

基于随机需求的区域血液供应系统优化

余娟^{1,2*}, 钟庆伦¹, 王文宪¹

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 成都 610031; 2. 郑州成功财经学院 商学院, 河南 巩义 451200)

(* 通信作者电子邮箱 1084612625@qq.com)

摘要:从供应链一体化的角度对区域血液供应网络建模。采用多目标规划的方法,将血液采集风险成本、系统运作成本、供给过多与过少的惩罚成本最小作为目标,考虑血液报废量与时间成正比的特性,将过期报废血液处理费用考虑在内,建立了随机需求的四种血型的区域供需网络均衡模型。通过证明所建模型是凸的,进一步导出了血液供需网络平衡的变分不等式。运用修改的拟牛顿法,求得了随机需求下血液供应链供需平衡的解。最后,通过成都某区供血系统进一步验证了模型的适用性。

关键词:区域血液供应链; 多种血型; 网络均衡; 随机需求; 变分不等式

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A

Regional blood supply system optimization under stochastic demand

YU Juan^{1,2*}, ZHONG Qinglun¹, WANG Wenxian¹

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

2. Department of Business, Zhengzhou Chengong University of Finance and Economics, Gongyi Henan 451200, China)

Abstract: Concerning the perspective of supply chain integration, a blood supply model was developed, which aimed to minimize the blood acquisition risk, system operation cost, the punishment for both excessive and insufficient acquisition by the multi-objective programming method. Taking into account the feature that the amount of expired blood is proportional to time, as well as the cost for expired blood processing, a regional supply and demand equilibrium model characterized by stochastic demand of the four types of blood was built. The model was proved to be convex, and the variational inequality of the blood supply and demand network equilibrium was derived. By modified quasi-Newton method, the solutions of the blood supply chain supply and demand equilibrium under stochastic demand condition were obtained. Finally, a case study in Chengdu verified the model's applicability.

Key words: regional blood supply chain; variety type of blood; network equilibrium; stochastic demand; variational inequality

0 引言

尽管供应链管理取得了巨大的成就,但是依然不能令人满意地解决实际问题,对时间要求敏感的产品供应链,特别是易腐产品提出了一个新的挑战^[1]。常见的易腐产品包括:某些食品、某种药品、疫苗、鲜花、人体血液等^[2]。特别是某些药品和疫苗,短缺及变质过期使用都有可能危及生命。近年来“血荒”的报道常见报端,引起许多的医学工作者和物流学者对血液管理的研究兴趣。目前对血液物流的研究主要集中在血液供应链的设施选址^[3]、库存管理^[4-5]、应急配送^[6-7]及供应链设计^[8]等方面。文献[9]通过对英国的血液供应链绩效评价,找出了一个更节约成本,同时也能增加血液供应安全性的策略;文献[10]通过调查流感爆发期间红细胞在德国的供应,得出“只有知道红细胞正常供应所占的比例,才能建立流感爆发的预警”的结论;文献[8]通过加强血液中心和医院输血部门之间的紧密合作提高血小板的供应链绩效;文献[11]以汶川地震血液应急保障为背景,分析验证了两阶段决策方法在新鲜度均值、最晚抵达时间、血液积压量、运输总费

用等指标上的优越性;文献[12]从供应链供需均衡的角度,以供应链的运营、废弃血液处理、采购风险成本为目标考虑了单一血型的血制品供应的一体化模型,并应用欧拉法进行求解。目前对血液的供应链管理大多集中在定性分析方面,本文在前人研究的基础上进一步对文献[12]进行扩展,运用多目标规划方法建立了随机需求的四种血型的血制品供应的区域供需均衡模型。考虑血液新鲜度随时间衰减的特性,建立模型时将时间变量引入血液报废函数中,使模型更符合实际情况,同时更具适用性。

1 区域供血系统供应链建模

1.1 区域供血系统的网络结构

一个完整的区域血液供应系统包括血液管理机构、血液采集点、血站、血液检测实验室、配送中心和血制品需求点。按血液供应的流程,供血网络拓扑结构可以用图1表示。血站按照区域的方式进行管理^[13],负责本辖区血液的采集与配送,以及区域范围内的血液的调度与平衡。需要临床用血的医院要向本辖区内的血液采供机构申请,如辖区血液采供机

收稿日期: 2014-03-12; 修回日期: 2014-05-26。

作者简介: 余娟(1981-),女,河南信阳人,讲师,博士研究生,主要研究方向:供应链复杂网络; 钟庆伦(1990-),男,四川威远人,硕士研究生,主要研究方向:运输组织优化; 王文宪(1986-),男,湖北孝感人,博士研究生,主要研究方向:铁路运输组织优化、智能算法。

构发生血制品短缺,可向邻近的血液采供机构申请调配。本文主要考虑血站能够正常供应的情况,即血液制品不足需要向邻近地区调配的情况不在本文考虑之列。此外,血液制品有多种,其中红细胞的保存时间最短(只有35 d)^[15],本文只对红细胞临床供应进行探讨,本文以后部分所提的血液统指红细胞。

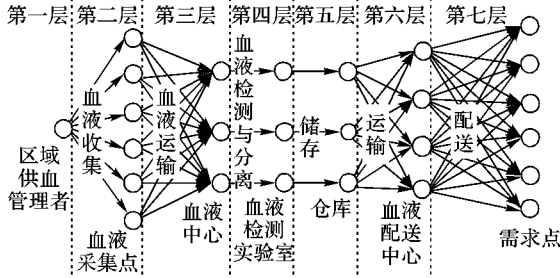


图1 供血网络拓扑结构

1.2 符号表示及基本假设

本文的基本符号表示及假设如下:

$G = (N, L)$ 表示区域供血网络,其中:设施设备表现为网络的节点 N ,血液供应的活动构成网络的边 L 。

a 表示供应链中的第 a 条边,其中 $a = 1, 2, \dots, L$ 。

f_a 表示第 a 条边的流量。

c_a 表示第 a 条边的单位血液运作成本,大小与 f_a 有关,即第 a 条边上单位血液的运营成本为 $c_a(f_a)$ 。

\hat{c}_a 表示第 a 条边血液总的运营成本,其值为 $\hat{c}_a = f_a \times c_a(f_a) (\forall a \in L)$ 。

s 表示第 s 种血型 ($s = 1, 2, 3, 4$), 分别代表 A、B、O、AB 型血。

v_k^s 表示第 k ($k = 1, 2, \dots, O$) 个需求点对第 s 种血型预测需求量。

d_k^s 表示第 k 个需求点对第 s 种血液的实际需求量。

p_k 表示从血液采集点到第 k 个需求点的路径集合。

P 表示网络拓扑结构中从起点到血液需求点的所有路径的集合。

x_p 表示路径 p 的流量。

x_p^s 表示路径 p 上第 s 种血液流量。

x_{pk}^s 通往第 k 个需求点路径中第 s 种血液流量。

$F_k^s(t)$ 表示需求点 k 对第 s 种血型需求概率密度函数,则第 k 个需求点对第 s 种血型需求分布函数为 $\rho_k^s(D_k^s) = \int_0^{D_k^s} F_k^s(t) dt$ 。

$\Delta k^{s+}, \Delta k^{s-}$ 分别表示第 k 个需求点对第 s 种血液供应过多的量及供应不足的量,其值分别为:

$$\Delta k^{s+} = \max\{0, v_k^s - d_k^s\}$$

$$\Delta k^{s-} = \max\{0, d_k^s - v_k^s\}$$

其中: $k = 1, 2, \dots, O; s = 1, 2, 3, 4$ 。

$E(\Delta k^{s+}), E(\Delta k^{s-})$ 分别表示第 k 个需求点对第 s 种血型红细胞的期望供应过多量与期望供给不足量,其值分别为:

$$E(\Delta k^{s+}) = \int_0^{v_k^s} (v_k^s - t) F_k^s(t) dt$$

$$E(\Delta k^{s-}) = \int_{v_k^s}^{\infty} (t - v_k^s) F_k^s(t) dt$$

其中: $k = 1, 2, \dots, O; s = 1, 2, 3, 4$ 。

$\lambda_k^{s-}, \lambda_k^{s+}$ 分别表示需求点 k 第 s 种血型红细胞的缺货惩罚及供给过多时的惩罚,则需求点 k 的第 s 种血型红细胞总的期望惩罚成本为:

$$E(\lambda_k^{s-} \Delta k^{s-} + \lambda_k^{s+} \Delta k^{s+}) = \lambda_k^{s-} E(\Delta k^{s-}) + \lambda_k^{s+} E(\Delta k^{s+})$$

t_a 表示为血液通过 a 边活动所持续的时间。

β_a 表示为经过第 a 条边的损耗率,当 $\beta_a = 1$ 表明血液在处理过程中完全损耗,反之为 $\beta_a = 0$ 。因此,经过边 a 后,血液的投入产出率为 $\alpha_a(t_a) = e^{-\beta_a t_a} (\forall a \in L)$ 。

f_a' 表示流入 a 边后继节点的流量,则有 $f_a' = \alpha_a \times f_a (\forall a \in L)$ 。

ω_a 表示血液或血制品在第 a 条边的废弃血液处理量,根据文献[14],其值为 $\omega_a = f_a - f_a' = (1 - \alpha_a)f_a (\forall a \in L)$ 。

z_a 表示为第 a 条边单位报废血液处理成本,大小与 f_a' 有关;更进一步,其单位报废血液处理成本表示为 $z_a(f_a)$ 。

\hat{z}_a 表示为第 a 条边废弃血液处理总费用函数: $\hat{z}_a = z_a(f_a) * w_a = \hat{z}_a(f_a) (\forall a \in L)$ 。

μ_{p_k} 表示单位血液从采集经过路径 p_k 到达 k 需求点的剩余率,等于路径上各边投入产出率的乘积,其值为:

$$\mu_{p_k} = \begin{cases} \prod_{a \in p_k} \alpha_a, & a \in p_k \\ 0, & a \notin p_k \end{cases}$$

需求点 k 对第 s 种血型预测需求量与通往需求点 k 的路径流量存在这样的关系:到达 k 点流量能够满足预测需求,即

$$v_k^s = \sum_{p \in p_k} x_{p_k}^s \mu_{p_k}; s = 1, 2, 3, 4, k = 1, 2, \dots, k \quad (1)$$

从流量守恒的角度,边流量和路径流量存在以下关系:

$$f_a = \sum_{p \in p} x_p \mu_p, \text{ 即 } f_a = \sum_{s=1}^4 \sum_{p_k \in p} x_{p_k}^s \mu_{p_k}; \forall a \in L \quad (2)$$

建模之前作出如下假设:

1) 本文所建模型是基于随机需求的单周期模型,即考虑供应运营管理的一个周期;

2) 血液经过分离后只考虑红细胞一种成分(因为红细胞保质期 35 d,血浆保质期为 1 a^[15]);

3) 网络容量能满足需求;

4) 考虑正常情况下的血液供应,突发事件血液供应不在本文考虑之列。

1.3 区域血液供应一体化建模

血液供应是一种公益事业,不以盈利为目的,在管理过程中追求管理成本最小化。血液供应成本包括:采集成本(含献血宣传成本)、运输成本、检测与分离成本、存储成本、配送成本、报废处理成本等。然而血液供应不足导致病人死亡或病情加重,会产生相应社会费用;同时血液采集过多又会产生存储费用,也存在报废风险。采血风险用 \hat{r}_a 表示,一般来说是血液采集量的函数,即 $\hat{r}_a(f_a)$ 。采血决策的制定者有一个风险偏好系数 θ ,倾向采取风险最小的决策,这样有:

$$\hat{r}_a = \min_{a \in L_1} \theta \sum \hat{r}_a(f_a) \quad (3)$$

其中: L_1 为供应链前两层的边,后几层的边用 L_1^c 表示。血液一体化供应过程中最小成本目标函数为:

$$TC_{\min} = \sum_{a \in L} \hat{c}_a(f_a) + \sum_{a \in L} \hat{z}_a(f_a) + \theta \sum_{a \in L_1} \hat{r}_a(f_a) +$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{s=1}^4 \sum_{k=1}^O [\lambda_k^{s-} E(\Delta_k^{s-}) + \lambda_k^{s+} E(\Delta_k^{s+})] \\
\text{s. t. } & v_k^s = \sum_{p_k \in P} x p_k^s \mu_{p_k} \\
& f_a = \sum_{p_k \in P} \sum_{s=1}^4 x p_k^s \mu_{p_k}, \quad \forall a \in L_1 \\
& x p_k^s \geq 0 \quad (4)
\end{aligned}$$

第一项表示血液供应中的血液采集、运输、检测与分离、存储及配送成本总和;第二项表示废弃血液总的处理成本;第三项血液采集总的风险成本;第四项表示血液供应过多及过少的惩罚成本;第一个约束表示采集到的血液经过处理后能够满足预测需求;第二个约束表示边流量和路径流量的关系。

式(4)的最优化问题可以按照路径流的方式改写。设单位流量的运营费用、废弃血液处理费用,及单位血液的采集风险分别为 $C(x_p)$ 、 $Z(x_p)$ 和 $R(x_p)$, 则路径 p 的血液总运营费用 $\hat{C}_p(x)$ 、路径 p 的废弃血液总处理费用 $\hat{Z}(x_p)$ 及路径 p 的血液采集风险 $\hat{R}(x_p)$ 分别为:

$$\begin{cases} \hat{C}(x_p) = x_p \times C(x_p) \\ \hat{Z}(x_p) = x_p \times Z(x_p); \quad \forall p \in P \\ \hat{R}(x_p) = x_p \times R(x_p) \end{cases} \quad (5)$$

同时,以路径度量的单位流量费用与以边度量的单位流量费用有以下的关系:

$$\begin{cases} C(x_p) = \sum_{a \in L} c_a(f_a) \alpha_{ap} \\ Z(x_p) = \sum_{a \in L} z_a(f_a) \alpha_{ap}; \quad \forall p \in P \\ R(x_p) = \sum_{a \in L} r_a(f_a) \alpha_{ap} \end{cases} \quad (6)$$

其证明参见文献[12]。式(4)的最优化问题按照路径流的方式改写为:

$$\begin{aligned}
TC_{\min} &= \sum_{p_k \in P} (\hat{C}(x_{p_k}^s) + \hat{Z}(x_{p_k}^s)) + \theta \sum_{p_k \in P} \hat{R}(x_{p_k}^s) + \\
& \sum_{s=1}^4 \sum_{k=1}^O (\lambda_k^{s-} E(\Delta_k^{s-}) + \lambda_k^{s+} E(\Delta_k^{s+})) \\
\text{s. t. } & v_k^s = \sum_{p_k \in P} x_{p_k}^s \mu_{p_k} \\
& x_{p_k}^s \geq 0, p_k \in P \quad (7)
\end{aligned}$$

2 目标函数向变分不等式转化及求解方法

2.1 目标函数向变分不等式转化

本文主要说明式(7)转化为变分不等式的方法,式(4)转化方式与此相类似。假设该问题的拉格朗日乘子为 $\gamma_k(k=1, 2, \dots, O)$, 那么该问题的拉格朗日函数为:

$$\begin{aligned}
\phi(x_{p_k}^s, \gamma_k) &= \sum_{p \in P} (\hat{C}(x_{p_k}^s) + \hat{Z}(x_{p_k}^s)) + \\
& \sum_{s=1}^4 \sum_{k=1}^O (\lambda_k^{s-} E(\Delta_k^{s-}) + \lambda_k^{s+} E(\Delta_k^{s+})) + \\
& \theta \sum_{p_k \in P} \hat{R}(x_{p_k}^s) + \sum_{s=1}^4 \sum_{k=1}^O \gamma_k \left[v_k^s - \sum_{p_k \in P} x_{p_k}^s \mu_{p_k} \right] \quad (8)
\end{aligned}$$

设血液供应链的运营成本及废弃血液处理及血液采集风险函数都是凸的连续可微,式(8)最优化问题等价于式(10)的变分不等式形式,确定 $(x_{p_k}^{s*}, \gamma_k^*) \in \mathfrak{R}_+$, 其中 X 表示多目

标最优解向量, \mathfrak{R}_+ 表示可行集,

$$\mathfrak{R}_+ = \left\{ (x_{p_k}^s, \gamma_k) \mid \exists X \geq 0, v_k^s = \sum_{p_k \in P} x_{p_k}^s \mu_{p_k}, x_{p_k}^s \geq 0 \right\}$$

由于与边相联系的总的运营费用、总的报废血液处理费用及血液采集风险函数是凸的可微函数,只需证明 $\lambda_k^{s-} E(\Delta_k^{s-}) + \lambda_k^{s+} E(\Delta_k^{s+})$ 是凸的可微即可说明式(8)有唯一解。

证明

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial^2 E[\lambda_k^{s-} E(\Delta_k^{s-}) + \lambda_k^{s+} E(\Delta_k^{s+})]}{(\partial v_k^s)^2} = \\
& \frac{\partial}{\partial v_k^s} \left(\frac{\partial}{\partial v_k^s} [\lambda_k^{s-} E(\Delta_k^{s-}) + \lambda_k^{s+} E(\Delta_k^{s+})] \right) = \\
& \frac{\partial}{\partial v_k^s} (\lambda_k^{s-} (\rho_k^s(v_k^s) - 1) + \lambda_k^{s+} \rho_k^s(v_k^s)) = \\
& \lambda_k^{s-} F(v_k^s) + \lambda_k^{s+} F(v_k^s) = (\lambda_k^{s-} + \lambda_k^{s+}) F(v_k^s) \geq 0 \quad (9)
\end{aligned}$$

由此可得出式(8)是连续的凸函数。因而式(8)有唯一解,且可以改写成式(10)所示的变分不等式形式:

$$\begin{aligned}
F(X) &= \sum_{k=1}^O \sum_{p_k \in P} \left[\frac{\partial \left(\sum_{s=1}^4 \sum_{q \in P} \hat{C}(x_{p_k}^{s*}) \right)}{\partial x_{p_k}^s} + \right. \\
& \frac{\partial \left(\sum_{s=1}^4 \sum_{q \in P} \hat{Z}(x_{p_k}^{s*}) \right)}{\partial x_{p_k}^s} + \frac{\partial \left(\sum_{s=1}^4 \sum_{q \in P} \hat{R}(x_{p_k}^{s*}) \right)}{\partial x_{p_k}^s} + \\
& \sum_{s=1}^4 \left(\lambda_k^{s+} \mu_{p_k} \rho_k \left(\sum_{p_k \in P} x_{p_k}^{s*} \mu_{p_k} \right) - \right. \\
& \left. \left. \lambda_k^{s-} \mu_{p_k} \left(1 - \rho_k \left(\sum_{p_k \in P} x_{p_k}^{s*} \mu_{p_k} \right) \right) \right) \right] \times (x_{p_k}^s - x_{p_k}^{s*}) + \\
& \sum_{s=1}^4 \sum_{k=1}^O \left[v_k^{s*} - \sum_{p_k \in P} x_{p_k}^{s*} \mu_{p_k} \right] \times (\gamma_k - \gamma_k^*) \geq 0 \quad (10)
\end{aligned}$$

设 $X = (x_{p_k}^{s*}, \gamma_k^*)^T$, $F(X) = (F_1(X), F_2(X))^T$, 而

$$\begin{cases} F_1(X) = \frac{\partial \left(\sum_{p_k \in P} \hat{C}(x_{p_k}^{s*}) \right)}{\partial x_{p_k}^s} + \frac{\partial \left(\sum_{p_k \in P} \hat{Z}(x_{p_k}^{s*}) \right)}{\partial x_{p_k}^s} + \\ \frac{\partial \left(\sum_{p_k \in P} \hat{R}(x_{p_k}^{s*}) \right)}{\partial x_{p_k}^s} + \lambda_k^{s+} \mu_{p_k} \rho_k \left(\sum_{p_k \in P} x_{p_k}^{s*} \mu_{p_k} \right) - \\ \lambda_k^{s-} \mu_{p_k} \left(1 - \rho_k \left(\sum_{p_k \in P} x_{p_k}^{s*} \mu_{p_k} \right) \right) \\ F_2(X) = v_k^{s*} - \sum_{s=1}^4 \sum_{p_k \in P} x_{p_k}^{s*} \mu_{p_k} \end{cases} \quad (11)$$

进一步变分不等式(11)可以写成如下的形式:

$$F(X^*)^T (X - X^*) \geq 0; \quad \forall X \in \mathfrak{R}_+ \quad (12)$$

式(12)的非线性补问题为:找到 $X^* \in \mathfrak{R}_+$ 使得

$$F(X^*)^T X^* = 0; \quad F(X^*) \geq 0 \quad (13)$$

运用 Fischer 的优函数法^[16], $\vartheta(a, b) = [\sqrt{b^2 + a^2} - (a + b)]^2: R^2 \rightarrow R_+$, 式(12)相关的非线性补形式能转化为连续可微的无约束优化问题:

$$\min_{\bar{X} \in \kappa} \theta(\bar{X}) = \sum_{k=1}^O \sum_{p_k \in P} \theta(x_{p_k}^{s*}, F_1(\bar{X})) + \sum_{k=1}^O \theta(\gamma_j^*, F_2(\bar{X})) \quad (14)$$

2.2 算法构建

式(14)通过以上转化模型转变为求解无约束问题,求解无约束问题的解法很多,如最速下降法,共轭梯度法、牛顿法及拟牛顿法等。对于本文无约束问题(14)的求解,采用修改的拟牛顿法,其求解步骤如下:

步骤1 给定初始点 $X^{(0)}$, 精度为 ξ 。

步骤2 若 $\|\nabla\theta(X^{(0)})\|^2 \leq \xi$, 则 $X^{(0)}$ 即为近似极小点, 停止迭代; 否则, 转步骤3。

步骤3 令 $H^{(1)} = I$ (I 为 n 阶单位矩阵), 计算其在 $X^{(1)}$ 处的梯度: $g_1 = \nabla\theta(X^{(1)})$, 置迭代次数 $b = 1$ 。

步骤4 令 $d^{(b)} = -H^{(b)} \nabla\theta(X^{(b)})$ 。

步骤5 从 $X^{(b)}$ 出发, 沿方向 $d^{(b)}$ 进行一维搜索, 确定最佳步长 $\lambda^{(b)}$, 使满足:

$$\min_{\lambda} \theta(X^{(b)} + \lambda^{(b)} g^{(b)}) = \theta(X^{(b)} + \lambda^{(b)} g^{(b)})$$

求得最佳步长 $\lambda^{(b)}$, 由此可以得到下一个近似点:

$$X^{(b+1)} = X^{(b)} + \lambda^{(b)} g^{(b)}$$

步骤6 检验是否满足收敛准则, 若 $\|\nabla\theta(X^{(b+1)})\|^2 \leq \xi$ 成立则停止迭代, 得到点 $\bar{X} = X^{(b+1)}$; 否则转步骤7。

步骤7 令

$$g_{1+b} = \nabla\theta(X^{(b+1)}), S^{(k)} = X^{(b+1)} - X^{(b)}$$

$$Y^{(b)} = \nabla\theta(X^{(b+1)}) - \nabla\theta(X^{(b)})$$

计算 H_{b+1} :

$$H_{b+1} = H_b + \frac{s^{(b)} s^{(b)T}}{s^{(b)T} Y^{(b)}} - \frac{H^{(b)} Y^{(b)T} Y^{(b)} H_b}{Y^{(b)T} H_b Y^{(b)}}$$

置 $b = b + 1$, 返回步骤4。

3 案例分析

成都市某区的血液供应系统如图2所示: 网络中有5个采血点、1个血站、1个血液检测实验室、1个仓库、及2个配送中心、3个需求点。采血点对应的风险函数分别为: $\hat{r}_1(f_1) = 2f_1^2$, $\hat{r}_2(f_2) = 0.5f_2^2$, $\hat{r}_3(f_3) = 1f_3^2$, $\hat{r}_4(f_4) = 1.5f_4^2$, $\hat{r}_5(f_5) = 0.3f_5^2$, 供血管理机构的风险系数 $\theta = 0.5$ 。

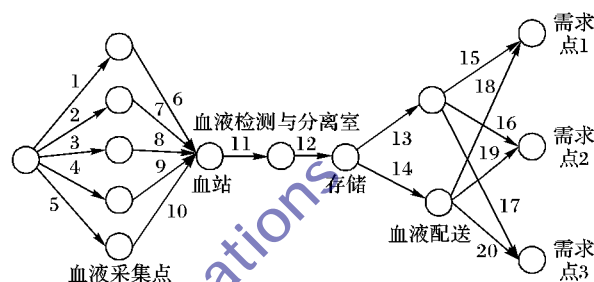


图2 某区域血液供应链网络

需求点1是三甲医院, 需求点2是二甲医院, 需求点3是二乙医院, 每个需求点对各种血型的需求量及惩罚系数如表1所示; 供应链网络中各边血液报废率、持续时间、投入产出率、总运营费用及总的废弃处理费用函数如表2所示。

设初始点为 $X^{(0)} = 0$, 收敛误差为 10^{-5} , 通过 Matlab7.0 计算可以得到表3, 经过进一步计算可得表2各边最优流量。

表1 需求点对各种血型需求量及惩罚函数

需求点 k	血型	供给过量 惩罚函数 (λ_k^{s+})	供给不足 惩罚函数 (λ_k^{s-})	血型需求 分布密度	需求点的概率 密度 ($\rho_k^s (\sum_{p_k \in P} x_{p_k}^s \mu_{p_k})$)
1	A 型血 ($s = 1$)	$\lambda_1^{1+} = 60$	$\lambda_1^{1-} = 3000$	[30,40]	$(\sum_{p_1 \in P} x_{p_1}^1 \mu_{p_1} - 30)/10$
	B 型血 ($s = 2$)	$\lambda_1^{2+} = 60$	$\lambda_1^{2-} = 3000$	[31,42]	$(\sum_{p_1 \in P} x_{p_1}^2 \mu_{p_1} - 31)/11$
	O 型血 ($s = 3$)	$\lambda_1^{3+} = 60$	$\lambda_1^{3-} = 3000$	[35,46]	$(\sum_{p_1 \in P} x_{p_1}^3 \mu_{p_1} - 35)/11$
	AB 型血 ($s = 4$)	$\lambda_1^{4+} = 60$	$\lambda_1^{4-} = 3000$	[5,10]	$(\sum_{p_1 \in P} x_{p_1}^4 \mu_{p_1} - 5)/5$
2	A 型血 ($s = 1$)	$\lambda_2^{1+} = 0$	$\lambda_2^{1-} = 1500$	[10,20]	$(\sum_{p_2 \in P} x_{p_2}^1 \mu_{p_2} - 10)/10$
	B 型血 ($s = 2$)	$\lambda_2^{2+} = 0$	$\lambda_2^{2-} = 1500$	[9,18]	$(\sum_{p_2 \in P} x_{p_2}^2 \mu_{p_2} - 9)/9$
	O 型血 ($s = 3$)	$\lambda_2^{3+} = 0$	$\lambda_2^{3-} = 1500$	[12,22]	$(\sum_{p_2 \in P} x_{p_2}^3 \mu_{p_2} - 12)/10$
	AB 型血 ($s = 4$)	$\lambda_2^{4+} = 0$	$\lambda_2^{4-} = 1500$	[1,3]	$(\sum_{p_2 \in P} x_{p_2}^4 \mu_{p_2} - 1)/2$
3	A 型血 ($s = 1$)	$\lambda_3^{1+} = 65$	$\lambda_3^{1-} = 2200$	[20,30]	$(\sum_{p_3 \in P} x_{p_3}^1 \mu_{p_3} - 20)/10$
	B 型血 ($s = 2$)	$\lambda_3^{2+} = 65$	$\lambda_3^{2-} = 2200$	[22,32]	$(\sum_{p_3 \in P} x_{p_3}^2 \mu_{p_3} - 20)/10$
	O 型血 ($s = 3$)	$\lambda_3^{3+} = 65$	$\lambda_3^{3-} = 2200$	[25,35]	$(\sum_{p_3 \in P} x_{p_3}^3 \mu_{p_3} - 25)/10$
	AB 型血 ($s = 4$)	$\lambda_3^{4+} = 65$	$\lambda_3^{4-} = 2200$	[2,6]	$(\sum_{p_3 \in P} x_{p_3}^4 \mu_{p_3} - 2)/4$

表2 各边报废率、持续时间、边系数、总运营费用及总的废弃处理费用函数、各边最优流量

Link a	β_a	t_a	α_a	$\hat{c}_a(f_a)$	$\hat{z}_a(f_a)$	f_a^*
1	0.15	0.20	0.9700	$6f_1^2 + 12f_1$	$0.8f_1^2$	96.14
2	0.18	0.25	0.9630	$9f_2^2 + 10f_2$	$0.7f_2^2$	29.06
3	0.16	0.30	0.9560	$7f_3^2 + 13f_3$	$0.6f_3^2$	48.78
4	0.18	0.50	0.9139	$5f_4^2 + 18f_4$	$0.8f_4^2$	37.42
5	0.20	0.10	0.9802	$8f_5^2 + f_5$	$0.6f_5^2$	111.00
6	0	0.05	1.0000	$0.6f_6^2 + f_6$	$0.8f_6^2$	93.26
7	0	0.10	1.0000	$0.8f_7^2 + f_7$	$0.5f_7^2$	27.98
8	0	0.06	1.0000	$0.4f_8^2 + 3f_8$	$0.6f_8^2$	46.63
9	0	0.02	1.0000	$0.3f_9^2 + 1f_9$	$0.65f_9^2$	34.20
10	0	0.05	1.0000	$0.5f_{10}^2 + 2f_{10}$	$0.58f_{10}^2$	108.80
11	0.15	1.50	0.7985	$15f_{11}^2 + 25f_{11}$	$0.5f_{11}^2$	310.87
12	0	2.00	1.0000	$8f_{12}^2 + 6f_{12}$	$0.8f_{12}^2$	248.23
13	0	0.10	1.0000	$0.3f_{13}^2 + 1f_{13}$	$0.4f_{13}^2$	169.21
14	0	0.15	1.0000	$0.5f_{14}^2 + 2f_{14}$	$0.7f_{14}^2$	79.02
15	0	0.20	1.0000	$0.7f_{15}^2 + 2f_{15}$	$0.6f_{15}^2$	89.11
16	0	0.25	1.0000	$0.6f_{16}^2 + 4f_{16}$	$0.4f_{16}^2$	22.14
17	0	0.40	1.0000	$1.1f_{17}^2 + 5f_{17}$	$0.5f_{17}^2$	57.96
18	0	0.25	1.0000	$0.8f_{18}^2 + 5f_{18}$	$0.7f_{18}^2$	29.70
19	0	0.10	1.0000	$0.5f_{19}^2 + 6f_{19}$	$0.4f_{19}^2$	18.11
20	0	0.30	1.0000	$0.4f_{20}^2 + 5f_{20}$	$0.5f_{20}^2$	31.21

表3 各个需求点对每种血型的最优需求量

需求点 k	v_k^{s*}			
	血型 A ($s = 1$)	血型 B ($s = 2$)	血型 O ($s = 3$)	血型 AB ($s = 4$)
1	36.28	33.69	40.01	8.84
2	11.67	12.21	15.06	1.31
3	26.84	28.03	29.38	4.92

4 结语

本文对区域血液供应网络优化,考虑了血液新鲜度随时间衰减的特性,模型与实际更相符,更具适用性。本文模型能应用于区域血液供应管理,而且所建模型有较强的适用性,稍加修改可以应用于其他时间敏感产品的供应网络。但所建模型没有考虑血制品的库存成本,而且只考虑了红细胞一种血液成分,下一步研究可以从以上两个方面入手。

参考文献:

- [1] GEORGIADIS P, VLACHOS D, IAKOVOUE E. A system dynamics modeling framework for the strategic supply chain management of food chains [J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 70(3): 351–364.
- [2] AHUMADA O, VILLALOBOS J R. Application of planning models in the agri-food supply chain: a review [J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 196(1): 1–20.
- [3] CETIN E, SARUL L S. A blood bank location model: a multi-objective approach [J]. *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2009, 2(1): 112–124.
- [4] PERERA G, HYAM C, TAYLOR C, *et al.* Hospital blood inventory practice: the factors affecting stock level and wastage [J]. *Transfusion Medicine*, 2009, 19(2): 99–104.
- [5] KOPACH R, BALCIOGLU B, CARTER M. Tutorial on constructing a red blood cell inventory management system with two demand rates [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 185(3): 1051–1059.
- [6] HEMMELMARYR V, DOERNER K F, HARTL R F, *et al.* Delivery strategies for blood products supplies [J]. *OR Spectrum*, 2009, 31(4): 707–725.
- [7] GREGOR P J, FORTHOFFER R N, KAPADIA A S. An evaluation of inventory and transportation policies of a regional blood distribution system [J]. *European Journal of Operational Research*, 1982, 10(1): 106–113.
- [8] FONTAINE M J, CHUNG Y T, ROGERS W M, *et al.* Improving platelet supply chains through collaborations between blood centers and transfusion services [J]. *Transfusion*, 2009, 49(10): 2040–2047.
- [9] KATSALIAKI K. Cost-effective practices in the blood service sector [J]. *Health policy*, 2008, 86(2): 276–287.
- [10] KAMP C, HEIDEN M, HENSELER O, *et al.* Management of blood supplies during an influenza pandemic [J]. *Transfusion*, 2010, 50(1): 231–239.
- [11] WANG K, MA Z, ZHOU Y. A two phase decision making approach for emergency blood transferring problem in public emergencies [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2013, 13(1): 169–178. (王恪铭, 马祖军, 周渝峰. 突发事件应急血液调剂问题的两阶段决策方法[J]. *统计与决策*, 2013, 13(1): 169–178).
- [12] NAGURNEY A, MASOUMI A H, YU M. Supply chain network operations management of a blood banking system with cost and risk minimization [J]. *Computational Management Science*, 2012, 9(2): 205–231.
- [13] 中华人民共和国卫生部. 采供血机构设置规划指导原则 [S]. 2005–12–16. (Ministry of health of the people's republic of China. Guiding principles of setting up blood collection agencies [S]. 2005–12–16.)
- [14] YU M, NAGURNEY A. Competitive food supply chain networks with application to fresh produce [J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 224(2): 273–282.
- [15] WANG P. Blood transfusion technology [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2002. (王培华. 输血技术学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2002.)
- [16] FISCHER A. A special Newton-type optimization method [J]. *Optimization*, 1992, 24(3/4): 26