

G1-Critic组合赋权法确定需求紧迫度的 应急物资调度模型及蜂群算法求解

周钰铨, 张惠珍*, 张 莉

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年8月5日; 录用日期: 2025年8月29日; 发布日期: 2025年9月5日

摘 要

重大灾害事件爆发初期, 救灾物资严重紧缺, 科学合理地分配物资对于缓解灾情十分重要。文章引入需求紧迫度的概念, 根据灾点的紧迫程度进行物资分配, 优先保证紧迫度高的灾区。结合地震灾害特征构建灾点需求紧迫度评价体系, 采用G1-Critic主客观组合赋权法确定各灾点的紧迫程度, 并考虑到各灾点的灾民们对于物资分配满足率不同而产生的嫉妒心理以及由于物资送达时间差异而产生的攀比心理的情况, 为尽可能地保证物资分配公平以及各灾区的物资送达时间差最小, 构建了以总加权嫉妒值最小和总攀比时间效应值最低为目标的物资调度优化模型。

关键词

需求紧迫度, G1法, CRITIC法, 物资调度, 人工蜂群算法

Emergency Material Scheduling Model and Bee Colony Algorithm to Determine Demand Urgency Based on G1-Critic Combined Weighting Method

Yuquan Zhou, Huizhen Zhang*, Li Zhang

School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Aug. 5th, 2025; accepted: Aug. 29th, 2025; published: Sep. 5th, 2025

Abstract

In the early stage of a major disaster, there is a serious shortage of disaster relief materials.

*通讯作者。

文章引用: 周钰铨, 张惠珍, 张莉. G1-Critic 组合赋权法确定需求紧迫度的应急物资调度模型及蜂群算法求解[J]. 建模与仿真, 2025, 14(9): 82-94. DOI: 10.12677/mos.2025.149586

Scientific and rational distribution of materials is very important for disaster relief. This paper introduces the concept of demand urgency, and combines the characteristics of earthquake disasters to build an evaluation system for the urgency of demand for disaster sites. The G1-Critic subjective and objective combination weighting method is used to determine the urgency of each disaster site. The jealousy caused by the different distribution satisfaction rates and the comparison psychology caused by the difference in the delivery time of materials, in order to ensure the fair distribution of materials and the minimum difference in the delivery time of materials in each disaster area as much as possible, the total weighted envy value is the smallest. The material scheduling optimization model with the goal of the lowest total comparison time effect value. According to the characteristics of the research problem, an improved bee colony algorithm is designed to solve the problem. The two-dimensional real number coding method is adopted, the population diversity is increased by strategies such as crossover mutation, and the Pareto dominance strategy is used to update the nectar source and external files. Finally, the rationality and effectiveness of the model and algorithm are verified by taking the Wenchuan earthquake as an example.

Keywords

Urgency of Demand, G1 Method, CRITIC Method, Material Scheduling, Artificial Bee Colony Algorithm

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自 21 世纪以来,我国各类灾害事件频发,不仅造成了一定数量的人员伤亡,同时也给经济发展与社会进步带来了阻碍,及时对灾区进行救援对于缓解灾情、安抚灾民十分关键。目前国内外对应急物资调度的研究已经有了一定的基础,Fiedrich 等人[1]以震后初期搜救阶段中死亡人数最低为目标,优先将应急救援物资分配给最严重的灾区,以此来降低死亡人数。Tzeng 等人[2]将应急物资调度问题扩展到多种物资、多灾点、多种运输方式的情况,建立了以最小化总成本、最短化总运输时间和最大化最低满足率的多目标模型。Mohasel 等人[3]将送取货时间,延迟配送等因素加以考虑,通过减少物资的延迟配送,合理分配资源,从而实现效用最大化。王海军等人[4]以平均车辆运输时间最小化和系统总成本最小化为目标,建立了基于多车型、双目标的开放式选址-路径问题混合整数规划模型。徐浩等人[5]考虑到震后道路受损的情况,将道路通行速度随时间发生变化来模拟灾后路径的运速受限,以最大化救援时间满意度之和和最小化救灾资源使用量为目标,建立了震后应急物资配送的多目标定位-路径问题优化模型。

但是灾后救援初期物资往往供不应求,针对这种情况,王旭坪等人[6]增加了对灾民对救援响应时间的满意程度的考虑,提出了以时间满意度、需求满意度和效用满意度为目标的多目标非线性整数规划模型。陈刚等人[7]考虑到灾害发生初期物资严重短缺的情况,提出了加权嫉妒值的概念,并将总加权嫉妒值最小作为应急物资调度的公平目标,将总成本最小作为效率目标,以此构建了多目标优化模型。为了更好地发挥应急物资的作用,考虑灾区的物资需求紧迫度显得尤为重要,根据紧迫程度对物资进行分配,能够最大程度地减少因物资分配不合理所造成的人员伤情恶化和物资浪费。目前针对紧迫度的研究还较为短缺,Sheu 等人[8]引入数据融合策略以及模糊聚类方法对各灾区进行紧迫性分组,进而根据其紧迫性分组情况对灾区进行物资分配。Yuan 等人[9]人最先采用函数关系量化受灾点需求紧迫程度,综合考虑受

灾点人口特点及受灾情况这两个因素，确定各受灾点的需求优先级。但在实际情况中，每个组的需求紧迫程度不能全面、准确地体现各受灾点对物资需求的迫切程度。王婧等人[10]将灰色关联分析和模糊TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)方法相结合，确定各受灾点的需求紧迫性。宋晓宇等[11]采用改进的灰色关联分析法来确定各灾点的物资需求紧迫程度，并通过设计物资缺失损失和满意度函数来体现物资调度效果，构建了以物资调度总成本最小和受灾点满意度最大为优化目标多目标的应急物资调度模型。陈雨珊[12]基于新冠肺炎疫情初期湖北省各地对于医疗防护物资的需求紧迫程度的不同，结合重大公共卫生事件的特点，选取了各市确诊人数比例、各市确诊出院率、各市确诊病亡率、各市百万人确诊率四个指标研究各市的需求紧迫性。

需求紧迫度的确定需要根据灾区的各灾情指标来综合评估，因此，构建需求紧迫度评价指标体系以及如何确定各指标的权重十分关键，需要考虑到各种突发灾害的现实情况以及专家学者以往的研究经验进行评价体系的搭建。

2. 需求紧迫度确定

2.1. 需求紧迫度评价指标

结合突发性灾害的特点，需求紧迫度评价指标的确定大致归纳为四大类：灾害强度、受灾人口情况、环境情况和物资需求情况(如表 1)。这四个指标均和物资需求紧迫度正相关，也就是四个指标值越高，则受灾点的情况就越严峻，紧迫程度就越高。

Table 1. Evaluation index system for demand urgency

表 1. 需求紧迫度评价指标体系

指标名称	指标类型
灾害强度	确定型指标
受灾人口数量	确定型指标
基础设施损毁程度	模糊型指标
物资短缺程度	模糊型指标

2.2. G1-Critic 组合赋权法确定需求紧迫度

文章采用的主客观赋权法为 G1-Gritic 法。G1 法作为一种主观赋权法，它相较于常用的层次分析法而言，计算过程更为简便，不需要构造判断矩阵，也不需要一致性检验。G1-Critic 法确定权重的基本步骤如下[13]。

(1) 数据标准化处理

步骤 1：构建原始矩阵，将 m 个灾点的 n 个评价指标形成原始矩阵。

$$X = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

第 i 个受灾点 x_i 的第 j ($j=1,2,\dots,n$) 个影响因素指标数据为 x_{ij} 。

步骤 2：数据标准化，具体公式如下所示。

$$p_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}} \quad (2)$$

p_{ij} 为数据标准化后的数值。

(2) G1 主观赋权法

步骤 1: 确定评价指标序关系

将 n 个评价指标 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 进行重要程度排序, 其中影响程度最大的指标记为 X_1^* , 依此类推, 在余下的指标中选出最重要的指标 X_2^* , 直到最后可以得到所有指标的重要程度排序 $X_1^* > X_2^* > \dots > X_n^*$ 。

步骤 2: 确定各指标间的相对重要程度

$$\frac{w_{j-1}^*}{w_j^*} = r_j, j = n, n-1, \dots, 2 \quad (3)$$

步骤 3: 确定权重系数 w_n

$$w_n = \frac{1}{1 + \sum_{j=2}^n \prod_{i=j}^n r_i} \quad (4)$$

(3) CRITIC 客观赋权法

步骤 1: 指标变异性

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \quad (5)$$

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1}} \quad (6)$$

S_j 为第 j 个指标的标准差, 标准差大则指标变异性大。

步骤 2: 指标冲突性

$$R_j = S_j \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (7)$$

$$r_{ij} = \frac{\text{Cov}(x_i, x_j)}{S_i S_j} \quad (8)$$

其中, r_{ij} 为第 i 个指标和第 j 个指标的相关系数。

步骤 3: 计算权重 η_j

$$\eta_j = \frac{R_j}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (9)$$

(4) 确定指标综合权重及物资需求紧迫度

$$\delta_j = \frac{w_j \cdot \eta_j}{\sum_{j=1}^n w_j \eta_j} \quad (10)$$

通过以上步骤求得各需求点的综合权重系数后, 再根据公式(11)计算出所有物资需求点的需求紧急度得分值 D_i , 最后依据公式(12)求得各点的需求紧迫度 λ_i 。

$$D_i = \sum_{j=1}^n \delta_j * p_{ij}, i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

$$\lambda_i = \frac{D_i}{\sum_{i=1}^m D_i}, i=1,2,\dots,m \quad (12)$$

其中, δ_j 为第 j 个评价指标对需求紧急度的权重值; p_{ij} 为物资需求点 i 的第 j 个评价指标的标准化值。

3. 问题假设和模型构建

我国各类自然灾害频发, 针对灾后救援, 我国已经有了丰富的救援经验和体系, 尤其是大规模自然灾害爆发后, 需要从全国各地调集物资进行救援时, 常常以火车站或者机场等交通枢纽作为临时应急物流集散中心, 再将物资配送到各个灾点如图 1 所示。

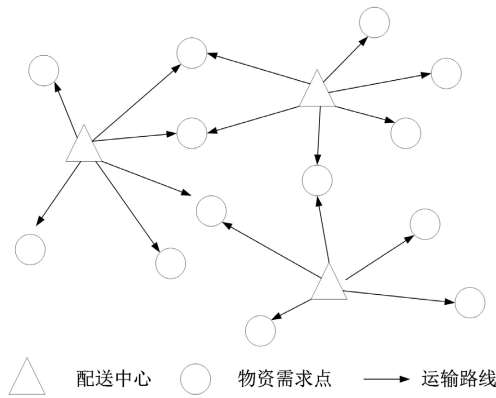


Figure 1. Emergency material dispatch network

图 1. 应急物资调度网络

3.1. 模型假设

为便于模型求解, 做出以下假设: (1) 灾后初期应急物资需求缺口大, 供应量短缺; (2) 应急车辆充足, 且车型单一; (3) 由于各灾区受灾程度不同, 灾民们心理相对脆弱, 容易和其他灾区的救援情况进行比较, 从而产生嫉妒心理。 (4) 应急救援具有时效性, 物资必须在规定的时点之前送达灾区; (5) 配送中心与灾点的位置已知, 且路径唯一; (6) 各个路段的道路损坏率已知; (7) 物资只考虑配送中心到需求点之间的单向流动。

3.2. 符号说明

I : 应急物资配送中心集合, $I = \{1, 2, \dots, m\}, i \in I$;

J : 受灾点集合, $J = \{1, 2, \dots, n\}, j \in J$;

K : 车辆集合, $K = \{1, 2, 3, \dots, e\}, k \in K$;

λ_j : 灾点 j 的物资需求紧迫度;

S_i : 配送中心 i 的物资供应量;

q_j : 灾点 $s_j = \sum_{i \in I} x_{ij}, \forall i \in I$ 的物资需求量;

c_k : 车辆 k 的容量;

v_k : 车辆 k 的平均速度;

x_{ij} : 配送中心 i 送到灾点 j 的物资量;

δ : 最低需求保障率;

σ : 比例公平系数, $\sigma \in [0, 1]$;

d_{ij} : 配送中心 i 到灾点 j 的距离;

t_j : 各个配送中心到灾点 j 的最大时间, $t_j = \max_{i \in I} \left(\frac{d_{ij}}{v_k} w_{ijk} \right), \forall k \in K$;

ET_j : 灾点 j 要求应急物资运达的时间期限;

γ_{ij} : 配送中心 i 到灾点 j 路段的损坏率;

φ : 修复单位距离平均所耗费的时间;

w_{ijk} : 0~1 变量, 表示车辆 k 是否从配送中心 i 配送物资到灾点 j ;

3.3. 模型构建

因此考虑灾民嫉妒心理的多目标物资调度模型如下:

$$\min Z_1 = \sum_{j \in J} \sum_{h \in J} \lambda_j e_{jh} \quad (13)$$

$$\min Z_2 = \sum_{j \in J} \left[t_j - \min_{j \in J} (t_j) \right] \quad (14)$$

$$S_i = \sum_{j \in J} x_{ij}, \forall i \in I \quad (15)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq q_j, \forall j \in J \quad (16)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \geq \delta q_j, \forall j \in J \quad (17)$$

$$\delta = \sigma \sum_{i \in I} S_i / \sum_{j \in J} q_j \quad (18)$$

$$\sum_{i \in I} S_i = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} \quad (19)$$

$$t_j = \max_{i \in I} \left(\frac{d_{ij}}{v_k} w_{ijk} + \varphi \gamma_{ij} d_{ij} \right), \forall k \in K \quad (20)$$

$$t_j \leq ET_j, \forall j \in J \quad (21)$$

$$S_i \geq 0, d_{ij} \geq 0, v_k \geq 0, t_j \geq 0, ET_j \geq 0, \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (22)$$

$$w_{ijk} = \begin{cases} 1 & k \text{ 车从 } i \text{ 配送物资到灾点 } j \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (23)$$

式(13)和式(14)为目标函数分别表示为最小化灾点的总加权嫉妒值和最小化时间攀比效应值; 式(15)配送中心配送给所有灾点的物资量为它的总供应量; 式(16)表示灾点所分配到的物资量不得超过其需求量; 式(17)表示灾点实际分配到的物资量必须满足其最低保障量; 式(18)为最低物资保障率的计算公式; 式(19)表示所有配送中心的应急物资要等于所有灾点实际分配到的物资总和; 式(20)表示为各个配送中心将物资配送物资到灾点 j 的最大时间; 式(21)表示物资配送到灾点的时间限制; 式(22)为非负约束; 式(23)为 0~1 约束。

4. 改进的人工蜂群算法设计

在多目标优化问题中, 由于个体无法直接通过某个目标函数值的大小比较来确定解的优劣, 因此文章将 Pareto 支配的相关思想用于适应度计算当中, 从而更好地发挥算法的寻优能力。

4.1. 解的表示方式

针对多配送中心、多需求点的应急物资调度问题的求解, 算法采用了二维实数编码方式, 可表示为

$X = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}, \dots, x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mn})$ 。其中, x_{ij} 表示第 i 个配送中心分配给第 j 个需求点的物资量。

4.2. 种群初始化

这里采用随机生成初始解的方式, 初始解产生后, 利用约束条件进行判断, 若满足则作为初始可行解, 否则, 就重新生成, 直到构成数量为 SN 个可行解组成的初始种群种群。

4.3. 观察蜂阶段

(1) 首先需要将雇佣蜂分根据 Pareto 支配原则将其划分为 Pareto 最优解和非 Pareto 最优解两类。

(2) 将所有划分为 Pareto 最优解的个体保留下来, 直接被观察蜂选择。对于非 Pareto 最优解的个体则按照公式(24)计算其再根据公式(25)进行轮盘赌比例选择。

(3) 当确定好要跟随的雇佣蜂后, 按照邻域搜索方式进行蜜源搜索, 产生新的蜜源。

(4) 比较新旧蜜源, 保留优质蜜源。

基于支配的多目标人工蜂群算法的适应度计算方法如下:

$$fitness(i) = \frac{DomNum_i}{FoodNumber} \quad (24)$$

$DomNum_i$ 为第 i 个蜜源支配种群中其他蜜源的数量, $FoodNumber$ 为种群中蜜源数量。

蜜源选择概率计算方式如下。

$$p(x) = \frac{fitness(x)}{\sum_{i=1}^N fitness(x_i)} \quad (25)$$

4.4. 蜜源更新策略

假设 x_i 表示原蜜源, x'_i 表示新蜜源, 比较它们之间的支配关系:

(1) 若 $x'_i \prec x_i$, 即新蜜源支配原蜜源, 则用 x'_i 代替 x_i , 更新外部档案, 并设置新蜜源 x'_i 的搜索次数为 0。

(2) 若 $x_i \prec x'_i$, 即原蜜源支配新蜜源, 则保留原蜜源, 原蜜源 x_i 的搜索次数增加 1。

(3) 如果 x_i 与 x'_i 互不支配, 则在 $[0, 1]$ 区间内生成随机数 r , $r > 0.5$ 时, 用 x'_i 代替 x_i , 并将 x'_i 的搜索次数设置为 0; 否则, 保持原蜜源不变, x_i 的搜索次数增加 1。

4.5. 改进的蜂群算法求解步骤

基于上述算法改进策略, 算法具体流程如图 2 所示。

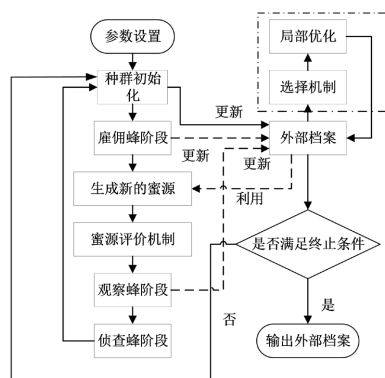


Figure 2. Basic flowchart of improved multi-objective artificial bee colony algorithm

图 2. 改进的多目标人工蜂群算法的基本流程图

5. 算例分析

文章以 2008 年汶川地震为背景,选取文献[14]中的部分数据,将成都军用机场,双流机场和火车北站作为震后的应急物资配送中心,21 个受灾县市作为物资需求点,表 2 是各配送中心的应急配送物资量,表 3 是 21 个受灾点的基本信息。表中的大部分数据可通过查阅相关网页、政府统计年鉴、新闻报道等方式获取,个别数据由于没有准确的渠道来源,为了保证数据的完整性,论文将结合实际设置虚拟数据,同样可以说明模型和算法的有效性。

Table 2. Supply quantity of emergency logistics center materials (Pieces)

表 2. 应急物流中心物资供应量(件)

名称	军用机场	双流机场	火车北站
供应量	11200	10800	10100

Table 3. Basic information of each disaster point

表 3. 各灾点基本信息

灾点	地震烈度	受困人数(万人)	基础设施损坏程度	物资短缺程度	物资需求量(件)
都江堰	10	2.43	严重	严重	1920
茂县	10	1.26	很严重	一般	1344
彭州	8	1.12	很严重	严重	1536
汶川	11	2.25	很严重	很严重	1920
九寨沟	6	0.46	一般	严重	1344
崇州	8	0.85	严重	严重	2304
大邑	8	0.76	一般	严重	2304
什邡	8	0.89	严重	一般	2304
北川	11	2.12	严重	很严重	1344
平武	8	1.08	严重	严重	1920
江油	8	1.24	严重	一般	1920
德阳	8	1.56	严重	一般	1536
绵阳	7	0.89	一般	严重	1536
广汉	8	1.29	严重	严重	2880
广元	7	1.32	一般	严重	2880
青川	8	0.57	严重	严重	2800
旺苍	7	0.63	一般	严重	1920
剑阁	8	0.67	很严重	严重	2880
理县	9	1.16	严重	一般	1920
安县	11	2.13	严重	较严重	1920
绵竹	9	1.29	严重	严重	1920

由于基础设施损坏程度和物资短缺程度均为模糊型指标,需要根据“五级法”将表中的模糊值指标量化得到表 4。

将表格 5 中的数据放入原始数据矩阵 X 中，再将原始矩阵标准化处理后得到矩阵 P 。

$$X = \begin{pmatrix} 10.0 & 10.0 & 8.00 & 11.0 & 6.00 & 8.00 & 8.00 & 8.00 & 11.0 & 8.00 & 8.00 & 8.00 & 7.00 & 8.00 & 7.00 & 8.00 & 7.00 & 8.00 & 9.00 & 11.0 & 9.00 \\ 2.43 & 1.26 & 1.12 & 2.25 & 0.46 & 0.85 & 0.76 & 0.89 & 2.12 & 1.08 & 1.24 & 1.56 & 0.89 & 1.29 & 1.32 & 0.57 & 0.63 & 0.67 & 1.16 & 2.13 & 1.29 \\ 7.00 & 9.00 & 9.00 & 9.00 & 5.00 & 7.00 & 5.00 & 7.00 & 7.00 & 7.00 & 7.00 & 7.00 & 5.00 & 7.00 & 5.00 & 7.00 & 5.00 & 9.00 & 7.00 & 7.00 & 7.00 \\ 7.00 & 5.00 & 7.00 & 9.00 & 7.00 & 7.00 & 7.00 & 5.00 & 7.00 & 7.00 & 5.00 & 5.00 & 7.00 & 7.00 & 7.00 & 7.00 & 7.00 & 7.00 & 5.00 & 9.00 & 7.00 \end{pmatrix}$$
$$P = \begin{pmatrix} 0.8000 & 0.8000 & 0.4000 & 1.0000 & 0.0000 & 0.4000 & 0.4000 & 0.4000 & 1.0000 & 0.4000 & 0.4000 & 0.4000 & 0.4000 & 0.4000 & 0.4000 & 0.4000 & 0.4000 & 0.4000 & 0.4000 & 0.4000 & 0.4000 \\ 1.0000 & 0.4061 & 0.3350 & 0.9086 & 0.0000 & 0.1979 & 0.1523 & 0.2182 & 0.8426 & 0.3147 & 0.5000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 0.0000 & 0.5000 & 0.0000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 \\ 0.5000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 0.0000 & 0.5000 & 0.0000 & 0.5000 & 0.0000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 \\ 0.5000 & 0.0000 & 0.5000 & 1.0000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.0000 & 1.0000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 \\ 0.4000 & 0.4000 & 0.2000 & 0.4000 & 0.2000 & 0.4000 & 0.2000 & 0.4000 & 0.6000 & 1.0000 & 0.6000 & 0.4000 & 0.4000 & 0.2000 & 0.4000 & 0.2000 & 0.4000 & 0.6000 & 1.0000 & 0.6000 & 0.4000 \\ 0.3959 & 0.5583 & 0.2182 & 0.4213 & 0.4365 & 0.0558 & 0.0862 & 0.1065 & 0.3553 & 0.8477 & 0.4213 & 0.5000 & 0.5000 & 0.0000 & 0.5000 & 0.0000 & 0.5000 & 0.0000 & 1.0000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 \\ 0.5000 & 0.5000 & 0.0000 & 0.5000 & 0.0000 & 0.5000 & 0.0000 & 0.5000 & 0.0000 & 1.0000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.0000 & 1.0000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 & 0.5000 \end{pmatrix}$$

Table 4. Conversion results of fuzzy index values
表 4. 模糊指标值转化结果

灾点	地震烈度	受困人数(万人)	基础设施损坏程度	物资短缺程度
都江堰	10	2.43	7	7
茂县	10	1.26	9	5
彭州	8	1.12	9	7
汶川	11	2.25	9	9
九寨沟	6	0.46	5	7
崇州	8	0.85	7	7
大邑	8	0.76	5	7
什邡	8	0.89	7	5
北川	11	2.12	7	9
平武	8	1.08	7	7
江油	8	1.24	7	5
德阳	8	1.56	7	5
绵阳	7	0.89	5	7
广汉	8	1.29	7	7
广元	7	1.32	5	7
青川	8	0.57	7	7
旺苍	7	0.63	5	7
剑阁	8	0.67	9	7
理县	9	1.16	7	5
安县	11	2.13	7	9
绵竹	9	1.29	7	7

5.1. 算法性能分析

实验环境为 Intel (R) Core i5-8250u CPU @ 1.60 GHz 8.00 GB 内存，操作系统为 64 位 Windows 10，使用 Matlab R2017b 进行编程求解。改进的人工蜂群算法中的参数主要包括：种群规模 SN ，外部档案容量 NA ，迭代次数 $iter$ 、最大循环次数等。这里根据相关文献，设置 $SN = 100$ ， $NA = 30$ ， $iters = 300$ ， $limit = 40$ 。

对于多目标优化而言，通常利用非支配前沿解的广泛性度量指标和均匀性度量指标来评价算法的性能[15]。这里主要与标准的蜂群算法和 NSGA-II 算法对比如表 5，其基本参数设置相同。

(1) 非支配前沿解广泛性指标

广泛性是指非支配前沿解在整个解空间分布的广泛程度，这里采用 Zitzler 于 2000 年提出的最大分散度的评价方法[16]来求解非支配前沿解集分布的广泛性，评价函数如式(26)所示：

$$D = \sqrt{\sum_{n=1}^K \left(\max_{i=1}^{[NDS]} f_k^i - \min_{i=1}^{[NDS]} f_k^i \right)^2} \quad (26)$$

(2) 非支配前沿解均匀度指标

均匀度指标是用来评价解集中解分布的均匀性，所求得值越小，则均匀性越好，算法的性能也就越好，我们采用文献[17]中的均匀度指标。

Table 5. Performance comparison of three algorithms

表 5. 三种算法的性能对比

运行次数	算法	NSGA-II		标准人工蜂群算法		改进人工蜂群算法	
		D	Δ	D	Δ	D	Δ
1		558.7857	28.9652	530.9865	24.9749	569.9876	15.0745
2		545.2314	27.2453	547.8534	23.1343	558.9865	16.2341
3		559.8641	23.6548	537.9776	24.4137	561.2542	21.1343
4		549.6589	27.9873	559.4365	26.5259	573.9776	21.3527
5		536.9864	22.3476	534.8692	25.9626	554.9683	20.9766
6		557.9642	23.8653	572.0966	22.1341	579.9429	21.9751
7		521.6841	23.3903	532.1965	20.1923	535.9764	17.9862
8		556.7545	21.0876	555.8663	23.9013	563.8642	18.3041
9		558.9868	20.9763	545.9767	20.0315	578.0858	17.0282
10		531.9702	19.9824	535.8508	21.0873	573.6732	14.9752
平均		547.7886	23.9502	545.3110	23.2357	565.0717	18.5041

5.2. 结果分析

通过上述改进的人工蜂群算法对上述模型进行求解可以得到一组帕累托解集。此时无法找到同时使两个目标值同时达到最优的解。采用文献[7]构建两个损失指标帮助决策者选择最合适的方案。帕累托解集中的所有方案的目标值和损失值如表 6。计算公式如下：

$$LE_{li} = \frac{\max Z_1 - Z_{i,1}}{\max Z_1 - \min Z_1} \quad (27)$$

$$LE_{2i} = \frac{\max Z_2 - Z_{i,2}}{\max Z_2 - \min Z_2}$$

(28)

其中， $\max Z_1$ 、 $\max Z_2$ 、 $\min Z_1$ 和 $\min Z_2$ 分别是目标函数 Z_1 和 Z_2 的最大值和最小值， $Z_{i,1}$ 和 $Z_{i,2}$ 分别是第 i 个方案的两个目标函数的值。决策者可根据自身对分配公平损失和时间公平损失的忍受程度选择满意的方案。决策者偏好与方案选择如表 7，例如决策者最多能接受 10% 的分配公平损失，那么在分配公平损失小于等于 10% 的方案中选择时间公平损失最小的方案，结果为方案 3。若决策者最多能接受 20% 的分配公平损失，即在分配损失小于等于 20% 的方案中选择时间攀比损失最小的方案，结果为方案 5。假设决策者为了兼顾两个目标，即在分配量损失低于 40% 中进行选择，此时方案 8 最优，此时最大总嫉妒加权值为 522.75，时间攀比值为 50.39。因此按照方案 8 进行物资分配。方案 8 的具体分配策略如表 8。

Table 6. F_1 loss index and F_2 loss index

表 6. F_1 损失指标和 F_2 损失指标

方案	F_1	F_2	LF_1	LF_2
#1	213.93	55.97	0.00%	100.00%
#2	235.29	54.91	2.63%	89.29%
#3	261.32	53.32	5.83%	73.21%
#4	320.71	52.30	13.13%	62.89%
#5	347.54	51.49	16.43%	54.78%
#6	440.91	51.19	27.91%	51.73%
#7	482.93	50.93	33.07%	49.06%
#8	522.75	50.39	37.97%	43.61%
#9	597.41	50.28	47.15%	42.55%
#10	630.36	50.13	51.20%	41.00%
#11	644.57	49.59	52.95%	35.55%
#12	690.58	49.18	58.60%	31.37%
#13	726.55	49.15	63.03%	31.09%
#14	732.38	48.80	63.75%	27.52%
#15	742.94	48.12	65.04%	20.67%
#16	888.63	47.68	82.96%	16.24%
#17	916.10	47.32	86.33%	12.60%
#18	1027.25	46.07	100.00%	0.00%

Table 7. Decision maker preferences and scheme selection

表 7. 决策者偏好与方案选择

决策者偏好		选择方案	实际损失	
			LF_1	LF_2
LF_1	10%	#3	5.83%	73.21%
	20%	#5	16.43%	54.78%
	30%	#6	27.91%	51.73%
	40%	#8	37.97%	43.61%
	50%	#9	47.15%	42.55%

续表

LF_2	15%	#17	86.33%	12.60%
	25%	#15	65.04%	20.67%
	35%	#12	58.60%	31.37%
	45%	#8	37.97%	43.61%
	60%	#5	16.43%	54.78%

Table 8. Material allocation for each demand point in Plan 8**表 8.** 方案 8 各需求点的物资分配量

名称	都江堰	茂县	彭州	汶川	九寨沟	崇州	大邑
军用机场	540	0	569	1424	0	725	1158
双流机场	394	0	0	0	0	939	657
火车北站	499	898	514	0	898	177	0
名称	什邡	北川	平武	江油	德阳	绵阳	广汉
军用机场	592	0	1424	0	484	582	855
双流机场	677	0	0	0	208	0	1528
火车北站	494	898	0	1281	434	502	0
名称	广元	青川	旺苍	剑阁	理县	安县	绵竹
军用机场	0	0	1424	0	0	1424	0
双流机场	2018	1850	0	2069	460	0	0
火车北站	400	527	0	361	935	0	1282

6. 结语

文章在应急物资调度问题的研究中考虑了灾民的嫉妒心理,并且,根据 G1-Critic 主客观综合赋权法来确定物资需求紧迫度,使得对应急物资调度问题考虑得更为完善。并针对地震等突发自然灾害考虑到了路段受损的情况,使其更符合实际情况。同时针对该问题的求解设计了改进的人工蜂群算法,通过改进邻域搜索方式,修正不可行解来进行蜜源的更新,利用帕累托支配关系改进蜜源更新策略来提升算法求解效率。并通过对算法进行性能分析证实改进的人工蜂群算法在求解该问题上的优越性。最后以实例分析得到一组帕累托解集,通过借鉴相关的选择策略帮助决策者从解集中选择出自己最满意的方案,结果表明,该算法和模型可有效地应用于应急物资调度问题。

参考文献

- [1] Fiedrich, F., Gehbauer, F. and Rickers, U. (2000) Optimized Resource Allocation for Emergency Response after Earthquake Disasters. *Safety Science*, **35**, 41-57. [https://doi.org/10.1016/s0925-7535\(00\)00021-7](https://doi.org/10.1016/s0925-7535(00)00021-7)
- [2] Tzeng, G., Cheng, H. and Huang, T.D. (2007) Multi-Objective Optimal Planning for Designing Relief Delivery Systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **43**, 673-686. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.10.012>
- [3] Afshar, A.M. and Haghani, A. (2012) Modeling Integrated Supply Chain Logistics in Real-Time Large-Scale Disaster Relief Operations. *Socio-Economic Planning Sciences*, **46**, 327-338. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2011.12.003>
- [4] 王海军, 杜丽敬, 马士华. 震后应急物流系统中双目标开放式选址: 路径问题模型与算法研究[J]. 管理工程学报, 2016, 30(2): 108-115.
- [5] 徐浩, 李佳川, 韩传峰. 震后运速受限条件下的多目标定位: 路径问题研究[J]. 管理工程学报, 2017, 31(4): 147-

155.

- [6] 王旭坪, 董莉, 陈明天. 考虑感知满意度的多受灾点应急资源分配模型[J]. 系统管理学报, 2013, 22(2): 251-256.
- [7] 陈刚, 付江月. 兼顾公平与效率的多目标应急物资分配问题研究[J]. 管理学报, 2018, 15(3): 459-466.
- [8] Sheu, J. (2010) Dynamic Relief-Demand Management for Emergency Logistics Operations under Large-Scale Disasters. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **46**, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.07.005>
- [9] Feng, Y., Xia, L., Wang, L.M., Bu, L.P. and Shao, Y. (2011) Loading Priority Evaluation Based on PRISM Classifier. *Advanced Materials Research*, **301-303**, 768-773.
- [10] 王婧, 王海军. 应急救援中应急物资需求紧迫性分级研究[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(5): 4-7.
- [11] 宋晓宇, 王建国, 常春光. 基于需求紧迫度的非线性连续消耗应急调度模型与算法[J]. 信息与控制, 2014, 43(6): 735-743.
- [12] 陈雨珊, 吕伟, 刘毅, 等. 重大疫情下医用防护物资需求紧迫度模型研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2021, 43(2): 112-116.
- [13] 李志强, 李琳, 张素风, 等. 基于 CRITIC_G1 法赋权的包装方案综合评价[J]. 包装工程, 2021, 42(13): 180-185.
- [14] 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.
- [15] 赵明, 宋晓宇, 常春光. 改进人工蜂群算法及其在应急调度优化问题中的应用[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(12): 3596-3601.
- [16] Zitzler, E., Deb, K. and Thiele, L. (2000) Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: Empirical Results. *Evolutionary Computation*, **8**, 173-195. <https://doi.org/10.1162/106365600568202>
- [17] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. (2002) A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **6**, 182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>