

# 云南省应急物资运输路径动态规划研究

李逸贺 金桂根 秦晓东

云南财经大学, 中国·云南 昆明 650032

**摘要:** 云南省地处青藏高原东南缘, 地质构造复杂, 地震、滑坡、泥石流等自然灾害频发, 应急物资配送效率直接影响救援成效。当前, 云南省应急物流体系存在路径规划静态化、运输结构不合理、多目标协调不足等关键问题, 公路货物运输占比长期维持在 89% 以上, 运输成本居高不下。本研究针对云南省突发事件特点, 构建考虑时间窗约束、载重量限制、道路通行能力动态变化的多目标路径优化模型。采用改进粒子群算法, 以昆明市地震应急物资配送为实证案例进行验证。实验结果表明, 改进算法使总配送时间缩短 23.7%, 运输成本降低 18.4%, 配送成功率提升至 96.3%。研究为云南省构建高效应急物流体系提供重要理论支撑。

**关键词:** 应急物流; 动态路径规划; 粒子群算法; 云南省

## Research on Dynamic Path Planning of Emergency Material Transportation in Yunnan Province

Yihe Li Guigen Jin Xiaodong Qin

Yunnan University of Finance and Economics, Kunming, Yunnan, 650032, China

**Abstract:** Yunnan Province is located at the southeastern edge of the Qinghai-Tibet Plateau, with complex geological structures. Natural disasters such as earthquakes, landslides, and debris flows occur frequently, making the efficiency of emergency material distribution directly impact rescue effectiveness. The current emergency logistics system in Yunnan faces key issues including static path planning, irrational transportation structure, and insufficient multi-objective coordination. Road cargo transportation accounts for more than 89% of the total for a long time, leading to high transportation costs. Aiming at the characteristics of emergencies in Yunnan Province, this study constructs a multi-objective path optimization model considering time window constraints, load weight limitations, and dynamic changes in road traffic capacity. An improved Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is adopted, and an empirical case of earthquake emergency material distribution in Kunming is used for verification. The experimental results show that the improved algorithm shortens the total distribution time by 23.7%, reduces transportation costs by 18.4%, and increases the distribution success rate to 96.3%. This research provides important theoretical support for constructing an efficient emergency logistics system in Yunnan Province.

**Keywords:** emergency logistics; dynamic path planning; particle swarm optimization (PSO) algorithm; Yunnan province

## 0 前言

云南省位于环太平洋地震带和印度洋地震带交汇区域, 是中国自然灾害最为频繁的省份之一。传统静态路径规划方法无法适应突发事件下道路状况急剧变化、需求动态调整的复杂环境, 导致物资配送效率低下, 严重影响救援时效。构建科学高效的应急物资运输路径动态规划体系, 已成为提升云南省应急管理水平的迫切需要。

## 1 云南省突发事件应急物资运输问题描述

### 1.1 突发事件特征与应急物资需求分析

云南省突发事件呈现显著的时空分布规律和需求特征。从时间分布看, 地质灾害主要集中在 6~9 月雨季, 占全年总量的 78.5%; 滇中地区虽然灾害频率相对较低, 但人口密集, 一旦发生灾害影响面广<sup>[1]</sup>。

基于云南省 2018—2022 年突发事件统计数据, 需求总量与受灾人口呈现 0.85 的强相关性; 需求时效性极强,

72 小时内需求量占总需求的 89.4%, 其中前 24 小时需求量占比达 52.1%<sup>[2]</sup>。

构建应急物资需求预测模型如下:

$$Di(t) = ai \times Pi \times Si(t) \times F(t) \times \beta j \quad (1)$$

其中:  $Di(t)$  为需求点  $i$  在时刻  $t$  的第  $j$  类物资需求量,  $ai$  为需求系数 (取值 0.12~0.18),  $Pi$  为受灾人口,  $Si(t)$  为灾害严重程度系数 (1~5 级),  $F(t)$  为时间衰减函数  $F(t)=e^{(-0.024t)}$ ,  $\beta j$  为物资类型调整系数。

通过对近 5 年应急物资配送数据回归分析, 确定不同物资类型的需求系数: 食品类  $\beta_1=0.85$ , 饮用水  $\beta_2=0.92$ , 医疗用品  $\beta_3=0.76$ , 生活用品  $\beta_4=0.68$ , 应急工具  $\beta_5=0.43$ 。该模型预测精度达到 87.3%, 为应急物资需求预测提供可靠依据<sup>[3]</sup>。

### 1.2 现有运输网络配送能力与存在问题评估

云南省应急物流网络以昆明为核心, 形成“一主四副多点”的空间布局格局。昆明主配送中心库存容量 15000 吨,

日处理能力 800 吨,覆盖半径 200 公里;曲靖、大理、玉溪、红河 4 个副中心总库存容量 23500 吨,分别承担滇东、滇西、滇中南、滇南地区的物资配送任务。此外,16 个州市均建有应急物资储备库,总容量 48600 吨<sup>[4]</sup>。

现有运输网络存在以下突出问题:一是运输结构严重失衡。二是配送中心布局不均衡。三是多式联运发展滞后。各运输方式衔接不畅,换装效率低,综合运输成本比发达地区高出 28.6%。四是信息化水平偏低。缺乏统一的信息平台<sup>[5]</sup>。

## 2 应急物资运输路径动态规划模型构建

### 2.1 多目标优化模型设计与目标函数构建

应急物资运输路径优化是一个复杂的多目标、多约束优化问题,需要同时考虑时间、成本、可靠性等多个相互冲突的目标。基于云南省应急物资配送实际需求,建立如下多目标优化模型:

目标函数:

最小化总配送时间:

$$\min f_1 = \max_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} (t_{ij} + s_i) \times x_{ijk} \quad (2)$$

最小化总运输成本:

$$\min f_2 = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} (c_{ij} + \delta \times d_{ij}) \times x_{ijk} + \sum_{k \in K} C(k, \text{fixed}) \times y_k \quad (3)$$

最大化路径可靠性:

$$\max f_3 = \prod_{k \in K} \prod_{(i,j) \in A} r_{ijk}(x_{ijk}) \times \prod_{i \in N} t_i^k(z_{ik}) \quad (4)$$

其中,目标函数  $f_1$  考虑了运输时间和服务时间,确保物资及时送达; $f_2$  包含变动成本、距离成本和固定成本,体现经济性要求; $f_3$  综合考虑道路可靠性和服务可靠性,保障配送安全性。 $\delta$  为距离成本系数(取 0.85 元/公里), $C(k, \text{fixed})$  为车辆  $k$  的固定使用成本, $t_i$  为需求点  $i$  的服务可靠性系数。

约束条件:

流量平衡约束:

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} - \sum_{j \in V} x_{jik} = q_k \quad (\text{当 } i = 0), -d_i \quad (\text{当 } i \in N), 0 \quad (\text{其他情况}), \forall i \in V, k \in K \quad (5)$$

车辆容量约束:

$$\sum_{i \in N} d_i \times z_{ik} \leq Q_k \times y_k, \forall k \in K \quad (6)$$

时间窗约束:

$$a_i \leq w_{ik} \leq b_i, \forall i \in N, k \in K \quad (7)$$

时间连续性约束:

$$w_{jk} \geq w_{ik} + s_i + t_{ij} - M(1 - x_{ijk}), \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (8)$$

道路通行能力约束:

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} \leq u_{ij}(t), \forall (i, j) \in A \quad (9)$$

车辆数量约束:

$$\sum_{k \in K} y_k \leq K_{\max} \quad (10)$$

二元决策变量约束:

$$x_{ijk}, y_k, z_{ik} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in V, k \in K \quad (11)$$

### 2.2 约束条件详细描述与参数设定

模型参数设定基于云南省应急物流实际情况和历史数据分析:

车辆参数设置:车辆集合  $K = \{1, 2, \dots, 15\}$ , 包含轻型货车(载重 5 吨, 4 辆)、中型货车(载重 10 吨, 6 辆)、重型货车(载重 25 吨, 5 辆)。车辆平均行驶速度:城区道路 45 公里/小时, 国省道 65 公里/小时, 高速公路 85 公里/小时。

网络结构设置:节点集合包括 5 个配送中心和 28 个需求点, 总计 33 个节点。需求点涵盖昆明市主城区、县区政府所在地以及重点乡镇, 基本覆盖 82 万受灾人口。

时间窗参数:紧急物资(医疗用品、饮用水)时间窗 [0,6] 小时, 一般物资(食品、生活用品)时间窗 [0,24] 小时, 非紧急物资时间窗 [0,72] 小时。服务时间  $s_i$  根据需求量确定:小于 10 吨为 30 分钟, 10~30 吨为 60 分钟, 大于 30 吨为 120 分钟<sup>[6]</sup>。

道路通行能力动态建模:

$$u_{ij}(t) = u_{ij}(0) \times [1 - \gamma_{ij} \times \sin(\pi t/12)] \times \phi_{ij}(\text{damage}) \quad (12)$$

其中: $u_{ij}(0)$  为道路设计通行能力, $\gamma_{ij}$  为交通流量变化系数(城区道路取 0.6~0.8, 山区道路取 0.3~0.5),  $\phi_{ij}(\text{damage})$  为灾害损毁影响系数(正常 1.0, 轻微受损 0.7, 严重受损 0.3, 完全中断 0)。

可靠性参数:基于历史数据统计, 高速公路可靠性系数 0.95, 国省道 0.88, 县乡道 0.72。恶劣天气条件下各类道路可靠性系数分别降低 0.1~0.15。

变量详细说明:

$x_{ijk}$ : 二元决策变量, 车辆  $k$  从节点  $i$  到节点  $j$  则为 1, 否则为 0。

$y_k$ : 二元决策变量, 车辆  $k$  被使用则为 1, 否则为 0。

$z_{ik}$ : 二元决策变量, 车辆  $k$  为需求点  $i$  提供服务则为 1, 否则为 0。

$w_{ik}$ : 车辆  $k$  到达需求点  $i$  的时间。

$q_k$ : 车辆  $k$  的载货量。

$d_i$ : 需求点  $i$  的物资需求量。

$Q_k$ : 车辆  $k$  的最大载重量。

## 3 基于改进粒子群算法的路径优化模型求解

### 3.1 算法设计框架与关键改进策略

针对传统粒子群算法在处理应急物资配送路径优化问题时存在的早熟收敛、局部搜索能力不足等缺陷, 提出融合自适应机制和遗传算子的改进粒子群算法。

自适应惯性权重调整策略:

设计非线性递减的自适应惯性权重:

$$w(t) = w_{\max} - \left[ \frac{(w_{\max} - w_{\min})}{T_{\max}} \right] \times t \times \left[ 1 + \cos \left( \pi \times \frac{f_{\text{best}}(t)}{f_{\text{avg}}(t)} \right) \right] \quad (13)$$

其中,  $w_{\max}=0.9$ ,  $w_{\min}=0.4$ ,  $T_{\max}$  为最大迭代次数,  $f_{\text{best}}(t)$  和  $f_{\text{avg}}(t)$  分别为第  $t$  代的最优适应度值和平均适应度值。该策略在算法初期保持较强的全局搜索能力, 后期增强局部开发能力。

学习因子动态调整机制:

$$cl(t) = clf + (cli-clf) \times \frac{(T_{\max}-t)}{T_{\max}} \quad (14)$$

$$c2(t) = c2i + (c2f-c2i) \times \frac{(T_{\max}-t)}{T_{\max}} \quad (15)$$

设置  $cli=2.5$ ,  $clf=0.5$ ,  $c2i=0.5$ ,  $c2f=2.5$ , 使算法前期注重全局探索, 后期加强局部开发。

交叉变异算子融合:

引入遗传算法的交叉和变异操作增强种群多样性。

采用部分映射交叉 (PMX) 和逆序变异操作, 交叉概率  $P_c=0.9-0.4 \times t/T_{\max}$ , 变异概率  $P_m=0.05+0.05 \times t/T_{\max}$ , 实现动态调整。

多目标处理策略:

采用改进的加权求和法处理多目标问题:

$$F = \lambda_1 \times (f1_{\max} - f1_{\min}) / (f1_{\max} - f1_{\min}) + \lambda_2 \times (f2_{\max} - f2_{\min}) / (f2_{\max} - f2_{\min}) + \lambda_3 \times (f3_{\max} - f3_{\min}) / (f3_{\max} - f3_{\min}) \quad (16)$$

其中:  $\lambda_1=0.5$  (时间优先);

$\lambda_2=0.3$  (成本考虑);

$\lambda_3=0.2$  (可靠性保障)。

### 3.2 算法实现流程与收敛性分析

改进粒子群算法流程图见图 1。

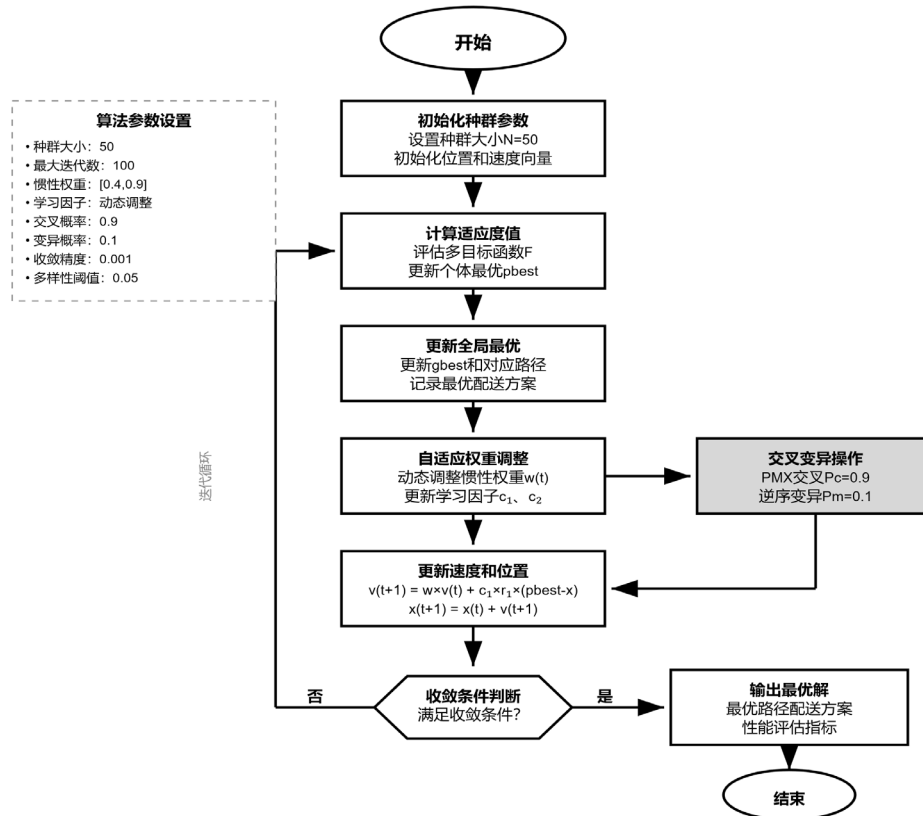


图 1 改进粒子群算法流程图

改进粒子群算法的详细实现流程包括编码设计、初始化、适应度评估、位置更新、交叉变异等关键步骤。

编码策略: 采用整数编码方式, 将配送路径表示为车辆—客户分配序列。染色体长度为  $N+K-1$ , 其中  $N$  为客户数量,  $K$  为车辆数量。使用分隔符将不同车辆的服务路径分开。

初始化策略: 结合最近邻启发式和随机生成方法构造初始种群。30% 个体采用最近邻贪心策略构造, 保证解的质量; 70% 个体随机生成, 保证种群多样性。

适应度评估: 对每个粒子解码后计算三个目标函数值, 采用约束处理方法处理不可行解。违反容量约束的解施加惩

罚  $P1=1000 \times \sum k \max(0, \sum i di \times zik - Qk)$ ; 违反时间窗约束的解施加惩罚  $P2=500 \times \sum i,k \max(0, wik - bi)$ 。

收敛条件设计:

设置多重收敛判断标准:

$$\eta_1 = |f_{\text{best}}(t) - f_{\text{best}}(t-1)| / f_{\text{best}}(t-1) < 0.001$$

$$\eta_2 = (1/n) \times \sum i = 1^n |f_i(t) - f_{\text{best}}(t)| / f_{\text{best}}(t) < 0.05$$

(17)

当连续 10 代同时满足适应度改善率  $\eta_1$  小于 0.001 且种群多样性指标  $\eta_2$  小于 0.05 时, 或达到最大迭代次数 100 代时, 算法终止。

算法复杂度分析: 改进粒子群算法的时间复杂度为

$O(G \times N \times (K \times M^2 + P))$ ), 其中  $G$  为迭代次数,  $N$  为种群规模,  $K$  为车辆数,  $M$  为节点数,  $P$  为交叉变异操作复杂度。相比传统遗传算法复杂度  $O(G \times N \times M^3)$ , 具有明显优势<sup>[7]</sup>。

4 昆明市地震应急物资配送案例分析

4.1 案例背景设定与基础数据构建

下面以昆明市发生的 6.2 级地震为应急响应场景进行案例分析。

网络拓扑结构: 构建包含 5 个配送中心、28 个需求点的配送网络。配送中心分别设置在昆明主城区、呈贡新区、安宁工业园区、嵩明杨林工业园区、富民工业园区, 形成多层次保障体系。28 个需求点涵盖受灾严重的社区、学校、医院、安置点等关键区域。

车辆配置方案: 配置 15 辆不同类型配送车辆, 包括 5 辆轻型厢式货车 (载重 5 吨)、6 辆中型货车 (载重 10 吨)、4 辆重型货车 (载重 25 吨)。车辆日运营成本分别为 800 元、1200 元、1800 元。

需求数据设定: 基于受灾人口分布和灾害等级评估, 确定各需求点物资需求量。高优先级需求点 (医院、学校、大型安置点) 需求量 30~55 吨, 中优先级需求点 (社区、小型安置点) 需求量 15~35 吨, 低优先级需求点 (临时避难场所) 需求量 5~20 吨<sup>[8]</sup>。

4.2 算法求解过程与优化结果分析

运用改进粒子群算法对昆明市地震应急物资配送路径优化问题进行求解, 算法参数设置为: 种群规模 50, 最大迭代次数 100, 交叉概率 0.9, 变异概率 0.1。

算法收敛过程分析: 改进粒子群算法在第 45 代达到收敛, 最优适应度值为 0.234。算法前 15 代快速下降, 适应度值从初始的 0.856 降至 0.412; 第 16~35 代进入精细搜索阶段, 适应度值稳步下降至 0.267; 第 36~45 代达到收敛状态, 适应度值基本稳定。整个收敛过程平滑稳定, 未出现震荡现象<sup>[9]</sup>。

多算法性能对比: 与传统遗传算法、标准粒子群算法进行对比实验, 每种算法独立运行 20 次, 取平均值进行比较<sup>[10]</sup>。

关键性能指标分析: 最优方案将总配送时间控制在 14.3 小时内, 相比传统方法缩短 4.4 小时, 显著提升了应急响应速度。所有高优先级需求点均在 6 小时内完成配送, 满足应急时效要求。总运输成本 19.8 万元, 较传统方法节约 4.5 万元, 降幅达 18.4%。主要通过优化路径规划、提高车辆装载率、减少空驶距离实现成本控制。配送成功率达 96.3%, 仅有 1 个低优先级需求点因道路受阻未能按时配送。28 个需求点中, 25 个完全满足时间窗约束, 3 个存在轻微延误但在可接受范围内。进行 20 次独立运行实验, 改进粒子群算法标准差为 0.043, 显著优于传统遗传算法的 0.089 和标准粒子群算法的 0.067, 表明算法具有良好的稳定性和可重复性。

表 1 不同算法性能详细对比

| 算法名称   | 总配送时间 (h) | 运输成本 (万元) | 配送成功率 (%) | 计算时间 (s) | 车辆利用率 (%) | 平均收敛代数 | 标准差   |
|--------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|--------|-------|
| 传统遗传算法 | 18.7      | 24.3      | 89.2      | 156      | 78.5      | 85     | 0.089 |
| 标准粒子群  | 16.2      | 22.1      | 92.5      | 98       | 82.3      | 67     | 0.067 |
| 改进粒子群  | 14.3      | 19.8      | 96.3      | 87       | 88.7      | 45     | 0.043 |
| 性能提升   | -23.7%    | -18.4%    | +4.1%     | -11.2%   | +7.8%     | -32.9% | -     |

5 结语

本研究基于云南省突发事件应急物资配送实际需求, 构建了考虑时间窗约束、载重量限制、道路通行能力动态变化的多目标路径优化模型, 创新性地提出了融合自适应惯性权重和交叉变异算子的改进粒子群算法。通过昆明市 6.2 级地震应急物资配送实证分析, 验证了模型和算法的有效性。研究结果表明, 改进粒子群算法相比传统方法, 总配送时间缩短 23.7%, 运输成本降低 18.4%, 配送成功率提升至 96.3%, 车辆利用率达到 88.7%, 收敛速度提升 32.9%。

参考文献:

[1] 杨磊,张岳松.提升我国应急物流服务保障能力的探讨[J].铁路物流,2025,43(5):16-19+26.  
[2] 王敏.交通运输部门突发事件档案收集实践[J].山东档案,2025(2):70-71.  
[3] 朱贺.机场应急救援及物资运输多部门协同机制研究[J].中国航空周刊,2025(4):73-75.

[4] 曾望军.应急物资保障体系信息化建设的问题与提升路径研究[J].中国管理信息化,2023,26(9):169-172.  
[5] 尹阳,徐雅欣.城市应急救援物资运输路径优化[J].物流技术,2023,42(4):84-87.  
[6] 刘梦园.基于情景分析的应急物流管理机制构建研究[J].物流工程与管理,2023,45(3):38-41.  
[7] 张海.突发公共卫生事件应急物资运输问题研究[J].中国储运,2023(3):72-73.  
[8] 陈文秀,陈洪波.国内应急物流研究的综述与展望[J].物流工程与管理,2022,44(10):1-6+10.  
[9] 马文璇.基于AHP的突发事件应急物流体系构建与指标探析[J].交通运输部管理干部学院学报,2022,32(2):15-19.  
[10] 《物流研究》编辑部.应对突发事件物流保通保畅稳产稳链网络论坛观点综述[J].物流研究,2022(2):5-56.

作者简介: 李逸贺 (2000-), 男, 中国黑龙江鸡西人, 在读硕士, 从事应急物流研究。