 25.77%; 较第 2 种情况而言, 灾民对应急物资到达的量及时间的综合满意度降低了 2.03%, 运输成本降低了 20.49%. 当目标权重取  $\omega_1 = 0.7, \omega_2 = 0.3$  时, 第 3 种情况较第 1 种情况而言, 灾民对物资到达的量及时间的综合满意度提升了 6.02%, 运输成本提高了 26.56%; 较第 2 种情况而言, 灾民对物资到达的量及时间的综合满意度降低了 9.01%, 运输成本降低了 19.87%. 通过对目标权重不

同取值的比较可以看出,第 3 种情况结合了前两种情况的优点,可以在保证获得较高综合满意度的同时,使运输成本中的花费不至于过高。

由表 3 可知:所提出的第 3 种决策方式,可根据实际情况调整配送中心的发车时间;而第 1 种决策方式,各配送中心的发车时间只能是上级物资运输的最晚到达时间;第 2 种决策方式,各配送中心的发车时间是上级物资运输的时间。

表 3 不同决策方式的配送中心发车时间

配送中心	发车时间/h		
	第 1 种	第 2 种	第 3 种
江油	2.71	2.71	2.71
汶川	2.56	2.56	2.56
茂县	6.78	5.10; 5.46; 6.78	5.46; 6.78
广元	5.78	5.78	5.78

根据表 2 和表 3 对 3 种决策方式的最优解进行比较可知,所提出的第 3 种决策方式更能够为决策者提供好的决策方案。第 3 种优化模型的最优调配方案如表 4 和表 5 所示。

表 4 供应点到配送中心的物资和车辆分配情况及发车时间

配送中心	供应点	供应点发车时间/h	发车数量/辆	发送应急物资的量/份	
				食品	日用品
江油	军用机场	0	0	0	0
	成都机场	0	0	0	0
	火车北站	0	3	42 020	4 821
汶川	军用机场	0	0	0	0
	成都机场	0	4	61 049	5 256
	火车北站	0	0	0	0
茂县	军用机场	0	1	12 549	1 277
	国际机场	0	1	951	1 144
	火车北站	0	2	33 980	2 379
广元	军用机场	0	4	52 451	5 323
	成都机场	0	0	0	0
	火车北站	0	0	0	0

表 5 供应点到配送中心的物资和车辆分配情况及发车时间

配送中心	受灾点	配送中心发车时间/h	发送应急物资的量/份	
			食品	日用品
江油	盐亭县	2.71	17 092	1 955
	永昌镇	2.71	5 498	647
	梓潼县	2.71	19 430	2 219
汶川	理县	2.56	23 851	2 014
	卧龙镇	2.56	3 808	343
	汶川	2.56	33 390	2 899
茂县	茂县	5.46	9 291	1 648
		6.78	23 388	1 620
	黑水县	5.46	2 700	493
		6.78	6 798	485
		6.78	1 509	493
广元	太平乡	6.78	3 794	274
	广元市	5.78	18 423	1 875
	朝天区	5.78	11 849	1 195
	苍溪县	5.78	22 179	2 253

### 4 结 论

针对从供应点运达配送中心的物资是否立即发出的问题,建立以灾民对物资的量及时间的综合满意度最大化及系统总成本最小化的多物资多级配送的应急物资调配方案优化模型,提出新的决策方式,并与传统的两种决策方式进行比较。提出基于实数编码的遗传算法对问题进行求解,通过比较最佳配送方案,得出第 3 种决策方式保留了第 1、第 2 种方式的优势,获得了高的物资量及时间综合满意度,并较第 2 种方式大大降低了系统总成本。

本文仅研究了一种运输方式,及配送中心位置已经确定的情形,而实际情况可涉及多种运输方式,因此需要在下一步的研究中考虑加入多种运输方式进行联合运输及考虑配送中心的选址问题。

### 参考文献(References)

- [1] 代颖, 马祖军, 朱道立, 等. 震后应急物资配送的模糊动态定位——路径问题[J]. 管理科学学报, 2012, 15(7): 60-70.  
(Dai Y, Ma Z J, Zhu D L, et al. Fuzzy dynamic location-routing problem in post-earthquake delivery of relief materials[J]. J of Management Sciences in China, 2012, 15(7): 60-70.)
- [2] 王绍仁, 马祖军. 震害紧急响应阶段应急物流系统中的 LRP[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(8): 1497-1507.  
(Wang S R, Ma Z J. Location-routing problem in emergency logistics system for post-earthquake emergency relief response[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2011, 31(8): 1497-1507.)
- [3] Zhang B, Peng J, Li S. Covering location problem of emergency service facilities in an uncertain environment[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 51: 429-447.
- [4] 郑斌, 马祖军, 周愉峰. 震后应急物流动态选址-联运问题的双层规划模型[J]. 系统管理学报, 2017, 26(2): 326-337.  
(Zeng B, Ma Z, Zhou Y F. Bi level model for dynamic location transportation problem for post-earthquake relief distribution[J]. J of systems & Management, 2017, 26(2): 326-337.)
- [5] 宋英华, 艾艳芳, 王喆, 等. 考虑商业物流资源的应急物流定位-分配问题模型[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(11): 157-162.  
(Song Y H, Ai Y F, Wang Z, et al. Research on LAP model of emergency logistics considering commercial logistics resources[J]. China Safety Science J, 2016, 26(11): 157-162.)

- [6] Boonmee C, Arimura M, Asada T. Facility location optimization model for emergency humanitarian logistics[J]. *Int J of Disaster Risk Reduction*, 2017, 24: 485-498.
- [7] Xian Q. Emergency logistics distribution optimization model and algorithm in disaster chain[C]. *Proc of the Int Conf on Information Engineering and Applications*. London: Springer, 2013: 373-382.
- [8] 庞海云, 刘南, 吴桥. 应急物资运输与分配决策模型及其改进粒子群优化算法[J]. *控制与决策*, 2012, 27(6): 871-874.  
(Pang H Y, Liu N, Wu Q. Decision-making model for transportation and distribution of emergency materials and its modified particle swarm optimization algorithm[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(6): 871-874.)
- [9] 张国富, 王永奇, 苏兆品, 等. 应急救援物资多目标分配与调度问题建模与求解[J]. *控制与决策*, 2017, 32(1): 86-92.  
(Zhang G F, Wang Y Q, Su Z P, et al. Modeling and solving multi-objective allocation-scheduling of emergency relief supplies[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(1): 86-92.)
- [10] 曲冲冲, 王晶, 黄钧, 等. 考虑时效与公平性的震后应急物资动态配送优化研究[J]. *中国管理科学*, 2018, 26(6): 178-187.  
(Qu C C, Wang J, Huang J, et al. Dynamic emergency materials distribution optimization with timeliness and fairness objective for post-earthquake emergency rescue[J]. *Chinese J of Management Science*, 2018, 26(6): 178-187.)
- [11] Edrissi A, Nourinejad M, Roorda M J. Transportation network reliability in emergency response[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 80: 56-73.
- [12] Zhang X, Zhang Z, Zhang Y, et al. Route selection for emergency logistics management: A bio-inspired algorithm[J]. *Safety Science*, 2013, 54: 87-91.
- [13] Najafi M, Eshghi K, Dullaert W. A multi-objective robust optimization model for logistics planning in the earthquake response phase[J]. *Transportation Research Part E*, 2013, 49(1): 217-249.
- [14] Nikoo N, Babaei M, Mohaynany A S. Emergency transportation network design problem: Identification and evaluation of disaster response routes[J]. *Int J of Disaster Risk Reduction*, 2018, 27: 7-20.
- [15] Wang H, Du L, Ma S. Multi-objective open location-routing model with split delivery for optimized relief distribution in post-earthquake[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, 69(3): 160-179.
- [16] 李双琳, 马祖军, 郑斌, 等. 震后初期应急物资配送的模糊多目标选址-多式联运问题[J]. *中国管理科学*, 2013, 21(2): 144-151.  
(Li S L, Ma Z J, Zheng B, et al. Fuzzy multi objective location multimodel transportation problem for relief delivery during the initial post-earthquake period[J]. *Chinese J of Management Science*, 2013, 21(2): 144-151.)
- [17] 汪定伟, 张国祥. 突发性灾害救援中心选址优化的模型与算法[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2005, 26(10): 953-956.  
(Wang D W, Zhang G X. Model and algorithm to optimize location of catastrophic rescue center[J]. *J of Northeastern University: Natural Science*, 2005, 26(10): 953-956.)
- [18] 徐琴, 马祖军, 李华俊. 城市突发公共事件在应急物流中的定位-路径问题研究[J]. *华中科技大学学报: 社会科学版*, 2008, 94(6): 36-40.  
(Xu Q, Ma Z J, Li H J. Location-routing problem in emergency logistics for public emergencies[J]. *J of Huazhong University of Science and Technology: Social Science Edition*, 2008, 94(6): 36-40.)

### 作者简介

宋英华(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事科研管理、应急管理、项目管理等研究, E-mail: song6688c@163.com;

葛艳(1992—), 女, 硕士生, 从事公共安全与应急管理、应急物流的研究, E-mail: 15539660278@163.com;

杜丽敬(1985—), 女, 讲师, 博士, 从事应急物流、供应链管理的研究, E-mail: 13243326568@163.com;

吕伟(1989—), 男, 讲师, 博士, 从事公共交通安全风险评估、车辆交通及行人动力学的研究, E-mail: weil@whut.edu.cn.

(责任编辑: 齐 霖)