

考虑居民心理成本的应急物资选址及路径优化研究

孙 坚¹, 霍良安^{1,2*}

¹上海理工大学管理学院, 上海

²上海理工大学智慧应急管理学院, 上海

收稿日期: 2024年12月25日; 录用日期: 2025年1月18日; 发布日期: 2025年1月24日

摘 要

在大规模灾害救援过程中, 如果应急物资供应不及时、分配不均衡将会致使灾民产生一定程度的负面心理情绪, 进而对救援效率造成影响。针对这一问题, 本文构建了绝对剥夺成本函数与相对剥夺成本函数来衡量灾民的负面心理情绪, 以衡量灾民的心理影响。此外, 通过总剥夺成本来表示资源分配的公平性。以救援总成本最小化为决策目标, 建立了一个同时兼顾效率与公平的集成优化模型, 涵盖受灾点选址和应急物资分配。为求解该模型, 设计了一种分阶段解码的遗传算法来对模型求解。最后, 以四川雅安地震受灾点进行实例分析, 对模型和算法的有效性及可行性予以了验证, 期望能为灾后应急救援提供具有价值的参考。

关键词

应急选址, 应急物资调配, 剥夺成本, 集成优化, 遗传算法

Research on the Optimization of Emergency Supplies Allocation and Scheduling Considering the Psychological Costs of Residents

Jian Sun¹, Liang'an Huo^{1,2*}

¹Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²School of Intelligent Emergency Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 25th, 2024; accepted: Jan. 18th, 2025; published: Jan. 24th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 孙坚, 霍良安. 考虑居民心理成本的应急物资选址及路径优化研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 1060-1072.
DOI: 10.12677/mos.2025.141097

Abstract

In large-scale disaster relief operations, delays in emergency supplies or imbalances in their distribution can lead to negative psychological effects among disaster victims, which, in turn, may affect the efficiency of the rescue efforts. To address this issue, this paper constructs absolute deprivation cost functions and relative deprivation cost functions to quantify the negative psychological impact on victims. Additionally, the total deprivation cost is used to represent the fairness of resource allocation. With the objective of minimizing the total rescue cost, an integrated optimization model is established, balancing both efficiency and fairness, covering aspects such as emergency evacuation, temporary shelter site selection, and emergency supply distribution. To solve this model, a staged decoding genetic algorithm is designed for model resolution. Finally, a case study based on the disaster-stricken area of Ya'an, Sichuan is conducted to validate the effectiveness and feasibility of the model and algorithm, providing valuable references for post-disaster emergency relief.

Keywords

Emergency Evacuation, Allocation of Emergency Supplies, Deprivation Cost, Integrated Optimization, Genetic 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

近些年来, 各类自然灾害频频发生, 给人类社会带来了巨大的财产损失和人员伤亡, 对人类的生存与发展构成了严重威胁。灾害降临之后, 为提升救援效率, 传统应急管理的相关研究通常以实现时间满意度最大化、救援总时间最小化或者总成本最小化为目标来构建优化模型[1]。不过, 鉴于各种灾害的突发性特点, 再加上救援初期应急物资的有限以及需求的紧迫, 身处复杂救援环境中的灾民在等待救援物资抵达的过程中, 会产生诸如焦虑、痛苦、嫉妒等负面心理情绪, 从而影响救援工作的有序推进[2]。故而, 在灾后救援中, 如何衡量并减少灾民的负面心理情绪, 对于救援工作的顺利开展以及效率的提升, 具有十分重要的意义。

灾后应急救援涉及多个方面, 如临时避难所选址、灾民疏散与应急物资调配。Ma Y [3]等提出模型包括单目标模型和多目标模型, 优化目标涵盖了疏散距离或时间最小化、避难所建设成本或数量最小化以及疏散风险最小化。Bayram 和 Yaman [4]建立了考虑疏散人口不确定性和道路网络及避难场所中断风险的两阶段随机疏散规划模型, 以最小化灾民疏散时间为目标。针对应急避难所选址的研究, El-Anwar [5]等提出了应急避难所的定义和类型, Xu Jinghai [6]等则明确了包括就近疏散准则、转运时间或距离最小化准则、最大覆盖准则在内的七大应急避难所选址准则, 并基于此建立了多准则约束的选址模型。例如, Ozbay 等[7]利用条件风险值模拟震后次生灾害发生的风险, 建立了以避难所使用数量最小化为目标的优化模型。赵秀娟[8]等则以避难所容量和服务距离为约束, 研究了以最短避难总距离和最小避难所总容量为目标的多目标优化问题。

在应急疏散问题的研究中, 目标通常包括转移安置灾民数量最大化、疏散距离、时间和成本最小化

等。例如, 孟永昌等[9]则以灾民疏散量最大、转移路线最短和可靠性最高为目标, 研究了基于路网的应急疏散问题。张伯尚等[10]构建了社区应急疏散多种运输方式协作调度优化模型, 以转移安置灾民数量最大化和成本最小化为目标。赵秀娟等[11]综合考虑避难所容量及疏散路线风险, 建立了最小化总加权疏散时间和避难所使用面积的多目标优化模型, 并使用改进遗传粒子群算法进行求解。

关于应急物资调配的研究, 多数关注调配时间或成本。郑斌等[12]针对震后物资供不应求的情况, 设计了一个以时间满意度最大化为目标的双层规划模型。曲冲冲等[13]则以时效性为目标, 建立了震后多时段动态物资调配模型。陈刚和付江月[14]以总物流成本最小化为目标, 建立了灾后应急物资分配优化模型, 并采用非支配排序多目标遗传算法进行求解。

在应急物流中, 必须考虑受灾民众的心理影响因素。将福利经济原则纳入灾后人道主义物流模式, 将物流成本和剥夺成本之和作为首选目标函数, 论证了将福利经济概念纳入模型的重要性。然而, 在固定预算情况下, 总剥夺成本最小化可能导致不公平的方案, 因此需考虑用基尼不平等指数成比例的项来量化不公平扩展剥夺成本。在救援过程中, 居民的心理创伤也不容忽视。Zhu L 等[15]人根据灾民的受伤程度研究应急救援的公平性和优先性, 提出用相对剥削成本来考虑救援配送的公平性。宋英华等[16]人构建了灾民对物资损毁的容忍程度函数, 以量化物资损毁率对灾民心理的影响。刘长石等[17]人针对初期受灾地区应急物资短缺情况, 以所有需求点的损失攀比较效应最小、运输到达需求点的时间攀比较效应最小和总运输时间最短为目标, 建立了应急物资分配和运输的双层协同优化模型, 确保应急物资分配的公平性和运输的效率性。王旭坪等[18]人利用前景理论量化公众的心理风险感知程度, 构建了公众对应急物资获得时间的心理风险感知最小和受灾地区物资未满足度最小的双目标模型。Geng Shaoqing 等[19]研究者在考虑救援预算的限制下, 构建了一个多目标优化模型, 最小化疏散过程中的距离, 提升避难所的容纳能力, 同时减少避难所的启用数量。该模型综合考虑了在紧急情况下有效地进行避难所选址和灾民疏散的决策问题。结果显示, 降低公众心理风险感知可能会增加运作成本。这些研究共同解读了受灾人员的恐慌心理, 比较常规的应急物资分配模型, 更符合受灾人员的心理活动和现实情况。朱建明等人在引入风险感知理论的同时, 利用公平厌恶函数表示物资分配的公平性。在应急物流中, 不仅要关注物资调度优化问题, 还要考虑受灾民众的心理影响因素对物流调配决策的影响。王熹徽等[20]人利用数值评定量表构建痛苦函数, 以描述灾民的痛苦感知成本, 并以物流成本与心理成本之和最小为目标, 构建应急避难场所选址和物资分配的优化模型。杨倩[21]为满足疫情防控的物资需求, 构建了一类考虑居民心理成本的多周期应急物流决策模型, 是以最小社会物流总成本和最小心理成本为目标的应急物流选址路径优化模型。

上述文献多是单独研究应急避难所选址、应急疏散或应急物资调配等问题, 较少将两种或多种问题进行集成研究。且已有研究更多的是考虑灾民转移时间和成本最小化、避难所覆盖范围或物资分配满意度最大化, 极少有研究关注灾民负面心理情绪的刻画与消除以及灾民负面心理情绪与其他目标函数之间的关系。

事实上, 灾后救援过程中降低灾民的负面心理情绪对救援效率的提高至关重要。因此, 本文综合考虑灾后应急救援网络中的临时避难所选址、灾民疏散和救援物资调配这三种救援行动, 提出灾民负面心理情绪的计算方式, 构建以救援总成本最小化为目标的集成优化模型, 并设计遗传算法进行求解。最后, 结合算例分析了救援时间和物资调配公平性对救援方案的影响。

2. 模型构建

2.1. 问题描述

大规模灾害突发后, 灾民疏散效率和应急物资调配的时效性与公平性会影响灾民的生存和心理状况, 灾民的心理情绪又反过来间接影响灾后救援效率。因此, 对灾后应急救援网络进行优化具有重要意义。

灾后应急救援行动主要分为两个方面：一方面是将受灾点的灾民疏散至临时应急避难所；另一方面是将多种物资(包括生活必需物资和应急医疗物资等)从应急物资配送中心运至临时避难所。故本文主要解决的问题是如何选择位置合适的临时应急避难所，快速有效的疏散灾民，同时确定合理的物资调配方案，确保物资调配的时效性和公平性，降低灾民负面心理情绪，提高救援效率，最终使整个应急救援行动的总成本最小。本文应急物资选址 - 分配方式如图 1 所示。

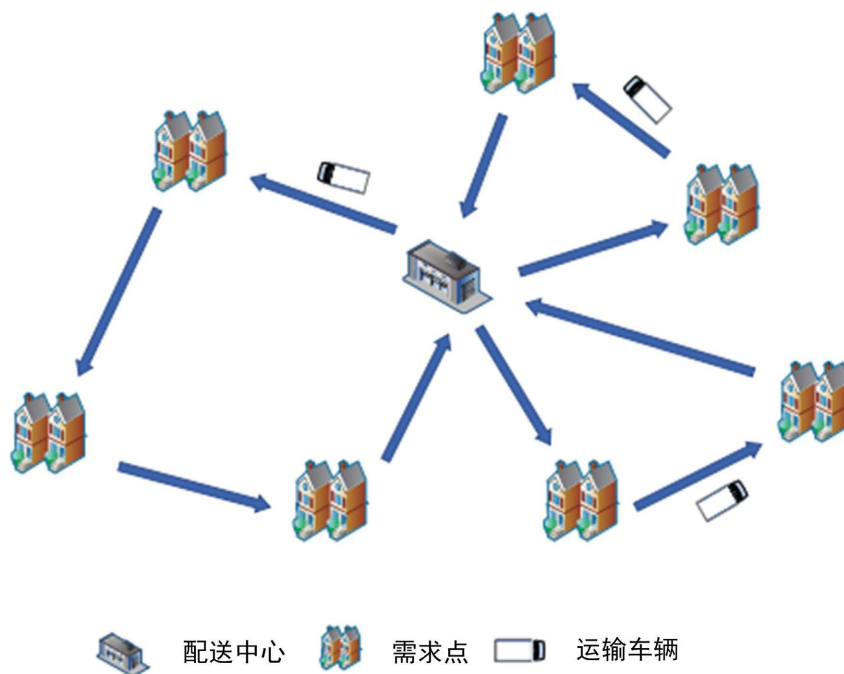


Figure 1. Vehicle routing map
图 1. 车辆路径配送图

2.2. 模型假设与变量说明

(1) 模型假设

- 1、备选应急避难所与受灾点的位置、数量已知。
- 2、救援过程中，灾民产生的负面心理情绪(包括焦虑、痛苦和绝望等)可以用剥夺成本函数量化。
- 3、借助救援车辆疏散至避难所的灾民均有不同程度的伤势，每个受灾点需转移的人口比例可以根据各受灾点的受灾程度得出。
- 4、运输车辆分为载人和载物两种车型，每种车型的额定容量唯一且已知。除最后一次外，其余运输均不考虑未满载情形。

5、运输车辆可多次往返运输，其运输成本由运输距离和最大载容量决定。

6、救援车辆车速恒定，应急物资的装卸时间不计。

(2) 符号与变量说明

I 、 J 、 K 分别代表仓库、受灾点、运输车辆集合， N 为受灾点数量 C_{ij} 为节点 i 和 j 之间的运输费用， G_i 为仓库 i 的固定费用， F_k 为运输车辆 k 的固定费用， V_i 为仓库 i 的所能提供应急物资的数量， d_j 为受灾点需求量， Q_k 为运输车辆容量。决策变量： y_i 表示节点 i 建仓库为 1，否则为 0； x_{ijk} 运输车辆 k 通过路径 ij 为 1，否则为 0； z_{ij} 表示受灾点 j 分配到仓库 i 为 1，否则为 0； U_{ik} 为辅助变量。

2.3. 需求点需求紧迫度分析

(1) 物资需求紧迫度的评价指标

根据考虑居民心理的相关文献,若无法按时满足居民的物资需求,居民将会产生攀比心理,引起居民的消极情绪,造成社会的不稳定。所以,在进行应急物资分配时需要对社区进行需求紧迫度分析,综合考虑不同社区的社会属性,优先满足需求紧迫度较高的社区居民的物资需求。

考虑需求紧迫度的评价指标主要包括道路受损程度、建筑物损害程度、灾区伤员数量、区域人口密度、物资储备与需求以及灾区老幼比例等。本文考虑地震或洪涝等突发自然灾害,为更准确地评估受灾地区的紧迫程度,具体考虑建筑物损坏程度、物资需求情况、区域人口密度、受灾人员数量四个因素,本文在借鉴了地震和洪涝等灾害应对中,各个学者对物资需求紧迫性指标的选取,在此基础上进一步拓展视野,选择了人口因素、环境条件和物资供应三个关键领域的四个指标,构建了一个更为全面的区域应急物资配送评估指标体系,以满足突发事件下的多元需求。需求点紧迫程度评价指标层次如图 2 所示。

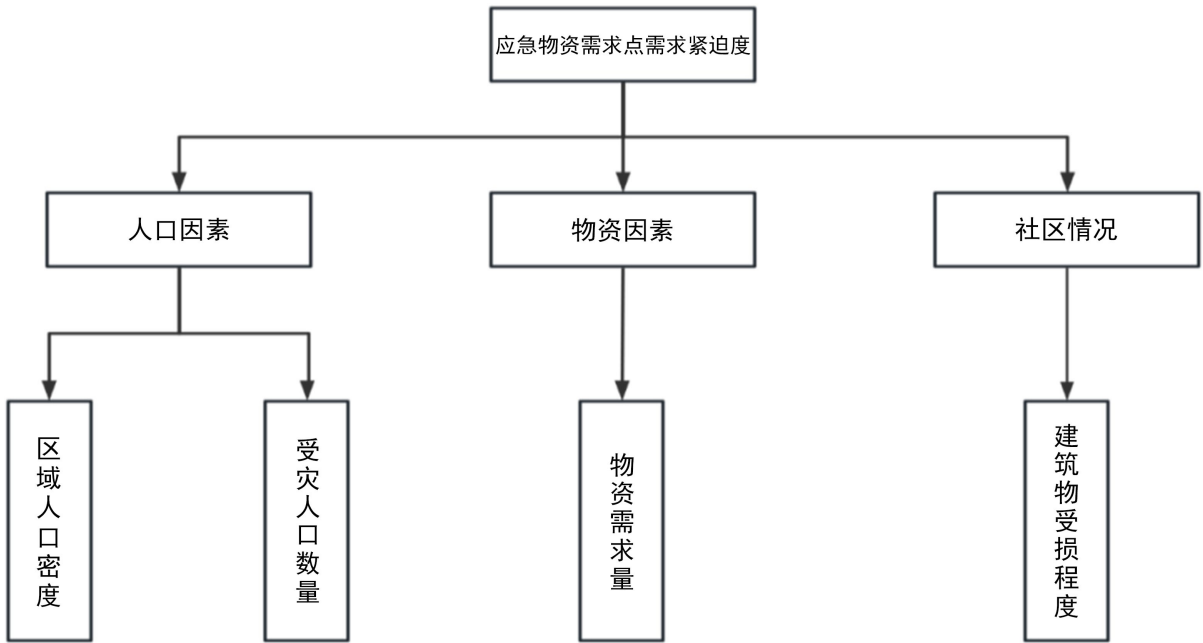


Figure 2. The hierarchy of emergency material needs at disaster sites is evaluated

图 2. 受灾点应急物资需求紧急度评价的层次结构

(2) 指标值去模糊化

模糊型指标包括道路受损程度和建筑物损害程度,通过三角模糊函数进行去模糊化,将语言描述转化为具体数值以方便计算,转换关系见表 1。

采用最可能值法确定权重,即 $\varepsilon = \gamma = 1$, $\beta = \frac{4}{6}$, 则去模糊化的确定值 $\alpha = \varepsilon\alpha_1 + \beta\alpha_2 + \gamma\alpha_3$, 模糊指标对应值为 0.95, 0.7, 0.5, 0.3, 0.05。

(3) 需求紧迫度确定

由于专家主观权重赋值具有一定的偏差,本文对受灾点进行应急物资需求紧迫度计算。先确定本文选取的影响因素是否恰当,再客观计算受灾点紧迫度系数,以便决策结果的可信度较高。具体步骤如下:

Table 1. The relationship between fuzzy evaluation index and triangular fuzzy number conversion**表 1.** 模糊评价指标与三角模糊数转换关系表

语言变量评价	三角模糊数
很严重	(0.7, 1, 1)
严重	(0.5, 0.7, 0.9)
一般	(0.3, 0.5, 0.7)
轻	(0.1, 0.3, 0.5)
很轻	(0, 0, 0.3)

步骤 1: 建立指标矩阵并归一化

设 m 个受灾点集合为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, 每个受灾点有 n 个评价指标, 需求紧迫度评价指标矩阵为 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 。基于 mim-max 法, 根据式(1)对评价矩阵进行标准化处理:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}\}}{\max\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}\} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}\}} \quad (1)$$

通过公式进 $p_{ij} = \frac{x_{ij}^*}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^*}$ 行归一化处理, 得到矩阵 $P = (p_{ij})_{m \times n}$, p_{ij} 为第 i 个受灾点对第 j 个评价指标

的贡献值。

步骤 2: 分析需求紧迫程度

根据式(2)计算关联系数 $\theta_i(k)$, 关联度反映位置与形状相似性的差异, 越大则受灾点需求越紧迫, 可通过关联系数确定评价指标选取是否恰当。

$$\theta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (2)$$

步骤 3: 确定紧迫度系数

计算指标熵值 e_j 及各指标的权重 a_j 。计算第 j 项评价指标, 得到熵值 $e_j (e_j \geq 0)$, 其中系数 $q = \frac{1}{\ln m}$ 。

$$e_j = -q \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

通过计算公式 $g_i = 1 - e_j$ 求得每个评价指标的信息效用值, 各指标的权重为 $a_j = \frac{g_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j}$ 。确定受灾

点的紧迫度综合得分, 计算紧迫度系数。

$$D_i = \sum_{j=1}^n a_j p_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

$$\lambda_i = \frac{D_{\min}}{D_i}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

其中: $D_{\min}$ 为需求最小紧迫度分值; D_i 为需求点 i 的需求紧迫度分值; λ_i 为需求点 i 所求紧迫度系数。

2.4. 灾民负面心理情绪刻画与衡量

灾民的负面心理情绪主要涵盖两个部分: 其一, 是由于无法及时获取应急物资而产生的诸如焦虑、痛苦和绝望等负面心理情绪; 其二, 是由于物资到达时间和分配量存在较大差异所导致的不平衡、嫉妒

等负面心理情绪。前者主要和物资的缺乏种类与数目、匮乏持续的时长以及灾民自身的经济社会属性相关, 并且会随着物资到达时间的延长而迅速增长。因此构造“绝对剥夺成本函数”, 采用以为 e 底的指数型函数来描绘灾民因物资匮乏而形成的负面心理情绪。文中考虑了多种应急物资, 在此先给出缺乏单位物资的灾民负面心理情绪的经济衡量, 将时间作为自变量的单位物资的剥夺成本函数如下:

$$\Gamma(t) = a_1 * (e^{b_1 * t} - 1) \quad (6)$$

其中, t 表示物资匮乏时长, Γ 表示绝对剥夺成本, a_1 、 b_1 为参数, 随救援阶段和应急物资的变化而变化。 ADC_{ik} 表示所有需求点的绝对剥夺成本与需求紧迫度乘积之和, 需求紧迫度反映需求点分级, 越紧迫的需求点越需要优先配送, 越需要降低需求点的绝对剥夺成本。避难所 i 的灾民绝对剥夺成本与该点的等待时间有关, 绝对剥夺成本函数如下:

$$ADC_{ik} = \lambda_i * \Gamma_i(t), \quad \forall i \in D \quad (7)$$

构造“相对剥夺成本函数”度量不同受灾点灾民遭受负面心理情绪的差异化程度, 衡量灾民因比较而产生的不平衡、嫉妒等负面心理情绪, 目的在于通过最小化任意两受灾点的平均总剥夺成本来保障应急物资调配的公平性。相对剥夺成本函数表达式如下:

$$RDC_{ijk} = |ADC_{ik} - ADC_{jk}|, \quad \forall i, j \in P \quad (8)$$

2.5. 数学模型构建

$$\min Z_1 = \sum_{i \in I} G_i y_i + \sum_{i \in I \cup J} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{ij} x_{ijk} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} F_k x_{ijk} \quad (9)$$

$$\min Z_2 = \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} ADC_{jk} + \varphi \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} RDC_{ijk} \quad (10)$$

s.t

$$\sum_{i \in I \cup J} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1, \quad \forall j \in J \quad (11)$$

$$\sum_{i \in I \cup J} d_j x_{ijk} \leq Q_k, \quad \forall k \in K \quad (12)$$

$$U_{lk} - U_{jk} + N x_{ijk} \leq N - 1, \quad \forall l \in J, j \in J, k \in K \quad (13)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ijk} - \sum_{j \in J} x_{jik} = 0, \quad \forall k \in K, i \in I \cup J \quad (14)$$

$$\sum_{i \in I \cup J} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (15)$$

$$\sum_{j \in J} d_j z_{ij} - V_i y_i \leq 0, \quad \forall i \in I \quad (16)$$

$$\sum_{u \in I \cup J} (x_{iuk} + x_{juk}) \leq 1 + z_{ij}, \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (17)$$

$$x_{ijk}, y_i, z_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j, k \quad (18)$$

$$U_{lk} \geq 0, \quad \forall l \in J, k \in K \quad (19)$$

$$\varphi \in [0, 1] \quad (20)$$

目标函数(9)表示仓库建设费用、运输费用和运输车辆固定费用之和最小化。目标函数(10)表示最小

化总匮乏成本。第一项表示相对剥夺成本, 第二项表示带有系数 φ 的相对剥夺成本, 两项合在一起表示灾民负面心理情绪成本。约束(11)表示每一个受灾点只能通过一条路线运输; 约束(12)为运输车辆容量约束; 约束(13)表示新的子回路消除约束; 约束(14)表示运输车辆约束守恒约束, 即驶入节点也是其驶出节点; 约束(15)每一辆运输车辆只能服务一条路线; 约束(16)表示仓库容量约束; 约束(17)表示受灾点只能被一个仓库服务; 约束(18)和(19)表示决策变量类型。约束(20)表示相对剥夺成本的系数范围。

3. 算法设计

灾后的应急疏散和物资调配对时效性有着较高的要求。相较于其他元启发式算法, 遗传算法具有运算速率快、搜索方式灵活、不受函数约束条件的限制、不容易陷入局部最优解以及鲁棒性强等优势。所以, 本文针对所构建的模型以及研究的问题, 设计了一种分阶段解码的遗传算法来加以求解, 同时将精英策略引入算法设计之中, 旨在提升算法的运算效率与准确性。

3.1. 染色体编码、解码设计及种群初始化

针对本文所研究的问题, 设计每条染色体由四个子串组成, 均采用实数编码方式, 具体编码如下。

子串 1 表示每个备选避难所是否被选中, 长度为 n , n 表示备选避难所个数。子串 1 的第 j 个基因位的取值表示避难所 j 是否被选为临时避难所, 该基因位的取值为 $[0, 1]$ 内的随机数, 且服从 $[0, 1]$ 的均匀分布。

子串 2 长度为 m , m 表示受灾点个数, 每个基因位的取值是随机生成, 服从 $[0, 1]$ 上的均匀分布, 表示受灾点的优先级, 用于表示避难所与受灾点的服务关系。

子串 3 表示受灾点灾民运往避难所时, 派往每个受灾点的车辆数。长度为 m , 每个基因位的取值随机生成, 且服从 $[0, 1]$ 的均匀分布, 在染色体解码时用于计算避难所派往每个受灾点的车辆数。

子串 4 长度为 n^* ($0 < n^* \leq n$), 表示物资从中应急物资配送中心运往避难所时, 配送中心派往每个避难所的车辆数。子串 4 每个基因位的取值为 $[0, 1]$ 内的随机数, 且服从 $[0, 1]$ 的均匀分布, 在染色体解码时用于计算配送中心派往每个避难所的车辆数。设置一定种群规模, 按照染色体编码方式随机产生条符合条件的染色体生成初始种群。

3.2. 适应度函数设计

本文所建集成优化模型的目标函数是总社会成本最小, 与适应度函数特征相反, 目标函数 $U = \min Z_1 + \min Z_2$, 则适应度函数 $fit(x) = \frac{1}{U}$ 。

3.3. 遗传操作

(1) 选择: 本文采用精英保留和轮盘赌相结合的选择策略, 使适应度较高的个体有较大概率进入下一代。

(2) 交叉: 对染色体的四条子串均采用多点交叉和算术交叉相结合的交叉方式, 每种交叉方式被使用的概率为 0.5。

(3) 变异: 对染色体的四条子串均采用单点变异和高斯变异相结合的变异方式, 每种变异方式被使用的概率为 0.5。

(4) 局部搜索: 使用破坏算子移除部分基因, 然后使用修复算子将这些基因按约束重新插入染色体中。

(5) 最优解: 更新第一阶段后未满足的需求, 即第二阶段的需求, 计算第二阶段各点的需求紧迫度。

(6) 终止条件: 算法迭代最大次后结束, 输出计算结果。

4. 算例分析

4.1. 算例介绍与参数设置

北京时间 2013 年 4 月 20 日 8 时 02 分四川省雅安市芦山县(北纬 30.3, 东经 103.0)发生 7.0 级地震。震源深度 13 公里。震中距成都约 100 公里。为验证本文模型及算法的有效性,以近年来四川雅安地震带为背景,设计选址 - 调度仿真案例进行分析。选取易受地震影响的 20 个地震带受灾地区构建受灾区域位置分布图,如图 3 示。

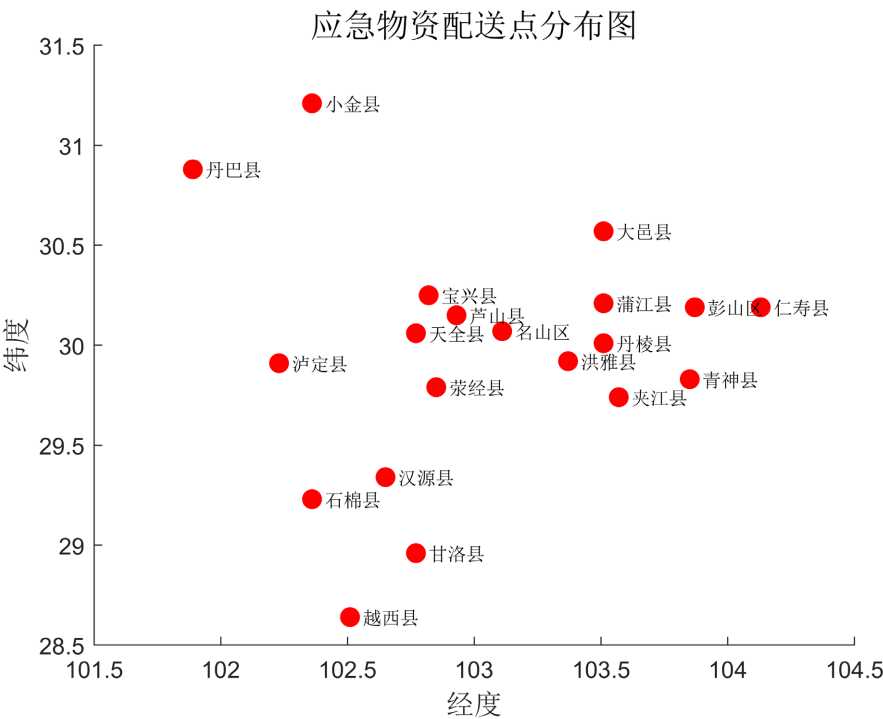


Figure 3. Coordinate map of the affected points
图 3. 受灾点坐标图

在本研究中,我们探讨了在紧急情况下的物资分配与调度问题。在这一场景中,我们拥有充足的应急车辆资源,它们能够确保物资从分配中心顺利送达各个受灾点。我们的目标是在 20 个受灾地区中,精心挑选若干个应急物资救援中心,以高效地完成救援物资的配送任务。在车辆配置方面,我们有普通装载货车,其最大载重量为 12 吨,行驶速度为 40 公里/小时,具有 40 万元的固定成本和每单位运行成本 1 万元。此外,我们还配备了铲车运载车,它们不仅能够运输车辆,还能清除路障,最大载重量为 8 吨,速度为 30 公里/小时,固定成本为 60 万元,单位运行成本为 1.5 万元。

我们已知应急物资配送中心与需求点的分布情况,并综合考虑了建筑物损坏程度、物资需求、区域人口密度和受灾人员数量这四个关键因素,进而计算出各地区的紧迫度系数。以雅安地震为例,我们选取了 20 个受灾地区进行研究。在这些地区中,前 16 个受灾较为严重的地区,其紧迫度系数是通过精确计算得出的。对于其余 4 个受灾相对较轻的地区,由于灾情数据不完全,我们采用了文献中的相关数据进行估算,其需求紧迫度系数设定为 0.3。至于人口密度的具体信息,可以在中国数据网中找到,而各受灾点的评价指标和紧迫度系数则详细记录在表 2 中。通过这种细致的分析和规划,我们旨在优化应急物资的分配流程,确保在紧急情况下能够迅速、有效地响应,以减轻灾害带来的影响。

Table 2. Information on the demand points for emergency supplies
表 2. 应急物资需求点信息

编号	受灾点	评价指标				紧迫度系数
		人口密度/(人/km ²)	受灾人员数量/人	建筑物损坏程度	物资需求情况/t	
1	宝兴县	18.7	7505	很严重	11	0.67
2	大邑县	402.1	52	一般	5	0.41
3	芦山县	99.9	5470	很严重	10	0.59
4	天全县	63.1	216	严重	7	0.45
5	越西县	133.9	33	很严重	8	0.50
6	荥经县	78.1	40	很严重	8	0.58
7	甘洛县	103.5	27	很严重	5	0.52
8	彭山区	700.1	102	严重	4	0.37
9	丹巴县	11.2	84	一般	5	0.32
10	小金县	11.6	201	很严重	3	0.47
11	汉源县	144.2	122	严重	8	0.35
12	石棉县	45.2	73	一般	8	0.32
13	泸定县	36.3	102	严重	7	0.40
14	夹江县	409.6	118	严重	6	0.41
15	丹棱县	312.5	172	严重	2	0.45
16	洪雅县	168.1	79	一般	1	0.31
17	仁寿县	505.6	83	轻	6	0.3
18	名山区	446.2	111	很轻	5	0.3
19	蒲江县	450.6	102	轻	4	0.3
20	青神县	497.8	96	轻	3	0.3

4.2. 计算结果分析

根据选取的 20 个受灾点数据信息，运用 R2024a 软件对案例进行编码并计算求解。采用本文的改进 NSGA-II 算法求解选址 - 调度问题。算法相关参数为：初始化种群 $Sizepop = 100$ ， $maxgen = 200$ ，交叉、变异概率分别为 $P_c = 0.8$ ， $P_m = 0.5$ ，调度过程车辆匀速行驶， $v = 50\text{ km/h}$ 。

根据需求紧迫度计算得到的结果如表 3 所示，为了应对灾情，本文计划建立 5 个应急物资配送中心。计算得出了各受灾点的物资满足率，所有受灾地区的满足率均在 0.7 以上，说明在考虑紧迫度的情况下，基本需求都得到了满足，降低了灾民的风险感知，提高了满意度，同时验证了配送方案的有效性。从图 4 中可以看出，所有受灾地区的满足率均在 0.7 以上，说明在考虑紧迫度的情况下，基本需求都得到了较好满足。例如，宝兴县、芦山县等受灾严重地区物资满足率较高，这验证了配送方案在优先满足需求紧迫度高的地区物资需求方面的有效性，降低了灾民的风险感知，提高了满意度。

Table 3. Location centers and distribution routes
表 3. 选址中心点及配送路径

序号	配送中心点	受灾点集合
1	宝兴县(1)	宝兴县(1)→芦山县(3)→名山区(18)→荥经县(6)→天全县(4)
2	汉源县(11)	汉源县(11)→石棉县(12)→越西县(5)→甘洛县(7)
3	洪雅县(16)	洪雅县(16)→丹棱县(15)→夹江县(14)
4	泸定县(13)	泸定县(13)→小金县(10)→丹巴县(9)
5	蒲江县(19)	蒲江县(19)→大邑县(2)→彭山区(8)→仁寿县(17)→青神县(20)

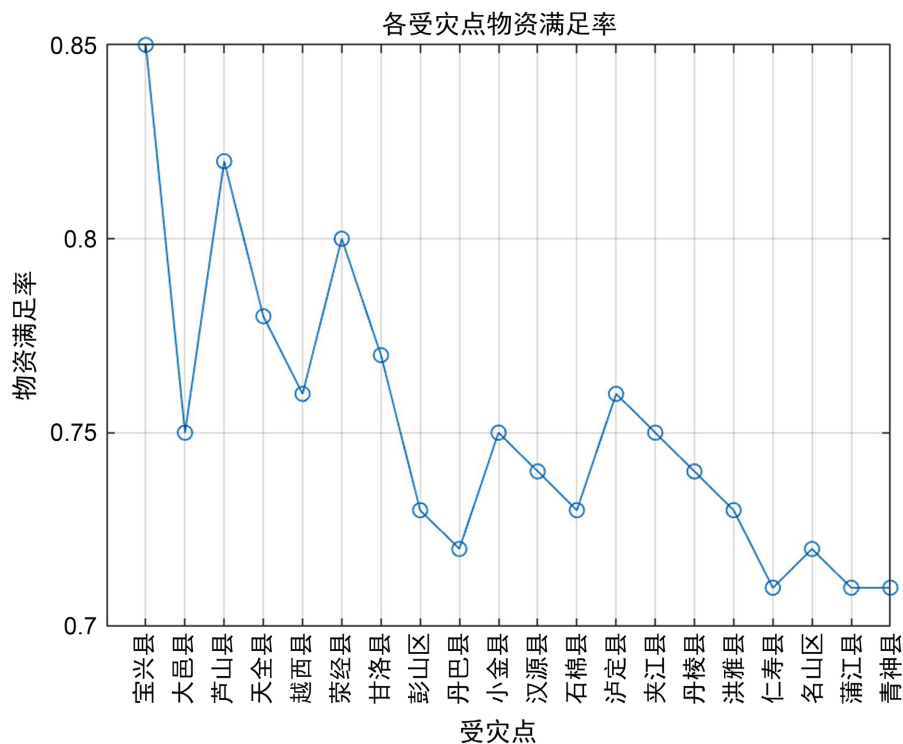


Figure 4. Analysis of material satisfaction rate

图 4. 物资满足率分析

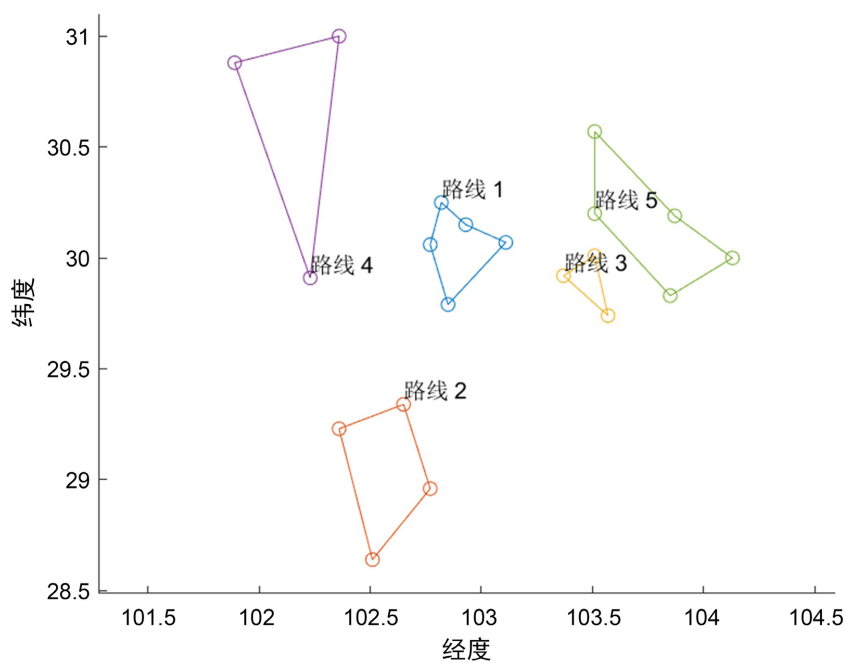


Figure 5. Distribution route diagram of the affected area

图 5. 受灾点配送路径图

通过合理规划, 如表 3 以宝兴县为配送中心点, 可覆盖周边多个受灾点, 实现资源的有效整合与分配。这种布局有助于减少运输成本, 提高物资配送效率, 确保受灾严重地区能优先获得物资支持, 满足

其紧迫需求,体现了物资分配的科学与合理性,为救援工作提供了有力保障。从图中可看出,各配送路径规划较为合理,充分考虑了地理因素,如图5经度分布等,使运输路线相对集中且高效。不同路线相互配合,形成较为完整的配送网络,能够快速将物资送达各受灾点,提高救援时效性,减少灾民等待时间,对降低灾民负面心理情绪、提升救援效率具有积极意义。

5. 结语

本文研究了基于剥夺成本的应急与物资调配的集成优化问题,并为此设计了一种分阶段解码的遗传算法来求解。同时将物资需求紧迫度作为重要调度因素,考虑需求紧迫度的方案有助于在突发灾害中确保救援物资及时有效地配送到需求点,既满足实际需求,又优化了应急物资的选址与调度。通过与忽略紧迫度的物资满足率对比,验证了本文模型的有效性。以近年来地震等自然灾害为背景,构造了算例进行仿真分析,结果证明了模型的科学与算法的有效性。提高灾民心理感知的公平性不会减少有限时间内的物资调配量,反而可以减轻灾民的负面情绪,提高救援效率。

本文仅考虑了单周期静态情况,未来研究可以探讨在道路通行能力和运输时间等因素随机变化的情况下的多周期动态优化。

参考文献

- [1] 于冬梅,高雷阜,赵世杰.考虑凸形障碍的应急设施选址与资源分配决策研究[J].系统工程理论与实践,2019,39(5): 1178-1188.
- [2] 陈刚,张锦,付江月.不确定环境中多目标应急物流选址分配模型[J].中国安全科学学报,2016,26(12): 163-168.
- [3] Ma, Y., Xu, W., Qin, L. and Zhao, X. (2019) Site Selection Models in Natural Disaster Shelters: A Review. *Sustainability*, **11**, Article 399. <https://doi.org/10.3390/su11020399>
- [4] Bayram, V. and Yaman, H. (2018) A Stochastic Programming Approach for Shelter Location and Evacuation Planning. *RAIRO—Operations Research*, **52**, 779-805. <https://doi.org/10.1051/ro/2017046>
- [5] El-Anwar, O., EL-Rayes, K. and Elnashai, A. (2008) Multi-Objective Optimization of Temporary Housing for the 1994 Northridge Earthquake. *Journal of Earthquake Engineering*, **12**, 81-91. <https://doi.org/10.1080/13632460802013602>
- [6] Xu, J., Yin, X., Chen, D., An, J. and Nie, G. (2016) Multi-Criteria Location Model of Earthquake Evacuation Shelters to Aid in Urban Planning. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **20**, 51-62. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.10.009>
- [7] Ozbay, E., Çavuş, Ö. and Kara, B.Y. (2019) Shelter Site Location under Multi-Hazard Scenarios. *Computers & Operations Research*, **106**, 102-118. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.02.008>
- [8] 赵秀娟,马运佳,梁埔君,等.粒子群算法在地震灾害应急避难所选址中的应用:以云南省鲁甸县文屏镇为例[J].北京师范大学学报(自然科学版),2018,54(2): 217-223.
- [9] 孟永昌,杨赛霓,史培军.基于改进遗传算法的路网应急疏散多目标优化[J].武汉大学学报(信息科学版),2014,39(2): 201-205.
- [10] 张佰尚,范刚龙,唐攀,等.社区应急疏散动态协作调度优化研究[J].中国管理科学,2019,27(4): 190-197.
- [11] Zhao, X., Coates, G. and Xu, W. (2019) A Hierarchical Mathematical Model of the Earthquake Shelter Location-Allocation Problem Solved Using an Interleaved MPSO-GA. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, **10**, 1712-1737. <https://doi.org/10.1080/19475705.2019.1609605>
- [12] 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型[J].系统管理学报,2017,26(2): 326-337.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 朱莉,曹杰,顾珺,等.公平缓解灾民创伤下的应急物资动态调配研[J].系统工程理论与实践,2020,40(9): 2427-2437.
- [16] 宋英华,韦良华,马亚萍,等.考虑灾民公平偏好心理的应急物资调配研究[J].安全与环境学报,2023,23(5): 1530-1536.

- [17] 刘长石, 罗亮, 周鲜成, 等. 震后初期应急物资分配-运输的协同决策: 公平与效率兼顾[J]. 控制与决策, 2018, 33(11): 2057-2063.
- [18] 王旭坪, 马超, 阮俊虎. 考虑公众心理风险感知的应急物资优化调度[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(7): 1735-1742.
- [19] Geng, S., Hou, H. and Zhang, S. (2020) Multi-Criteria Location Model of Emergency Shelters in Humanitarian Logistics. *Sustainability*, **12**, Article 1759. <https://doi.org/10.3390/su12051759>
- [20] 王熹徽, 张文鑫, 余玉刚, 等. 考虑灾民痛苦感知的应急避难所选址与物资分配优化[J]. 中国管理科学, 2020, 28(12): 162-172.
- [21] 杨茜. 考虑居民心理成本的多周期物流网络优化[J]. 中国储运, 2024(3): 73-75.