

中文引用格式:曾小青,刘黎明,程泽禹.考虑灾后模糊需求与道路受损的应急物资配送模型及算法[J].中国安全科学学报,2025,35(1):186-193.

英文引用格式:ZENG Xiaoqing,LIU Liming,CHENG Zeyu. Emergency supply distribution model and its algorithm considering post-disaster fuzzy demand and road damage [J]. China Safety Science Journal,2025,35(1):186-193.

考虑灾后模糊需求与道路受损的应急物资配送 模型及算法*

曾小青 教授,刘黎明,程泽禹

(长沙理工大学 经济与管理学院,湖南 长沙 410004)

中图分类号:X913.1

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.01.0374

基金项目:国家社会科学基金资助(21BGL176)。

【摘要】 在重大灾害发生初期,在受灾点需求不确定、受灾区域道路损坏以及考虑救援工作的公平性和及时性等影响下,为实现迅速而有效地配送应急物资,应用社交网络搜索算法(SNS)求解应急物资配送模型。首先,在考虑模糊需求和受灾道路损坏的基础背景下,以应急救援总成本和人道主义救援评价为目标,构建应急物资配送模型;然后,在求解模型时引入SNS算法,并提出强化学习率策略的改进SNS(ISNS);最后,以2022年四川泸定地震为例,分别应用SNS算法、ISNS算法、离散粒子群算法、遗传算法和模拟退火算法这5种求解该算例。结果表明:ISNS算法具有稳定性,求解结果与其他算法相比,应急救援总成本至少节省6410元,人道主义救援评价目标至少提升50.6%,体现出ISNS算法的优越性。ISNS算法有利于应急物资配送问题求解。

【关键词】 模糊需求; 道路受损; 应急物资配送; 社交网络搜索算法(SNS); 时间满意度

Emergency supply distribution model and its algorithm
considering post-disaster fuzzy demand and road damage

ZENG Xiaoqing, LIU Liming, CHENG Zeyu

(School of Economics and Management, Changsha University of Science and
Technology, Changsha Hunan 410004, China)

Abstract: In the early stages of a major disaster, where demand at disaster sites is uncertain, roads are damaged in affected areas, and the fairness and timeliness of rescue operations must be considered, the SNS algorithm is applied to solve the emergency supply distribution model to achieve rapid and effective distribution of emergency supplies. First, an emergency supply distribution model was constructed, with the objective of minimizing the total cost of emergency rescue and the evaluation of humanitarian aid under the background of fuzzy demand and damaged roads. Then, the SNS algorithm was introduced to solve the model, and an improved SNS (ISNS) algorithm with a reinforcement learning rate strategy was proposed. Finally, taking the 2022 Luding Earthquake in Sichuan as an example, the SNS algorithm, ISNS algorithm, discrete particle swarm optimization, genetic algorithm, and simulated annealing algorithm were applied to solve this case, respectively. The results indicate that the ISNS algorithm demonstrates stability. Compared with other algorithms, the total cost of emergency rescue is reduced by at least 6410 yuan, and

the evaluation of the humanitarian aid evaluation target is improved by at least 50.6%, highlighting the superiority of the ISNS algorithm. The ISNS algorithm is beneficial for solving emergency supply distribution problems.

Keywords: fuzzy demand; road damaged; emergency supplies distribution; social network search (SNS); time satisfaction

0 引言

突发事件因其不确定性、突发性和意外性以及时间紧迫、资源严重短缺、大规模冲击和破坏等特征,给人民的生命和财产带来较大损失^[1]。灾害发生后,迅速高效地开展救援活动,对于缓解灾害影响至关重要。相比一般的资源配置,突发事件应急物流资源配置存在信息的不完备性、时间约束的紧迫性、不确定性和社会性等特点。研究应急物资资源配置,对于提高应急快速响应能力、降低应急响应成本、减轻突发事件带来的负面影响,具有重要意义。

针对应急选址-路径规划问题,MONZÓN 等^[2]提出灾前人道主义物流模型,通过加固和联合优化救援分发中心的预置和路段,确保尽可能多的受灾人口得到有效帮助。SUN Youqiang 等^[3]考虑不确定的交通状况和真实的道路状况,提出以运输时间和运输成本为双目标应急物流调度模型。针对应急物资需求问题,王庆荣等^[4]采用三角模糊数刻画出受灾点的不确定需求,构建了需求不确定下的 2 阶段应急选址-路径规划模型。孙华丽等^[5]运用鲁棒优化的思想描述了受灾点的需求量,以最小化救援总成本和最大化救援效率为目标,建立了双目标多物资定位-路径优化模型。针对道路受损问题,AHMAD 等^[6]采用路面状况指数法(Pavement Condition Index, PCI)分析了 PCI 对车辆行驶速度的影响。文献[7-8]提出标准的路面使用性能衰变方程,构建了路面破损与车辆行驶速度的模型框架。目前,针对应急选址-路径规划的研究通常以最小化救援总成本、最大化救援效率或者最大化满意度等因素为目标,也有对应急物资需求不确定性进行鲁棒优化和道路毁损对应急救援的影响方面的研究,但还鲜有研究综合考虑道路受损和不确定需求下,多目标应急物资配送问题,且缺少求解该类问题的新型启发式算法。

因此,笔者拟提出模糊需求下的多目标应急物资配送模型,在考虑模糊需求和道路受损情况下,以救援总成本最少和人道主义救援评价最大为目标,利用三角模糊数刻画受灾点的需求不确定性,采用

交互式模糊多目标线性规划方法^[9],确定受灾点需求的等价模型,设计模型的求解方法,运用 SNS 算法和 ISNS 算法进行算例验证分析,并将该模型和算例的求解过程和结果与离散粒子群算法(Discrete Particle Swarm Optimization algorithm, DPSO)、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)进行对比,验证 ISNS 算法的有效性,以期实现迅速而有效地配送应急物资,提高应对突发事件的能力。

1 应急物资配送模型

1.1 应急物资配送问题描述

在重大灾害发生初期,应急管理部门需要及时快速准确地向受灾点分配救援物资、制定救援方案。考虑到重大灾害的突发性,受灾点所需物资的数量一般是不确定的,且救援道路的通行状况也会受损。此外,由于应急配送中心日常运营成本的原因,在救援初期,应急物资往往处于供不应求的状态,因此在分配救援物资时需要考虑公平性问题。受灾点的群众对于应急物资的满足程度需设定一个最低标准,只有保障配送中心供给受灾点的物资量满足该最低程度,才能认为该救援有效。同时,救援时效性也是人道主义救援评价的重要指标。因此,在应急物资供不应求时,考虑模糊需求和道路受损等条件,确定合理的物资分配方案物资运送方案,才能使得人道主义救援评价最大和应急救援总成本最小。

1.2 模型相关假设

作出以下假设:①将应急物资视为 1 种物资;②由于需要在重大灾害发生后立即指定救援方案,因此只考虑救援初期应急物资供不应求的情况;③各个应急物资配送中心车辆处于充裕状态;④受灾点的模糊需求量可根据灾害等级、种类和受灾点人数等相关数据确定;⑤道路受损系数仅与灾害规模有关且已知;⑥不考虑车辆到达受灾点的装卸物资的时间。

1.3 模型设计

1.3.1 应急救援总成本

应急救援总成本主要包含配送中心固定成本和

车辆运输成本,计算见下式:

$$C = \sum_{h \in H} \varepsilon_h \sum_{\substack{h \in H \\ i \in I}} x_{hi} d_h + \sum_{h \in H} \varepsilon_h \sum_{\substack{h \in H \\ j \in J}} x_{hj} d_h + \sum_{h \in H} \varepsilon_h \sum_{\substack{h \in H \\ m \in M}} x_{hm} d_h + \sum_{i \in I} \rho_i + \sum_{j \in J} o_j \quad (1)$$

式中: C 为应急救援总成本,元; H 为配送车辆集合, $H = \{1, 2, \dots, h\}$; ε_h 为配送车辆 h 的单位距离成本,元; x_{hi} 、 x_{hj} 和 x_{hm} 分别为配送车辆 h 服务应急物资配送中心、转运点和受灾点的情况,若 h 经过该点,则该值取1,否则取0; d_h 为配送车辆 h 的行驶距离,km; I 为应急物资配送中心的集合, $I = \{1, 2, \dots, i\}$; J 为转运点的集合, $J = \{1, 2, \dots, j\}$; M 为受灾点的集合, $M = \{1, 2, \dots, m\}$; ρ_i 为应急物资配送中心 i 的固定成本,元; o_j 为转运点 j 的固定成本,元。

1.3.2 人道主义救援评价目标

模型中,发生重大灾害后,对于人道主义救援的评价主要由3部分组成,即需求点应急物资的满足程度 Q 、各个需求点应急物资满足程度的方差 B 和时间满意度 Z 。当 Q 越大, B 越小时,可体现人道主义救援的公平性。同时,时间满意度越高,越能体现救援及时性。因此,需求点应急物资满足程度的表达见下式:

$$Q = \sum_{m \in M} \frac{\sum_{h \in H} p_h^m}{\sum_{m \in M} \tilde{S}_m} \times 100\% \quad (2)$$

式中: p_h^m 为配送车辆 h 给受灾点 m 提供的物资量,km; \tilde{S}_m 为受灾点 m 的模糊需求量, $\tilde{S}_m = (S^L, S^M, S^U)$,其中, S^L, S^M, S^U 分别表示决策者对于受灾点物资需求的最保守值、最可能值、最乐观的估计值,kg。确定受灾点的满足程度后,可求得受灾点的满足程度方差,公式见下式:

$$B = \frac{\sum_{m \in M} (\mu_m - Q)}{m} \quad (3)$$

其中,

$$\mu_m = \frac{\sum_{h \in H} p_h^m}{\tilde{S}_m} \quad (4)$$

式中 μ_m 为受灾点 m 应急物资的满足程度。根据文献[10-11]提出的时间隶属函数,引入时间满意度函数:

$$f_{t_{hm}} = \begin{cases} 1, & t_{hm} \leq L_m \\ 1 - \left(\frac{t_{hm} - L_m}{U_m - L_m} \right)^k, & L_m \leq t_{hm} \leq U_m \\ 0, & U_m \leq t_{hm} \end{cases} \quad (5)$$

式中: t_{hm} 为配送车辆 h 到达需求点 m 所需要的时间,h; L_m 为需求区域获得救灾物资可以接受的最长等待时间,h; U_m 为需求区域获得救灾物资无法接受的最短等待时间,h; k 为刻画时间敏感程度的系数,当 $k > 1$ 时,时间隶属函数 $f_{t_{hm}}$ 为凸函数;当 $k < 1$ 时, $f_{t_{hm}}$ 为凹函数;当 $k = 1$ 时, $f_{t_{hm}}$ 为线性时间满意度函数。模型的总的时间满意度函数见下式:

$$Z = \sum_{m \in M} \frac{\sum_{h \in H} p_h^m f_{t_{hm}}}{\sum_{m \in M} \tilde{S}_m} \quad (6)$$

考虑到道路受损情况对于车辆行驶情况的影响,根据文献[7-8]提出PCI方程:

$$PCI = PCI_0 \left\{ \gamma \times \exp \left[- \left(\frac{\alpha}{\chi} \right)^\beta \right] \right\} \quad (7)$$

式中:PCI₀为初始使用性能指数; α, β, γ 分别为影响PCI的相关系数,由观测数据回归而成; χ 为灾害规模程度,根据灾害类型、灾害大小、灾害影响范围等因素确定。故车辆 h 的行驶速度为:

$$v_h = \left(1 - \frac{\exp(PCI)}{8.14} \right) V_h \quad (8)$$

$$t_{hm} = \frac{d_{hm}}{v_h} \quad (9)$$

式中: v_h 为配送车辆 h 实际行驶速度,km/h; V_h 为配送车辆 h 规定行驶速度,km/h; d_{hm} 为配送车辆 h 到达受灾点 m 时的行驶距离,km。

模型的目标是受灾点满足程度和时间满意度最大,受灾点满足程度方差最小,并且还需考虑3种指标之间的差异,因此,人道主义救援评价的目标函数为:

$$A = \omega_1 \varphi_1 \frac{Q^*}{Q} + \omega_2 \varphi_2 \frac{B^*}{B} + \omega_3 \varphi_3 \frac{Z^*}{Z} \quad (10)$$

式中: $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为权重系数,根据专家的偏好进行设定,且 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 为比例系数,用于统一 Q, B 和 Z 的量纲; Q^* 为最大受灾点满足程度; B^* 为应急物资满足程度的方差; Z^* 为以时间满意度为单一目标时的最大值。

1.3.3 模型的目标函数

综上所述,模型中存在应急救援总成本目标和人道主义救援评价目标,但是两者计量单位不同,进行简单的线性加权并不能很好地解释模型的效果。因此,考虑使用单目标最优值来使得双目标的单位消除。整个模型的目标函数为:

$$\min F = \tau C + (1 - \tau) A = \tau \frac{C}{C^*} + (1 - \tau) \frac{A}{A^*} \quad (11)$$

$$\text{s. t. } \sum_{h \in H} \sum_{m \in M} p_h^m = p_h^* < p_h, \forall h \in H \quad (12)$$

$$\sum_{h \in H} p_h^m > \lambda_m \times \tilde{S}_m, \forall m \in M \quad (13)$$

$$\sum_{h \in H} p_h^m \times x_{hi} < S_i, \forall i \in I \quad (14)$$

式中: τ 为偏好系数; C^* 为以应急救援总成本为单目标时的最优值; A^* 为以人道主义救援满意度为单目标时的最优值; p_h^* 为配送车辆 h 的实际装载量, kg; p_h 为配送车辆 h 的最大装载量, kg; λ_m 为受灾点 m 的物资需求最低满足程度; S_i 为应急物资配送中心 i 的应急物资储备量, kg。

式(12)表明:每辆车的装载量 p_h^* 不超过其最大装载量 p_h ; 式(13)表明:对于每个需求点都应满足其最低满足程度; 式(14)表明:应急物资配送中心的应急物资的供给量不超过其应急物资储备量。

2 设计——SNS 与 ISNS 求解算法

2.1 SNS

TALATAHARI 等^[12] 提出了社交网络搜索算法 (Social Network Search, SNS)。该算法通过模拟用户在表达观点时的情绪和在社交网络中获得更多人气的尝试。这些情绪包括模仿、对话、争论和创新。由于社交网络中没有可微调的参数,可简化算法的设计和使用时,提高算法的稳定性和可靠性,降低拟合的风险及降低计算成本。

模仿指单个用户位置改进后,其他用户使用式(15)进行更新。

$$\mathbf{X}'_a = \mathbf{X}_w + \text{rand}(-1, 1) \times \text{rand}(0, 1) \times (\mathbf{X}_w - \mathbf{X}_a) \quad (15)$$

式中: \mathbf{X}'_a 为用户 a 搜索空间中的新位置。 \mathbf{X}_a 为第 a 个用户位置的向量; \mathbf{X}_w 为第 w 个用户位置的向量。 rand 表示从 0~1 之间随机生成的数。

对话指 2 个用户之间使用下式交换想法以选择最佳观点。

$$\mathbf{X}'_a = \mathbf{X}_l + \text{rand}(-1, 1) \times \text{sign}(y_a - y_w) \times (\mathbf{X}_w - \mathbf{X}_a) \quad (16)$$

式中: \mathbf{X}_l 为随机选择的用户 l 的位置向量; y_a, y_w 分别为用户 a 和 w 的观点; $\text{sign}(y_a - y_w)$ 为用户观点的差异。

社交网络中存在多个群组,群组中用户通过争论来交换想法以选择最佳观点。其数学模型定义为:

$$\mathbf{X}'_a = \mathbf{X}_a + \text{rand}(0, 1) \times$$

$$\left(\frac{\sum_{r \in R} \mathbf{X}_r}{R} - (1 + \text{round}(\text{rand}(0, 1))) \times \mathbf{X}_a \right) \quad (17)$$

式中: R 为群组中的用户数量; round 函数表示对 rand 生成的数四舍五入。

创新指用户通过式(18)产生新想法。

$$x'_a{}^d = \text{rand}_2 \times x_a^d + (1 - \text{rand}_2(0, 1)) \times (d_{\min} + \text{rand}_1(0, 1) \times (d_{\max} - d_{\min})) \quad (18)$$

$$\mathbf{X}'_a = [x_1, x_2, \dots, x'_a{}^d, \dots, x_n]$$

式中: d 为从决策变量区间中随机选取的变量; d_{\min} 为变量 d 的最小值; d_{\max} 为变量 d 的最大值。

2.2 应急物资配送模型求解算法

传统的 SNS 算法,在求解过程中,采用单个用户随机的选择某一个情绪,该用户在该情绪下的学习率是随机的。这种方法在算法求解初期,确实可以更好搜索问题的求解空间;但在求解中后期,容易在接近收敛时出现振荡或波动,导致收敛速度变慢或者无法收敛到最优解。

笔者提出强化学习率策略的改进 SNS (Improved SNS, ISNS)。在拟议的 ISNS 中,调整了传统 SNS 的更新流程。ISNS 与 SNS 相比,采用相同的 4 种情绪,但对于每一代的学习率,提出一种强化策略,即引入一个自适应参数 δ , 见下式:

$$\delta = 4 \times \frac{t}{T^{\max}} \times \left(1 - \frac{t}{T^{\max}} \right) \quad (19)$$

式中: t 为当前开始约束解的搜索空间的迭代次数; T^{\max} 为最大迭代次数。参数 δ 随着迭代次数的变化而变化, σ 为比例系数,一般情况下, $\sigma \in [0, 1]$ 。则模型中 $\text{rand}()$ 函数可用下式表示。

$$\text{rand}() = \begin{cases} \max(\text{rand}(), \delta), & t < \sigma T^{\max} \\ \min(\text{rand}(), \delta), & t \geq \sigma T^{\max} \end{cases} \quad (20)$$

当前迭代次数 t 小于 σT^{\max} 时,表示模型继续扩大解的搜索空间;当前迭代次数 t 大于 σT^{\max} 时,表示模型开始缩小解的搜索空间。这样保证了模型在前期能够在搜索空间进行充分搜索,跳出了局部最优的缺陷,同时,后期模型的学习率逐渐降低,使得最优值趋于稳定。

以球形函数为目标函数,其表达式见下式:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (21)$$

运用 SNS、ISNS、DPSO、GA 和 SA 共 5 种算法计

算球形函数的最小值。取 $n = 100$ 、SNS 中的用户数量为 50、最大评估次数为 50 000,即最大迭代次数为 1 000;DPSO 中个体数量为 50、最大迭代次数为 1 000、惯性权重为 0.8、个体学习因子为 2、社会学习因子为 2;GA 算法中交叉概率为 0.5、变异概率为 0.8;SA 算法初始温度为 1 000、降温系数为 0.99、步长为 4;计算球形函数的最优值。5 种算法的收敛曲线如图 1 所示。

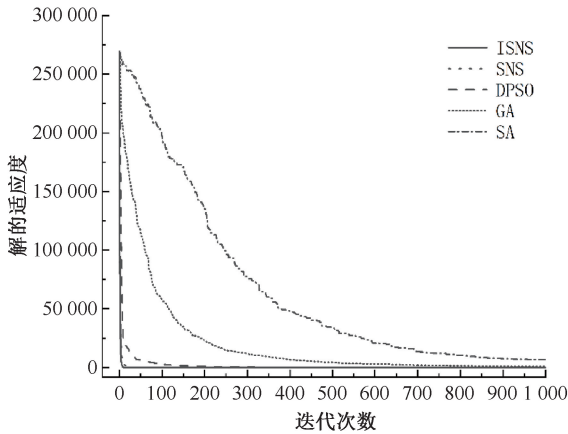


图 1 各类算法针对球形函数的收敛曲线

Fig. 1 Convergence curves of various algorithms for spherical functions

5 种算法的初始解相同。从图 1 看出,ISNS 相较于 SNS、DPSO、GA、SA 能够较快收敛,且能够找到更优解。在运行算例过程中,由于 DPSO 算法需要调整初始速度、惯性权重、个人学习因子和社会学习因子等超参数,且 SA 算法由于步长和迭代次数限制,收敛速度较慢;其他 3 种算法相比于 SNS 和 ISNS 算法找到最优解需要多次计算,会花费更多运算时间。

3 算例分析

3.1 算例描述

为验证模型有效性,以 2022 年四川泸定地震为案例,参考王海军等^[13]的研究进行仿真试验。某地发生重大灾害,因为灾害发生的突然性,无法及时获得受灾点实际需求量。运输网络拓扑图如图 2 所示,其中,受灾点为 I_5-I_{13} ,候选配送中心为成都 (I_1)、德阳 (I_2) 与乐山 (I_3),另外都江堰 (I_4) 作为转运点,转运点的成本为 1 000 元。

候选配送中心容量及固定建设费用见表 1,车辆参数见表 2,各个需求点的 L_m 和 U_m 见表 3。假设车辆无限,且 1 辆车只能服务 1 次配送中心,但可服

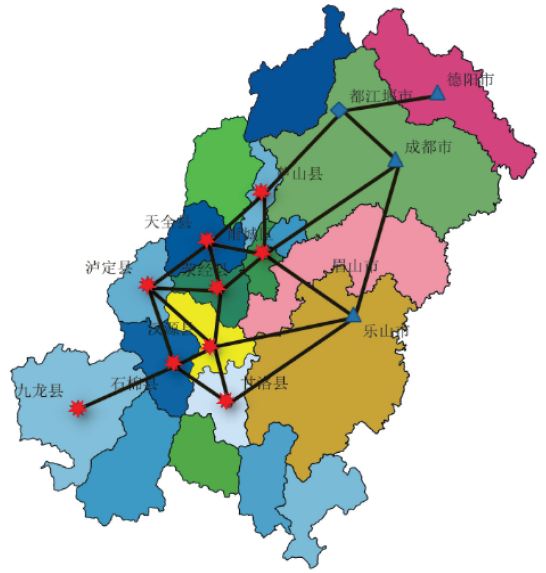


图 2 运输网络拓扑图

Fig. 2 Transportation network topology

务多个受灾点。设定各受灾点的模糊需求量见表 4,数值按照各个城市的人口和距离震源的距离和文献[13]给出。根据 Liang Tienfu^[9]提出的去模糊化方法,将受灾点物资需求量转化为确定数值,具体结果见表 5。各受灾点与候选配送中心的距离见表 6,数值为根据各地中心的经纬度计算出的直线距离,km;-表示没有直接链路。

由于实际供给量往往小于需求量,令最低保障度 $\lambda_m = 0.7$,灾害指数 $\chi = 8$, $(\alpha, \beta, \gamma) = (12, 1.4, 2.5)$,由于救援过程更加看重救援的公平性、尽可能多地进行人道主义救援,对于经济方面要求不高,则设定偏好系数 $\tau = 0.4$, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别为 0.3, 0.1, 0.6。

表 1 候选配送中心参数

Table 1 Parameters of candidate distribution centers

配送中心	容量/kg	固定建设费用/元
成都	15 000	5 000
绵阳	8 000	4 800
广元	4 000	4 000

表 2 车辆参数

Table 2 Parameters of vehicles

车辆类型	容量/kg	平均行驶速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	单位距离成本/ ($\text{元} \cdot \text{km}^{-1}$)
A_1	2 100	50	10.0
A_2	650	30	3.1
A_3	360	20	1.7

表 3 受灾点的时间满意度参数

Table 3 Time satisfaction parameters for disaster sites

需求点	等待时间/h	需求点	等待时间/h
泸定县 I_5	[1.31, 57.61]	石棉县 I_{10}	[0.96, 76.96]
汉源县 I_6	[3.14, 68.34]	雨城区 I_{11}	[1.66, 75.17]
芦山县 I_7	[2.96, 76.96]	天全县 I_{12}	[2.39, 50.00]
九龙县 I_8	[1.47, 86.27]	荣经县 I_{13}	[0.42, 71.90]
甘洛县 I_9	[0.28, 37.55]		

表 4 受灾点应急物资模糊需求量

Table 4 Fuzzy demand for emergency supplies at disaster sites

需求点	模糊需求量/kg	需求点	模糊需求量/kg
泸定县 I_5	[3 200, 3 450, 3 600]	石棉县 I_{10}	[3 000, 3 200, 3 400]
汉源县 I_6	[3 400, 3 600, 3 800]	雨城区 I_{11}	[400, 580, 700]
芦山县 I_7	[600, 820, 1 000]	天全县 I_{12}	[800, 1 000, 1 200]
九龙县 I_8	[200, 440, 600]	荣经县 I_{13}	[3 000, 3 200, 3 400]
甘洛县 I_9	[1 100, 1 350, 1 500]		

表 5 受灾点应急物资需求量

Table 5 Emergency supplies demand at disaster sites

需求点	需求量/kg	需求点	需求量/kg
泸定县 I_5	3 430	石棉县 I_{10}	3 200
汉源县 I_6	3 600	雨城区 I_{11}	568
芦山县 I_7	812	天全县 I_{12}	1 000
九龙县 I_8	424	荣经县 I_{13}	3 200
甘洛县 I_9	1 330		

表 6 运输网络距离参数

Table 6 Distance parameters of transportation networks

地点	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	I_{10}	I_{11}	I_{12}	I_{13}
I_1	0	—	123	57	—	—	—	—	—	—	127	—	—
I_2	—	0	—	75	—	—	—	—	—	—	—	—	—
I_3	123	—	0	—	—	111	—	—	116	—	85	—	—
I_4	57	75	—	0	—	—	115	—	—	—	—	—	—
I_5	—	—	—	—	0	74	—	—	—	77	—	54	61
I_6	—	—	111	—	74	0	—	—	43	30	—	—	53
I_7	—	—	—	115	—	—	0	—	—	—	19	19	—
I_8	—	—	—	—	—	—	—	0	—	87	—	—	—
I_9	—	—	116	—	—	43	—	—	0	50	—	—	—
I_{10}	—	—	—	—	77	30	—	87	50	0	—	—	—
I_{11}	127	—	85	—	—	—	19	—	—	—	0	25	26
I_{12}	—	—	—	—	54	—	19	—	—	—	25	0	31
I_{13}	—	—	—	—	61	53	—	—	—	—	26	31	0

3.2 算法结果与分析

采用 Jupyter Notebook 和 Python 3.9 对算法编程。ISNS 的计算结果见表 7。该方案的应急救援总成本为 38 670.0 元,满足了 84.345%的需求,时间满意度为 5.672,人道主义救援评价为 15.248。图 3

为车辆行驶路线图,线条越粗,表示该路段经过的车辆越多。与运输网络相比,该方案着重行驶成都—雨城区—荣经县—汉源县这一路段,舍去了由乐山支援甘洛县等路线。

表 7 模型结果

Table 7 Model's results

应急救援总成本/元	38 670.0
满足程度/%	84.345
满足方差	$9.699\ 832 \times 10^{-7}$
时间满意度	5.672
人道主义救援评价	15.248

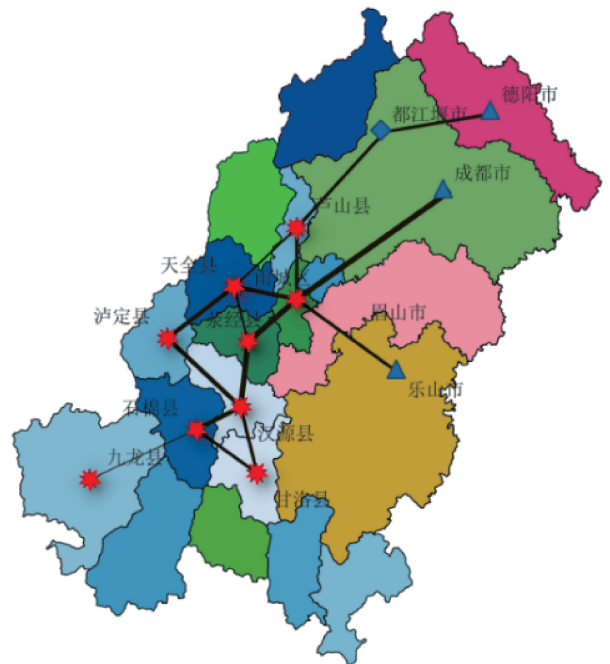


图 3 车辆行驶路线

Fig. 3 Vehicle routes

使用 SNS、ISNS、DPSO、GA 和 SA 共 5 种算法运算实例,DPSO 算法的粒子最大速度为 55、惯性权重取 0.3、个体认知因子为 3、社会学习因子为 2;GA 算法的交叉概率为 0.5、变异概率为 0.05;SA 算法初始温度为 3、降温系数为 0.95、步长为每辆车最大载重量的 1/20;5 种算法使用相同的初始解,最大迭代次数为 1 000。5 种算法的结果和运行情况见表 8。

从表 8 看出,ISNS 算法和 SNS 算法相比于 DPSO 算法、GA 算法和 SA 算法在求解物资配送问题有更优解,同时,ISNS 算法相比于传统的 SNS 算法,节省了 14.219%的应急救援总成本,时间满意度也优于 SNS 算法,能够更好地满足应急救援需要。DPSO 算法,在求解中期,由于解的多样性不如

表 8 运行结果对比

Table 8 Comparison of operational results

算法	应急救援总成本/元	满足程度/%	满足方差	时间满意度	人道主义救援评价	模型适应度	运行时间
ISNS	38 670.0	84.354	$9.699\ 832 \times 10^{-7}$	5.672	15.248	1.186	3 min 47 s
SNS	45 080.0	84.946	$8.899\ 038 \times 10^{-6}$	3.844	30.895	1.985	3 min 48 s
DPSO	57 764.4	82.064	$8.367\ 739 \times 10^{-5}$	4.237	37.420	2.464	4 min 39 s
GA	59 780.0	84.269	$3.744\ 398 \times 10^{-4}$	20.850	52.085	3.035	4 min 52 s
SA	70 455.7	78.177	$8.654\ 783 \times 10^{-5}$	4.662	35.358	2.642	4 min 4 1s

SNS 算法和 ISNS 算法,因此,产生了过于早熟的解;由于 GA 算法的复杂性,运行效率都不如其他 4 种算法;SA 算法由于步长限制,收敛速度较慢,也需要更多迭代次数。ISNS 算法可在一定程度上跳出局部最优,提高解的搜索能力。且 SNS 算法和 ISNS 算法相较于其他算法在运行时间上有着显著优势有助于帮助决策者更快作出决策,减少灾害造成的损失。

图 4 为 5 种算法的适应度曲线,ISNS 和 SNS 相比于 DPSO、GA 和 SA 都能够找到更优解,DPSO 则能够较快趋于稳定,SA 算法收敛速度较慢。

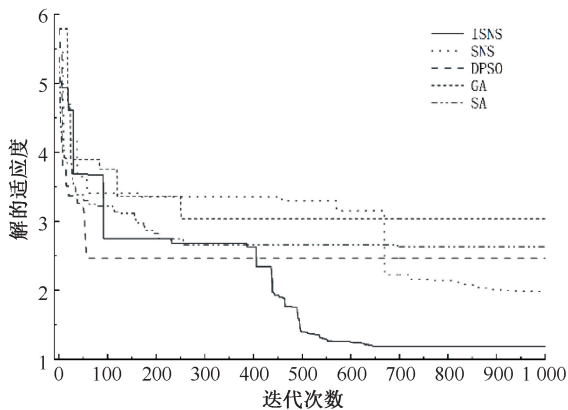


图 4 各类算法收敛曲线

Fig. 4 Convergence curves of various algorithms

基于图 4 的性能比较大致如下:

1) 收敛速率。ISNS 和 DPSO 在初始迭代中表现出快速提高,快速减小了模型适应度,表明对最优解具有较强的初始收敛性。与 ISNS 相比,SNS 稳定下降,但速度较慢,表明收敛速度适中,但最终结果仍然优于初始收敛性比其强的 DPSO。GA 和 SA 在

整个迭代过程中也表现出下降,但仍高于 SNS 和 ISNS,表明与 ISNS 相比收敛速度较慢。

2) 稳定性和最终性能。5 种算法在大约 200 次迭代后开始趋于稳定,并随着迭代的继续逐步改进。其中,SNS 在整个过程优于 DPSO、GA 和 SA,ISNS 综合表现最佳。值得注意的是,ISNS 经过迭代后能对结果进行进一步优化,使目标函数取得最低值。ISNS 能够找到具有最优适应度的解决方案,表现出最佳的整体优化性能。

3) 最终收敛性。在最终迭代 700~1 000 次时,所有算法趋于稳定。ISNS 和 SNS 的收敛程度优于其他算法。

综上,相比几种优化算法,ISNS 更为有效,且具有更佳的优化性能和更稳定的收敛性。

4 结 论

1) 综合考虑需求不确定和道路受损对应急物资配送的相关影响,在满足其他约束的条件下以应急救援总成本和人道主义救援评价为双优化目标,体现了模型的科学性和准确性、救援的及时性和公平性。

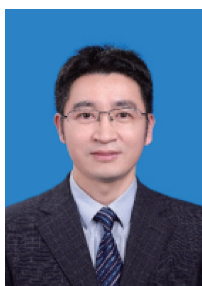
2) 引入了 SNS 算法,并提出了强化学习率策略的 ISNS 算法,使用 SNS 算法和 ISNS 算法对应急物资路径规划问题求解,通过与 DPSO、GA 和 SA 求解相同算例的结果对比,验证了 ISNS 算法的可行性和优越性。

3) 当前模型假设需求和道路损坏条件是静态的。然而,在实际灾害场景中,这些条件可能会迅速变化。探讨考虑车辆限制、配送中心物资随时间变化和道路受损动态变化等多种情境的应急物资配送模型,将是后续研究的重点。

参 考 文 献

- [1] CHEN Rui, SHARMAN R, RAO H R, et al. Coordination in emergency response management[J]. Communications of the ACM, 2008, 51(5): 66-73.
- [2] MONZÓN J, LIBERATORE F, VITORIANO B. A mathematical pre-disaster model with uncertainty and multiple criteria

- for facility location and network fortification[J]. *Mathematics*, 2020, 8(4): DOI:10.3390/math8040529.
- [3] SUN Youqiang, REN Yeqing, CAI Xingjuan. Biobjective emergency logistics scheduling model based on uncertain traffic conditions[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 1–15.
- [4] 王庆荣, 王雪娜, 朱昌锋, 等. 需求不确定下的两阶段应急物流选址-路径研究[J/OL]. *灾害学*: 1–12[2024–12–19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1097.P.20240920.1014.002.html>.
WANG Qingrong, WANG Xuena, ZHU Changfeng, et al. Research on two-stage emergency logistics location-routing problem with uncertain demand[J/OL]. *Journal of Catastrophology*: 1–12[2024–12–19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1097.P.20240920.1014.002.html>.
- [5] 孙华丽, 曹文倩, 薛耀锋, 等. 考虑路径风险的需求不确定应急物流定位-路径问题[J]. *运筹与管理*, 2018, 27(7): 37–42.
SUN Huali, CAO Wenqian, XUE Yaofeng, et al. Emergency logistics-routing model with uncertain demand under p-ath risk[J]. *Operations Research and Management Science*, 2018, 27(7): 37–42.
- [6] AHMAD S, AZIKIN M, SUKRI A, et al. Aplikasi metode PCI (Pavement Condition Index) dalam mengukur tingkat kerusakan jalan dan pengaruhnya terhadap kecepatan kendaraan[J]. *Rekonstruksi Tadulako: Civil Engineering Journal on Research and Development*, 2020, 1(2): 17–22.
- [7] 贾贵宾. 路面破损对道路通行能力的影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
JIA Guibin. Research on road capacity resulting from pavement distress [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [8] 孙立军, 刘喜平. 路面使用性能的标准衰变方程[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 1995, 23(5): 512–518.
SUN Lijun, LIU Xiping. General deterioration equation for pavement performance[J]. *Journal of Tongji University*, 1995, 23(5): 512–518.
- [9] LIANG Tienfu. Distribution planning decisions using interactive fuzzy multi-objective linear programming[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2006, 157(10): 1303–1316.
- [10] 于冬梅, 高雷阜, 赵世杰. 给定需求区域应急物资储备库选址模型及其解法[J]. *中国安全科学学报*, 2015, 25(11): 170–176.
YU Dongmei, GAO Leifu, ZHAO Shijie. A location model with demand regions and algorithm for emergency supplies repository [J]. *China Safety Science Journal*, 2015, 25(11): 170–176.
- [11] 周磊, 李前鹏, 李法朝. 考虑时间满意度的应急物资储备库选址模型与算法[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(3): 188–194.
ZHOU Lei, LI Qianpeng, LI Fachao. Location model and algorithm for emergency material storage considering time satisfaction[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(3): 188–194.
- [12] TALATAHARI S, BAYZIDI H, SARAEE M. Social network search for global optimization[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 92815–92863.
- [13] 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.
WANG Haijun, DU Lijing, MA Shihua. Model and algorithms for integrated open location and routing problem in emergency logistics under earthquake[J]. *Journal of Industrial Engineering/Engineering Management*, 2016, 30(2): 108–115.



作者简介: 曾小青 (1975—), 男, 江西吉水人, 博士, 教授, 主要从事应急物流管理、大数据分析、数字经济等方面的研究。E-mail: zengxq@csust.edu.cn。