

震后应急物资多方式供应的模糊动态 LRP^①

刘长石^{1,2,4}, 寇 纲³, 刘导波²

(1. 电子科技大学经济与管理学院, 成都 611731; 2. 湖南商学院工商管理学院, 长沙 410205;
3. 西南财经大学工商管理学院, 成都 610074; 4. 湖南商学院移动商务智能湖南省重点实验室, 长沙 410205)

摘要: 研究震后应急物资多方式供应中的多层次设施定位-路线规划问题(LRP), 综合考虑应急物流网络中的多周期应急物资模糊需求、时间窗限制、部分路网损毁与动态恢复、车辆随机行驶时间、大需求点采用需求分割策略同时进行运输与配送等特性, 以应急物资总供应时间最短为目标, 构建了一个震后应急物资多方式供应的多周期模糊 LRP 优化模型, 并根据模型特点设计了一种贪婪算法结合蚁群算法的混合启发式算法予以求解. 最后, 通过算例验证了本文模型和算法的可行性与有效性.

关键词: 地震灾害; 应急物资; 多方式供应; 定位-路径问题; 动态决策

中图分类号: F252; U116 文献标识码: A 文章编号: 1007-9807(2016)10-0061-12

0 引言

我国是一个地震多发国家, 仅 20 世纪地震遇难人数多达 50 多万. 为降低地震造成的损失, 应急物资必须在尽可能短的时间内供应到需求点. 根据 2008 年“5.12”汶川大地震救灾工作的实际反馈信息, 有效实现震后应急物资供应的关键在于合理进行应急设施定位分配(location allocation problem, LAP) 与科学规划应急车辆路线(vehicle routing problem, VRP). 而且 LAP 与 VRP 相互依赖、相互影响, 必须将二者进行整体设计与优化, 即研究震后应急物资供应中的定位-路径问题(location routing problem, LRP)^[1-2].

近年来, 应急物流系统中的 LRP 成为了研究热点之一^[3]. 文献[4]构建了一个灾后应急物资供应的多目标 LRP 优化模型, 并为小规模应急 LRP 设计了精确求解算法、为大规模的应急 LRP 设计了启发式求解算法. 文献[5]研究了震后开放式应急物资供应的 LRP, 构建了一个非线性整

数 LRP 优化模型, 并设计了一种混合启发式算法予以求解. 文献[6]考虑了应急物流网络损毁情况下的应急物资供应问题, 以需求覆盖面最大为目标构建了一个 0-1 线性规划模型, 并设计了一种禁忌搜索算法予以求解. 文献[7]综合考虑了震后应急物流网络故障与救援时间限制等因素, 构建了一个混合非线性规划的 LRP 优化模型, 并设计了一种变邻域搜索算法予以求解. 文献[8]构建了一个以应急物资运达总时间最短和系统总成本最小为目标的 LRP 优化模型, 并设计了一种遗传算法求解. 文献[9]将灾后应急 LRP 划分为 LAP 和 VRP, 建立了以总成本最小为目标的应急 LRP 优化模型, 并设计了一种两阶段启发式算法分别求解 LAP 和 VRP. 文献[10]建立了一个震后应急物流系统中的两级 LRP 优化模型, 设计了一种基于两阶段分解思想的“三角”启发式算法予以求解. 文献[11]研究了震后应急物资配送的模糊动态 LRP, 以应急物资总运达时间最小为目标建立了一个动态 LRP 优化模型, 并设计了一种

① 收稿日期: 2014-11-26; 修订日期: 2015-07-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71222108; 71173028; 91224001); 国家社科基金资助项目(12BJY123); 2015 湖南省教育厅优秀青年资助项目(15B131); 湖南省科技厅 2015 年重点研发计划资助项目(2015ZK3049).

作者简介: 刘长石(1975-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 讲师. Email: liuchangshi964@126.com

两阶段启发式求解算法. 文献[12]以应急物资总配送时间最短和受灾点应急物资未满足的总损失最小为目标建立了一个LRP优化模型,并设计了一种遗传算法予以求解. 文献[13]考虑了道路疏通能力有限与限定救援时间的多方式应急物资供应问题,建立了带时间窗的车辆与直升机联合救援优化模型,并设计了一种启发式算法予以求解. 最近,还有文献[14]研究了应急医疗物资联合运送优化问题,文献[15]研究了带限制期的震后应急物资配送多目标开放式LRP,文献[16]进行了震后交通管制下的多出救点应急物资调运优化,文献[17]进行了模糊供求条件下应急物资动态调度决策.

总体来看,学者们从不同的角度对应急物流系统中的LRP进行了有益的探索,使得这一领域的研究成果日益丰富,但已有研究在以下方面仍存在一些研究缺口:1)已有成果大都假设灾后应急物流网络始终正常连通、任意节点间的车辆行驶时间不受灾害影响,关于路网损毁情况下的应急物流系统中的LRP研究甚少;2)普遍采用一种方式进行单品种应急物资供应,且应急物资需求点的需求量均小于应急物资供应设备容量,多方式、多品种应急物资供应的LRP亟待深入、系统研究;3)通常只针对单周期应急物资供应的LRP进行静态规划,关于应急物资多周期动态供应的LRP研究鲜少.此外,尽管文献[1]考虑了多周期应急物资供应问题,文献[11]中考虑了应急车辆动态调度,文献[12]至文献[14]考虑了应急物资多方式供应,文献[13]与文献[14]考虑了应急物流网络的部分道路损毁情况,但均未同时考虑.

本文研究震后应急物资多方式供应的模糊动态LRP,具有如下特点:1)应急物资供应具有时间窗约束;2)需求点的应急物资需求量不确定;3)有些需求点在一定时间周期内变成了“连通孤岛”,车辆难以到达,需要采用飞机供应应急物资;4)大需求点采用“需求分割”策略同时进行运输与配送;5)部分道路损毁导致应急车辆难以正常行驶,考虑车辆随机行驶时间;6)经过抢修,损毁道路随着时间推移动态恢复;7)集散点与配送中心、配送中心与需求点都是多对多的关系.为此,本文综合考虑应急物流网络中的多周期模糊需求、时间窗限制、车辆随机行驶时间、部分路网损毁与动态恢复、大需求点采用“需求分割”策略同时进行运输与配送等特性,以应急物资总供应

时间最短为目标,构建一个震后应急物资多方式供应的多周期模糊LRP优化模型,并根据模型特点设计一种混合启发式算法求解.

1 问题描述

震后,灾区急需大量的应急物资.但由于灾区部分道路损毁、运输工具容量限制、应急救援时间紧迫等不利因素,应急物资难以及时供应.为克服应急物资供应的滞后性,需要在灾区外围建立适当数量与规模的应急物资集散点(一级设施),用来存储、转运应急物资;同时,需要在灾区临时构建配送中心(二级设施),用来供应应急物资到灾区各需求点(三级设施).为明确本研究的适用范围,本文假设如下:1)考虑某类应急物资供应;2)集散点只对配送中心采用车辆运输应急物资,集散点与配送中心之间的路网始终正常连通;3)“连通孤岛”类型的需求点采用直升飞机供应应急物资,其他需求点采用车辆供应;4)大需求点采用“需求分割”策略同时进行运输与配送,小需求点(包括大需求点通过需求分割策略生成的“小需求点”)采用巡回配送方式;5)只考虑需求点的时间窗上限;6)运输工具从配送中心出发,服务完毕后回到原配送中心;7)运输工具的数量足够;8)通过抢修,路网连通信息随着时间推移而动态变化.决策问题:如何在不同的时间周期内选择合适的应急物资集散点与配送中心,并结合路网连通信息规划直升飞机与应急车辆的供应路线,满足灾区各需求点的应急物资需求,使应急物资总供应时间最短?

2 数学模型

2.1 符号说明

$T = \{t \mid t = 1, 2, 3, \dots, T\}$ 为应急物资供应周期集合; $A = \{r \mid r = 1, 2, 3, \dots, R\}$ 为灾区外围的备选应急物资集散点集合; AQ_r 为集散点 r 的容量; $B = \{p \mid p = 1, 2, 3, \dots, P\}$ 为灾区备选配送中心集合; BQ_p 为配送中心 p 的容量; $F = \{\varepsilon \mid \varepsilon = 1, 2, 3, \dots, L\}$ 为直升飞机集合; FQ_ε 为直升飞机 ε 的容量; $V = \{k \mid k = 1, 2, 3, \dots, K\}$ 为车辆集合; VQ_k

为车辆 k 的容量; $Y = \{y | y = 1, 2, 3, \dots, L + K\}$ 为运输工具集合, $Y = F \cup V$; YQ_y 为运输工具 y 的容量; BC 为需求量大于等于运输工具 y 容量 YQ_y 的大需求点集合; SC 为需求量小于运输工具 y 容量 YQ_y 的小需求点和大需求点通过分割策略生成的“小需求点”的集合; C 为灾区所有需求点集合, $C = BC \cup SC$; $N = A \cup B \cup C$ 为应急物流网络所有节点集合, $i, j \in N$; d_{ij} 为节点 i 到节点 j 之间的道路距离; $a_{ijt} \in \{0, 1\}$ 为 t 周期内节点 i 到节点 j 之间的道路连通情况, 0 表示不连通, 1 表示连通, 当 $t = 1$ 时, 相关决策部门可以通过航拍、GPS 等技术获取 a_{ijt} 的初始值; G 为 t 周期内与所分配的配送中心 p 的道路不连通的需求点 i 的集合, $G \subseteq C$; ψ_ε 为直升飞机 ε 的飞行速度; FT_{iet} 为 t 周期内直升飞机 ε 到达节点 i 的时间, 当 $i \in B$ 时, $FT_{iet} = 0$; ω_{ijet} 为 t 周期内直升飞机 ε 从节点 i 到达节点 j 的飞行时间, $\omega_{ijet} = d_{ij}/\psi_\varepsilon$; KT_{ikt} 为 t 周期内车辆 k 到达节点 i 的时间, 当 $i \in B$ 时, $KT_{ikt} = 0$; τ_{ijkt} 为 t 周期内车辆 k 从节点 i 行驶到节点 j 的随机行驶时间, q_{it} 为 t 周期内需求点 i 的需求量, 采用三角模糊数表示, 即 $q_{it} = (q_{ia}, q_{ib}, q_{ic})$; L_{it} 为 t 周期内需求点 i 要求应急物资达到的最晚时间; fa_{rpt} 为 t 周期内从集散点 $r (r \in A)$ 运输到配送中心 $p (p \in B)$ 的运输量; fb_{pit} 为 t 周期内从配送中心 $p (p \in B)$ 运输到道路连通的大需求点 $i (i \in BC)$ 的运输量; ub_{pit} 为 t 周期内从配送中心 $p (p \in B)$ 运输到道路不连通的大需求点 $i (i \in BC \cap G)$ 的运输量。

决策变量如下:

l_{rt} 如果在 t 周期内候选集散点 $r (r \in A)$ 被选择则为 1, 否则为 0; z_{pt} 如果在 t 周期内候选配送中心 $p (p \in B)$ 被选择则为 1, 否则为 0; g_{prt} 如果在 t 周期内配送中心 $p (p \in B)$ 被分配给集散点 $r (r \in A)$ 则为 1, 否则为 0; y_{ipt} 如果在 t 周期内需求点 $i (i \in C)$ 被分配给配送中心 $p (p \in B)$ 则为 1, 否则为 0; $e_{\varepsilon t}$ 如果在 t 周期内直升飞机 $\varepsilon (\varepsilon)$ 承担了运输配送任务则为 1, 否则为 0; φ_{ijet} 如果在 t 周期内直升飞机 $\varepsilon (\varepsilon)$ 从节点 i 行驶到节点 $j (i, j \in E)$ 则为 1, 否则为 0; x_{ijkt} 如果在 t 周期内车辆 $k (k \in V)$ 从节点 i 行驶到节点 $j (i, j \in N)$ 则为 1, 否则为 0。

2.2 数学模型

在实际应急物资供应过程中, 路网连通信息变化总在一些离散的时间点发生. 因此, 本文基

于滚动时域策略将上述动态决策问题转化为一系列离散时间点的静态决策问题, 建立震后应急物资多方式供应的多周期模糊动态 LRP 模型如下

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{i \in B} \sum_{j \in G} \sum_{\varepsilon \in F} \omega_{ijet} \varphi_{ijet} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in V} \tau_{ijkt} x_{ijkt} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{r \in A} fa_{rpt} g_{prt} \leq WQ_p, \forall p \in B, \forall t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{p \in B} WQ_p z_{pt} \leq \sum_{r \in A} AQR_r, \forall t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{i \in SC \cap G} \sum_{j \in B \cup C} E(q_{it}) \varphi_{ijet} \leq FQ_\varepsilon, \forall \varepsilon \in F, \forall t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{i \in SC} \sum_{j \in B \cup SC} E(q_{it}) x_{ijkt} \leq VQ_k, \forall k \in V, \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{i \in C} E(q_{it}) y_{ipt} \leq BQ_p, \forall p \in B, \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{i \in B \cup SC} x_{ijkt} - \sum_{i \in B \cup SC} x_{jikt} = 0, \forall j \in B \cup SC, \forall k \in V, \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in SC} x_{ijkt} \geq 1, \forall k \in V, \forall t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{p \in B} g_{prt} \geq l_{rt}, \forall r \in A, \forall t \in T \quad (9)$$

$$g_{prt} \leq l_{rt}, \forall p \in B, \forall r \in A, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in SC} \sum_{k \in V} x_{ijkt} \leq 1, \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in SC} \sum_{\varepsilon \in F} \varphi_{ijet} \leq 1, \forall t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{p \in B} \sum_{j \in SC} \sum_{k \in V} x_{pjkt} \geq z_{pt}, \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{j \in SC} x_{pjkt} \leq z_{pt}, \forall k \in V, \forall p \in B, \forall t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{p \in B} \sum_{j \in SC \cap G} \sum_{\varepsilon \in F} \varphi_{pj\epsilon t} \geq z_{pt}, \forall t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{j \in SC \cap G} \varphi_{pj\epsilon t} \leq z_{pt}, \forall \varepsilon \in F, \forall p \in B, \forall t \in T \quad (16)$$

$$\sum_{g \in B \cup SC} x_{pjkt} + \sum_{g \in B \cup SC} x_{pgkt} - y_{ipt} \leq 1, \quad (17)$$

$$\forall i \in SC, \forall k \in V, \forall p \in B, \forall t \in T$$

$$KT_{jkt} = KT_{ikt} + \tau_{ijkt}, \forall j \in C, \quad (18)$$

$$\forall i \in B \cup C, \forall k \in V, \forall t \in T$$

$$FT_{jet} = FT_{iet} + \omega_{ijet}, \forall j \in C, \quad (19)$$

$$\forall i \in G, \forall \varepsilon \in F, \forall t \in T$$

$$KT_{ikt} \leq L_{jt}, \forall i \in C, \forall k \in V, \forall t \in T \quad (20)$$

$$FT_{iet} \leq L_{jt}, \forall i \in C, \forall \varepsilon \in F, \forall t \in T \quad (21)$$

$$fa_{rpt} \geq 0, fb_{pit} \geq 0, ub_{pit} \geq 0, q_{it} \geq 0, \quad (22)$$

$$l_{rt} \in \{0, 1\}, z_{pt} \in \{0, 1\}, g_{prt} \in \{0, 1\},$$

$$y_{ipt} \in \{0, 1\}, e_{\varepsilon t} \in \{0, 1\}, \varphi_{ijet} \in \{0, 1\}, \quad (23)$$

$$x_{ijkt} \in \{0, 1\}, a_{ijt} \in \{0, 1\}$$

其中 $E(q_{it})$ 表示周期 t 内需求点 i 的模糊需求量 q_{it} 采用模糊数期望值法^[18] 计算得到的“实际”需求量,即 $E(q_{it}) = \frac{q_{iia} + 2q_{iib} + q_{iic}}{4}$.

式(1)为目标函数,表示最小化应急物资总供应时间,包括直升飞机供应时间与应急车辆供应时间.约束式(2)表示每个周期从集散点运输到配送中心的应急物资数量不超过该配送中心的最大运输能力;式(3)表示集散点的总容量要满足配送中心的总容量;式(4)表示分配给巡回直升飞机的所有道路不连通的小需求点的需求量之和不超过该直升飞机容量限制;式(5)表示分配给巡回车辆的所有小需求点的需求量之和不超过该车辆容量限制;式(6)表示分配给配送中心的所有需求点的需求量之和不超过该配送中心容量;式(7)表示路径连续性约束,进入节点的车辆必须从该节点离开;式(8)表示子巡回消除约束,每一条路径至少连接到一个配送中心;式(9)、式(10)表示只要集散点开放就有配送中心分配给它,且配送中心只分配给开放的集散点;式(11)表示巡回车辆只能分配给一个配送中心;式(12)表示巡回直升飞机至多分配给一个配送中心;式(13)、式(14)只要配送中心开放就有应急车辆分配给它,且应急车辆只分配给开放的配送中心;式(15)、式(16)表示只有配送中心开放才有直升飞机车辆分配给它,且直升飞机只分配给开放的配送中心;式(17)表示当且仅当一条路径从配送中心出发经过某小需求点时,此小需求点才能分配给该配送中心;式(18)表示巡回车辆的时间约束;式(19)表示巡回直升飞机的时间约束;式(20)、式(21)表示应急物资供应必须符合需求点时间窗约束;式(22)与式(23)表示变量取值约束.

2.3 需求点路网连通情况处理

震后,部分灾区道路存在不同程度损毁.本文假设震后会进行道路抢修,因此道路连通情况在不同时间周期是动态变化的.为决定需求点的应急物资供应方式,必须进行适当处理.

文献[19~25]从不同的角度研究了灾后路网连通问题.本文综合并拓展了文献[19,21,23,25]提出的方法,令 θ 表示地震中心点, p 表示配送中心.根据需求点 $i(i \in G)$ 与地震中心点 θ 的距离 $dd_{i\theta}$ (单位: km)、需求点 i 的地形 dx_i (ma 表

示山区、pa 表示平原)、配送时间与地震发生时刻的时间跨度 kt_i (单位: 天)、 a_{ij} 的初始值等因素来预计 t 周期内需求点 i 的道路连通情况 a_{ipt} , 即

$$a_{ipt} = \begin{cases} 0, & \text{if } dd_{i\theta} \leq 10, kt_i \leq 15, dx_i \in \text{ma} \\ 0, & \text{if } 10 < dd_{i\theta} \leq 20, kt_i \leq 10, dx_i \in \text{ma} \\ 1, & \text{else} \end{cases} \quad (24)$$

即当需求点 i 位于山区、 $dd_{i\theta} \leq 10$ km、 $kt_i \leq 15$ 天时, $a_{ipt} = 0$. 需求点 i 属于“连通孤岛”, 车辆无法通行, 采用直升飞机供应应急物资, $i \in G$; 当 i 位于山区、 $10 < dd_{i\theta} \leq 20$ km、 $kt_i \leq 10$ 天时, 同样 $a_{ipt} = 0, i \in G$; 否则 $a_{ipt} = 1$, 采用车辆供应.

2.4 车辆随机行驶时间估算

行驶在损毁道路上的应急车辆的行驶速度难以确定, 无法计算行驶时间, 必须进行适当处理. 文献[21, 22]根据道路容量和车辆数量分析了道路正常状态下的车辆行驶时间, 文献[23]研究了抢修损毁路段产生的配送时延. 文献[24]对震后车辆行驶时间进行了模拟仿真. 文献[25]进行了汶川地震灾区道路损毁度研究. 本文参考并拓展了文献[24]与文献[25]的方法, 根据需求点 j 与地震中心点 θ 的距离 $dd_{j\theta}$ 、节点 i 到节点 j 之间的道路距离 d_{ij} 、车辆 r 的行驶速度 VS_r 、需求点 j 的地形 dx_j 、应急物资供应时间与地震发生时刻的时间跨度 kt_j 、节点 i 到达节点 j 的道路损毁程度指标 zb_{ij} 等因素, 并令 $\xi_{ijr} = d_{ij}/VS_r$, 表示道路正常状态下车辆 r 从节点 i 到达节点 j 的行驶时间, 预计车辆 r 从节点 i 到达节点 j 的行驶时间 VT_{ijr} 为

$$VT_{ijr} = \begin{cases} \vartheta^* \xi_{ijr} & \text{if } dd_{j\theta} \leq 20, k_{ij} \leq 5, dx_j \in \text{ma}, zb_{ij} > 0.3 \\ \sigma^* \xi_{ijr} & \text{if } dd_{j\theta} \leq 20, 6 \leq k_{ij} \leq 10, dx_j \in \text{ma}, 0.2 < zb_{ij} \leq 0.3 \\ \beta^* \xi_{ijr} & \text{if } dd_{j\theta} \leq 20, 11 \leq k_{ij} \leq 15, dx_j \in \text{ma}, 0.1 < zb_{ij} \leq 0.2 \\ \varepsilon^* \xi_{ijr} & \text{if } dd_{j\theta} \leq 20, k_{ij} \leq 5, dx_j \in \text{pa}, 0.01 < zb_{ij} \leq 0.1 \\ \mu^* \xi_{ijr} & \text{if } dd_{j\theta} \leq 20, 6 \leq k_{ij} \leq 10, dx_j \in \text{pa}, 0.01 \leq zb_{ij} \\ \xi_{ijr} & \text{else} \end{cases} \quad (25)$$

其中 ma 表示山区、 pa 表示平原、 $zb_{ij} > 0.3$ 表示从节点 i 到节点 j 的道路完全损毁、 $0.2 < zb_{ij} \leq 0.3$ 表示严重损毁、 $0.1 < zb_{ij} \leq 0.2$ 表示中度损毁、 $0.01 < zb_{ij} \leq 0.1$ 表示轻微损毁、 $0.01 \leq zb_{ij}$ 表示较轻微损毁。即当 $dx_j \in ma$ 、 $dd_{j0} \leq 20 \text{ km}$ 、 $kt_j \leq 5$ 天且 $zb_{ij} > 0.3$ 时,从节点 i 通往需求点 j 的道路属于完全损毁状态,车辆难以行驶, VT_{ij} 是 ξ_{ij} 的 ϑ 倍;当 $dx_j \in ma$ 、 $dd_{j0} \leq 20 \text{ km}$ 、 $6 \leq kt_j \leq 10$ 天、 $0.2 < zb_{ij} \leq 0.3$ 时,通往需求点 j 的道路属于严重损毁状态,车辆行驶非常缓慢, VT_{ij} 是 ξ_{ij} 的 σ 倍;当 $dx_j \in ma$ 、 $dd_{j0} \leq 20 \text{ km}$ 、 $11 \leq kt_j \leq 15$ 天、 $0.1 < zb_{ij} \leq 0.2$ 时,通往需求点 j 的道路属于中度损毁状态,车辆行驶比较缓慢, VT_{ij} 是 ξ_{ij} 的 β 倍;当 $dx_j \in pa$ 、 $dd_{j0} \leq 20 \text{ km}$ 、 $kt_j \leq 5$ 天、 $0.01 < zb_{ij} \leq 0.1$ 时,通往需求点 j 的道路属于轻微损毁状态,车辆行驶缓慢, VT_{ij} 是 ξ_{ij} 的 ε 倍;当 $dx_j \in pa$ 、 $dd_{j0} < 20 \text{ km}$ 、 $6 \leq kt_j \leq 10$ 天、 $0.01 \leq zb_{ij}$ 时,通往需求点 j 的道路属于较轻微损毁状态,车辆可以慢慢行驶, VT_{ij} 是 ξ_{ij} 的 μ 倍;否则,通往需求点 j 的道路基本没有损毁,车辆正常行驶, $VT_{ij} = \xi_{ij}$ 。决策者根据震后路网实际情况确定系数 ϑ 、 σ 、 β 、 ε 、 μ 的值。

3 算法设计

通常求解 LRP 有 2 种方法: 2 阶段求解与整体求解。前者把 LRP 分解为 LAP 与 VRP 分别求解,求解速度比较快;后者把 LRP 作为一个整体予以求解,具有更高的求解质量^[2-4]。本文基于整体求解的思路,设计了一种贪婪算法结合蚁群算法的混合启发式算法来求解上述模型。具体步骤如下

步骤 1 初始化。设定地震中心坐标 DZ 、要选择的集散点数量 SR 、要选择的配送中心数量 SP 、算法最大循环次数 $\max \text{ iter}$ 、 T 、 AQ_r 、 BQ_p 、 a_{ij} 、 ϑ 、 σ 、 β 、 ε 、 μ 的初始值,令当前循环次数 $\text{iter} = 1$,总供应时间 f 为一个非常大的正数、当前供应周期 $t = 1$ 。

步骤 2 需求点分配给配送中心。1) 令 YN 与 WN 分别表示已分配、待分配的需求点集合, BX 与 BW 分别表示已选、未选的配送中心集合, BQ_p^z 表示配送中心 p 当前装载量。2) 任意选择

$p(p \in BW)$, 令 $p \in BX$, 计算所有需求点 $i(i \in WN)$ 与 p 的距离,并按从大到小的顺序排列。3) 先把排序第一的需求点 i_1 分配给 p , $BQ_p^z = BQ_p^z + E(q_{r1})$, 如果 $BQ_p^z < BQ_p$, 令 $i_1 \in YN$, 继续分配需求点 i_2 给 p , 以此类推;否则,选择一个配送中心 $p(p \in BW)$ 。4) 如果 $WN = \phi$ 转步骤 3; 否则, 步骤 2 循环。

步骤 3 配送中心分配给集散点。1) 令 AY 、 AW 分别表示已选、未选的集散点集合, AQ_r^z 表示集散点 r 当前装载量。2) 随机选择 $r(r \in AW)$, 令 $r(r \in AY)$, 采用贪婪算法随机选择 $p(p \in BX)$, $AQ_r^z = AQ_r^z + BQ_p^z$ 。3) 如果 $AQ_r^z < AQ_r$, 继续分配 $p(p \in BX)$ 给 r ; 否则选择下一个集散点。以此类推。4) 如果 $p(p \in BX)$ 全部被分配, 步骤 3 结束, 并计算集散点到配送中心的车辆运输时间 $\sum_{t \in T} \sum_{i \in A} \sum_{j \in B} \sum_{k \in V} \tau_{ijkt} x_{ijkt}$, 转步骤 4; 否则, 步骤 3 循环。

步骤 4 已选配送中心的直升飞机路线规划与车辆路径规划。本文采用蚁群算法^[26] 规划直升飞机路线与车辆路径。具体方法如下

Step1 需求点供应方式选择。任意选择 $p(p \in BX)$, 根据式(24) 决定属于 p 的需求点 i 的应急物资供应方式, 即如果 $i \in G$, 采用直升飞机供应; 否则采用车辆供应。

Step2 直升飞机路线规划。对于集合 G , 采用蚁群算法^[26] 优化直升飞机飞行路线, 计算直升飞机从配送中心供应应急物资到各需求点的时间 $\sum_{t \in T} \sum_{i \in B} \sum_{j \in G} \sum_{s \in F} \omega_{ijst} \varphi_{ijst}$ 。

Step3 车辆路径规划。对于物资供应方式为应急车辆的所有需求点, 采用蚁群算法^[26] 优化应急车辆行驶路线, 根据式(25) 计算车辆随机行驶时间 VT_{ij} , 并计算车辆从配送中心供应应急物资到各个需求点的时间 $\sum_{t \in T} \sum_{i \in B} \sum_{j \in G} \sum_{k \in V} \tau_{ijkt} x_{ijkt}$ 。

Step4 如果所有 $p(p \in BX)$ 都规划完毕, 步骤 4 结束, $\text{iter} = \text{iter} + 1$ 并计算本次循环中的应急物资总供应时间 $\text{Time}_{\text{iter}}$ 。如果 $\text{Time}_{\text{iter}} < f$, $f = \text{Time}_{\text{iter}}$ 转步骤 5; 否则, 步骤 4 循环。

步骤 5 如果 $\text{iter} < \max \text{ iter}$, 转步骤 2; 否则, $t = t + 1$ 转步骤 6。

步骤 6 如果 $t < T$, 转步骤 1; 否则, 算法结束。

4 算例分析

根据文献 [27, 28], 地震应急期可以划分为初期救援阶段、中期安置阶段和后期恢复阶段. 初期救援阶段时间为震后 0 至 10 天, 其中最重要的为震后 0 至 3 天, 主要任务是抢救生命、防范次生衍生灾害, 应急物资主要为应急抢险设备、医疗设备与药品等. 中期安置阶段时间为震后 11 天至 90 天, 主要任务为受灾民众生活安置、正常生活秩序的恢复, 应急物资主要为生活类物资. 后期恢复阶段时间为灾后的 3 个月至 5 年, 主要包括全面恢复重建、灾害损失评估、善后处置和长期心理危机干预等. 文献 [29] 结合地震灾害救援的实践经验, 认为震后 0~3 天和 2 个星期内是震后交通系统最困难的阶段, 0~3 天内的主要救援活动为紧急救援, 4 天~14 天内的主要救援活动为物资运输、生命线抢修, 15 天~30 天内的主要救援活动为重建恢复.

本文令震后应急物资供应分为 3 个周期, $T = \{1, 2, 11\}$ (单位: 天), 并假设第 1 天应急物资主要为应急抢险设备, 第 2 天应急物资主要为医疗设备与药品, 第 11 天应急物资主要为生活类物资; 有 4 个候选应急物资集散点, 坐标、容量如表 1 所示; 有 7 个候选配送中心, 坐标、容量如表 2 所示; 各配送中心拥有 2 种配送车辆, 载重量分别为 350 单位、300 单位, 行驶速度分别为 60 km/h、50 km/h; 集散点采用大容量车辆运输应急物资到配送中心, 车辆容量为 500 单位, 行驶速度为 70 km/h, 应急物资从集散点运往配送中心所需的服务时间为运输量的 0.2 倍; 在 $[100 \text{ km} \times 100 \text{ km}]$ 的平面坐标上随机产生 30 个应急物资需求点, 坐标、地形 (ma 表示山区, pa 表示平原)、不同周期的应急物资需求量与时间窗如表 3 所示, 应急物资从配送中心供应到需求点所需的服务时间为运输量的 0.1 倍; 直升飞机容量 $FQ = 600$ 单位, 飞行速度 $\psi = 600 \text{ km/h}$. 由于篇幅限制, 略去路网连通情况 a_{ij} 的初始值.

程序相关变量设置如下: $DZ = (50, 50)$ 、 $SR = 2$ 、 $SP = 4$ 、 $\max \text{ iter} = 500$ 、 $\vartheta = 5$ 、 $\sigma = 4$ 、 $\beta = 3$ 、 $\varepsilon = 2$ 、 $\mu = 1.5$, 蚁群算法迭代次数 $NC = 50$, 蚂蚁数量 $m = 20$, 残留信息相对重要度 $\alpha = 1$, 能见度系数 $Beta = 5$, 信息素更新常量 $\text{xxs} = 15$, 挥发度系数 $Rho = 0.3$.

算法采用 Matlab R2013a 编程实现, 在 CPU 1.90GHz、内存 4G 的微机对上对测试算例进行求解. 程序运行时间为 265.36 s. 结果如下: 当 $t = 1$, 总供应时间为 2 371.12 m, 各需求点的平均供应时间为 79.14 s; 当 $t = 2$, 总供应时间为 2 593.86 s, 各需求点的平均供应时间为 86.43 s; 当 $t = 11$, 总供应时间为 2 654.84 s, 各需求点的平均供应时间为 88.49 s. 说明本文算法可以在较短运行时间内计算出令决策者较满意的 LRP 规划方案.

各周期的设施定位与路线安排决策结果如表 4 (A 表示集散点, B 表示配送中心, A 与 B 的数字代表坐标, 路线中的数字 0 代表配送中心, 其余数字代表需求点序号, 直配路线中的 V 表示车辆, H 表示直升飞机), 可以得知: 1) 当 $t = 1$ 和当 $t = 2$ 时, 采用直升飞机进行供应的需求点非常多, 只有少量车辆配送路径; 2) 当 $t = 11$, 采用应急车辆进行供应的需求点相对比较多, 但还是存在少量“连通孤岛”类型的灾区需求点必须采用直升飞机供应应急物资; 3) 各个周期的集散点与配送中心定位方案、直升飞机飞行路线、车辆行驶路径方案都不一样. 说明应急 LRP 优化方案随着时间推移而动态变化. 仿真结果同时表明, 如果只采用车辆进行应急物资供应, 应急物资难以及时供应到“连通孤岛”类型的灾区需求点. 决策者应该根据需求点不同时间周期内的实际路网状况选择合理的应急物资供应方式, 同时采用多种应急物资供应方式, 才能有效满足灾区需求点的需求.

表 1 候选应急物资集散点数据

Table 1 Parameters of transshipment points

集散点序号	1	2	3	4
坐标 (km)	(29, 21)	(77, 23)	(22, 69)	(74, 70)
容量	6 000	6 500	6 800	6 500

表 2 候选配送中心数据

Table 2 Parameters of distribution centers

配送中心序号	1	2	3	4	5	6	7
坐标	(43, 37)	(43, 66)	(64, 61)	(55, 39)	(73, 35)	(39, 61)	(76, 56)
容量	2 750	2 850	2 900	2 850	2 800	2 400	2 300

表 3 不同救援周期的需求点数据

Table 3 Parameters of demand nodes in different relief period

需求点序号	1	2	3	4	5	6
坐标	(72 66)	(64 78)	(34 60)	(30 40)	(25 40)	(39 58)
地形	ma	pa	pa	pa	ma	ma
需求量	(405 440 486) (335 370 390) (350 380 410)	(70 80 95) (60 80 90) (40 60 75)	(80 100 130) (70 100 120) (60 80 100)	(70 80 90) (70 80 90) (50 65 80)	(160 180 200) (110 140 170) (100 130 160)	(130 160 190) (120 140 160) (110 130 150)
时间窗	(0 200) (0 250) (0 350)	(0 210) (0 260) (0 370)	(0 208) (0 240) (0 360)	(0 210) (0 265) (0 380)	(0 220) (0 250) (0 360)	(0 230) (0 255) (0 358)
需求点序号	7	8	9	10	11	12
坐标	(62 54)	(44 48)	(38 41)	(49 48)	(61 52)	(66 59)
地形	pa	ma	pa	ma	pa	ma
需求量	(350 380 410) (135 170 190) (130 160 190)	(445 480 496) (315 330 360) (150 170 190)	(90 110 130) (80 100 110) (70 80 90)	(650 680 710) (415 440 460) (250 260 270)	(145 180 196) (100 130 160) (80 90 99)	(165 180 206) (125 150 168) (70 90 110)
时间窗	(0 210) (0 260) (0 370)	(0 210) (0 270) (0 380)	(0 218) (0 244) (0 369)	(0 216) (0 285) (0 387)	(0 210) (0 230) (0 362)	(0 235) (0 259) (0 378)
需求点序号	13	14	15	16	17	18
坐标	(63 46)	(55 56)	(59 52)	(59 67)	(28 56)	(31 54)
地形	ma	ma	ma	ma	pa	ma
需求量	(136 160 186) (125 140 160) (80 90 100)	(435 480 500) (415 450 470) (240 270 200)	(140 160 180) (90 110 130) (70 90 110)	(650 680 710) (420 450 480) (370 390 410)	(85 110 130) (75 90 110) (50 70 90)	(115 140 166) (105 130 148) (60 80 100)
时间窗	(0 200) (0 270) (0 380)	(0 220) (0 262) (0 374)	(0 213) (0 268) (0 371)	(0 215) (0 264) (0 377)	(0 220) (0 264) (0 373)	(0 214) (0 263) (0 375)
需求点序号	19	20	21	22	23	24
坐标	(68 43)	(69 53)	(60 60)	(46 53)	(65 37)	(39 47)
地形	pa	ma	ma	ma	ma	pa
需求量	(80 90 110) (70 80 90) (60 70 80)	(120 150 170) (80 90 100) (60 80 90)	(80 110 130) (70 90 100) (60 70 80)	(460 490 510) (370 390 410) (660 670 680)	(110 130 140) (70 80 90) (62 73 85)	(370 400 430) (370 380 390) (130 160 190)
时间窗	(0 211) (0 263) (0 372)	(0 214) (0 268) (0 379)	(0 220) (0 240) (0 350)	(0 231) (0 265) (0 377)	(0 200) (0 266) (0 389)	(0 221) (0 263) (0 374)
需求点序号	25	26	27	28	29	30
坐标	(64 53)	(49 63)	(57 55)	(66 57)	(62 70)	(53 58)
地形	ma	ma	ma	ma	ma	ma
需求量	(130 150 170) (90 100 110) (60 80 100)	(120 140 160) (80 90 100) (70 80 90)	(220 250 270) (180 190 200) (160 180 200)	(420 455 470) (370 390 410) (160 180 200)	(330 350 380) (280 310 340) (460 480 500)	(640 670 700) (290 320 350) (360 410 460)
时间窗	(0 232) (0 276) (0 375)	(0 211) (0 264) (0 372)	(0 221) (0 243) (0 355)	(0 236) (0 267) (0 378)	(0 220) (0 263) (0 380)	(0 226) (0 268) (0 370)

表 4 设施定位和路线安排决策结果

Table 4 Facility selection and vehicle route planning of different relief period

T	A	B	车辆路线	飞机路线	直配路线
1	22 69	43 37	0-9-4-5-0,0-24-0	0-8-10-0	- - -
		39 61	0-3-17-0	0-6-18-22-14-0,0-16-26-0	0-22-0 (H)
	77 23	76 53	0-7-11-0,0-2-1-0	0-12-21-15-13-25-20-0	0-1-0 (V)
		73 35	0-19-29-0	0-23-28-0,0-27-30-0	0-29-0 (V)
2	74 70	76 53	0-29-2-0,0-7-11-0,0-1-0	0-20-12-28-25-15-21-13-0	0-1-0 (V),0-29-0 (V)
		73 35	0-19-0	0-23-0	- - -
	29 21	43 37	0-9-4-5-0,0-24-0	0-8-10-0	- - -
		39 61	0-3-17-0	0-6-14-27-0,0-18-22-30-0,0-26-16-0	0-22-0 (H)
11	74 70	39 61	0-3-17-18-0,0-6-24-0,0-5-4-9-0	0-8-10-22-0	0-22-0 (H)
	22 69	73 35	0-19-13-23-0	- - -	- - -
		42 66	0-26-0	0-30-0	- - -
		64 61	0-1-2-16-21-0,0-7-11-0,0-12-20-25-0,0-29-0,0-28-0	0-14-27-15-0	0-1-0 (V),0-16-0(V),0-29-0 (V)

图 1 分别表示了不同周期内设施定位与路线安排的决策结果。结果表明: 1) 震后应急救援初期, 灾区存在比较多的“连通孤岛”类型的需求点, 必须采用直升飞机进行应急物资供应才能按时完成任务。2) 震后应急救援中后期, 通过抢修后, 部分“连通孤岛”类型的需求点的道路连通情况发生了改变。此时, 这些需求点可以采用应急车辆供应应急物资。3) 在震后应急救援后期灾区仍然存在少量“连通孤岛”类型的需求点, 这些需求点离地震中心的距离非常近, 说明了震后离地震中心距离非常近的部分道路损毁非常严重, 抢修难度大, 可能需要比较长的抢修时间才能恢复道路正常状态。4) 各周期内的设施定位方案、飞机飞行路线、车辆行驶路线不一样。说明了不同周期内的 LRP 优化方案是动态变化的, 同时也证

明了为有效保障震后应急物资供应, 非常有必要采用多种供应方式。

在蚁群规模等各种参数不变的前提下, 通过扩展上文算例(算例 1)的规模参数 a, b, c 形成算例 2 至算例 4, 采用本文的混合启发式算法 (HHA) 分别求解各个算例, 并与文献 [5] 的数学启发法 (MHA)、文献 [15] 的混合遗传算法 (HGA) 分别进行了应急物资总供应时间、程序运行时间比较, 结果如表 5 所示。其中, a 表示集散点数量, b 表示配送中心数量, c 表示需求点数量。由于文献 [15] 求解的是单周期的 LRP, 本文把文献 [15] 求解的时间乘以周期作为对比结果。从表 5 可知, 随着问题规模的增大, 求解时间会有所增长; HHA 在应急物资总供应时间明显优于 MHA, HHA 在程序运行时间方面略胜 HGA。

表 5 不同问题规模的 LRP 求解结果

Table 5 Results of different scale LRP

算例	规模参数				算法运行时间		应急物资总供应时间	
	T	a	b	c	HHA	HGA	HHA	MHA
1	{1, 2, 11}	4	7	30	265.36	277.29	2 371.12	2 407.38
2	{1, 4, 8}	3	5	30	573.41	604.89	2 674.65	2 703.51
3	{3, 7, 14}	5	5	40	620.17	634.92	3 024.81	3 146.32
4	{4, 6, 18}	6	5	50	721.93	734.19	4 075.63	4 235.86

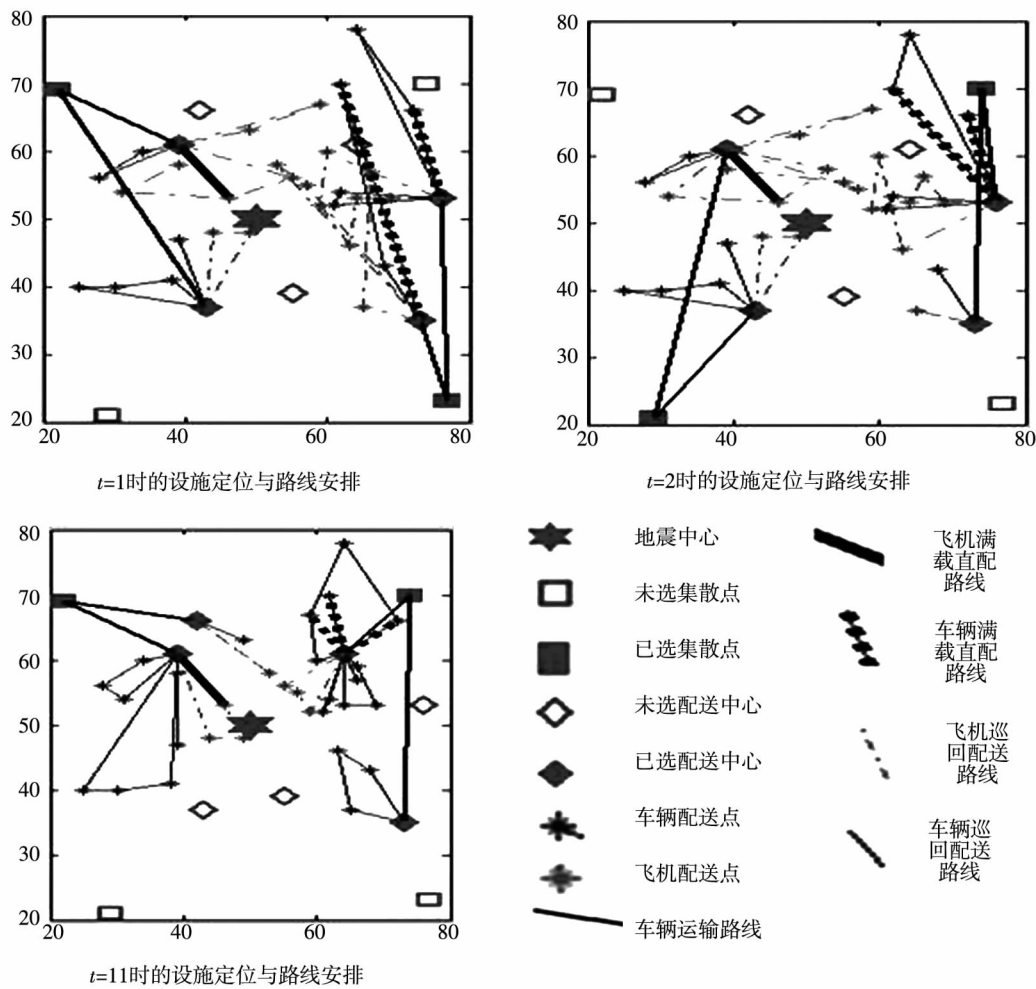


图 1 不同救援周期内的设施定位与路线安排

Fig. 1 Facility selection and vehicle route planning of different relief period

5 结束语

应急物资(尤其应急药品)的及时供应是震后救援工作的重中之重.有效实现应急物资及时供应,尽快抢救地震灾区受灾群众,保障其生命与财产安全,具有重大的现实意义.为此,本文综合考虑应急物资需求点的模糊需求量、时间窗限制与路网连通情况、车辆随机行驶时间、路网动态恢复以及应急物资需求分割运输与配送等特性,采用直升飞机与应急车辆同时进行应急物资供应,以应急物资供应总时间最短为目标,构建一个震后应急物资多方式供应的多

周期模糊 LRP 优化模型,据此进行震后救援过程中的应急设施定位、直升飞机与应急车辆路线规划的联合决策.并根据模型的特点,设计一种混合启发式算法予以求解.算例计算结果表明,该算法运行效率较高,可以较好地解决震后应急物流系统中的多方式供应应急物资的模糊 LRP.本文的方法特别适合于震后灾区需求点的应急物资需求量不确定、交通路网存在一定损毁、车辆行驶时间随机、应急物流网络可能存在“连通孤岛”、同时采用多种应急物资供应方式的应急物流系统规划情景.

进一步的研究将考虑突发自然灾害后的多品种应急物资的多式联运供应问题.

参 考 文 献:

- [1]王绍仁,马祖军. 震后应急物流系统中带时间窗的模糊动态 LRP[J]. 运筹与管理,2011,20(5):63-72.
Wang Shaoren, Ma Zujun. Fuzzy dynamic LRP with time windows in post-earthquake emergency logistics systems[J]. Operations Research and Management Science, 2011, 20(5): 63-72. (in Chinese)
- [2]代颖,马祖军. 应急物流系统中的随机定位-路径问题[J]. 系统管理学报,2012,21(2):212-218.
Dai Ying, Ma Zujun. Stochastic location-routing problem in emergency logistics systems[J]. Journal of Systems & Management, 2012, 21(2): 212-218. (in Chinese)
- [3]Prodhon C, Prins C. A survey of recent research on location-routing problems[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 238: 1-17.
- [4]Rath S, Gutjahr W J. A math-heuristic for the warehouse location-routing problem in disaster relief[J]. Computers & Operations Research, 2014, 42: 25-39.
- [5]Wang H, et al. Multi-objective open location-routing model with split delivery for optimized relief distribution in post-earthquake[J]. Transportation Research Part E, 2014, 69: 160-179.
- [6]Salman F S, Yucel E. Emergency facility location under random network damage: Insights from the Istanbul case[J]. Computers & Operations Research, 2015, 62: 266-281.
- [7]Ahmadi M, et al. A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on San Francisco district[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2015, 75: 145-163.
- [8]郑斌,马祖军,方涛. 应急物流系统中的模糊多目标定位-路径问题[J]. 系统工程,2009,27(8):21-25.
Zheng Bin, Ma Zujun, Fang Tao. Fuzzy multi-objective location-routing problem in emergency logistics systems[J]. Systems Engineering, 2009, 27(8): 21-25. (in Chinese)
- [9]曾敏刚,崔增收,余高辉. 基于应急物流的减灾系统 LRP 研究[J]. 中国管理科学,2010,4(2):75-80.
Zeng Mingang, Cui Zengshou, Yu Gaohui. Research on location-routing problem of relief system based on emergency logistics[J]. Chinese Journal of Management Science, 2010, 4(2): 75-80. (in Chinese)
- [10]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 Shaoren, Ma Zujun. Location-routing problem in emergency logistics system for post-earthquake emergency relief response[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2011, 31(8): 1497-1507. (in Chinese)
- [11]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):212-218.
Dai Ying, Ma Zujun, Zhu Daoli, et al. Fuzzy dynamic location-routing problem in post-earthquake delivery of relief materials[J]. Journal of Management Sciences in China, 2012, 15(7): 212-218. (in Chinese)
- [12]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 Shuanglin, Ma Zujun, Zheng Bin, et al. Fuzzy multi-objective location-multimodal transportation problem for relief delivery during the initial post-earthquake period[J]. Chinese Journal of Management Science, 2013, 21(2): 144-151. (in Chinese)
- [13]祁明亮,秦凯杰,赵琰. 雪灾救援物资车辆-直升机联合运送的调度问题研究[J]. 中国管理科学,2014,22(3):59-67.
Qi Mingliang, Qin Kaijie, Zhao Yan. Research on problem of scheduling of helicopter coordinated with vehicle for resources

- distribution in snowstorm [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2014, 22(3): 59–67. (in Chinese)
- [14] 阮俊虎, 王旭坪, 杨挺. 大规模灾害中基于聚类的医疗物资联合运送优化 [J]. *中国管理科学*, 2014, 22(10): 80–89.
- Ruan Junhu, Wang Xuping, Yang Ting. A clustering-based approach for medical supplies intermodal transportation in large-scale disasters [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2014, 22(10): 80–89. (in Chinese)
- [15] 马祖军, 代颖, 李双琳. 带限制期的震后应急物资配送模糊多目标开放式定位路径问题 [J]. *系统管理学报*, 2014, 23(5): 658–667.
- Ma Zujun, Dai Ying, Li Shuanglin. Fuzzy multi-objective open location-routing problem with deadlines in post-earthquake relief deliveries [J]. *Journal of Systems & Management*, 2014, 23(5): 658–667. (in Chinese)
- [16] 李双琳, 马祖军. 震后交通管制下多出救点应急物资调运问题 [J]. *管理科学学报*, 2014, 17(5): 1–13.
- Li Shuanglin, Ma Zujun. Post-earthquake multi-depot relief distribution under traffic control [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2014, 17(5): 1–13. (in Chinese)
- [17] 王海军, 王婧, 马士华, 等. 模糊供求条件下应急物资动态调度决策研究 [J]. *中国管理科学*, 2014, 22(1): 55–64.
- Wang Haijun, Wang Jing, Ma Shihua, et al. Decision-making for emergency materials dynamic dispatching based on fuzzy demand and supply [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2014, 22(1): 55–64. (in Chinese)
- [18] Liu B D, Iwamura K. Chance constrained programming with fuzzy parameters [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1998, 94: 227–237.
- [19] 兰日清, 丰彪, 王自法. 震后公路桥梁通行能力快速评估技术研究 [J]. *世界地震工程*, 2009, 25(2): 81–87.
- Lan Riqing, Feng Biao, Wang Zifa. Study on the fast assessment of traffic capacity of highway bridges after strong earthquakes [J]. *World Earthquake Engineering*, 2009, 25(2): 81–87. (in Chinese)
- [20] 陈厚群, 李敏, 石玉成. 基于设定地震的重大工程场地设计反应谱的确定方法 [J]. *水利学报*, 2005, 36(12): 1399–1404.
- Chen Houqun, Li Min, Shi Yucheng. Determination of design response spectrum for important structures based on scenario earthquake [J]. *ShuiLi Xue Bao*, 2005, 36(12): 1399–1404. (in Chinese)
- [21] Shinozuka M, Murachi Y, Dong X, et al. Effect of seismic retrofit of bridges on transportation networks [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, 2(2): 169–179.
- [22] Pablo A M D, Irina S D, Kenneth S. Network repair crew scheduling and routing for emergency relief distribution problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, doi: 10.1016/j.ejor.2015.06.026. (Accepted Manuscript)
- [23] 陈森, 姜江, 陈英武, 等. 未定路网结构情况下应急物资车辆配送问题模型与应用 [J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(5): 907–1005.
- Chen Sen, Jiang Jiang, Chen Yingwu, et al. Emergency logistics distribution problem model under uncertain roadway network structure and its application [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2011, 31(5): 907–1005. (in Chinese)
- [24] Peng M, et al. Post-seismic supply chain risk management: A system dynamics disruption analysis approach for inventory and logistics planning [J]. *Computers & Operations Research*, 2014, 42: 14–24.
- [25] 秦军, 曹云刚, 耿娟. 汶川地震灾区道路损毁度遥感评估模型 [J]. *西南交通大学学报*, 2010, 45(5): 768–774.
- Qin Jun, Cao Yungang, Geng Juan. Evaluation model for damage extent of roads in Wenchuan earthquake-stricken areas based on remote sensing information [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2010, 45(5): 768–774. (in Chinese)
- [26] 李士勇. 蚁群算法及其应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- Li Shiyong. *Ant Colony Algorithm and its Application* [M]. Harbin Institute of Technology Press, 2004. (in Chinese)
- [27] 詹承豫. 地震巨灾后抗震救灾的阶段划分及主要任务研究 [J]. *甘肃社会科学*, 2008, (5): 44–47.

- Zhan Chengyu. Phases of earthquake emergency response period and its main task after strong earthquake [J]. *Gansu Social Sciences*, 2008, (5): 44–47. (in Chinese)
- [28] 王海鹰, 孙刚, 欧阳春, 等. 地震应急期关键时间阶段划分研究 [J]. *灾害学*, 2013, 28(3): 166–170.
Wang Haiying, Sun Gang, Ouyang Chun, et al. Phases of earthquake emergency response period [J]. *Journal of Catastrophology*, 2013, 28(3): 166–170. (in Chinese)
- [29] 李永义. 交通系统地震应急决策模型与方法 [D]. 中国地震局工程力学研究所, 2014.
Li Yongyi. Method and Model of Earthquake Emergency Decision Making on Traffic System [D]. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2014. (in Chinese)

Fuzzy dynamic LRP for post-earthquake multimodal relief delivery

LIU Chang-shi^{1,2}, *KOU Gang*³, *LIU Dao-bo*²

1. School of Management and Economics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;
2. School of Management, Hunan University of Commerce, Changsha 410205, China;
3. School of Management, Southwestern University of Finance and Economics, Chengdu 610074, China;
4. Key Laboratory of Hunan Province for Mobile Business Intelligence, Hunan University of Commerce, Changsha 410205, China

Abstract: The fuzzy dynamic location-routing problem (LRP) for post-earthquake multimodal relief delivery was studied. A multi-period programming model for the fuzzy dynamic LRP was developed by considering the following characteristics: fuzzy demand of relief materials, time window constraints, dynamic rehabilitation of affected road networks, stochastic vehicle travel time, demand segmentation strategy employed for the node with great demand, multimodal relief delivery, and split deliveries. The goal was to minimize the total time in relief delivery. A hybrid heuristic algorithm was proposed to solve the model. Finally, the feasibility and validity of the proposed approaches were demonstrated by a numerical example.

Key words: earthquake disaster; emergency supplies; multimodal delivery; location-routing problem; dynamic decision making