第32卷 第11期 控 制 与 决 策 Vol.32 No.11
2017年 11月 Control and Decision Nov. 2017

文章编号: 1001-0920(2017)11-2056-07 DOI: 10.13195/j.kzyjc.2016.0959

最小化救灾物资运输重量的决策方法

石 群, 杨镇铭, 杨 文, 赵千川†

(清华大学 自动化系，北京 100084)

摘 要: 在救灾物资供给灾民人数最大化的前提下,提出最小化运输重量的决策方法. 首先给出救灾物资替换关系和搭配关系的定义,并对救灾物资运输问题进行形式化描述;然后建立两阶段整数规划模型,并研究分解为子问题的方法;最后考虑救灾物资的数量存在不确定关系,分两种情况进行仿真实验. 结果表明,通过描述救灾物资的结构,可以改善救灾效果,提高救灾物资运输效率.

关键词: 替换关系；搭配关系；救灾物资结构；整数规划

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Decision method of minimizing shipping mass of relief materials

SHI Qun, YANG Zhen-ming, YANG Wen, ZHAO Qian-chuan†

(Department of Automation，Tsinghua University，Beijing 100084，China)

Abstract: Relief materials are transported to the disaster areas after natural disasters. This paper studies the decision method of minimizing the shipping mass of relief materials under the premise condition of maximizing the number of victims supplied by relief materials. This paper gives the definitions of the substitution and collocation among relief materials, and presents a problem about minimizing the shipping mass of relief materials with formulation. Then, the paper establishes a two-stage integer programming model and studies the method to decompose the original problem into smaller sub-problems. Considering the uncertain quantities of relief materials, this paper designs simulation experiments in two different conditions. The simulation results show that the relief effects and efficiency are improved by describing relief materials structure.

Keywords: substitution；collocation；relief materials structure；integer programming

0 引 言

目前在许多自然灾害还难以准确预测的情况下,由于灾害的突发关系和破坏关系,往往给人民的生命和财产带来巨大损失. 以组织运输救灾物资为主要对象的应急物流研究日益引起国内外学者的重视,近年来得到了快速发展.

“应急物流”等相关概念由欧忠文等[1] 首先提出. 祁明亮等[2] 针对应急实际需求,对应急管理决策的辅助模型进行了综述;姚杰等[3] 探讨了如何利用博弈模型生成应急预案;张旭凤[4] 分析了应急物资分类体系;张永领[5] 将突发事件应急资源需求结构划分了层次; Aakil 等[6] 对应急物流领域的优化模型进行了综述.

关于应急救灾物资配送和调度问题,许多学者做出重要工作. 应急物流问题非常复杂,涉及多目标、多约束、动态关系、不确定关系、关联耦合等因素. 现有应急物流的模型多以运输物资的总量(如总费用或总重量)为优化目标,以运达时间或运输里程等满意度指标为约束.

刘春林等[7] 考虑时间紧迫关系等因素,建立了应急时间最早、出救点数目最少的多目标数学模型,采用模糊优化方法求解. 缪成等[8] 分析自然灾害救灾物资运输与商业运输的不同特点,研究了多货物、多起止点网络流问题与多种运输方式满载车辆调度问题. 王旭坪等[9] 考虑人的有限理性关系,将量化后的时间满意度、需求满意度和效用满意度作为模型的目标函数,构建非线关系整数规划模型,描述大规模突发事件的应急物资分配问题. Sheu 等[10] 研究了大规模自然灾害的应急物资快速响应问题. 刘北林等[11] 考虑应急物资调度过程中时间的紧迫关系和

收稿日期: 2016-07-26；**修回日期:** 2016-10-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61425027).

作者简介: 石群 (1983−), 男, 博士生, 从事物流系统优化与控制的研究；赵千川 (1969−), 男, 教授, 博士生导师, 从事网络化动态系统性能优化与安全控制等研究.

†通讯作者. E-mail: zhaoqc@tsinghua.edu.cn

运作的经济关系,建立了时间最短、成本最小多目标数学模型,采用理想点法求解. 刘春林等[12] 讨论多出救点的紧急物资调度问题,给出了在应急时间最早前提下出救点数目最少的模型并求解. Han 等[13] 研究了大规模应急物资供应点选择及运输路径规划问题. Alfredo 等[14] 采用启发式算法求解多阶段、多出救点的应急物资运输问题. 潘郁等[15] 以连续关系消耗应急过程为背景,采用粒子群算法求解多目标应急资源调度问题. 孙颖等[16] 对地震、瘟疫、恐怖袭击等灾害发生的特点与调运应急资源的机理进行分析,建立了非线关系混合整数规划模型. 戴更新等[17] 给出了多资源应急问题的数学模型,采用单资源问题的成果求解. Marius[18], Potvin 等[19], Eric Taillard 等[20] 考虑了时间窗约束条件下的应急救灾物资运输车辆路径规划问题. 何建敏等[21] 对应急调度问题中的时间紧迫关系和应急出救点数目两个指标进行折衷,运用模糊优化方法求解限制期下的多出救点组合模型.

针对突发事件的动态关系和不确定关系,也有相应的研究. 计国君等[22] 考虑灾情发展状况引起灾民对救灾物资需求情况的变化,研究了救灾物资调度方案. 灾民对应急救灾物资的需求具有模糊关系和不确定关系. Ali 等[23] 考虑应急救灾物流的不确定关系,采用改进粒子群算法求解救灾物资调度问题. 王兰英等[24] 引入直觉模糊集,提高了应急物资需求预测精度. 樊治平等[25] 针对突发事件提出了基于前景理论的应急响应风险决策方法. 傅克俊等[26] 分析供应链系统中风险的类型,提出了构建以"弹性关系策略"和"鲁棒关系策略"为核心的供应链系统应急策略体系,建立了供应链系统应急策略模型. 赵千川等[27] 运用动态规划思想,提出了一种柔性库存优化控制策略. 寇纲等[28] 指出应急环境下的信息具有不确定关系、模糊关系,运用单一方法难做决策,于是,集成模糊理论、灰色系统理论和多目标决策理论,提出了改进模糊多目标应急决策方法. 吴启迪等[29] 详细分析动态博弈框架下应急管理中应急决策者与突发事件之间的序贯博弈过程,形成了资源调度最优方案.

现有的应急物流辅助决策模型对物资需求的关联耦合考虑较少,这导致针对运输总量的优化在一定程度上造成原本就非常有限的运输能力的浪费. 本文将从对救灾物资的替换关系和搭配关系分析入手,通过定义同时考虑救灾人数和运输重量的两阶段优化模型,改进应急物流辅助决策模型的效果. 仿真实验结果表明了本文方法的有效性.

1　问题描述

自然灾害发生后,需要紧急向灾区运输多种救灾物资. 然而,灾区交通状况通常会遭到破坏,交通工具无法短期批量到达灾区,导致运输救灾物资的重量有限. 考虑到救灾物资需求之间的关联耦合关系,本文提出两阶段优化问题: 首先第1阶段对筹集到的救灾物资,最大化供给灾民人数; 然后第2阶段在最大化供给灾民人数的结果下,最小化救灾物资的运输总重量.

为便于描述问题,列出若干定义及符号说明如下.

定义1　从运输的角度,将筹集到的救灾物资的最小单元称为运输单元,用 X_i 表示, $i = 1, 2, \cdots, m$.

定义2　从满足灾民需求的角度,将运达灾区后向灾民发放的救灾物资的最小单元称为使用单元,用 Y_j 表示, $j = 1, 2, \cdots, n$. 将单个灾民需要 Y_j 的数量记作 y_{0j}.

运输单元是组成使用单元的最小单元. 从组成使用单元的角度,将运输单元之间的关联耦合关系分为替换关系和搭配关系两类.

定义3　每个使用单元 Y_j 由按一定数量比例同时取用的若干使用元素组成,使用元素记作 $Z_k^j, k = 1, 2, \cdots, l_j$. 这种数量比例关系称为搭配关系,用"&"表示. 将组成单个使用单元 Y_j 所需的使用元素 Z_k^j 的数量记作 z_{0k}^j.

定义4　每种使用元素 Z_k^j 可以从若干种运输单元的集合 $X(Z_k^j)$ 中随意取用其中一种,即满足替换关系,用"$\|$"表示. 将构成单个使用元素 Z_k^j 的可选运输单元 X_i 的数量记作 $x_{0i}(Z_k^j)$.

以图1为例,说明本文考虑的关联耦合关系.

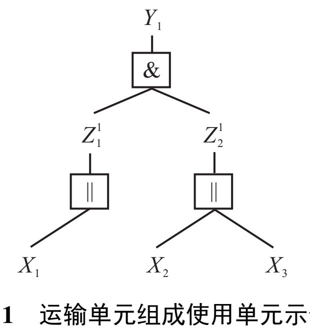

图 1　运输单元组成使用单元示例

如图1所示,使用单元 Y_1 由两个搭配使用元素 Z_1^1 和 Z_2^1 组成,记作 $Y_1 = \&(Z_1^1, Z_2^1)$. 使用单元 Z_1^1 由一种运输单元 X_1 构成,使用单元 Z_2^1 由具有替换关系的运输单元 X_2 和 X_3 构成,记作 $Z_1^1 = X_1, Z_2^1 = \|(X_2, X_3)$. 如果将图1中的大写字母替换成对应的小写字母,也可直观地表示救灾物资组成之间的数量关系.

本文用 $X(Y_j)$ 表示使用单元 Y_j 组成结构中包

含的所有运输单元种类的集合. 显然, $X(Y_j) = \bigcup_{k=1,2,\cdots,l_j} X(Z_k^j)$.

关于救灾物资,本文约定使用单元的组成结构满足以下假设:

假设1 在不同的使用单元中,不允许存在同种运输单元,即 $X(Y_j)\bigcap X(Y_{j'}) = \varnothing$. 全部运输单元 $X = \bigcup_{j=1,\cdots,n} X(Y_j)$.

下面建立救灾物资运输两阶段优化问题的数学模型.

第1阶段优化问题的决策变量是救灾物资可以供给的灾民人数 $h(h\in \boldsymbol{Z})$ 和构成使用元素所需的运输单元的数量 $x_i(Z_k^j)(x_i(Z_k^j)\in \boldsymbol{Z})$,其中

$$x_i(Z_k^j),\ k=1,2,\cdots,l_j,$$
$$j=1,2,\cdots,n,\ i=1,2,\cdots,m.$$

则各种运输单元 X_i 的数量 x_i 满足

$$x_i=\sum_{k=1}^{l_i} x_i(Z_k^j),\ j=1,2,\cdots,n,\ i=1,2,\cdots,m. \tag{1}$$

同时 x_i 需要满足以下约束:

$$0\leqslant x_i\leqslant \hat{x}_i,\ i=1,2,\cdots,m. \tag{2}$$

其中 $\hat{x}_i$ 表示筹集到的各种运输单元 X_i 的数量.

目标函数为

$$\max\ h. \tag{3}$$

当各种使用单元 $Y_j(j=1,2,\cdots,n)$ 的供给灾民人数均等于 h 时,救灾物资可以供给的灾民人数为 h,其计算公式为

$$h=\Big\lfloor\frac{y_j}{y_{0j}}\Big\rfloor,\ j=1,2,\cdots,n. \tag{4}$$

其中 y_j 表示使用单元 Y_j 的数量,由

$$y_j=\Big\lfloor\frac{z_k^j}{z_{0k}^j}\Big\rfloor,\ k=1,2,\cdots,l_j,\ j=1,2,\cdots,n \tag{5}$$

确定. 式(5)中 z_k^j 表示组成使用单元 Y_j 所需的使用元素 Z_k^j 的数量,由

$$z_k^j=\sum_i\Big\lfloor\frac{x_i(Z_k^j)}{x_{0i}(Z_k^j)}\Big\rfloor,\ X_i\in X(Z_k^j) \tag{6}$$

确定. 式(6)中 $k=1,2,\cdots,l_j$, $j=1,2,\cdots,n$.

第1阶段优化问题的约束条件整理如下.

将式(1)代入(2),得

$$0\leqslant\sum_{k=1}^{l_j}x_i(Z_k^j)\leqslant\hat{x}_i. \tag{7}$$

其中: $j=1,2,\cdots,n$, $i=1,2,\cdots,m$. 式(7)是不等式约束.

此外,还有不等式约束

$$h\geqslant 0. \tag{8}$$

将式(6)代入(5),再将式(5)代入(4),可得

$$h=\left\lfloor\frac{\sum_i\Big\lfloor\dfrac{x_i(Z_k^j)}{x_{0i}(Z_k^j)}\Big\rfloor}{(z_{0k}^j y_{0j})}\right\rfloor,\ X_i\in X(Z_k^j). \tag{9}$$

其中: $k=1,2,\cdots,l_j$, $j=1,2,\cdots,n$. 式(9)是等式约束.

求解第1阶段优化问题,将目标函数值,即全部救灾物资使用单元的供给灾民人数记作 h^*.

第2阶段优化问题是在全部救灾物资供给灾民人数为 h^* 的条件下,最小化运输救灾物资的总重量.

第2阶段优化问题的决策变量是构成使用元素所需的运输单元的数量 $x_i(Z_k^j)$, $x_i(Z_k^j)\in\boldsymbol{Z}$,有

$$x_i(Z_k^j),\ k=1,2,\cdots,l_j,$$
$$j=1,2,\cdots,n,\ i=1,2,\cdots,m.$$

目标函数为

$$\min\ \sum_{j=1}^{n}\sum_i\Big[\rho_i\sum_{k=1}^{l_j}x_i(Z_k^j)\Big]. \tag{10}$$

其中: ρ_i 表示运输单元 X_i 的密度, $X_i\in X(Z_k^j)$.

将 $h=h^*$ 代入式(9),得

$$h^*=\left\lfloor\frac{\sum_i\Big\lfloor\dfrac{x_i(Z_k^j)}{x_{0i}(Z_k^j)}\Big\rfloor}{(z_{0k}^j y_{0j})}\right\rfloor,\ X_i\in X(Z_k^j). \tag{11}$$

其中: $k=1,2,\cdots,l_j$, $j=1,2,\cdots,n$. 式(11)是等式约束. 式(10)中 $x_i(Z_k^j)$ 满足式(7)、(11).

自然灾害发生后,可筹集到的救灾物资的数量通常具有不确定性. 这里,假设筹集到的各种运输单元 X_i 的数量范围已知,即 $\hat{x}_i\in[\hat{x}_i^-,\hat{x}_i^+]$. 显然,每种运输单元的数量越多,筹集到的全部运输单元的供给灾民人数越多.

将两个阶段模型的约束(7)中各运输单元 X_i 的数量取区间下界即 $\hat{x}_i=\hat{x}_i^-(i=1,2,\cdots,m)$ 时的求解结果称为保守型决策;各运输单元 X_i 的数量取区间上界即 $\hat{x}_i=\hat{x}_i^+(i=1,2,\cdots,m)$ 时的求解结果称为乐观型决策.

2 求解方法

第2节建立了救灾物资运输两阶段优化问题的数学模型,分别采用整数规划法求解.

第1阶段整数规划问题 P_1 以式(3)为目标函数,以 $h, x_i(Z_k^j)(j=1,2,\cdots,n)$ 为决策变量,以式

(7)～(9)为约束条件.

第2阶段整数规划问题P_2以式(10)为目标函数, 以$x_i(Z_k^j)(j=1,2,\cdots,n)$为决策变量, 以式(7)、(11)为约束条件.

整数规划的求解时间复杂度随着问题模型规模的增大而迅速增大. 为此, 下面研究将上述两阶段整数规划问题分解为若干个小规模的整数规划子问题的方法. 实际救灾物资容易满足假设1, 组成不同使用单元的运输单元的种类是不同的, 即$X(Y_j)\bigcap X(Y_{j'})=\varnothing$, $X=\bigcup\limits_{j=1,\cdots,n}X(Y_j)$.

对于第1阶段整数规划问题P_1, 根据式(3)、(9), 可得

$$\min\ (\max\ h_j); \tag{12}$$

$$h_j=\left\lfloor\sum_i\frac{\left\lfloor\dfrac{x_i(Z_k^j)}{x_{0i}(Z_k^j)}\right\rfloor}{(z_{0k}^jy_{0j})}\right\rfloor,\ X_i\in X(Z_k^j). \tag{13}$$

其中: $k=1,2,\cdots,l_j$, $j=1,2,\cdots,n$. j在$1,2,\cdots,n$中任取不同的值, 式(13)中的X_i不同, 即可分别求解h_j的最大值; 再将此n个最大值取最小值, 即为全部救灾物资的最大供给灾民人数.

将第1阶段整数规划问题P_1分解为n个整数规划子问题$P_{1j}, j=1,2,\cdots,n$.

P_{1j}的决策变量是使用单元Y_j可以供给的灾民人数$h_j(h_j\in\boldsymbol{Z})$和组成使用单元$Y_j$所需运输单元的数量$x_i(Z_k^j)$, $x_i(Z_k^j)\in\boldsymbol{Z}$, 有

$$x_i(Z_k^j),\ k=1,2,\cdots,l_j,\ X_i\in X(Z_k^j).$$

目标函数为

$$\max\ h_j. \tag{14}$$

约束条件为

$$0\leqslant\sum_{k=1}^{l_j}x_i(Z_k^j)\leqslant\hat{x}_i; \tag{15}$$

$$h_j\geqslant 0; \tag{16}$$

$$h_j=\left\lfloor\sum_i\frac{\left\lfloor\dfrac{x_i(Z_k^j)}{x_{0i}(Z_k^j)}\right\rfloor}{(z_{0k}^jy_{0j})}\right\rfloor,\ X_i\in X(Z_k^j); \tag{17}$$

其中$k=1,2,\cdots,l_j$.

分别求解n个整数规划子问题P_{1j}, 得到Y_j的最大供给灾民人数h_j^*, $j=1,2,\cdots,n$, 第1阶段整数规划问题P_1的解$h^*=\min\ h_j^*$, $j=1,2,\cdots,n$.

将第2阶段整数规划问题P_2分解为n个整数规划子问题$P_{2j}, j=1,2,\cdots,n$.

P_{2j}的决策变量是组成使用单元Y_j所需运输单元的数量$x_i(Z_k^j)$, $x_i(Z_k^j)\in\boldsymbol{Z}$, 有

$$x_i(Z_k^j),\ k=1,2,\cdots,l_j,\ X_i\in X(Z_k^j).$$

目标函数为

$$\min\ \sum_i\left[\rho_i\sum_{k=1}^{l_j}x_i(Z_k^j)\right], \tag{18}$$

其中$X_i\in X(Z_k^j)$. 约束条件为

$$0\leqslant\sum_{k=1}^{l_j}x_i(Z_k^j)\leqslant\hat{x}_i; \tag{19}$$

$$h^*=\left\lfloor\sum_i\frac{\left\lfloor\dfrac{x_i(Z_k^j)}{x_{0i}(Z_k^j)}\right\rfloor}{(z_{0k}^jy_{0j})}\right\rfloor,\ X_i\in X(Z_k^j); \tag{20}$$

其中$k=1,2,\cdots,l_j$.

分别求解n个整数规划子问题P_{2j}, 得

$$x_i^*(Z_k^j),\ k=1,2,\cdots,l_j,$$
$$X_i\in X(Z_k^j),\ j=1,2,\cdots,n;$$
$$\sum_i\left[\rho_i\sum_{k=1}^{l_j}x_i^*(Z_k^j)\right],$$
$$X_i\in X(Z_k^j),\ j=1,2,\cdots,n.$$

各种运输单元X_i的数量$x_i^*=\sum\limits_{j=1}^{n}\sum\limits_{k=1}^{l_j}x_i^*(Z_k^j)$, 重量$w_i^*=\rho_ix_i^*$, $i=1,2,\cdots,m$. m种运输单元的总重量$w^*=\sum\limits_{i=1}^{m}w_i^*$.

整数规划子问题P_{1j}、P_{2j}仅涉及组成使用单元Y_j的运输单元$X(Y_j)$, 而且在实际救灾活动中组成单独某种使用单元Y_j所需运输单元的种类往往较少, 所以各个子问题P_{1j}、P_{2j}对应的整数规划模型的规模较小. 与分解前的整数规划问题P_1、P_2相比, 子问题P_{1j}、P_{2j}求解时间复杂度低很多.

3　仿真实验

Linet Özdamar[30] 研究了救灾物资运输问题, 并指出共计1 054 430 kg救灾物资需要采用直升机运输至地震灾区. 假定文献[30]中各种救灾物资运输单元的重量是能够筹集到的重量的最大值, 各种救灾物资运输单元信息如表1所示.

救灾物资运输单元具有替换关系、搭配关系和数量比例关系.

1) 救灾物资的替换关系:

i) 蚊帐可替换盘蚊香, 数量比为1: 3;

ii) 蚊帐可替换电蚊香, 数量比为1: 0.25;

表 1 救灾物资运输单元信息

序号	物资名称	密度	最小数量	最大数量
1	单帐篷	25	1 200	1 500
2	集体帐篷	45	360	500
3	盘蚊香	1.5	1 410	1 600
4	电蚊香	1.8	100	120
5	蚊帐	2	500	700
6	毛毯	2	400	400
7	毛巾被	3	1 500	1 500
8	饮用水	2	189 900	190 000
9	单衣	1	3 500	3 500
10	裤子	1.2	3 300	3 600
11	方便面	1.2	50 000	80 000
12	面包	1.8	100 000	110 000
13	蛋糕	2.5	66 000	86 800
14	蔬菜	1	32 000	36 104
15	大米	1	15 600	15 600
16	面粉	2	13 600	15 000
17	卫生纸	0.3	3 900	3 900
18	消毒剂	1.9	1 128	1 800

iii) 毛毯与毛巾被之间可双向替换,数量比为1:1;

iv) 方便面、面包与蛋糕之间可双向替换,数量比为100: 200: 200;

v) 大米与面粉之间可双向替换,数量比为15: 20.

2) 救灾物资的搭配关系:

i) 单帐篷和盘蚊香搭配,数量比为1: 3;

ii) 单帐篷和蚊帐搭配,数量比为1: 1;

iii) 集体帐篷和电蚊香搭配,数量比为0.25: 0.25;

iv) 集体帐篷和蚊帐搭配,数量比为0.25: 1;

v) 单衣和裤子搭配,数量比为2: 2.

计算环境如下.

软件: Matlab(2009B, 32 bit);

CPU: Intel(R) Core(TM) i3-3220, 3.30 GHz;

RAM: 4.00 GB(3.88 GB 可用).

最小化救灾物资运输重量决策问题, 对于保守情况, 直接求解原整数规划问题, 求解时间为603 097 s. 而将原整数规划问题分解为子问题, 求解时间为39 s. 对于乐观情况, 将问题分解为子问题, 求解时间62 s. 可见利用物资关联耦合关系的结构信息, 可有效降低求解复杂度.

求解最小化救灾物资运输重量决策问题, 得到保守、乐观类型的运输决策如表2所示.

保守型运输决策如图2所示. 横坐标为各种运输单元的名称. 由于运输单元重量较大, 采用以2为底的对数作为纵坐标展示. 保守型运输决策供给灾民1 128 人, 筹集救灾物资总重量为925 168.2 kg, 实际运输592 961.32 kg, 占比为64.09 %.

表 2 最小化救灾物资运输重量决策

序号	名称	保守运输重量 /kg	乐观运输重量 /kg
1	单帐篷	5 700	13 325
2	集体帐篷	10 125	13 275
3	盘蚊香	1 026	2 398.5
4	电蚊香	180	216
5	蚊帐	1 000	1 400
6	毛毯	800	800
7	毛巾被	2 184	3 939
8	饮用水	203 040	308 340
9	单衣	2 256	3 426
10	裤子	2 707.2	4 111.2
11	方便面	60 000	96 000
12	面包	180 000	198 000
13	蛋糕	64 000	181 500
14	蔬菜	22 560	34 260
15	大米	15 600	15 600
16	面粉	19 200	26 920
17	卫生纸	439.92	668.07
18	消毒剂	2 143.2	3 254.7

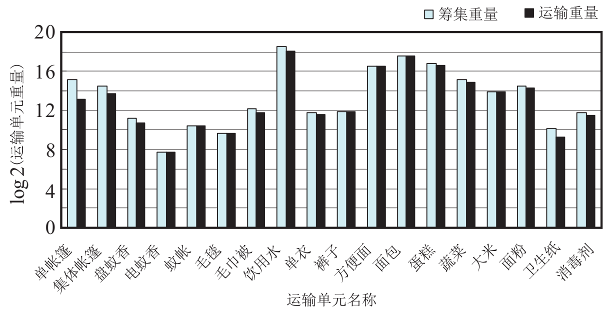

图 2 保守型运输决策

乐观型运输决策如图3所示. 横坐标为各种运输单元的名称. 由于运输单元重量较大, 采用以2为底的对数作为纵坐标展示. 乐观型运输决策供给灾民1 713 人, 筹集救灾物资总重量为1 054 430 kg, 实际运输907 433.47 kg, 占比为86.06%.

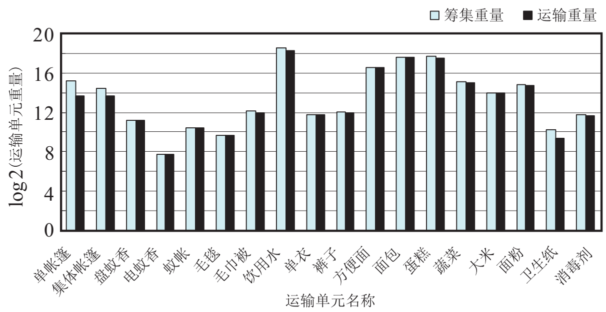

图 3 乐观型运输决策

4 结 论

本文调研了救灾物资运输问题的研究成果, 给出了救灾物资运输单元、使用单元的定义, 并描述了救灾物资替换关系和搭配关系. 在此基础上, 对一种救灾物资运输问题进行了形式化描述. 对于全部救灾

物资,以最大化供给灾民人数和最小化运输重量为先后两个阶段的优化目标,以运输单元、使用单元之间的替换关系和搭配关系为约束条件,建立了两阶段整数规划数学模型,并研究了将原整数规划问题分解为若干易解的子问题的方法. 然后,本文针对一个直升机运输救灾物资的问题,进行了仿真实验. 结果表明,考虑救灾物资之间的替换关系和搭配关系,可以最大化救灾物资供给人数,并最小化运输总重量,救灾更有效. 将原整数规划问题分解为若干子问题,求解时间复杂度更低.

本文的创新点和特点如下:

1) 以灾民实际需求为依据,定义救灾物资替换关系和搭配关系的描述方法和定量计算方法.

2) 突出应急救灾活动的首要目标,即有限的救灾物资能够供给最多人数的灾民,并在此基础上,以最小化救灾物资运输重量为第2目标,求解每种救灾物资的运输重量.

3) 考虑筹集到救灾物资的数量通常是一个区间,即救灾物资数量存在不确定关系. 假设救灾物资运输能力充足,但由于以最小化救灾物资运输重量为优化目标,实际上也相当于考虑了救灾物资运输能力的节约或最小化.

不足之处和后续拟研究工作如下:

1) 自然灾害发生后,短时间内可能无法获取“灾民对救灾物资需求量的准确预测信息”,导致模型求解与实际灾民需求可能存在一定误差.

2) 研究互联网、物联网等信息技术,应用于应急救灾领域,将发挥巨大作用.

3) 确定各种救灾物资运输重量后,应考虑运输过程实际条件,例如路况恶化、二次灾害等因素的影响.

参考文献(References)

[1] 欧忠文, 王会云, 姜大立, 等. 应急物流[J]. 重庆大学学报, 2004, 27(3): 164-167.
(Ou Z W, Wang H Y, Jiang D L, et al. Emergency logistics[J]. J of Chongqing University: Natural Science Edition, 2004, 27(3): 164-167.)

[2] 祁明亮, 池宏, 赵红, 等. 突发公共事件应急管理研究现状与展望[J]. 管理评论, 2006, 18(4): 35-45.
(Qi M L, Chi H, Zhao H, et al. Research and prospect of public accident emergency management[J]. Management Review, 2006, 18(4): 35-45.)

[3] 姚杰, 计雷, 池宏. 突发事件应急管理中的动态博弈分析[J]. 管理评论, 2005, 17(3): 46-50.
(Yao J, Ji L, Chi H. Dynamic game analysis in emergency management[J]. Management Review, 2005, 17(3): 46-50.)

[4] 张旭凤. 应急物资分类体系及采购战略分析[J]. 中国市场, 2007(32): 110-111.
(Zhang X F. Analysis of classify system for contigency materials and purchase strategy[J]. China Market, 2007(32): 110-111.)

[5] 张永领. 突发事件应急资源的需求结构研究[J]. 灾害学, 2010, 25(4): 127-132.
(Zhang Y L. Research of demand structure of emergency resource[J]. J of Catastrophology, 2010, 25(4): 127-132.)

[6] Aakil M Caunhye, Nie Xiaofeng, Shaligram Pokharel. Optimization models in emergency logistics: A literature review[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2012, 46(1): 4-13.

[7] 刘春林, 沈厚才. 一类离散应急供应系统的两目标优化模型[J]. 中国管理科学, 2003, 11(4): 27-31.
(Liu C L, Shen H C. Two-objective optimization model for discrete emergent supply system[J]. Chinese J of Management Science, 2003, 11(4): 27-31.)

[8] 缪成, 许维胜, 吴启迪. 大规模应急救援物资运输模型的构建与求解[J]. 系统工程, 2006, 24(11): 6-12.
(Miao C, Xu W S, Wu Q D. A transportation modal and solution of large-scale emergency relief commodities[J]. Systems Engineering, 2006, 24(11): 6-12.)

[9] 王旭坪, 董莉, 陈明天. 考虑感知满意度的多受灾点应急资源分配模型[J]. 系统管理学报, 2013, 22(2): 251-256.
(Wang X P, Dong L, Chen M T. Multiple-area post-disaster resource distribution model considering perception satisfaction[J]. J of Systems & Management, 2013, 22(2): 251-256.)

[10] Sheu Jiuh-Biing, Pan Cheng. Relief supply collaboration for emergency logistics responses to large-scale disasters[J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2015, 11(3): 210-242.

[11] 刘北林, 马婷. 应急救灾物资紧急调度问题研究[J]. 哈尔滨商业大学学报: 社会科学版, 2007(3): 3-5.
(Liu B L, Ma T. Research on the scheduling problem of emergency materials[J]. J of Harbin University of Commerce: Social Science, 2007(3): 3-5.)

[12] 刘春林, 何建敏, 施建军. 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.
(Liu C L, He J M, Shi J J. The study on optimal model for a kind of emergency material dispatch problem[J]. Chinese J of Management Science, 2001, 9(3): 29-36.)

[13] Han Yunjun, Guan Xiaohong, Shi Leyuan. Optimization based method for supply location selection and routing in large-scale emergency material delivery[J]. IEEE Trans on Automation Science and Engineering, 2011, 8(4): 683-693.

[14] Alfredo Moreno, Douglas Alem, Deisemara Ferreira. Heuristic approaches for the multiperiod location-transportation problem with reuse of vehicles in emergency logistics[J]. Computers & Operations Research, 2016, 69(C): 79-96.

[15] 潘郁, 余佳, 达庆利. 基于粒子群算法的连续关系

消耗应急资源调度[J]. 系统工程学报, 2007, 22(5): 556-560.
(Pan Y, Yu J, Da Q L. Emergency resources scheduling on continuous consumption system based on particle swarm optimization[J]. J of Systems Engineering, 2007, 22(5): 556-560.)

[16] 孙颖, 池宏, 贾传亮. 多路径下应急资源调度的非线性关系混合整数规划模型[J]. 运筹与管理, 2007, 16(5): 5-8.
(Sun Y, Chi H, Jia C L. Nonlinear mixed-integer programming model for emergency resource dispatching with multi-path[J]. Operations Research and Management Science, 2007, 16(5): 5-8.)

[17] 戴更新, 达庆利. 多资源组合应急调度问题的研究[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(9): 52-55.
(Dai G X, Da Q L. The study of combinatorial scheduling problem in emergency systems[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2000, 20(9): 52-55.)

[18] Marius M Solomon. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints[J]. Operations Research, 1987(35): 254-265.

[19] Potvin Jean-Yves, Rousseau Jean-Marc. A parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problem with time windows[J]. European J of Operational Research, 1993, 66(3): 331-340.

[20] Éric Taillard, Philippe Badeau, Michel Gendreau, et al. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows[J]. Transportation Science, 1997, 31(2): 170-186.

[21] 何建敏, 刘春林. 限制期条件下应急车辆调度问题的模糊优化方法[J]. 控制与决策, 2001, 16(3): 318-321.
(He J M, Liu C L. Fuzzy programming problem for vehicle dispatch under time restriction[J]. Control and Decision, 2001, 16(3): 318-321.)

[22] 计国君, 朱彩虹. 突发事件应急物流中资源配送优化问题研究[J]. 中国流通经济, 2007, 21(3): 18-21.
(Ji G J, Zhu C H. Study on the distribution optimal problem in emergency logistics for emergency ecent[J]. China Business and Market, 2007, 21(3): 18-21.)

[23] Ali Bozorgi-Amiri, Mohammad Saeid Jabalameli, Mehdi Alinaghian, et al. A modified particle swarm optimization for disaster relief logistics under uncertain environment[J]. Int J of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 60(1): 357-371.

[24] 王兰英, 郭子雪, 张玉芬, 等. 基于直觉模糊案例推理的应急物资需求预测模型[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(4): 775-780.
(Wang L Y, Guo Z X, Zhang Y F, et al. An emergency supplies demand prediction model based on intuitionistic fuzzy case reasoning[J]. J of China University of Mining & Technology, 2015, 44(4): 775-780.)

[25] 樊治平, 刘洋, 沈荣鉴. 基于前景理论的突发事件应急响应的风险决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(5): 977-984.
(Fan Z P, Liu Y, Shen R J. Risk decision analysis method for emergency response based on prospect theory[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2012, 32(5): 977-984.)

[26] 傅克俊, 胡祥培, 王旭坪. 供应链系统中的应急策略与模型[J]. 中国软科学, 2007(5): 119-124.
(Fu K J, Hu X P, Wang X P. The emergency strategies and models in supply chain systems[J]. China Soft Science, 2007(5): 119-124.)

[27] 沈挺, 赵千川, 郑大钟. 一种库存控制策略[J]. 自动化学报, 1999, 25(3): 337-343.
(Shen T, Zhao Q C, Zheng D Z. An inventory control policy[J]. Acta Automatica Sinica, 1999, 25(3): 337-343.)

[28] 邬文帅, 寇纲, 彭怡, 等. 面向突发事件的模糊多目标应急决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(6): 1298-1304.
(Wu W S, Kou G, Peng Y, et al. A fuzzy multi-criteria emergency decision-making method[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2012, 32(6): 1298-1304.)

[29] 杨继君, 吴启迪, 程艳, 等. 面向非常规突发事件的应对方案序贯决策[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(4): 619-624.
(Yang J J, Wu Q D, Cheng Y, et al. Contingency plans of unconventional emergency based on sequential decision-making[J]. J of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(4): 619-624.)

[30] Linet Özdamar. Planning helicopter logistics in disaster relief[J]. OR Spectrum, 2011, 33(3): 655-672.

（责任编辑：李君玲）