第41卷第5期 辽宁工业大学学报(自然科学版) Vol.41, No.5
2021年10月 Journal of Liaoning University of Technology(Natural Science Edition) Oct. 2021

DOI:10.15916/j.issn1674-3261.2021.05.011

应急物资配送问题研究

王金英[1]，包立军[2]

（1.辽宁工业大学 理学院，辽宁 锦州 121001；2.锦州市公安局 网络安全保卫支队，辽宁 锦州 121001）

摘 要：研究了多受灾点的应急物资运送方案的优化问题。首先将各城市路径分布图进行简化，对各节点重新编号，采用 Floyd 算法求出各城市运送物资到达受灾地所需要的时间，建立了一个多目标应急物资配送模型并进行求解。其次，建立了基于双层规划方法的应急物资配送模型，采用动态优选策略求得全局满意应急方案。最后，为实现整体救灾目标，求得了近似最优解作为应急物资运送方案。

关键词：最短路径；Floyd 算法；资源竞争；动态优选策略

中图分类号：O221　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1674-3261(2021)05-0325-05

Research on Distribution of Emergency Materials

WANG Jin-ying[1], BAO Li-jun[2]

（1. College of Science, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China;

2. Network Security Detachment, Jinzhou Public Security Bureau, Jinzhou 121001, China）

Abstract: This paper studies the optimization of emergency supplies transportation scheme for multiple disaster areas. Firstly, the route distribution map of each city is simplified, and each node is renumbered. Floyd algorithm is employed to calculate the time required for each city to transport materials to the disaster-stricken area, a multi-objective emergency materials distribution model is established and solved. Secondly, the emergency material distribution model based on the bi-level programming method is established, and the dynamic optimization strategy is adopted to obtain the overall satisfactory emergency plan. Finally, in order to achieve the overall disaster relief goal, the approximate optimal solution is obtained as the emergency material transportation scheme.

Key words: shortest path; Floyd algorithm; resource competition; dynamic optimizing strategy

当今我国经济飞速发展，各类公共突发应急事件时有发生，使人类的生命和财产遭受严重损失。灾后初期受灾地区往往需要大规模的应急救援物资，为保证应急物资的配送时效，提高救援效率，有必要对应急物资配送方案的优化问题进行研究，这具有重要的理论和实际意义。

目前，对于应急物资配送方案问题的研究也较多，如文献[1]研究了物资需求约束条件下多出救点的紧急物资调度问题。文献[2]建立了一种双层决策方法的应急资源配置模型，确保配置过程兼顾公平性和及时性。文献[3]建立了随机混合整数规划模型，据此讨论了应急物资储备地点和仓库的库存水平。文献[4]构建了一个多目标优化模型，对应急物资配送车辆路径安排以及配送中心选址等问题进行决策。文献[5]建立了物资动态分配和配送中心选址的多目标规划模型，并设计了一种非支配排序的遗传算法进行求解。文献[6]构建了应急物资公平配送的多目标车辆路径优化模型，并用MATLAB进行求解。文献[7]建立了考虑受灾点需求时间窗的多目标应急物资车辆配送路径规划方案模型，并运用遗传算法求解。文献[8]引入公平理论，构建了关于效率和公平的双目标优化模型，并利用改进的遗传算

收稿日期：2021-03-04
基金项目：辽宁省教育厅高校科研基金(JJL201915403)
作者简介：王金英(1981-)，女，辽宁黑山人，副教授，硕士。

法实现物资配送优化。上述文献虽然成功地得到了应急物资配送的最优解，但大多局限于将单受灾点作为研究对象，当多地同时受灾，各受灾点资源需求存在竞争时，各单受灾点最优解的累加甚至不是可行方案。因此，本文针对多受灾点情形，在满足资源连续性的条件下，建立了多受灾点-多出救点的应急资源配置模型，并通过MATLAB求解。

1　问题的提出

某省份各个城市的分布情况如图 1 所示，图中的直线段代表连接各个城市的公路，直线段上的数值代表车辆通过这段路程所需要的时间。目前有 3 个地区突然发生自然灾害，各受灾地记为 A1、A2、A3，所需应急物资分别为 100、80、60 t/a；能够供应应急物资的城市为 C1，C2，…，C12，这些城市能供应的应急物资为 30、15、15、20、35、40、30、20、10、25、25、30 t/d。

问题一：若 C1，C2，…，C12 供应的应急物资成本是 2，4，5，3，1，6，2，3，6，1，5，5 万元/(t·h)，为保证受灾地 A1、A2、A3 每天需求的应急物资，请帮助设计一份经济快捷的运送方案。

问题二：若每小时消耗应急物资 5 t，为灾害爆发后应急物资能尽快运送至 A1、A2、A3 三地并保证连续供应，请帮助设计一份救灾第一天的运送方案。

问题三：若希望应急物资能够在灾害发生后 5 h 之内送达且保证连续供应，请修改问题二的运送方案。

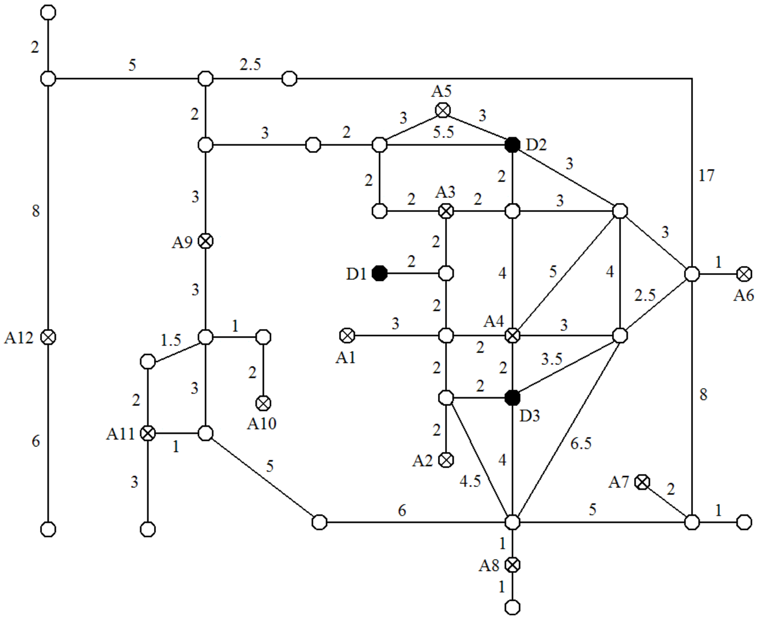


图 1　某省份各城市的分布图

2　基本假设与符号说明

2.1　基本假设

假设 1：运输过程中没有突发事件发生，保证耗时为图中标记量。

假设 2：应急物资在运输过程中损坏率为零。

假设 3：所有装卸时间及费用忽略不计。

假设 4：配送车辆能够容纳各城市提供的应急物资。

2.2　符号说明

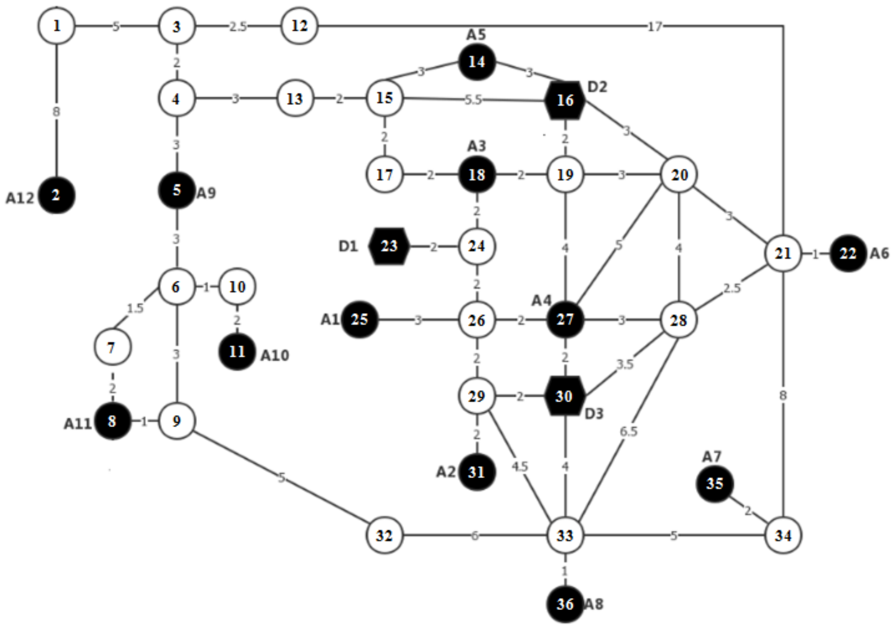
F：运送方案的总代价；T：运送过程的时间代价；W：运送物资的成本代价；p：时间代价对应的权重；q：成本代价对应的权重；x_{ij}：城市 Cj 实际供给受灾地 Ai 的应急物资量；t_{ij}：城市 Cj 到受灾地 Ai 所需的时间；w_j：城市 Cj 运送应急物资的成本；y_i：受灾地 Ai 的应急物资需求量；s_i：受灾地 Ai 的应急开始时间；f_i：受灾地 Ai 的应急结束时间；x_j：城市 Cj 可提供的应急物资量；v：应急物资的消耗速率。

3　模型的建立与求解

3.1　问题一的建模与求解

将各城市的分布图(图 1)简化，去掉图中无效的节点和路径，对简化后的路径图各节点重新编号(图 2)，以便下一步求解各城市到达受灾地区的时间。

接下来，求各城市运送应急物资到达受灾地的时间，即求各城市对应的节点到受灾地对应的节点之间的最短路径。本文采用 Floyd 算法[9-10]进行求解，结果整理后如表 1 所示。



⬢ 表示突发自然灾害的受灾地区；●表示提供应急物资的城市；○表示路径的节点

图 2　重新编号后的路径图

表 1　各城市到达受灾地的时间

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
A1	7	8	4	6	11	12.5	17.5	11.5	16	22	22.5	28
A2	11	12	4	6	3	7	16	13	13.5	19.5	20	25.5
A3	7	4	8	2	11	7	11	5	20	21	16	32

采用矩阵形式表示任意全局方案为：

$$\varphi=\begin{bmatrix}\varphi_1\\ \varphi_2\\ \varphi_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1,12}\\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2,12}\\ x_{31} & x_{32} & \cdots & x_{3,12}\end{bmatrix}$$

其中，第 i 行是受灾地 Ai 的局部应急方案，若 $x_{ij}\neq 0$，代表出救点 Cj 参与 Ai 的救援，$i=1,2,3$；第 j 列表示 Cj 向 Ai 提供应急物资，如果此列全为 0，代表 Cj 未参与救援，$j=1,2,\cdots,12$。

运送方案总代价为：

$$F(\varphi)=pT(\varphi)+qW(\varphi)=$$
$$p\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{12}(x_{ij}\cdot t_{ij})+q\sum_{j=1}^{12}\left(w_j\cdot\sum_{i=1}^{3}(x_{ij}\cdot t_{ij})\right)\quad(p+q=1)$$

约束条件为：

$$\sum_{j=1}^{12}x_{ij}=y_i\quad(i=1,2,3)$$
$$\sum_{i=1}^{3}x_{ij}\leqslant x_j\quad(j=1,2,\cdots,12)$$

在发生自然灾害后，要想获得一份经济快速的应急物资运送方案，既要考虑时间代价又要考虑成本代价，需要在时间和成本之间寻求一种平衡，这里选择时间权重与成本权重相等的情形。对模型应用 MATLAB 编程求解，将所得结果进行整理，得到如表 2 所示的运送方案，运送方案总代价 $F(x)=3\ 776.25$。

表 2　各城市到受灾地的运送方案（$p=q=0.5$）

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
A1	30	0	15	20	5	0	5	0	0	25	0	0
A2	0	0	0	0	30	40	0	0	10	0	0	0
A3	0	15	0	0	0	0	25	20	0	0	0	0

由表 1 可知，C12 运送应急物资到达 A1、A2、A3 所需时间分别为 28、25.5、32 h（均超 24 h），即 C12 提供应急物资不能于当日送达受灾地，而其余 11 个城市都可在当天内将应急物资送达到受灾地。因 C12 提供物资不能于当日到达，C12 所提供物资将计入次日提供物资量。由于灾害发生后第一天内无法接收到 C12 的物资，因此，第一天需要单独考虑，于是计算第一天的分配方案时，需除去 C12 对应的 3 个变量。再根据表 2 可知，运送方案中 C12 未参与救援，因此，除去 C12 对应的 3 个变量后，运送方案保持不变，即问题一的应急方案为：

$$\varphi=\begin{bmatrix}\varphi_1\\ \varphi_2\\ \varphi_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}30&0&15&20&5&0&5&0&0&25&0&0\\ 0&0&0&0&30&40&0&0&10&0&0&0\\ 0&15&0&0&0&0&25&20&0&0&0&0\end{bmatrix}$$

3.2 问题二的建模与求解

本节针对应急物资的连续消耗进行研究。基于此，下面给出运送方案φ对于应急开始时间连续可行的相关定义[1-2]。

定义 1　如果对 $\forall t\in[s_i, s_i+y_i/v]$，有 $\sum_{k\in\{j|t_{ij}\leqslant t, j=1,2,\cdots,12\}} x_{ik}\geqslant(t-s_i)v$，则称受灾地A$i$的运送方案$\varphi_i$对于应急开始时间$s_i$连续可行。

这里，$\sum_{k\in\{j|t_{ij}\leqslant t, j=1,2,\cdots,12\}} x_{ik}$ 表示受灾地Ai在应急过程中任一时刻t已经到达的物资量，$(t-s_i)v$表示到t时刻的物资消耗。

定义 2　设 Ai 对于s_i的连续可行方案φ_i的全体为X_{S_i}，若$\forall\varphi_i\in X_{S_i}$，有$X_{S_i}\neq\Phi$，$\sum_{i=1}^{3}x_{ij}\leqslant x_j$，称全局方案$\varphi$对于所有受灾地连续可行。

时间向量$T_i=(t_{i1},t_{i2},\cdots,t_{i,12})$中的元素从小到大进行排列，得到$t_{ij}^{1\forall}\leqslant t_{ij}^{2\forall}\leqslant\cdots\leqslant t_{ij}^{12\forall}$，这里上标代表排序号，$j^{\forall}$代表元素原始下标。相应地，各出救点C$j$到A$i$由近至远依次为$A_j^{1\forall},A_j^{2\forall},\cdots,A_j^{12\forall}$；可提供应急物资量依次为$x_j^{1\forall},x_j^{2\forall},\cdots,x_j^{12\forall}$；实际提供应急物资量依次为$x_{ij}^{1\forall}\leqslant x_{ij}^{2\forall}\leqslant\cdots\leqslant x_{ij}^{12\forall}$。为表述方便，下文将在不产生歧义的情况下省略$j^{\forall}$。

设连续可行方案φ的全体为X_s，此时多出救点-多受灾点运送方案的目标函数为：

$$\min_{X_s\neq\Phi, X_{s_i}\neq\Phi} Z(\varphi)=\sum_{i=1}^{3}(s_i^*-s_i')$$

$$\min_{\varphi_i\in\varphi} s_i(\varphi_i)=\max_{h\in\{l|x_{ij}^l\neq 0, l=1,2,\cdots,p_i\}}\left(t_i^h-\sum_{j\in\{j|t_{ij}^k<t_i^h, k=1,2,\cdots,p_i\}}x_{ij}/v\right)$$

约束条件为：

$$s_i^*-s_i'\geqslant 0,\quad \sum_{k=0}^{p_i-1}x_{ij}^{k\forall}<y_i\leqslant\sum_{k=0}^{p_i}x_{ij}^{k\forall},$$

$$\sum_{j=1}^{12}x_{ij}=y_i,\quad \sum_{i=1}^{3}x_{ij}\leqslant x_j\quad(i=1,2,3;\ j=1,2,\cdots,12)$$

这里，s_i^*表示全局满意情形下Ai的应急最早开始时间，s_i'表示Ai的独立应急最早开始时间，φ_i表示独立最优应急运送方案。

由表 1 知运送应急物资最快到达 A1 的城市为 C3，用时 4 h。为保证应急物资连续供应，运送物资到达 A1 的最晚时间t应满足$t<4+100/5=24$，因此 C1～C11 均符合条件。要想应急物资尽快运送至受灾地，由表 1 知排序靠前的 5 个城市 C3、C4、C1、C2、C5 提供的物资量能够满足要求且保证连续供应。通过求解，得 A1 的独立最优解：$s_1'=4$，$\varphi_1'=(30,15,15,20,20,0,0,0,0,0,0,0)$。同理，求得 A2 和 A3 的独立最优解：$s_2'=3$，$\varphi_2'=(0,0,15,20,35,10,0,0,0,0,0,0)$；$s_3'=2$，$\varphi_3'=(5,15,0,20,0,0,0,20,0,0,0,0)$。

观察上述方案，发现各出救点之间存在资源竞争，所以，A1、A2、A3 3 地的独立最优解累加是不可行的。动态优选策略的核心思想是在得到各受灾点独立最优应急方案(具体算法见文献[1])的情况下，检测存在竞争的出救点及竞争资源量，从未被利用的资源中找到可以满足各受灾点应急最早开始时间延长量之和最小，且费用最少的调整方案。通过动态优选策略(具体算法见文献[2])，对上述方案进行调整，得到全局满意应急方案：

$$s_1^*=4,\quad s_2^*=3,\quad s_3^*=11$$

$$\varphi=\begin{bmatrix}\varphi_1\\ \varphi_2\\ \varphi_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}30&15&15&20&0&0&0&20&0&0&0&0\\ 0&0&0&0&35&40&0&0&5&0&0&0\\ 0&0&0&0&0&0&30&0&5&0&25&0\end{bmatrix}$$

3.3 问题三的建模与求解

由于设计第一天的运送方案时，C12 不参与救援，所以第一天所有出救点能提供的物资量总计为$x_1+x_2+\cdots+x_{11}=265$。又由于 A1、A2、A3 每天的应急物资需求量总计为240，因此，救灾第一天应急物资的供应量剩余$265-240=25$。为保证应急物资连续供应，通过分析知，应急开始时间应尽量晚一些且在 5 h 内。在灾害发生后 5 h 内，A1、A2、A3 接收到应急物资的最晚时间分别为 4、4、5，物资需要持续供应的时间分别为 20、16、12。根据出救点到达 A1、A2、A3 的时间排序可知：(1)C11 最多向 A1 提供应急物资$v*(s_1^*+20-t_{1,11})=7.5$；C10 最多向 A1 提供应急物资$v*(t_{1,11}-t_{1,10})=2.5$。(2)C11 无法满足应急物资的持续供应，不适合参与 A2 的救援，原因为$s_2^*+16=20$，$t_{1,11}\geqslant 20$；C10 最多向 A2 提供应急物资$v*(s_2^*+16-t_{1,10})=2.5$。

(3) C11 最多向 A3 提供应急物资 $v*(s_3^*+12-t_{1,11})=5$；C9 和 C10 无法满足应急物资的持续供应，不适合参与 A3 的救援，原因为 $s_3^*+12=17$，$t_{39}>17$，$t_{3,10}>17$，但 C9 参与 A1、A2 的应急救援是可行的。综上所述，C10 最多向 A1、A2 提供应急物资 2.5+2.5=5，C11 最多向 A1、A3 提供应急物资 7.5+5=12.5，因此 C10、C11 应急物资供应量至少剩余 $(x_{10}-5)+(x_{11}-12.5)=32.5$。由于 32.5 远远大于第一天应急物资的供应剩余量 25，因此不存在可行的应急方案。

为更好地对受灾点进行救援，实现整体救灾目标，设计了一种近似最优解。将 C3 向 A1 提供物资的发货时间延迟 0.5 h，C5 向 A2 提供物资的发货时间延迟 2 h，通过求解，得到全局满意应急方案：

$$s_1^*=4.5,\quad s_2^*=5,\quad s_3^*=5$$

$$\varphi=\begin{bmatrix}\varphi_1\\ \varphi_2\\ \varphi_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}30 & 15 & 15 & 20 & 0 & 0 & 2.5 & 0 & 5 & 2.5 & 10 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 35 & 30 & 2.5 & 0 & 5 & 2.5 & 5 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 25 & 20 & 0 & 0 & 5 & 0\end{bmatrix}$$

该方案保证了应急物资在灾害爆发后 5 h 内送达且连续供应，不足之处是受灾地 A1 的应急结束时间为 $f_1=4.5+20=24.5$，这样应急结束时间超过当日 0.5 h。

4 结束语

首先根据权重 p、q 的不同取值情况，设计了各城市提供应急物资运送到各受灾地的 3 种方案，可以依据具体的实际情况选择参数 p、q 的值，从而得到经济快速的应急物资运送方案。其次考虑了“时间最短、持续供应”的条件，求得了符合要求的近似最优解。最后为实现整体救灾目标，设计了一种应急物资运送方案。本文的这类问题有很强的应用背景，广泛适合于大型火灾、危险化学品泄漏、电力系统故障、网络系统瘫痪等灾害的应急。

参考文献：

[1] 刘春林, 施建军, 何建敏. 一类应急物资调度的优化模型研究[J]. 中国管理科学, 2001, 9(3): 29−36.

[2] 王苏生, 王岩. 基于公平优先原则的多受灾点应急资源配置算法[J]. 运筹与管理, 2008, 17(3): 16−21.

[3] 王亮, 邱玉琢. 两级应急物资储备协同预先配置优化决策研究[J]. 软科学, 2015, 29(12): 117−120.

[4] 陈刚, 付江月. 基于NSGAII的应急物流多目标LRP研究[J]. 软科学, 2016, 30(4): 135−139.

[5] 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.

[6] 张杏雯. 模糊条件下应急物资公平配送多目标优化模型[J]. 物流科技, 2019, 42(5): 20−24.

[7] 吕伟, 李志红, 马亚萍, 等. 考虑受灾点需求时间窗的应急物资配送车辆路径规划研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(3): 5−11.

[8] 张杏雯, 倪静. 公平约束下的应急物资配送模型及算法[J]. 统计与决策, 2020, 36(7): 179−182.

[9] 陈华友, 周礼刚, 刘金培. 数学模型与数学建模[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

[10] 王翼. MATLAB基础及在运筹学中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

责任编辑：孙 林