

国家血液战略储备库选址—库存问题^①

马祖军¹, 周愉峰²

(1. 西南交通大学经济管理学院物流与应急管理研究所, 成都 610031;
2. 重庆工商大学重庆市发展信息管理工程技术研究中心, 重庆 400067)

摘要: 建立血液战略储备库是应对大规模突发事件应急血液保障问题的重要途径之一。为提高应急血液保障能力, 以灾后应急血液保障时效性最高及日常条件下血液战略储备库运营成本最低为目标, 基于非线性混合整数规划方法建立了一个考虑多情景、多阶段、多血型、随机需求、库存补充提前期、容量限制及协同定位等因素的血液战略储备库多目标选址—库存问题优化模型。根据该模型的性质, 设计了一种基于小生境技术的多目标非支配排序遗传算法进行求解。算例分析结果表明, 该算法能够有效获得 Pareto 前沿, 产生一簇 Pareto 解, 因而决策者可根据偏好与实际需要权衡应急血液保障成本与时效性, 选择合适的血液战略储备库选址—库存决策方案。

关键词: 突发事件; 血液保障; 战略储备; 选址—库存问题; 遗传算法

中图分类号: F252; C931 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2018)03-0054-15

0 引言

大规模地震、特大恐怖袭击等突发事件可能造成大量伤员, 导致应急血液需求急剧增加。例如 2001 年 9.11 事件后短短 4 天内美国血液中心共采血 251 370 单位(U), 约为平时的 2.8 倍; 2008 年 5.12 汶川地震后, 成都、绵阳、德阳、广元、阿坝这 5 个血站的血制品入库量达到了 107 911U, 约为 2007 年同期的 1.85 倍^[1]。由于血液在采集、检测、运输、储存及使用等方面要求很高, 无法即采即用, 这与灾后紧急用血需求形成突出矛盾。而建立国家血液战略储备体系是提高失血伤员救治能力的重要途径^[1-5], 对提高我国应急血液保障水平, 应对大规模突发事件应急血液需求有重要意义。

美国早在“9.11”事件后就提出了建立国家血液储备的构想, 具备在 4h~6h 内向美国全境供

应血液的能力, 以便更好地应对突发卫生事件、灾害和恐怖袭击, 以及保障军事行动最初的血液需求^[4]。而汶川地震应急血液保障过程中反映出的问题也引发了一些学者对我国应急血液保障问题的思考, 并初步探讨了血液战略储备库建设问题。如郑忠伟等^[5]建议在全国 6 大区域建立多个直属于国家的战备应急血液储备库。吴卫星等^[4]提出以“国家血液储备单元”的形式在某些人口密集、功能完善的采供血机构设立若干个国家血液储备单元。黎成等^[6]建议在各省血液中心储备血液制品, 构成“国家血液储备单元”。马祖军等^[1]提出在全国若干血液中心设立国家血液战略储备库, 并以调剂时效性和可靠性最高为目标建立了一个多情景、多阶段、多品种的血液战略储备库多目标选址模型, 设计了一种基于禁忌搜索算法的两阶段启发式算法。文献[7-9]则探讨了军队血站战

① 收稿日期: 2015-12-20; 修订日期: 2016-07-17。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71672154); 教育部人文社会科学研究规划基金资助项目(16YJA630038); 国家自然科学基金重大研究计划培育项目(90924012); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-10-0706)。

作者简介: 马祖军(1974), 男, 浙江开化人, 博士, 教授, 博士生导师。Email: zjma@swjtu.edu.cn

备血液储备库的建设管理问题。但这些研究基本上都是定性地探讨了建立血液战略储备库的必要性,只有文献[1]定量分析了血液战略储备库选址问题。此外,引发大量应急血液需求的大规模突发事件发生概率毕竟较小,如果在选址决策中只追求灾害发生后总的血液调剂时间最短而忽略成本因素,势必造成储备库的日常运营成本非常庞大。因此,血液战略储备库选址不仅要保证突发事件发生后能够将血液快速运送到各个受灾地,而且要使储备库在日常运行维护过程中的运营成本尽可能小。然而,现有研究未考虑血液库存日常运营成本。因此,有必要在血液战略储备库选址决策中进一步集成血液库存决策,研究以灾后应急血液保障时效性最高和血液战略储备日常运营总成本最低为目标的血液战略储备库选址—库存问题(location-inventory problem, LIP)。

目前已有不少学者研究了LIP,例如Daskin等^[10]建立了分销网络设计中LIP的非线性整数规划(nonlinear integer-programming, NIP)模型,并设计了拉格朗日松弛(Lagrangian relaxation)算法进行求解。Shen等^[11]建立了LIP的NIP模型,并转换成集合覆盖(set-covering)模型,设计了列生成(column generation)算法进行求解。Wu等^[12]研究了易腐品配送中采用零库存订货(zero-inventory-ordering)库存策略的多周期LIP,建立了非线性混合整数规划(mixed-integer nonlinear programming, MINLP)模型,也转换成集合覆盖模型,采用列生成算法求解。Liao等^[13]研究了供应商管理库存(vendor-managed inventory)环境下的多目标LIP,建立了MINLP模型,并采用多目标非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA-II)进行求解。在随机LIP研究方面,Miranda和Garrido^[14]建立了随机需求条件下分销网络设计中LIP的MINLP模型,并设计了基于拉格朗日松弛和次梯度(subgradient)方法的启发式算法;之后,他们又进一步考虑了仓库的库存容量和订货量限制^[15]。Yao等^[16]建立了随机需求条件下多源补货仓库LIP的MINLP模型,并设计了一种迭代启发式(iterative heuristic)算法来求解。Sourirajan等^[17]研究了随机需求条件下分销网络设计中考虑补货提前期和安全库存水平的LIP,并采用遗传算法求解所建的NIP模型。Qi和

Shen^[18]也考虑供应中断的影响,研究了供应不可靠下供应链集成设计中的LIP,建立了MINLP规划模型,并转换成拉格朗日对偶问题后采用次梯度算法求解。Qi等^[19]研究了随机供应中断条件下供应链集成设计中的LIP,建立了NIP模型,并设计了嵌入拉格朗日松弛方法的分支定界(branch-and-bound)算法进行求解。Chen等^[20]研究了考虑设施中断(facility disruption)风险的可靠性LIP,建立了NIP模型,并采用拉格朗日松弛算法求解。此外,Tancrez等^[21]针对三级供应链中工厂到客户之间可以采用直接配送和配送车辆具有容量限制的LIP,建立了一种非线性连续优化模型,并设计了迭代启发式算法。Shahabi等^[22]考虑零售商需求相关情形下的LIP,建立了一个非线性0-1整数规划模型,再转换成混合整数锥二次规划(conic quadratic program)模型,并设计了一种外逼近(outer approximation)算法求解。Escalona等^[23]研究了快速消费品分销中考虑不同服务水平的LIP,建立了MINLP规划模型,并设计了一种启发式算法。Mousavi等^[24]研究了季节性多产品分销网络设计中的多周期LIP,建立了MINLP模型,并设计了一种改进的果蝇优化算法(fruit fly optimization algorithm)进行求解。Ahmadi-Javid和Hoseinpour^[25]研究了多商品分销网络中具有价格敏感需求的利润最大化LIP,建立了MINLP模型,并设计了拉格朗日松弛启发式算法进行求解。还有Wheatley等^[26]研究了服务备件物流网络设计中具有服务需求约束的LIP,建立了MINLP模型,并设计了一种基于逻辑的Benders分解(logic-based benders decomposition)算法进行求解。

综上所述,现有研究均针对分销网络中的LIP,尚缺乏对应急物流领域LIP的研究。而应急设施选址、应急物资储备和保障需要考虑一些特殊因素,如应急设施的日常运营成本、应急物资品类特征、多情景突发事件的随机性、灾后响应速度、灾后需求的多阶段性和日常需求的随机性、储备库的容量限制和库存状态更新、应急条件下的协同定位等,因此有必要对应急物流网络中的LIP进行深入研究。

与以往研究不同的是,本文针对大规模突发事件应急血液保障问题,考虑应急血液保障特性,以灾后应急血液保障时效性最高及日常条件下血

液战略储备库运营总成本最低为目标,基于 MIN-LP 方法建立了一个考虑多情景、多阶段、多血型、随机需求、库存补充提前期、容量限制及协同定位等因素的血液战略储备库多目标 LIP 优化模型. 根据该模型的特点,设计了一种基于小生境技术的多目标 NSGA-II 算法进行求解. 该算法在得到 Pareto 前沿的同时,决策者可根据实际需要和偏好权衡应急血液保障成本与保障效果,在 Pareto 前沿面上选择恰当的血液战略储备库选址—库存决策方案.

1 国家血液战略储备库 LIP 优化模型

1.1 问题描述

设置血液战略储备库的主要目的是在大规模突发事件发生后能提供及时高效的血液保障,即追求灾后应急响应的时效性最大. 由于引发大量血液需求的突发事件发生概率较小,必须考虑血液战略储备库在日常条件下的运营成本. 此外,为了实现平战结合,血液战略储备库通常是在既有的省级血液中心基础上改扩建而成,因此必须考虑改扩建的固定成本以及改扩建后库存状态变化引起的日常运营成本增量. 由于无法准确得知不同地区发生不同类型不同严重程度突发事件的概率,本文采用情景分析方法和期望需求量来表示灾后应急血液需求情形. 而在日常条件下,各省级血液中心的血液需求量可根据历史数据拟合得到.

血液是典型的稀缺易腐资源,为了避免过期报废的发生,各血液战略储备库的血液储备量受所在地的血液轮换更新能力限制. 储备库对每种血液制品都有轮换更新能力上限,在血液出库后库存可以进行补充. 在应急条件下,血液储备库的血液采集储备能力受限,而需求却急剧增加,因此有必要考虑血液战略储备库之间的协同定位,即允许多个储备库服务于同一个需求点以满足受灾地的血液需求. 此外,不同突发事件对应急血液的需求量不同,且应急血液需求具有多阶段性,即救援期不同阶段的应急血液需求量不同^[1]. 在确定了各阶段的应急血液需求量(可参考文献[1]中

提出的非常规突发事件应急血液需求预测方法)之后,即可进行血液战略库的选址决策.

上述问题可以看成是一个考虑多情景、多阶段、多血型、随机需求、容量限制及协同定位的血液战略储备库多目标 LIP,需要解决的问题是:建立多少个血液战略储备库? 建在何处? 应急条件下受灾地的血液需求量如何在各个储备库之间进行分配? 各个储备库应该储备多少血液?

1.2 符号说明

1) 集合

- M : 突发事件情景集合, $m \in M$;
- I : 应急血液需求点集合, $i \in I$;
- J : 血液战略储备库候选地集合, $j \in J$;
- N : 应急血液需求阶段集合, $n \in N$;
- K : 血型集合, $k \in K$.

2) 参数

- χ : 血液战略储备库规划期时长;
- $t_{n, n+1}^s$: 应急血液相邻需求阶段的开始时间间隔;
- p_{im} : 需求点 i 在规划期内发生 m 情景突发事件的概率;
- v_{imk}^n : 受灾地 i 发生 m 情景突发事件时在 n 阶段对 k 型血的期望需求量;
- C_{jk} : 血液战略储备库候选地 j 对 k 型血的储备能力上限;
- ρ : 血液库存补充系数,表示每天的库存补充量与储备能力上限的比值;
- L : 血液库存补充提前期;
- h_j : 血液战略储备库 j 的单位血液库存持有成本;
- T_i : 需求点 i 的应急血液调剂时限;
- d_{ji} : 候选地 j 到需求点 i 的距离;
- t_{ji} : 候选地 j 到需求点 i 的应急血液调剂耗时,包括应急血液调剂准备耗时 t_j 和运输时间 d_{ji}/V_{ji} ,其中 d_{ji} 和 V_{ji} 分别表示候选点 j 到需求点 i 的距离和运输速度;
- θ : 与血液库存成本相关的权重因子;
- λ : 与血液轮换更新成本相关的权重因子;
- s_{jk} : 血液战略储备库 j 为应对突发事件的 k 型血安全库存量;
- W : 一个很大的正数.

3) 变量

X_j : 0-1 变量, 表明是否在候选地 j 建立储备库;

x_{jimk}^n : 受灾地 i 发生 m 情景突发事件时在 n 阶段对 k 型血的需求由储备库 j 供应的数量;

S_{jk} : 储备库 j 的 k 型血最大库存量(中间变量);

Q_{jk1} : 血液中心 j 未建储备库时对 k 型血的采血批量(中间变量);

Q_{jk2} : 血液中心 j 建立储备库后对 k 型血的采血批量;

q_{jkm}^n : m 情景突发事件下储备库 j 在 n 阶段期初可用的 k 型血库存量(中间变量)。

1.3 库存成本分析

将既有的血液中心改扩建为血液战略储备库, 需增加一个安全库存以应对可能发生的应急血液需求的不确定性, 则储备库的库存容量、安全库存、血液采集批量均会发生变化, 建模时需要计算由于建设血液战略储备库所支付的额外成本, 包括改扩建的固定成本、改扩建引发的新增库存持有成本、新增安全库存持有成本以及新增血液轮换更新成本。

1) 设立血液战略储备库之前的运营成本分析

设血液战略储备库候选地 j 的血液中心的血液日需求量服从相互独立的正态分布 $N(\mu_{jk}, \sigma_{jk}^2)$ [27-29] 采用 (Q, s) 库存策略, 库存补充提前期为 L 天, 则血液战略储备库候选地 j 的血液中心安全库存量、订货点、平均库存量分别为

$$ss_{jk} = z_{jk} \sqrt{L\sigma_{jk}}, \forall j \in J, k \in K \quad (1)$$

$$R_{jk} = L\mu_{jk} + z_{jk} \sqrt{L\sigma_{jk}}, \forall j \in J, k \in K \quad (2)$$

$$I_j = Q_{jk1}/2 + z_{jk} \sqrt{L\sigma_{jk}}, \forall j \in J, k \in K \quad (3)$$

其中 z_{jk} 为储备库 j 中 k 型血的保障水平系数。

设立血液战略储备库之前的血液中心日常周转库存成本为

$$\sum_k (\theta h_j Q_{jk1}/2 + \theta h_j z_{jk} \sqrt{L\sigma_{jk}}) T_{jk}^p + \lambda v(Q_{jk1}), \forall j \in J \quad (4)$$

其中 T_{jk}^p 为 j 地未建储备库时连续两次订购 k 型血的时间间隔, $v(Q_{jk1})$ 为血液中心进行血液库存轮换更新的成本, 且

$$T_{jk}^p = Q_{jk1}/\mu_{jk}, \forall j \in J, k \in K \quad (5)$$

$$v(Q_{jk1}) = g_j + a_j Q_{jk1}, \forall j \in J, k \in K \quad (6)$$

其中 g_j 和 a_j 分别表示血液库存轮换更新的固定成本和变动成本。

令式(4)除以 T_{jk}^p , 可得成本率为

$$\sum_k \theta h_j Q_{jk1}/2 + \theta h_j z_{jk} \sqrt{L\sigma_{jk}} + \lambda \mu_{jk} v(Q_{jk1})/Q_{jk1}, \forall j \in J \quad (7)$$

再令式(7)对 Q_{jk1} 求导, 可得

$$Q_{jk1}^* = \sqrt{\frac{2\lambda g_j \mu_{jk}}{\theta h_j}}, \forall j \in J, k \in K \quad (8)$$

因此, 候选地 j 的血液中心建立战备储备库之前的运营成本为

$$\sum_k \sqrt{\frac{\theta h_j \lambda g_j \mu_{jk}}{2}} + \theta h_j z_{jk} \sqrt{L\sigma_{jk}} + \sqrt{\frac{\theta h_j \lambda g_j \mu_{jk}}{2}} + \lambda \mu_{jk} a_j = \sum_k \sqrt{2\theta h_j \lambda g_j \mu_{jk}} + \theta h_j z_{jk} \sqrt{L\sigma_{jk}} + \lambda \mu_{jk} a_j, \forall j \in J \quad (9)$$

2) 建立血液战略储备库之后的运营成本分析

建设血液战略储备库后, 需增加一个安全库存量 s_{jk} 以应对应急血液需求的不确定性, 则安全库存量、订货点、平均库存量分别为

$$ss_{jk2} = s_{jk} + z_{jk} \sqrt{L\sigma_{jk}}, \forall j \in J, k \in K \quad (10)$$

$$R_{jk2} = s_{jk} + L\mu_{jk} + z_{jk} \sqrt{L\sigma_{jk}}, \forall j \in J, k \in K \quad (11)$$

$$I_{j2} = s_{jk} + Q_{jk2}/2 + z_{jk} \sqrt{L\sigma_{jk}}, \forall j \in J, k \in K \quad (12)$$

建立血液战略储备库后的周转库存成本为

$$\sum_k (\theta h_j Q_{jk2}/2 + \theta h_j s_{jk} + \theta h_j z_{jk} \sqrt{L\sigma_{jk}}) T_{jk2}^p + \lambda v(Q_{jk2}), \forall j \in J \quad (13)$$

其中 T_{jk2}^p 为 j 地建为储备库后连续两次订购 k 型血的时间间隔。

对式(13)除以 T_{jk2}^p 可以得到成本率为

$$\sum_k \theta h_j Q_{jk2}/2 + \theta h_j s_{jk} + \theta h_j z_{jk} \sqrt{L\sigma_{jk}} + \lambda \mu_{jk} v(Q_{jk2})/Q_{jk2}, \forall j \in J \quad (14)$$

由于血液战略储备库可能面临大量应急血液需求, 而储备库的容量有限, 故最优血液采集量无法通过求导得到, 需根据如下两个约束来

处理 Q_{jk2} .

1) 限定血液最大采集量. 设 Q_{jk2max} 表示储备库 j 对 k 型血的最大可采集量, 则

$$Q_{jk2} \leq Q_{jk2max}, \forall j \in J, k \in K \quad (15)$$

2) 限定每个储备库的最高服务水平. 设违背库存容量约束的最大概率为 δ , 则

$$Pr(R_{jk} - D_{jk} + Q_{jk2} \leq C_{jk}) = 1 - \delta, \forall j \in J, k \in K \quad (16)$$

其中 D_{jk} 表示采血提前期内的随机需求量.

式(16)可以转化为

$$Q_{jk2} + (z_{jk} + z_{1-\delta}) \sqrt{L} \sigma_{jk} = C_{jk}, \forall j \in J, k \in K \quad (17)$$

为保证该约束满足血液战略储备库已经建立的前提, 将约束改写为

$$Q_{jk2} + (z_{jk} + z_{1-\delta}) \sqrt{L} \sigma_{jk} = C_{jk} X_j, \forall j \in J, k \in K \quad (18)$$

因此, 候选地 j 的血液中心建设血液战略储备库而新增的成本为

$$\begin{aligned} \min Z_j = & \sum_k \{f_j + \chi \theta h_j Q_{jk2} / 2 + \chi \theta h_j s_{jk} + \\ & \chi \theta h_j z_{jk} \sqrt{L T} \sigma_{jk} + \chi \lambda \mu_{jk} v(Q_{jk2}) / Q_{jk2} - \\ & \chi [\sqrt{2 \theta h_j \lambda g_j \mu_{jk}} + \theta h_j z_{jk} \sqrt{L T} \sigma_{jk} + \lambda \mu_{jk} a_j] X_j \\ = & \sum_k \{f_j + \chi \theta h_j Q_{jk2} / 2 + \chi \theta h_j s_{jk} + \\ & \chi \lambda \mu_{jk} v(Q_{jk2}) / Q_{jk2} - \chi [\sqrt{2 \theta h_j \lambda g_j \mu_{jk}} + \lambda \mu_{jk} a_j] X_j \end{aligned} \quad (19)$$

1.4 模型构建

至此, 可建立国家血液战略储备库 LIP 优化模型 MP1 如下

MP1:

$$\min Z_1 = \sum_m \sum_n \sum_i \sum_j \sum_k P_{im} t_{ji} x_{jimk}^n \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \min Z_2 = & \sum_j \sum_k \{f_j + \chi \theta h_j Q_{jk2} / 2 + \chi \theta h_j s_{jk} + \\ & \chi \lambda \mu_{jk} v(Q_{jk2}) / Q_{jk2} - \\ & \chi [\sqrt{2 \theta h_j \lambda g_j \mu_{jk}} + \lambda \mu_{jk} a_j] X_j \end{aligned} \quad (21)$$

$$\text{s. t. } \sum_i x_{jimk}^n \leq q_{jkm}^n X_j, \forall m \in M, n \in N, j \in J, k \in K \quad (22)$$

$$q_{jkm}^n \leq s_{jk} \leq S_{jk} \leq C_{jk}, \forall n \in N, j \in J, m \in M, k \in K \quad (23)$$

$$q_{jkm}^n = \min(q_{jkm}^{n-1} - \sum_i x_{jimk}^{n-1} + t_{n, n+1}^s C_{jk} \rho, q_{jkm}^1), \forall j \in J, k \in K, m \in M, n \geq 2 \quad (24)$$

$$q_{jkm}^1 = s_{jk}, \forall j \in J, k \in K \quad (25)$$

$$\sum_j x_{jimk}^n = v_{imk}^n, \forall s \in S, i \in I, m \in M, k \in K, n \in N \quad (26)$$

$$x_{jimk}^n \leq \frac{\max\{T_i - t_{ji}, 0\}}{T_i - t_{ji}} W, \forall s \in S, k \in K, i \in I, j \in J \quad (27)$$

$$x_{jimk}^n \leq X_j W, i \in I, j \in J, m \in M, k \in K, n \in N \quad (28)$$

$$Q_{jk2} + (z_j + z_{1-\delta}) \sqrt{L} \sigma_{jk} = C_{jk} X_j, \forall j \in J, k \in K \quad (29)$$

$$Q_{jk2} \leq Q_{jk2max}, \forall j \in J, k \in K \quad (30)$$

$$x_{jimk}^n \geq 0, \forall i \in I, j \in J, m \in M, k \in K, n \in N \quad (31)$$

$$X_j \in \{0, 1\}, \forall j \in J \quad (32)$$

目标式(20)表示突发事件发生后各需求点所需应急血液的调剂时间加权和最短, 用来表示灾后应急血液保障的时效性; 式(21)表示建立血液战略储备库的系统总成本最小. 约束式(22)表示候选地在各需求阶段负责保障的各型血的期望需求量不超过其在该阶段期初拥有的改型血库存量; 式(23)表示候选地在各需求阶段期初可用的各型血库存量不超过安全库存量及储备能力上限; 式(24)为候选地在各需求阶段期初可用的各型血库存量的表达式; 式(25)表示候选地在需求阶段1初期的各型血可用库存量等于安全库存量; 式(26)表示各应急血液需求点的需求必须得到满足; 式(27)为应急血液调剂时限约束; 式(28)表示只能从已开设的血液战略储备库调剂血液; 式(29)表示满足血液保障水平的应急血液采集量表达式; 式(30)为应急血液采集量上限约束; 式(31)为非负变量约束; 式(32)为0-1变量约束.

1.5 模型分析

分析模型 MP1, 有如下性质:

定理1 若 $s_{jk} + z_{jk} \sqrt{L} \sigma_{jk} + \sqrt{\frac{2 \lambda g_j \mu_{jk}}{\theta h_j}} \leq C_{jk}$, 则

$$Q_{jk2}^* = \sqrt{\frac{2 \lambda g_j \mu_{jk}}{\theta h_j}}; \text{ 否则 } Q_{jk2}^* = \min [Q_{jk2max}, C_{jk} X_j - (z_{jk} + z_{1-\delta}) \sqrt{L T} \sigma_{jk}].$$

证明 令 $\frac{\partial z_2}{\partial Q_{jk2}} = 0$ 得 $Q_{jk2}^* = \sqrt{\frac{2\lambda g_j \mu_{jk}}{\theta h_j}}$. 若 $s_{jk} + z_{jk} \sqrt{L} \sigma_{jk} + \sqrt{\frac{2\lambda g_j \mu_{jk}}{\theta h_j}} \leq C_{jk}$ 成立, 表示储备库 j 满足容量约束, 即等同于无容量约束问题, 则最小值在唯一的正极大值点处产生, 即 $Q_{jk2}^* = \sqrt{\frac{2\lambda g_j \mu_{jk}}{\theta h_j}}$. 否则, 最小值在定义域边界产生. 由式 (29) 和式 (30) 可得 Q_{jk2} 的定义域为连续空间 $[0, \min(Q_{jk2\max}, C_{jk} X_j - (z_{jk} + z_{1-\delta}) \sqrt{L} \sigma_{jk})]$ 则最小值为 $Q_{jk2}^* = \min[Q_{jk2\max}, C_{jk} X_j - (z_{jk} + z_{1-\delta}) \sqrt{L} \sigma_{jk}]$.

定理 2 令 $I^i = \{j | \partial_{ij} = 1, \forall j\}$ 为可在应急调剂时限内覆盖需求点 i 的储备库集合. 按调剂时间 $t_{ij} (j \in I^i)$ 升序排列 I^i 内的储备库, 得 $\{j_1, j_2, \dots, j_r | j \in I^i\}$. 在开设储备库既定的情况下, 最优的分配方案为按照 j_1, j_2, \dots, j_r 的顺序依

次供应需求点 i .

证明 开设储备库既定的情况下, 决策方案的系统成本也已固定. 此时, 将需求点 i 指派给最近的有救灾库存保有量的储备库可以提高应急血液保障的时效性.

2 模型求解

2.1 算法流程

模型 $MP1$ 是一个多目标 MINLP 模型, 属于 NP-hard 问题, 精确求解很困难, 在此设计一种基于小生境技术的多目标 NSGA-II 算法, 如图 1 所示. 该算法可求得 Pareto 前沿解集, 以便决策者根据实际情况及偏好在一簇 Pareto 解中选择合适的优化方案. 该算法操作步骤如下:

1) 染色体编码/解码

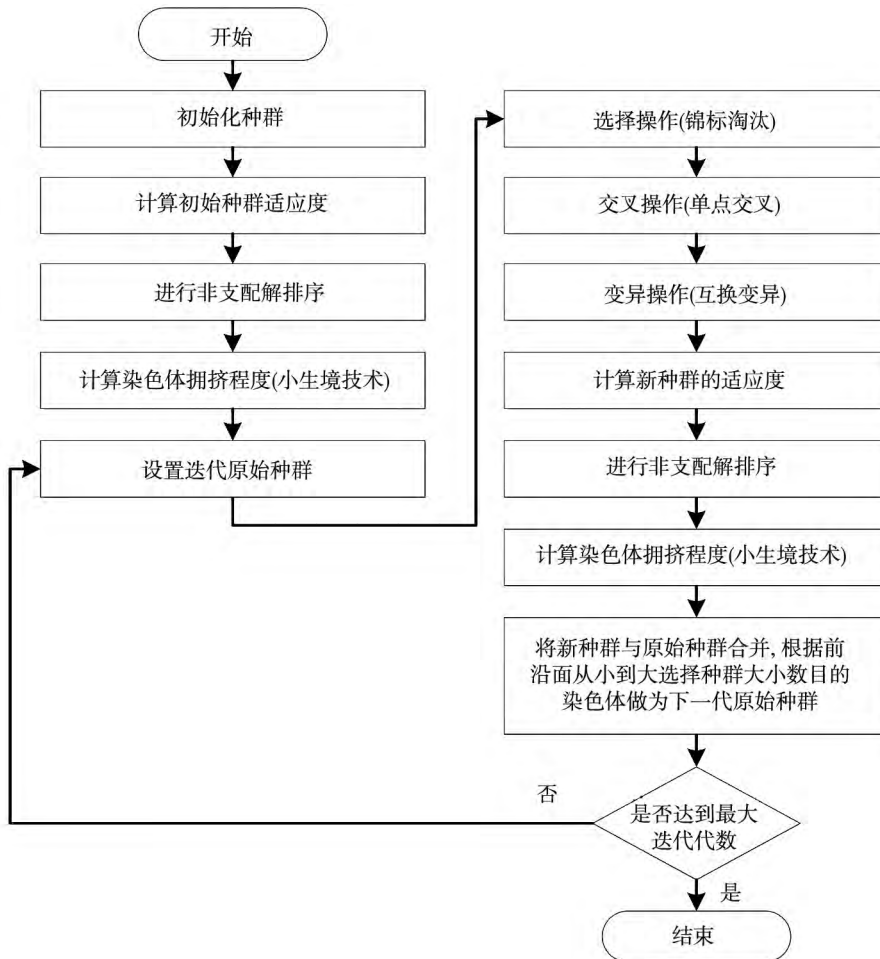


图 1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flowchart

模型 MP1 需要求解选址变量 X_j 、分配变量 x_{ijmk}^n 、血液中心建立血液战略储备库前后的采血批量 Q_{jk1} 及 Q_{jk2} 。 Q_{jk1}^* 可通过式 (8) 计算, Q_{jk2}^* 可通过定理 1 所述方法求解。由定理 2 可知, 开设储备库既定时, 最优分配决策方案也随之确定。假设我国建立血液战略储备库的候选设施点和应急血液需求点均为大陆地区 31 个省/自治区/直辖市所在地的血液中心或中心血站。因此, 采用 0-1 整数编码策略, 令每条染色体上的基因位数为 31, 每个基因随机取 0 或 1, 表示储备库的开设情况。

染色体中分配变量 x_{ijmk}^n 的解码过程为: 对于需求点 i , 找出该条染色体中 I^i 内的按调剂时间升序排列的开设设施 $\{j_a, j_b, \dots, j_n \mid j \in I^i, X_j = 1\}$ 。则有

$$x_{j_a i m k}^n = \min(v_{i m k}^n, q_{j_a k m}^n), \forall i \in I, \\ j \in \{j_a, j_b, \dots, j_n \mid j \in I^i, X_j = 1\}, \quad (33) \\ \forall m \in M, k \in K, n \in N$$

其中 $q_{j_a k m}^n$ 可通过式 (24) 和式 (25) 求得。

若 $x_{j_a i m k}^n = v_{i m k}^n$, 则需求点 i 的分配变量 x_{ijmk}^n 求解完毕; 否则

$$x_{j_b i m k}^n = \min(v_{i m k}^n - x_{j_a i m k}^n, q_{j_b k m}^n), \forall i \in I, \\ j \in \{j_a, j_b, \dots, j_n \mid j \in I^i, X_j = 1\}, \quad (34) \\ m \in M, k \in K, n \in N$$

依此计算, 直至 $\sum_j x_{ijmk}^n = v_{i m k}^n, \forall i \in I, j \in \{j_a, j_b, \dots, j_n \mid j \in I^i, X_j = 1\}, m \in M, k \in K, n \in N$, 或 j_n 中的应急血液储备分配完毕。

2) 初始化种群

采用 Matlab 软件内置函数 Randint 随机均匀产生染色体, 种群规模为 $popsiz$ e。因为有应急调剂时限约束式 (27) 的存在, 初始种群中代表可行解的染色体数量可能不够丰富。此时, 可以观察应急调剂时限覆盖矩阵 ∂_{ij} 对 I^i 内元素稀少的需求点进行处理, 以改进初始种群的质量。处理规则为: 若某条染色体中 $I^i = \emptyset$, 则在 $\{j_1, j_2, \dots, j_n \mid j \in I^i\}$ 中随机抽取一个候选储备库, 将染色体上的该基因位改为 1。例如, 若应急调剂时限为 8h, 可覆盖需求点 31 的候选储备库只有 26 和 31。若某条染色体中第 26 和第 31 号基因位都为 0, 则在

两者中随机选取 1 个基因将其设为 1。

3) 非支配解排序

染色体适应度评价后, 即可对目标函数值 Z_1 和 Z_2 进行非支配解排序。由于种群中可能存在有可行解, 因此需对不满足约束的染色体进行惩罚, 保证最终得到的优化结果都为可行解。

首先, 对每条非可行解染色体 p 计算其未满足需求量 $lost_p$

$$lost_p = \sum_i \sum_m \sum_k \sum_n v_{i m k}^n - \sum_i \sum_j \sum_m \sum_k \sum_n x_{ijmk}^n \quad (35)$$

然后, 根据 $lost_p$ 计算惩罚后的目标函数值

$$Z_1 = Z_1 + \kappa \times lost_p \quad (36)$$

$$Z_2 = Z_2 + \delta \times lost_p \quad (37)$$

其中 κ 、 δ 分别为目标函数值 Z_1 和 Z_2 的惩罚因子, 惩罚力度与需求未满足量成正比。由于血液保障关系到伤员生命安全, 缺血造成的后果会很严重, 所以 κ 、 δ 的取值应较大。

定义 1 对于种群中的任意两条染色体 p 和 q , 若满足 $\forall z, Z_z^p \leq Z_z^q, z \in \{1, 2\}$, 且 $\exists z, Z_z^p < Z_z^q, z \in \{1, 2\}$, 则称 p 支配 q , p 为非支配解, q 为支配解。Pareto 最优解, 也叫 Pareto 非支配解, 是不被任何其他可行解支配的解^[30]。

根据该定义, 对种群中的染色体进行非支配解排序, 计算流程如下:

步骤 1 令 i 表示前沿面, S_p 表示由染色体 p 支配的所有染色体集合, n_p 表示染色体 p 支配其他染色体的数量, F_i 表示第 i 前沿面染色体集合, 并初始化 $i = 1, S_p = \varphi, n_p = 0, F_i = \varphi$;

步骤 2 对种群中的每条染色体 q , 若 p 支配 q , 则令 $S_p = S_p \cup \{q\}$; 若 q 支配 p , 则令 $n_p = n_p + 1$;

步骤 3 若 $n_p = 0$, 表示没有任何染色体支配染色体 p , 则 p 即为种群中的最优染色体, 属于第 1 前沿面, 令其秩 $p_{rank} = 1$, 更新第 1 前沿面集合, 即令 $F_1 = F_1 \cup \{p\}$;

步骤 4 若 $F_i \neq \varphi$, 则令 $Q = \varphi$, 用来存储第 $i + 1$ 前沿面所对应的染色体; 否则, 算法结束;

步骤 5 遍历前沿面集合 F_i 中的每条染色体 p , 对于集合 S_p 中每条染色体 q , 令 $n_q = n_q - 1$ 。

若 $n_q = 0$ 表示在后续前沿面中没有任何染色体支配 q 则令 $q_{rank} = i + 1, Q = Q \cup \{q\}$;

步骤 6 令 $i = i + 1, F_i = Q$ 返回步骤 3.

4) 小生境技术

在遗传算法操作中,具有高适应度值的染色体有更大的生存概率,当某个染色体的适应值大大高于种群的平均适应值时,它在种群中的数量会急剧增加甚至支配整个种群.该状态一旦产生,通过交叉操作难以生成新的染色体,而偶尔的随机变异不能保证很快跳出这种状态,从而导致搜索过程徘徊不前,产生早熟收敛现象.为了克服这一缺点,将小生境(niche)技术引入遗传算法,通过计算染色体周围的拥挤程度来计算适应度的降低程度以保证算法的多样性,其计算流程如下:

步骤 1 对任意前沿面 F_i , 设其有 u 个染色体,初始化 $F_i(d_j) = 0$, 其中 j 表示 F_i 中第 j 号染色体;

步骤 2 针对每个目标函数 z , 基于该目标对前沿面 F_i 进行排序, 设排序结果为 $S = sort(F_i, z)$. 对小生境边界的染色体赋予最大距离值, 即令 $I(d_1) = \infty, I(d_u) = \infty$;

步骤 3 对于非小生境边界上的染色体, 令其表现距离 $I(d_k) = I(d_k) + \frac{S_z(k+1) - S_z(k-1)}{Z_z^{\max} - Z_z^{\min}}$, 其中 $k \in [2, \mu - 1]$, $S_z(k)$ 表示排序结果中第 k 个染色体对应的第 z 个目标的值.

5) 遗传操作

采用锦标赛淘汰赛对染色体进行选择操作, 并采用单点交叉和互换变异操作.

6) 终止条件

当遗传算法迭代达到最大替代代数时, 算法终止并输出结果.

2.2 算法性能评估

可根据收敛性、稳定性、多样性等指标评估多目标优化算法的性能. 收敛性和稳定性可通过算法收敛代数进行观察, 而多样性可通过 Pareto 解的数量及多样性指标 Δ 来度量.

定义 2 将算法获得的所有非劣解按某个目标函数值的大小有序地分布在目标空间上, 设 ω_m 为相邻两点间的距离, $\bar{\omega}$ 为 ω_m 的均值, $\omega_\alpha, \omega_\beta$ 分

别为算法获得的边界解与相应极端解间的距离, n 为非劣解的个数, 则多样性指标 Δ 为

$$\Delta = \frac{\omega_\alpha + \omega_\beta + \sum_{m=1}^{n-1} (\omega_m - \bar{\omega})}{\omega_\alpha + \omega_\beta + (n-1)\bar{\omega}} \quad (38)$$

Δ 反应了非劣解是否能均匀地分布在 Pareto 前沿面上. 当算法获得的非劣解均匀地分布在均衡面上时, 有 $\omega_\alpha = 0, \omega_\beta = 0$, 所有 $\omega_m = \bar{\omega}$, 则 $\Delta = 0$.

极端解指某一目标函数值最大而其他目标函数值最小的解. 两个极端解可通过如下方法计算:

极端解 1 系统时效性最优, 成本最劣. 即所有候选地均开设血液战略储备库的情况;

极端解 2 系统时效性最劣, 成本最优. 可通过单目标遗传算法(GA)求解模型 MP2 得到近似最优解.

MP2:

$$\begin{aligned} \min Z_2 = & \sum_k \sum_j \{f_j + \chi\theta h_j Q_{jk2}/2 + \chi\theta h_j s_{jk} + \\ & \chi\lambda\mu_{jk}v(Q_{jk2})/Q_{jk2} - \\ & \chi[\sqrt{2\theta h_j \lambda g_j \mu_{jk}} + \lambda\mu_{jk}a_j]\} X_j \quad (39) \\ \text{s. t. 式(22) ~ 式(32)} \end{aligned}$$

模型 MP2 也是个 MINLP 模型, 可采用单目标 GA 进行求解. 单目标 GA 的编码/解码方式、交叉、变异算子均与上述多目标 NSGA-II 算法相同, 区别在于:

1) 不用非支配解排序和基于小生境技术的拥挤度计算;

2) 适应度评价: 设每条染色体 p 对应的目标函数值为 Z_{2p} , 则其适应度为 $f_p = \xi/Z_{2p}$, 其中 $\xi > 0$ 为常数. 此外, 计算适应度值时, 也要对不满足约束条件的染色体进行惩罚, 即令 $Z_{2p} = Z_{2p} + \delta \times lost_p$.

3) 轮盘赌与精英保留策略: 为加速算法的收敛, 通过轮盘赌进行选择, 并采用精英保留策略将每代中最优染色体直接替换最差染色体进入下一代染色体种群中.

3 算例分析

3.1 算例构造

为提高我国应对大规模突发事件的应急血液

保障能力,拟规划建设国家血液战略储备库,假设规划期为30年.鉴于大规模地震是最具代表性的可能造成大量应急血液需求的突发事件,在此根据文献[31]提出的我国大陆地区地震灾害人口危险性计算方法来估算各地在规划期内发生有应急血液需求的突发事件的相对概率,再根据突发事件严重程度将应急血液需求分为高、中、低三种情景,通常越严重突发事件的发生概率越小,据此随机生成规划期内各地发生三种情景突发事件的概率(假设服从参数 λ 分别为0.01、0.02和0.05的指数分布).在此参照“5.12”汶川地震后三天内成都血液中心的血液出库量^[1]设定情景1的应急血液需求量,并假设情景2和情景3的需求量

分别为情景1的需求量的50%和20%.再根据表1所示各地人口血型分布比例^[1]估计各种血型的需求量.此外,假设突发事件救援期分为紧急救援和后续救援这两个阶段,开始时间间隔3天.输血治疗大多发生在紧急救援阶段,而后续治疗的血液需求量相对减少^[1],在此假设后续救援阶段对各种血液制品的需求量为紧急救援阶段的70%.

假设各血液战略储备库候选地的应急血液调剂准备耗时 t_j 均为3h,运输距离 d_{ji} 可根据表1所示各地经纬度进行计算,运输速度 V_{ji} 均为800km/h,应急血液调剂时限为8h,单位血液库存持有成本为10元/U.

表1 各地人口血型分布比例

Table 1 Distribution of blood group at candidate locations

编号	候选地	位置		血型比例(%)			
		经度	纬度	A	B	O	AB
1	北京	116.53	39.55	27	32	29	12
2	天津	117.13	38.15	26	36	27	11
3	上海	121.4	31.2	31	29	30	10
4	重庆	106.53	29.55	33	24	35	8
5	石家庄	114.47	38.07	25.11	35.13	29.55	10.21
6	太原	112.48	37.95	25.02	34.6	30.57	9.81
7	沈阳	123.48	41.93	27.28	32.31	30.4	10.01
8	长春	125.37	44.03	27.04	31.8	31.63	9.53
9	哈尔滨	126.68	45.77	26.38	32.96	30.88	9.78
10	南京	118.82	32.08	27.67	30.06	33.35	8.92
11	杭州	120.15	30.27	30.56	26.39	34.61	8.44
12	合肥	117.2	32	32.57	24.63	34.37	8.43
13	福州	119.28	26.07	28.05	23.7	42.12	6.13
14	南昌	115.92	28.77	33.28	23.56	35.01	8.15
15	济南	117.03	36.65	27.65	33.18	28.25	10.92
16	郑州	113.65	34.77	26.89	32.56	30.64	9.91
17	武汉	114.25	30.58	32.61	25.12	33.5	8.77
18	长沙	113.03	28.2	35.26	21.44	35.56	7.74
19	广州	113.28	23.13	25.15	26.04	42.85	5.96
20	海口	110.28	20	23.57	33.23	35.06	8.14
21	成都	104.05	30.62	32.33	24.04	35.63	8
22	贵阳	106.75	26.58	29.9	27.61	33.69	8.8
23	昆明	102.65	25.05	32.11	26.72	31.66	9.51
24	西安	108.93	34.22	28.21	29.04	34.11	8.64
25	兰州	103.82	36.15	26.45	30.9	33.99	8.66
26	西宁	101.78	36.6	22.4	36.57	32	9.03
27	柳州	109.35	24.6	22.81	26	46	5.19
28	呼和浩特	111.7	41.07	24.86	33.25	32.96	8.93
29	拉萨	91.08	29.63	20.1	34.98	37.99	6.93
30	银川	106.25	38.48	28	29.08	34.36	8.56
31	乌鲁木齐	87.57	43.82	28.65	29.73	32.32	9.3

3.2 计算结果

根据遗传算法基本参数的设置原则^[32]和多次实验,上文基于小生境技术的多目标 NSGA-II 算法参数设置如下:种群规模 $popsiz e = 400$,最大迭代次数 $max\ gen = 200$,交叉概率 $p_c = 0.9$,变异概率 $p_m = 0.05$.采用 Matlab 语言编程实现上述算法,运行平台为 Intel (R) Pentium2 (R) CPU G3260T@ 2.90GHz,4GB 内存,64 位 Windows 10 操作系统的 PC 机,运行时间为 54.79min.算法终止时,所有解均已收敛到 Pareto 前沿面上,共有 254 个不同 Pareto 解,分布如图 2 所示,表 2 给出了部分较典型的 Pareto 解.

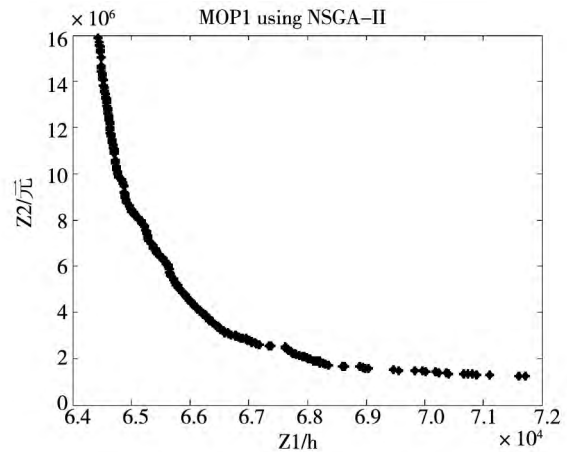


图 2 Pareto 前沿面

Fig. 2 Pareto frontier

表 2 部分 Pareto 解

Table 2 Partial Pareto solutions

典型解	开设设施	开设设施数	目标值 1	目标值 2
1	1 2 4 - 11 ,13 ,14 ,16 - 21 23 24 26 - 31	26	64 555.48	13 448 723.85
2	2 4 - 7 9 ,11 - 14 ,16 ,17 ,19 21 - 24 26 - 31	23	64 772.34	9 997 391.25
3	2 4 - 6 8 9 ,11 ,13 ,14 ,16 ,17 ,19 23 24 26 - 31	20	65 366.30	6 894 378.31
4	2 4 5 8 9 ,12 - 14 23 24 26 - 31	16	66 026.63	4 398 241.95
5	2 4 6 9 ,12 ,14 23 26 27 28 29 30 31	13	66 504.96	3 339 527.04
6	2 6 8 ,12 ,14 22 23 26 27 30 31	11	67 793.28	2 218 533.07
7	5 8 ,12 ,14 20 22 23 26 30 31	10	68 260.45	1 788 420.44
8	5 8 ,12 ,14 20 23 26 30 31	9	68 947.55	1 632 377.26
9	5 ,12 ,14 20 23 26 30 31	8	70 412.01	1 354 306.13
10	5 ,12 ,14 23 26 29 31	7	71 607.21	1 238 505.57

由图 2 可知,系统总成本与系统时效性这两个目标是悖反的,且成本目标的波动性相对较大.在 Pareto 前沿面的左侧,当储备库建设数量较多,系统时效性较高时,略微降低系统的时效性,可大幅度减少系统总成本;而在 Pareto 前沿面的右侧,当储备库建设数量较少时,降低系统总成本引起的系统时效性损耗过大.

3.3 算法性能分析

多样性指标 Δ 的计算需要计算两个极端解:

1) 极端解 1: 成本最劣、时效性最优

显然所有候选地均开设血液战略储备库即为

成本最劣、时效性最优的决策方案.极端解 1 的目标函数值为 [64 361.206 0 ,17 239 297.733 0],决策方案如表 3 所示.

2) 极端解 2: 成本最优、时效性最劣

模型 MP2 的最优解即为极端解 2,它反应了建立储备库的最低成本要求.采用上文所述单目标 GA 求解 MP2,连续运行 10 次,取其中最优的解作为近似极端解 2,其目标函数值为 [74 419.606 6 ,1 084 939.224 3],决策方案如表 4 和图 3 所示.

表3 成本最劣、时效性最优的决策方案

Table 3 The solution with the highest cost and the shortest relief time

编号	储备库	采血批量			
		A	B	O	AB
1	北京	26.27	28.60	27.23	17.51
2	天津	20.94	24.64	21.34	13.62
3	上海	30.50	29.50	30.00	17.32
4	重庆	35.22	30.04	36.28	17.34
5	石家庄	18.24	21.57	19.79	11.63
6	太原	11.71	13.77	12.94	7.33
7	沈阳	16.97	18.47	17.92	10.28
8	长春	16.45	17.84	17.79	9.77
9	哈尔滨	19.12	21.38	20.69	11.64
10	南京	16.99	17.71	18.65	9.65
11	杭州	18.62	17.30	19.81	9.78
12	合肥	15.56	13.53	15.98	7.92
13	福州	16.13	14.83	19.76	7.54
14	南昌	14.79	12.44	15.17	7.32
15	济南	15.67	17.17	15.84	9.85
16	郑州	17.39	19.13	18.56	10.56
17	武汉	20.39	17.90	20.67	10.58
18	长沙	17.99	14.03	18.06	8.43
19	广州	20.41	20.76	26.63	9.93
20	海口	7.37	8.75	8.99	4.33
21	成都	24.36	21.01	25.58	12.12
22	贵阳	12.81	12.48	13.78	7.04
23	昆明	16.41	14.97	16.29	8.93
24	西安	17.65	17.90	19.40	9.77
25	兰州	11.16	12.06	12.65	6.38
26	西宁	8.03	10.26	9.60	5.10
27	柳州	14.07	15.02	19.99	6.71
28	呼和浩特	9.64	11.15	11.10	5.78
29	拉萨	3.83	4.99	5.26	2.25
30	银川	8.53	8.69	9.45	4.72
31	乌鲁木齐	10.78	10.98	11.45	6.14

表4 成本最优、时效性最劣的决策方案

Table 4 The solution with the lowest cost and the longest relief time

编号	储备库	采血批量			
		A	B	O	AB
14	南昌	14.79	12.44	15.17	7.32
16	郑州	17.39	19.13	18.56	10.56
20	海口	7.37	8.75	8.99	4.33
24	西安	17.65	17.90	19.40	9.77
26	西宁	8.03	10.26	9.60	5.10
28	呼和浩特	9.64	11.15	11.10	5.78

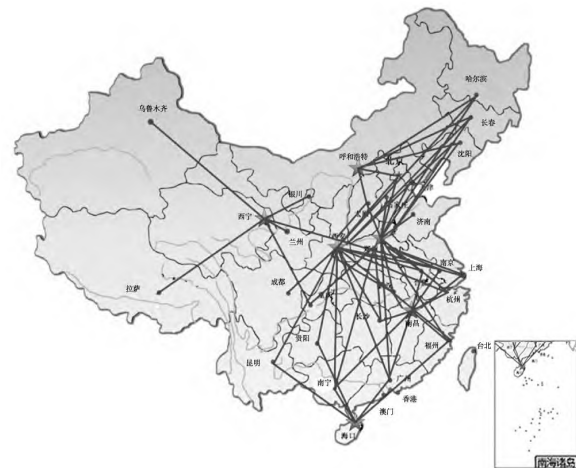


图3 成本最优、时效性最劣的选址—分派方案

Fig. 3 Location-allocation scheme with the lowest cost and the longest relief time

在此基础上,根据算法种群规模及最大迭代次数设计4组不通过规模的算例,分析不同迭代次数下算法的各个性能指标,如表5和图4所示。可以看出:

1) 各算例均能有效得出 Pareto 前沿解集,收敛代数均小于21代,表明上文 NSGA-II 算法的有效性。

2) 解的质量与种群规模正相关。种群规模越大,产生的候选解越多,Pareto 前沿解集越丰富,解的分布也越均匀。

3) 解的质量与迭代次数正相关。多组算例及同一算例中不同迭代次数的计算指标结果表明,迭代次数越多,Pareto 前沿解集越丰富,且解的分布越均匀。

4) 随着迭代次数增加,解的质量改善空间下降,但计算时间显著增加。4组算例均表明,无论是解的数量还是解的分布,在迭代初期解的质量提高明显,而到了迭代后期,解的质量提高有限。以算例1为例,从第5代到第100代,不同 Pareto 解的数量从34个增加至249个;但从第100代到第200代,不同 Pareto 解的数量仅从249个增至254个。在算例2中,从第5代到第100代,不同 Pareto 解的数量从23个增加至158个;但从第100代到第200代,不同 Pareto 解的数量仅从158个增至159个, Δ 指标也只下降了0.0008。种群规模为200的3组算例表明,运算时间基本与迭代次数线性正相关。因此,迭代后期解的质量微小

改善将耗费大量的计算时间. 种群规模为 200 的 3 组算例同样也表明了本文提出的算法具有较好的稳定性.

4 结束语

建立国家血液战略储备库对于提高应急血液保障能力的意义重大. 本文考虑大规模突发事件应急血液保障的特性, 以灾后应急血液保障时效性最高及日常条件下血液战略储备库运营总成本最低为目标, 基于 MINLP 方法建立了一个考虑多

情景、多阶段、多血型、随机需求、库存补充提前期、容量限制及协同定位等因素的血液战略储备库多目标选址—库存模型. 通过分析该模型的性质, 设计了一种基于小生境技术的多目标 NSGA-II 算法对问题进行求解. 算例分析结果表明, 该算法能够有效获得 Pareto 前沿, 产生一簇 Pareto 解, 因而决策者可根据偏好与需要权衡运营成本与应急血液保障效果, 在 Pareto 前沿面上选择合适的决策方案.

进一步的研究可考虑血液战略储备库所在地的安全可靠性问题, 在模型中考虑设施中断风险的影响, 并研制更高效的模型求解算法.

表 5 基于小生境技术的多目标 NSGA-II 算法性能测试

Table 5 Performance of multi-objective NSGA-II algorithm based on niche technique

算例	种群规模	最大迭代代数	收敛代数	迭代代数	Pareto 解数量	不同 Pareto 解数量	非支配解层数	计算时间(min)	Δ
1	400	200	21	1	20	20	22	-	-
				5	38	34	8	-	-
				21	400	118	1	-	0.771 3
				70	400	219	1	-	0.766 7
				100	400	249	1	-	0.764 4
				200	400	254	1	54.79	0.761 5
2	200	200	18	1	15	15	19	-	-
				5	29	23	5	-	-
				18	200	75	1	-	0.812 4
				70	200	145	1	-	0.809 6
				100	200	158	1	-	0.807 2
				200	200	159	1	30.86	0.806 4
3	200	100	18	1	15	15	19	-	-
				5	29	23	5	-	-
				18	200	75	1	-	0.812 4
				70	200	145	1	-	0.809 6
				100	200	154	1	14.56	0.808 5
4	200	50	14	1	15	15	19	-	-
				5	29	23	5	-	-
				18	200	75	1	-	0.809 9
				50	200	139	1	6.75	0.809 6

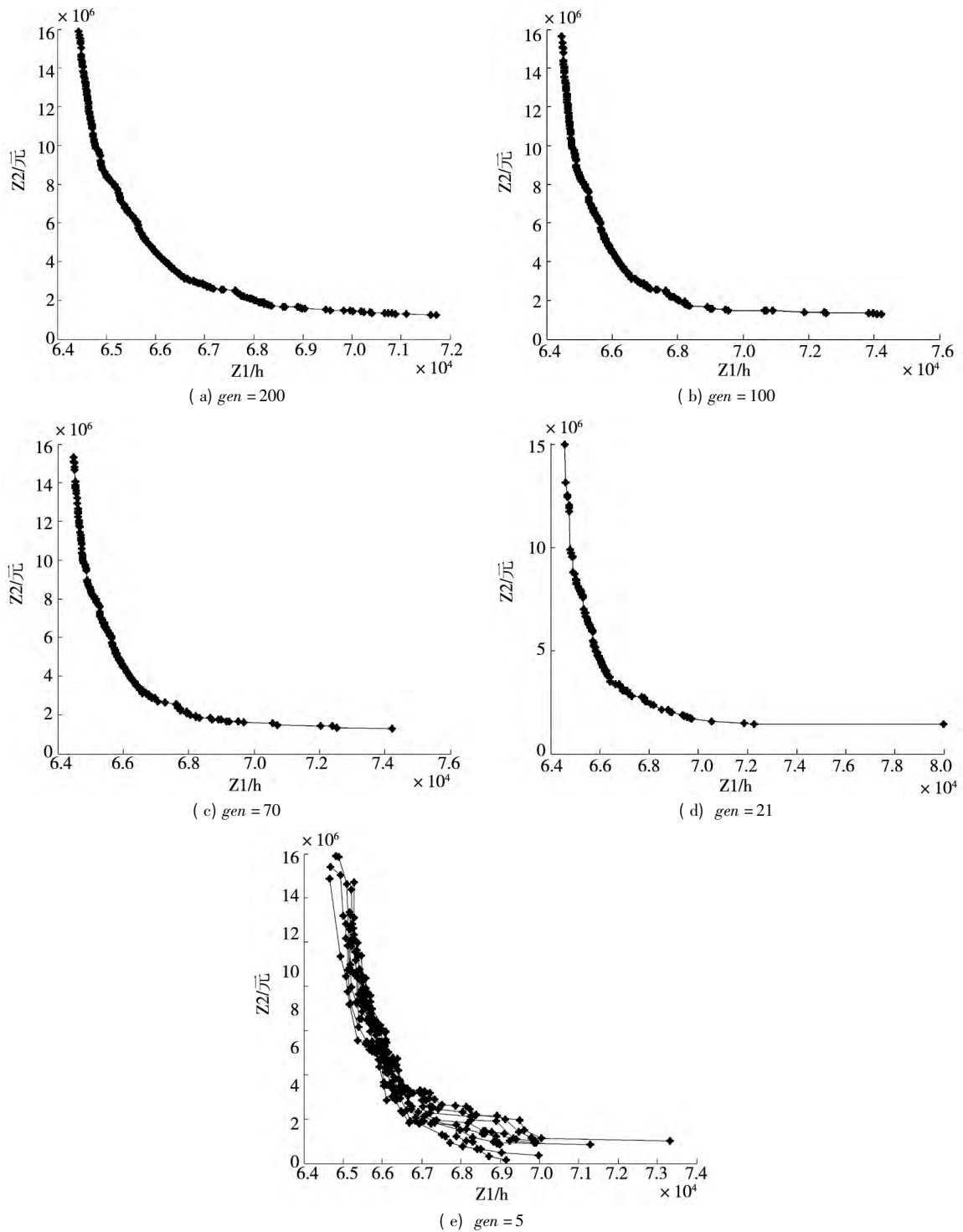


图4 算例1的 Pareto 前沿面

Fig. 4 Pareto frontiers of numerical example 1

参考文献:

[1]马祖军,代颖,王恪铭. 非常规突发事件应急血液保障理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
 Ma Zujun, Dai Ying, Wang Keming. Theory and Methods for Emergency Blood Supply in Unconventional Emergencies [M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)

[2]Healy B. Why We Need a Blood Reserve [N]. The Washington Post, March 29, 2002, Sect. A: 23.

- [3]Doddridge D. National BloodReserve [EB/OL]. Advisory Committee on Blood and Tissue Safety and Availability ,22nd Meeting ,January 2004 , <http://www.hhs.gov/ash/bloodsafety/advisorycommittee/pastmeetings/pastmeetings.html>.
- [4]吴卫星,杨宁,栾尧. 突发事件时血液供应方式的探讨[J]. 中国输血杂志,2006,19(2): 165-167.
Wu Weixing, Yang Ning, Luan Yao. Emergency blood supply mode in emergencies[J]. Chinese Journal of Blood Transfusion, 2006, 19(2): 165-167. (in Chinese)
- [5]郑忠伟,蔡辉,王槲. 应急状态下的紧急血液保障和血液安全[J]. 中国输血杂志,2008,12(8): 571-573.
Zheng Zhongwei, Cai Hui, Wang Shuo. Emergency blood supply and blood safety in emergencies[J]. Chinese Journal of Blood Transfusion, 2008, 12(8): 571-573. (in Chinese)
- [6]黎成,宋斌,吴卫星,等. 紧急状态下血液保障体系研究进展[J]. 人民军医,2008,51(3): 135-136.
Li Cheng, Song Bin, Wu Weixing, et al. State-of-the-art on blood supply system in emergencies[J]. People's Military Surgeon, 2008, 51(3): 135-136. (in Chinese)
- [7]栾建凤,叶东,孙海. 关于战备血液储备的思考[J]. 人民军医,2008,51(3): 131.
Luan Jianfeng, Ye Dong, Sun Hai. Think about strategic blood reserves[J]. People's Military Surgeon, 2008, 51(3): 131. (in Chinese)
- [8]易学明,孙海,李安丽,等. 战备血液储备库建设探讨[J]. 解放军医院管理杂志,2008,15(9): 866-868.
Yi Xueming, Sun Hai, Li Anli, et al. Construction of blood reserve bank for preparedness against war[J]. Hospital Administration Journal of Chinese People's Liberation Army, 2008, 15(9): 866-868. (in Chinese)
- [9]任红,张立福,穆林,等. 军队血站战备血液的储备管理[J]. 解放军医院管理杂志,2014,21(3): 289-290.
Ren Hong, Zhang Lifu, Mu Lin, et al. Blood reserves management for combat readiness in military blood station[J]. Hospital Administration Journal of Chinese People's Liberation Army, 2014, 21(3): 289-290. (in Chinese)
- [10]Daskin M S, Coullard C R, Shen Z-J M. An inventory-location model: Formulation, solution algorithm and computational results[J]. Annals of Operations Research, 2002, 110(1-4): 83-106.
- [11]Shen Z-J M, Coullard C, Daskin M S. A joint location-inventory model[J]. Transportation Science, 2003, 37(1): 40-55.
- [12]Wu T, Shen H C, Zhu C. A multi-period location model with transportation economies-of-scale and perishable inventory[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 169: 343-349.
- [13]Liao S H, Hsieh C L, Lai P J. An evolutionary approach for multi-objective optimization of the integrated location-inventory distribution network problem in vendor-managed inventory[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(6): 6768-6776.
- [14]Miranda P A, Garrido R A. Incorporating inventory control decisions into a strategic distribution network design model with stochastic demand[J]. Transportation Research Part E, 2004, 40(3): 183-207.
- [15]Miranda P A, Garrido R A. Valid inequalities for Lagrangian relaxation in an inventory location problem with stochastic capacity[J]. Transportation Research Part E, 2008, 44(1): 47-65.
- [16]Yao Z S, Lee L H, Jaruphongsa W, et al. Multi-source facility location-allocation and inventory problem[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 207(2): 750-762.
- [17]Sourirajan K, Ozsen L, Uzsoy R. A genetic algorithm for a single product network design model with lead time and safety stock considerations[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 197(2): 599-608.
- [18]Qi L, Shen Z-J M. A supply chain design model with unreliable supply[J]. Naval Research Logistics, 2007, 54(8): 829-844.
- [19]Qi L, Shen Z-J M, Snyder L V. The effect of supply disruptions on supply chain design decisions[J]. Transportation Science, 2010, 44(2): 274-289.
- [20]Chen Q, Li X P, Ouyang Y F. Joint inventory-location problem under the risk of probabilistic facility disruptions[J]. Transportation Research Part B, 2011, 45(7): 991-1003.
- [21]Tancrez J, Lange J, Semal P. A location-inventory model for large three-level supply chains[J]. Transportation Research Part E, 2012, 48(2): 485-502.
- [22]Shahabi M, Unnikrishnan A, Jafari-Shirazi E, et al. A three level location-inventory problem with correlated demand[J]. Transportation Research Part B, 2014, 69: 1-18.
- [23]Escalona P, Ordóñez F, Marianov V. Joint location-inventory problem with differentiated service levels using critical level policy[J]. Transportation Research Part E, 2015, 83: 141-157.
- [24]Mousavi S M, Alikar N, Niaki S T A, et al. Optimizing a location allocation-inventory problem in a two-echelon supply chain network: A modified fruit fly optimization algorithm[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 87: 543-560.

- [25] Ahmadi-Javid A, Hoseinpour P. Incorporating location, inventory and price decisions into a supply chain distribution network design problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2015, 56: 110–119.
- [26] Wheatley D, Gzara F, Jewkes E. Logic-based benders decomposition for an inventory-location problem with service constraints[J]. *Omega*, 2015, 55: 10–23.
- [27] 高宝俊, 宣慧玉, 张莉. 大型医院血液库存系统订货点控制的仿真研究[J]. *中国管理科学*, 2005, 13(2): 76–80.
Gao Baojun, Xuan Huiyu, Zhang Li. Simulation on the order point of a blood inventory system[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2005, 13(2): 76–80. (in Chinese)
- [28] 高宝俊, 宣慧玉, 汪方军, 等. 需求季节性变动的血液库存系统仿真研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2005, 11(11): 98–104.
Gao Baojun, Xuan Huiyu, Wang Fangjun, et al. Simulation of a blood inventory system with time varying demand[J]. *System Engineering: Theory & Practice*, 2005, 11(11): 98–104. (in Chinese)
- [29] 吕昕. 基于仿真技术的血液中心库存系统优化研究[J]. *工业工程与管理*, 2011, 2: 118–122.
Lü Xin. Study on optimization of blood center inventory system based on simulation technology[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2011, 2: 118–122. (in Chinese)
- [30] 王芳, 饶运清, 唐秋华, 等. 多目标决策下 Pareto 非支配解的快速构造方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(2): 454–463.
Wang Fang, Rao Yunqing, Tang Qiuhua, et al. Fast construction method of Pareto non-dominated solution for multi-objective decision-making problem[J]. *System Engineering: Theory & Practice*, 2016, 36(2): 454–463. (in Chinese)
- [31] 刘欢, 徐中春, 吴绍洪, 等. 基于 GIS 的中国地震灾害人口风险性分析[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(3): 368–374.
Liu Huan, Xu Zhongchun, Wu Shaohong, et al. GIS-based analysis of earthquake disaster population risk in China[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(3): 368–374. (in Chinese)
- [32] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182–197.

Location-inventory problem for national strategic blood reserves

MA Zu-jun¹, ZHOU Yu-feng²

1. Institute for Logistics and Emergency Management, School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. Chongqing Engineering Technology Research Center for Information Management in Development, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China

Abstract: Establishing strategic blood reserves is one effective way to deal with emergency blood supply problem in large-scale sudden-onset emergencies. To enhance the ability of emergency blood supply, an optimal model for multi-objective location-inventory problem was developed to maximize the timeliness of post-disaster emergency blood supply and minimize the total operation cost of strategic blood reserves. The model takes into account some factors including multi-scenario, multi-stage, multiple blood group, stochastic demand, replenishment lead time, facility capacity and coordinated location. After analyzing the characteristics of the model, a NSGA-II algorithm based on niche technique is proposed to solve the model. The results of a numerical example show that the efficient Pareto frontier can be obtained by using the algorithm. Thus, the decision makers can select an appropriate location-inventory scheme for strategic blood reserves from a cluster of Pareto solutions by keep a balance between the cost and timeliness of emergency blood supply according to his preferences and actual needs of decision-makers.

Key words: sudden-onset emergency; blood supply; strategic reserve; location-inventory problem; genetic algorithm