

分级响应的应急资源布局模型和算法*

王晶¹, 朱建明²

(1. 北京工商大学商学院, 北京 100048; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 对如何在某地区建立分级的、多灾难情景下的资源布局进行了分析, 提出了双层规划的数学模型, 并给出了基于粒子群算法的模型求解方法, 最后通过算例验证了模型和算法的有效性。

关键词: 应急资源布局; 双层规划; 情景分析; 粒子群优化

中图分类号: TP182 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)08-2872-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.019

Emergency resource location and allocation model and algorithm for graded response

WANG Jing¹, ZHU Jian-ming²

(1. School of Business, Beijing Technology & Business University, Beijing 100048, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper analysed the establishment of regional-level, multi-disaster scenarios emergency resource location and allocation. It proposed a bi-level programming model and gave an effective algorithm based on PSO. Cases study illustrates the proposed model is very effective.

Key words: emergency resource location and allocation; bi-level programming; scenario analysis; particle swarm optimization (PSO)

近些年来国内外自然灾害频发, 2008年初中国南方的大雪、汶川 8.0 级大地震; 2010 年青海玉树地震, 以及 2011 年日本 9.0 级大地震, 使应急管理再一次成为研究的热点。如何做到未雨绸缪, 从容应对各种频发的自然灾害及其他各类突发事件, 已成为各级政府、企业等需要迫切解决的最主要问题之一。应急管理中应急资源布局的研究无疑又将成为重中之重。应急资源的布局包括应急资源的选址和配置两部分。布局的目标是将应急资源的地址合理规划, 在每一个地址配置适量的资源, 使得应急管理中资源的供应量达到最大或者最优。

有关选址与布局问题的数学模型已有很多研究, 大致可分为确定性模型和随机性模型两类。在确定性模型研究方面, Hakimi^[1] 提出了 P-median 问题, 确定设施的建造地址, 使需求点与设施之间的平均距离最小化。ReVelle 等人^[2] 将 P-median 问题描述成线性整数规划, 并用分支定界法求解模型。Sylvester^[3] 提出了仓库问题 (center problem), 建立了 P-center model。Jia 等人^[4] 研究了在需求点的需求量已知的情况下, 多点发生突发事件中医疗设施选址问题的模型。

在随机性模型研究方面, Larson^[5] 的超立方体模型最早地将排队论应用到紧急医疗服务系统问题中。超立方体模型及其他的扩展模型在紧急医疗服务系统应用中比较有效, 但其计算量巨大, 限制了此模型大范围的运用。Daskin^[6] 提出了最大期望覆盖模型 (maximum expected covering location problem formulation, MEXCLP); Repede、Goldberg 等人^[7,8] 对 MEXCLP 做

了扩展工作; ReVelle 等人^[9] 的随机集覆盖选址模型 (probabilistic location set covering problem, PLSCP) 在保证一定覆盖率的前提下最小化服务设施的数目。此后, Marianov 等人对 PLSCP 进行了扩展, 建立了排队随机集覆盖选址模型。Gong 等人^[10] 研究在突发事件营救初期, 分别在伤员集中区域分配合适的救护车数, 并基于离散时间策略分析了救护车再分配问题。然而这些模型的研究较少涉及多物资的资源配置, 而且往往不是针对大规模突发事件的应急资源布局。

针对我国目前的应急管理分类分级的体制, 我国宁夏、福建等地区已初步形成省、市、县三级救灾物资储备网络。针对某特定地区可能面临的突发事件进行合理、高效、低成本的应急资源布局, 是保证该地区应对突发事件和及时展开救援的重要保证。然而目前相关的研究较少, 本文用双层规划建立模型, 对某地区 (如某省) 可能发生的灾难情景进行分析, 建立适用于多情景、分级的资源布局 (省市两级), 使得每一级应急资源储备发挥各自的作用, 同时使得应急物资储备网络的成本较低。

1 问题描述与模型建立

目前研究较多的是基于情景的应急资源布局。情景分析是指通过分析某地区发生不同级别突发事件的可能性以及发生后造成的损失情况, 将地区抽象出几个应急资源需求点, 每个需求点发生不同级别突发事件的概率不同、发生后造成损失

收稿日期: 2011-12-25; **修回日期:** 2012-02-03 **基金项目:** 国家自然科学基金重大研究计划集成项目 (91024031); 国家自然科学基金重大研究计划培育项目 (90924008)

作者简介: 王晶 (1982-), 男, 河北邯郸人, 讲师, 博士, 主要研究方向为应急管理、数学模型与算法 (wangjing-b08@mails.gucas.ac.cn); 朱建明 (1979-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为应急管理、运筹学。

情况不同,资源需求量也不同。假定灾难的级别 level 有两类, low 为损失较小的低级别的灾难, high 为损失较大的高级别的灾难。\$S\{\omega_1^{\text{low}}, \dots, \omega_u^{\text{low}}, \dots, \omega_v^{\text{high}}, \dots, \omega_s^{\text{high}}\}\$ 为灾难发生时造成损失的情景构成的集合; \$P(\omega_s^{\text{level}})\$ 为突发事件发生时情景 \$\omega_s^{\text{level}}\$ 发生的概率, \$\sum_s P(\omega_s^{\text{level}}) = 1\$。

本文将说明如何建立基于情景的省市两级应急资源布局。假定 \$P\$ 省拥有 \$N\$ 个属于省级的备选物资储备仓库 \$\{p_1, p_2, \dots, p_N\}\$, \$P\$ 省有 \$M\$ 个城市分别为 \$\{C_1, C_2, \dots, C_M\}\$。对于城市 \$C_i\$ 有 \$M_i\$ 个属于市级的备选物资储备仓库 \$\{C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{iM_i}\}\$, \$K_i\$ 个可能的受灾需求点 \$\{D_{i1}, D_{i2}, \dots, D_{iK_i}\}\$。问题是在时间、供应满意度等约束条件下分别从省市备选储备仓库集合中选择若干个建立储备仓库使每一级的成本最低。

1.1 模型假设

a) 根据灾难分类分级响应处置的原则, 假定对于级别为 low 的灾难, 其应对主体为所在的市, 物资的需求由市一级储备提供。

b) 对于级别为 high 的灾难其造成的损失较大, 物资需求量较大, 应对主体为省市联合应对, 其救援过程一般也持续多个阶段。第一阶段救援对响应时间要求较高, 应保证物资在有效时间内运达需求点, 其物资提供一般为市一级的物资仓库和距离较近的省一级的仓库; 第二阶段的物资保障一般由省级物资储备仓库提供。

c) 储备的物资为一些常用物资, 如帐篷、铁钎、棉衣、被等可以长期储备的物资。

1.2 模型建立

1.2.1 模型主要考虑的问题

a) 市一级的物资储备覆盖范围小, 但距离受灾点近, 可以保证较高的突发事件时间响应度; 其储备数量上只需满足 low 级别的灾难和 high 级别灾难第一阶段的物资供应即可。

b) 省一级的物资储备覆盖范围广, 是针对省内各种灾难情景的资源布局, 储备数量上应能保证救援物资的持续供应。因此对省市两级仓库合理选址, 安排两级物资储备的数量, 使得省市两级物资储备构成的储备网络具有多灾难情景适应性, 在时间和供应满意度等约束下求得物资储备的成本最小。

1.2.2 建模方法

双层规划的研究起源于经济问题, 如资源配置、价格控制问题的研究等。双层规划是双层决策问题的数学模型, 是一种具有二层递阶结构的系统优化问题, 上层问题与下层问题都有各自的目标函数与约束条件。上层先给定一个决策变量, 下层各子系统以这个决策变量为参量, 根据自己的目标函数和约束条件, 在可能的范围内求得一个最优值, 并将自己的最佳反应反馈给上层, 上层再在下层最佳反应的基础上, 在可能的范围内求得整体上的最优解。

双层规划模型是由两个相互关联的子模型 \$(U)\$ 和 \$(L)\$ 组成, 其中 \$(U)\$ 称为上层规划, \$(L)\$ 称为下层规划。\$F\$ 是上层规划所确定的目标函数, \$x\$ 为上层规划的决策变量, \$G(x, y)\$ 是对变量的约束; \$f\$ 为下层规划所确定的目标函数, \$y\$ 为下层规划的决策变量, \$g(x, y)\$ 是对变量的约束。上层决策者通过设置 \$x\$ 的值来影响下层决策者, 因此限制了下层决策者的可行约束集, 而下层决策者的行为反过来又会通过 \$y\$ 影响上层的决策。所以下层决策变量 \$y\$ 是上层决策变量 \$x\$ 的函数, 即 \$y = y(x)\$, 这个

函数一般称为反应函数。

$$\begin{aligned} (U) \quad & \min_x F(x, y) & (L) \quad & \min_y f(x, y) \\ \text{s. t.} \quad & G(x, y) \leq 0 & \text{s. t.} \quad & g(x, y) \leq 0 \end{aligned}$$

本问题解决的是如何合理安排省市两级物资储备。省市两级物资储备仓库的选址和储备数量的决策是相互影响的, 通过对双层规划的上下层相互影响决策的分析可知, 双层规划较好地描述了省市两级应急物资储备之间的关系, 双层规划的最优解就是在满足约束条件下省市两级物资储备的最优决策。

1.2.3 模型的数学符号表达

1) 参数变量

\$CP_n\$ 表示开建省级储备仓库 \$P_n\$ 的固定投入, \$CC_{ij}\$ 表示开建市级物资储备仓库 \$C_{ij}\$ 的固定投入;

\$VP_n\$ 表示仓库 \$P_n\$ 的容积, \$VC_{ij}\$ 表示仓库 \$C_{ij}\$ 的容积;

\$TC_{ijk}\$ 表示仓库 \$C_{ij}\$ 到需求点 \$D_{ik}\$ 的广义时间距离 (广义时间距离考虑距离长短和交通等因素), \$TP_{nik}\$ 表示仓库 \$P_n\$ 到需求点 \$D_{ik}\$ 的广义时间距离;

\$d_{ik}^m(\omega_s^{\text{level}})\$ 表示情景 \$\omega_s^{\text{level}}\$ 下 \$i\$ 市受灾点 \$k\$ 关于 \$m\$ 物资的需求量;

\$v_m\$ 表示物资 \$m\$ 的单位体积大小;

\$\lambda_m\$ 表示物资 \$m\$ 的单位购买费用;

\$c\$ 表示 high 级别突发事件第一阶段救援物资供应的满意度下限, 一般 \$c = 20\%\$;

\$\tau\$ 表示未满足物资单位数量的惩罚费用;

\$P(\omega_s^{\text{level}})\$ 表示灾难发生时情景 \$\omega_s^{\text{level}}\$ 发生的概率;

\$T_1, T_2\$ 表示第一阶段、第二阶段对于救援时间的要求;

\$\epsilon\$ 为一小数, \$M\$ 为一大数。

2) 决策变量

\$SP_n^m\$ 表示省级物资仓库 \$P_n\$ 物资 \$m\$ 的储备数量;

\$SC_{ij}^m\$ 表示市级物资仓库 \$C_{ij}\$ 物资 \$m\$ 的储备数量;

\$z_{ij}\$ 表示 \$C_{ij}\$ 仓库的选择标志, \$z'_n\$ 表示 \$P_n\$ 仓库的选择标志;

\$x_{ijk}^m(\omega_s^{\text{level}})\$ 表示情景 \$\omega_s^{\text{level}}\$ 时 \$C_{ij}\$ 运到 \$D_{ik}\$ 物资 \$m\$ 的数量, \$y_{1nik}^m(\omega_s^{\text{high}})\$ 表示情景 \$\omega_s^{\text{high}}\$ 时第一阶段 \$P_n\$ 运到 \$D_{ik}\$ 的物资 \$m\$ 的数量, \$y_{2nik}^m(\omega_s^{\text{high}})\$ 表示情景 \$\omega_s^{\text{high}}\$ 时第二阶段 \$P_n\$ 运到 \$D_{ik}\$ 的物资 \$m\$ 的数量。

3) 辅助变量

\$\delta_{ik}^m(\omega_s^{\text{high}})\$ 表示在 \$\omega_s^{\text{high}}\$ 情景下 \$i\$ 市 \$k\$ 受灾点物资 \$m\$ 需求未能满足的数量。

基于双层规划的省市两级资源布局模型如下:

a) 上层规划 (省级应急资源布局):

$$F(SC, z', y) = \min_n \sum_n CP_n z'_n + \sum_{m,n} \lambda_m SP_n^m + \sum_{m,n,i,k,s} P(\omega_s^{\text{high}}) TP_{nik} y_{1nik}^m(\omega_s^{\text{high}}) + \sum_{m,n,i,k,s} P(\omega_s^{\text{high}}) TP_{nik} y_{2nik}^m(\omega_s^{\text{high}}) + \tau \sum_{i,k,m,s} P(\omega_s^{\text{high}}) \delta_{ik}^m(\omega_s^{\text{high}}) \quad (1)$$

$$\sum_i \sum_k y_{1nik}^m(\omega_s^{\text{high}}) + \sum_i \sum_k y_{2nik}^m(\omega_s^{\text{high}}) \leq SP_n^m \quad \forall n, m, \omega_s^{\text{high}} \quad (2)$$

$$\sum_n y_{1nik}^m(\omega_s^{\text{high}}) + \sum_n y_{2nik}^m(\omega_s^{\text{high}}) + \sum_j x_{ijk}^m(\omega_s^{\text{high}}) + \delta_{ik}^m(\omega_s^{\text{high}}) \geq d_{ik}^m(\omega_s^{\text{high}}) \quad \forall i, k, m, \omega_s^{\text{high}} \quad (3)$$

$$\epsilon z'_n \leq \sum_m SP_n^m \leq M z'_n \quad \forall n \quad (4)$$

$$\sum_m v_m SP_n^m \leq VP_n \quad \forall n \quad (5)$$

$$TP_{nik} y_{2nik}^m(\omega_s^{\text{high}}) \leq T_2 y_{2nik}^m(\omega_s^{\text{high}}) \quad \forall n, i, k, m, \omega_s^{\text{high}} \quad (6)$$

$$z'_n \in \{0, 1\} \quad \forall n \quad (7)$$

$$\delta_{ik}^m(\omega_s^{\text{high}}) \geq 0 \quad \forall i, k, m, \omega_s^{\text{high}} \quad (8)$$

b) 下层规划 (\$i\$ 市市级应急资源布局):

$$f_i(CC_i, z_i, x_i) = \min \sum_j CC_{ij} z_{ij} + \sum_{j,m} \lambda_m SC_{ij}^m + \sum_{j,m,s} P(w_s^{low}) TC_{ijk} x_{ijk}^m(\omega_s^{low}) + \sum_{j,m,s} P(\omega_s^{high}) TC_{ijk} x_{ijk}^m(\omega_s^{high}) \quad (9)$$

$$\sum_k x_{ijk}^m(\omega_s^{high}) \leq SC_{ij}^m \quad \forall j, m, \omega_s^{high} \quad (10)$$

$$\sum_k x_{ijk}^m(\omega_s^{low}) \leq SC_{ij}^m \quad \forall j, m, \omega_s^{low} \quad (11)$$

$$d_{ik}^m(\omega_s^{low}) \leq \sum_j x_{ijk}^m(\omega_s^{low}) \quad \forall k, m, \omega_s^{low} \quad (12)$$

$$cd_{ik}^m(\omega_s^{high}) \leq \sum_n \gamma_{1nik}^m(\omega_s^{high}) + \sum_j x_{ijk}^m(\omega_s^{high}) \leq d_{ik}^m(\omega_s^{high}) \quad \forall k, m, \omega_s^{high} \quad (13)$$

$$\varepsilon z_{ij} \leq \sum_m SC_{ij}^m \leq M z_{ij} \quad \forall j \quad (14)$$

$$\sum_m \nu_m SC_{ij}^m \leq VC_{ij} \quad \forall j \quad (15)$$

$$TC_{ijk} x_{ijk}^m(\omega_s^{low}) \leq T_1 x_{ijk}^m(\omega_s^{low}) \quad \forall j, k, m, \omega_s^{low} \quad (16)$$

$$TC_{ijk} x_{ijk}^m(\omega_s^{high}) \leq T_1 x_{ijk}^m(\omega_s^{high}) \quad \forall j, k, m, \omega_s^{high} \quad (17)$$

$$TP_{nik} \gamma_{1nik}^m(\omega_s^{high}) \leq T_1 \gamma_{1nik}^m(\omega_s^{high}) \quad \forall n, k, m, \omega_s^{high} \quad (18)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall j \quad (19)$$

上下层规划目标函数式(1)(9)分别表示最小化省级、市级物资储备仓库的开建成本、物资的配置费用和灾难发生时运输费用之和,式(1)中还考虑了对于需求未能满足需求物资的惩罚费用;式(2)(10)(11)表示任何灾难情景下从储备点运出的物资不大于其储备量;式(3)(12)(13)分别是对需求点不同情景下需求量被满足的约束,对于级别为 high 的灾难在第一阶段市级和省级较近的仓库物资调运过程中,保证各个可能受灾点所有情景下的需求供应满意度达到 c ,第二阶段省级的调运中要考虑所有的情景需求的满意度。为了降低成本考虑的是期望下的均值满足,这样考虑是合理的,因为对于那些发生概率较低且需求较大的情景其物资满意度可以相应降低,从而降低储备成本;式(4)(14)表示在被选址的仓库才能配置资源;式(5)(15)是对储备仓库容积的约束;式(6)(16)~(18)是各种情景下发生物资运输两点间的时间约束,使得物资运输在救援要求时间内到达;式(7)(19)是备选点被选择的标志;式(8)中 $\delta_{ik}^m(\omega_s^{high})$ 在 ω_s^{high} 情景下未能满足需求的物资数量,在目标中对其进行概率期望下费用惩罚。

2 模型求解与算例研究

2.1 模型分析

本模型是一个双层规划模型,上层规划解决的是以仓库开建、储备、运输费用最小为目标对省级仓库进行选址和配置资源;下层规划解决的是各个市如何在约束条件下以最小化市级仓库的开建、配置、运输费用为目标进行仓库的布局和资源分配。省市两级物资仓库的选址和资源分配是相互影响的,双层规划的最优解就是在满足时间、满意度等要求下省市两级物资储备权衡下的最优决策。

每个市级资源布局对应一个规划 $f_i(CC_i, z_i, x_i)$, 下层规划由 M 个市级决策模型构成。因此模型中变量、约束的个数将随着市、备选点、情景的增多而增多,而且本模型是混合整数双层规划,问题的计算复杂度会显著增大。文献[11]指出即使是很简单的双层线性规划问题也是 NP-hard 问题,不存在多项式求解算法,双层规划的非凸性是造成双层规划问题求解异常复杂的另一重要原因。目前对于双层规划模型求解通常采用近似算法,下面给出通过粒子群算法求解此模型。

2.2 算法设计

粒子群优化(PSO)^[12]算法是近年发展起来的一种新的进

化算法,是从随机解出发,通过迭代寻找最优解。和其他启发式算法一样,它也是通过适应度来评价解的品质,通过追随当前搜索到的最优值来寻找全局最优。在 PSO 中,每个优化问题的解都是搜索空间中的一只“鸟”,称之为粒子。所有的粒子都有一个由被优化的函数决定的适应值(fitness value),每个粒子还有一个速度决定它们飞翔的方向和距离。PSO 首先初始化一群随机粒子(随机解),然后粒子们就追随当前的最优粒子在解空间中搜索,迭代找到最优解。在每一次迭代中,粒子通过跟踪两个极值来更新自己,第一个就是粒子本身所找到的最优解,个体极值 pbest;另一个极值是整个种群目前找到的最优解,全局极值 gbest。在第 k 次迭代中,第 i 个粒子具有如下两个属性:

a) 在一个 N 维空间中的位置向量 $X_i^k = (x_1^k, \dots, x_n^k, \dots, x_N^k)$, 其中 $x_n^k \in [1_n, u_n]$, $1 \leq n \leq N$, l_n 和 u_n 是位置向量第 n 维坐标的下限和上限。

b) 速度向量 $V_i^k = (v_1^k, \dots, v_n^k, \dots, v_N^k)$, 其值被限定在最大速度向量 $V_{max}^k = (v_{max}^k, \dots, v_{max}^k, \dots, v_{max}^k)$ 以及最小速度向量 $V_{min}^k = (v_{min}^k, \dots, v_{min}^k, \dots, v_{min}^k)$ 之间。

在 PSO 算法的每一次迭代过程中,整个种群的所有粒子均根据以下两个公式被更新:

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 r_1 (P_i^k - X_i^k) + c_2 r_2 (P_g^k - X_i^k) \quad (20)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (21)$$

其中: P_i 是第 i 个粒子自身所找到的当前最佳位置(即个体最优解),在某些文献中 P_i 也被记做 pbest; P_g 有时也记做 gbest,是整个粒子群目前找到的最优解; r_1 和 r_2 是 $[0, 1]$ 间的随机数; c_1 和 c_2 被称做学习因子,通常, $c_1 = c_2 = 2$; ω 是加权系数,一般取值在 $0.1 \sim 0.9$ 。通过大量实验证明,如果 ω 随算法迭代的进行而线性减小,将显著改善算法的收敛性能。设 ω_{max} 为最大加权系数, ω_{min} 为最小加权系数, $iter$ 为当前迭代次数, $iter_{max}$ 为算法总的迭代次数,则有

$$\omega = \omega_{max} - iter \times \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{iter_{max}} \quad (22)$$

粒子群在更新过程中,粒子速度每一维的取值不超过最大允许值,粒子位置每一维的坐标也限制在允许范围内。同时, P_i 与 P_g 在迭代过程中不断更新,最后输出的 P_g 就是算法得到的最优解。

通过分析和对比现有的求解双层规划模型的方法和算法,本文在借鉴一些优秀的算法思想的基础上,提出采用粒子群优化算法并借助分层迭代的思想来求解双层规划模型,即对上层规划采用 PSO 算法进行求解,下层规划采用传统优化方法进行求解,然后在上层规划与下层规划之间反复迭代,最后逐渐逼近双层规划问题的最优解。

下面给出求解本模型的双层规划的基本流程:

a) 初始化。初始化 PSO 算法中的参数;随机产生上层模型的初始解(需满足约束条件);随机初始化粒子群中粒子的位置 Y_i 与速度 $V_i, i \in [1, m], m$ 为群体规模(即粒子个数);将第 i 个粒子的 P_i 设置为该粒子的当前位置, P_g 设置为初始群体中最佳粒子的位置。

b) (a) 根据式(20)(21)更新位置与速度;

(b) 将粒子 i 的位置 Y_i (即上层模型的解)代入下层规划各个模型中,利用传统优化方法求解下层规划各个模型,获得下层规划的最优解 X_i ;

(c)将 X_i, Y_i 代入上层规划的目标函数,计算粒子 i 的适应度 $F(Y_i)$;

(d)如果粒子 i 的适应度优于 P_i 的适应度, P_i 更新为该粒子的当前位置 Y_i ; 对应于 P_i 的下层模型的最优解 xP_i 被相应地更新为 X_i ;

(e)如果粒子 i 的适应度优于 P_g 的适应度, P_g 更新为该粒子的当前位置 Y_i ; 对应于 P_g 的下层模型的最优解 xP_g 被相应地更新为 X_i 。

c)判断算法收敛准则是否满足,如果满足,转步骤 d); 否则转步骤 b)。

d)输出双层规划模型的最优解 P_g 和 xP_g , 并相应地求出上、下层规划的目标函数值,算法结束。

2.3 实例计算和结果分析

为简化模型,本文假定某省 P 有三个市 $\{C_1, C_2, C_3\}$, 每个城市都有三个属于本市的待选物资储备仓库 $\{C_{i1}, C_{i2}, C_{i3}\}, i=1, 2, 3$; 三个需求点 $\{D_{i1}, D_{i2}, D_{i3}\}, i=1, 2, 3$; 四个省级待选物资储备仓库 $\{P_1, P_2, P_3, P_4\}$, 两种储备物资 $\{m_1, m_2\}$, 如图 1 所示。

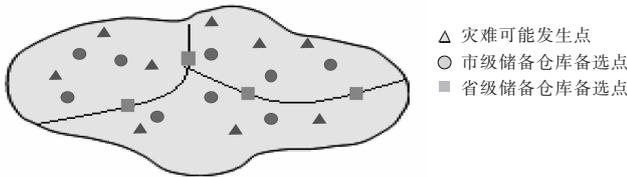


图 1 区域示意图

表 1 给出了该算例中的参数值。

表 1 算例中参数值

c	T_1	T_2	ν_1	ν_2	λ_1	λ_2	τ	CP_1	CP_2	CP_3
20%	8 h	72 h	3 m ³	4 m ³	120 ¥	200 ¥	250 ¥	70 w	80 w	110 w
CP_4	CC_{11}	CC_{12}	CC_{13}	CC_{21}	CC_{22}	CC_{23}	CC_{31}	CC_{32}	CC_{33}	
90 w	50 w	30 w	20 w	10 w	20 w	26 w	20 w	30 w	45 w	

针对特定灾难的不同情景进行资源布局,同时很好地验证本模型建立的资源布局具有多情景适应性,本文构建了 Scenario library 情景数据库(表 2)。例如地震情景库中情景要素可以是震源、震级、时间等要素不同组合产生的情景,同时笔者认为可通过估算得到受灾点在该情景下对各种物资的需求数量。表 3 为仓库选址与资源配置结果。

表 2 Scenario library 部分数据(受灾点物资需求)

情景概率	需求量									
	D_{11}	D_{12}	D_{13}	D_{21}	D_{22}	D_{23}	D_{31}	D_{32}	D_{33}	
	m_1, m_2									
ω_1^{low}	0.06	0,0	0,0	0,0	35,40	48,21	35,45	0,0	0,0	0,0
ω_5^{low}	0.05	25,28	20,30	40,35	0,0	0,0	0,0	40,30	38,40	30,40
ω_8^{high}	0.08	0,0	0,0	0,0	135,110	120,140	120,115	0,0	0,0	0,0
ω_{15}^{high}	0.08	100,120	130,150	150,145	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ω_{19}^{high}	0.05	0,0	0,0	0,0	150,158	171,130	160,187	250,220	180,110	120,150
ω_{20}^{high}	0.07	120,125	120,180	170,160	150,174	185,158	160,175	123,125	185,165	210,150
ω_{30}^{high}	0.02	120,125	130,180	170,160	160,134	230,170	180,187	200,150	185,210	210,170

表 3 仓库选址与资源配置结果

仓库	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	
	m_1, m_2						
储备数量	0,0	38,34	51,62	49,34	49,37	38,39	
仓库	C_{31}	C_{32}	C_{33}	P_1	P_2	P_3	P_4
	m_1, m_2						
储备数量	56,64	85,86	0,0	215,234	358,230	0,0	257,310

由表 3 的结果分析可知,开建费比较高的备选仓库没有被选择;市级物资储备的数量对于该市级为 low 的突发事件均可以满足;通过对情景库中灾难级别为 high 的情景下的调运方案可知,第一阶段的物资满意度都高于 c ,第二阶段的物资调运对于发生概率较大的情景的物资满意度都高于 90%。

3 结束语

本文针对如何基于灾难情景在特定区域建立低成本、分级响应的应急资源布局给出了基于双层规划的数学模型及求解方法。分级的资源布局既可保证救灾中每个阶段对于应急物资的需求,又可以达到不同级别间物资储备的共享,降低了成本。实验证明本文的模型是合理可行的方案,对于在特定区域(如省市两级)建立两级资源布局具有很好的指导意义。同时双层规划可以推广为 k 层规划,因此可以建立多级的应急资源布局体系,如省、市、县三级应急资源网络。

参考文献:

- [1] HAKIMI S L. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph[J]. *Operations Research*, 1964, 12(3):450-459.
- [2] ReVELLE C, SWAIN R W. Central facilities location[J]. *Geographical Analysis*, 1970, 2(1):30-42.
- [3] SYLEVESTER J J. A question in the geometry of situation[J]. *Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics*, 1857, 1:79.
- [4] JIA Hong-zhong, ORDÓÑEZ F, DESSOUKY M. Solution approaches for facility location of medical supplies for large-scale emergencies[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2007, 52(2):257-276.
- [5] LARSON R C. A hypercube queuing model for facility location and re-districting in urban emergency services[J]. *Computers and Operations Research*, 1974, 1(1):67-95.
- [6] DASKIN M S. A maximum expected covering location model: formulation, properties and heuristic solution[J]. *Transportation Science*, 1983, 17(1):48-70.
- [7] REPEDE J F, BERNARDO J J. Developing and validating a decision support system for locating emergency medical vehicles in louisville, kentucky[J]. *European Journal of Operational Research*, 1994, 75(3):567-581.
- [8] GOLDBERG J, DIETRICH R, CHEN J M, et al. Validating and applying a model for locating emergency medical vehicles in Tucson, AZ[J]. *European Journal of Operational Research*, 1990, 49(3):308-324.
- [9] ReVELLE C, HOGAN K. The maximum reliability location problem and alpha reliable p-center problems: derivatives of the probabilistic location set covering problem[J]. *Annals of Operations Research*, 1989, 18(1):155-174.
- [10] GONG Qiang, BATTIA R. Allocation and reallocation of ambulances to casualty clusters in a disaster relief operation[J]. *IIE Transactions*, 2007, 39(1):27-39.
- [11] GUMUS Z H, FLOUDAS C A. Global optimization of nonlinear bilevel programming problem[J]. *Journal of Global Optimization*, 2001, 20(1):1-31.
- [12] 吕振肃, 侯志荣. 自适应变异的粒子群优化算法[J]. *电子学报*, 2004, 32(3):416-420.
- [13] 赵志刚. 求解双层规划模型的粒子群优化算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2007, 27(8):92-98.