

11-17-2021

Optimization of Vaccination Supply Chain Based on SCG in Nanshan District

Zhenning Dong

School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China;

Shunzhou Huang

School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China;

Jiajun Chen

School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China;

Huiqiong Zheng

School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Optimization of Vaccination Supply Chain Based on SCG in Nanshan District

Abstract

Abstract: To optimize the vaccination network, inventory strategy and human resource allocation in Nanshan District, *Supply Chain Guru's (SCG) network optimization method* is used to select 50 alternative stations to decrease the fixed operating cost. SCG's inventory optimization method is used to set inventory strategy for each station, and simulation method is designed to compare total cost of all schemes. To optimize the opening days of vaccination stations, a medical personnel allocation rule is designed, which reduces some stations' opening days to 2 or 3 days and increases some stations' medical personnel. An simulation method is designed to compare the total costs and service levels of different schemes. The optimized network opens 48 stations, which reduces the total cost by ¥950,000 yuan, a saving of 4.93%. The optimized vaccination human resource allocation reduces medical personnel by 56.6% and saves labor cost by 6.54 million. The vaccination network optimization and human resource allocation method can reduce the cost of vaccination supply chain, and the simulation method can provide reference to the decision makers.

Keywords

network optimization, vaccination station, inventory management, Supply Chain Guru(SCG), simulation

Recommended Citation

Dong Zhenning, Huang Shunzhou, Chen Jiajun, Zheng Huiqiong. Optimization of Vaccination Supply Chain Based on SCG in Nanshan District[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(11): 2733-2741.

基于 SCG 的南山区疫苗接种供应链优化

董振宁, 黄顺洲, 陈嘉俊, 郑惠琼

(广东工业大学 管理学院, 广东 广州 510520)

摘要: 为优化南山区疫苗接种网络、库存策略及人力资源配置, 利用供应链优化大师(Supply Chain Guru, SCG)的网络优化功能选择开放 50 个备选站点以降低固定运营成本; 运用库存优化功能为各站点设置库存策略, 运用仿真功能比较各方案总成本。设计医疗人员分配规则将部分站点开放时间缩减为 2 (或者 3) 天, 并增加部分站点医疗人员; 设计仿真方法比较各方案服务水平和成本。优化后网络开放 48 个接种站点, 总成本下降 95 万元, 节约 4.93%; 医疗人员数量下降 56.6%, 节约人工成本 654 万元。疫苗接种站点网络优化和人力资源配置可以降低供应链运营成本; 仿真评价方法可以供决策人员参考。

关键词: 网络优化; 疫苗接种站; 库存管理; 供应链优化大师 SCG(Supply Chain Guru); 模拟仿真

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2021) 11-2733-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-FZ0740

Optimization of Vaccination Supply Chain Based on SCG in Nanshan District

Dong Zhenning, Huang Shunzhou, Chen Jiajun, Zheng Huiqiong

(School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China)

Abstract: To optimize the vaccination network, inventory strategy and human resource allocation in Nanshan District, *Supply Chain Guru's (SCG) network optimization method* is used to select 50 alternative stations to decrease the fixed operating cost. SCG's inventory optimization method is used to set inventory strategy for each station, and simulation method is designed to compare total cost of all schemes. To optimize the opening days of vaccination stations, an medical personnel allocation rule is designed, which reduces some stations' opening days to 2 or 3 days and increases some stations' medical personnel. An simulation method is designed to compare the total costs and service levels of different schemes. The optimized network opens 48 stations, which reduces the total cost by ¥950,000 yuan, a saving of 4.93%. The optimized vaccination human resource allocation reduces medical personnel by 56.6% and saves labor cost by 6.54 million. The vaccination network optimization and human resource allocation method can reduce the cost of vaccination supply chain, and the simulation method can provide reference to the decision makers.

Keywords: network optimization; vaccination station; inventory management; Supply Chain Guru(SCG); simulation

引言

在突发的新冠疫情影响下, 如何有效应对突发公共卫生事件成为政府决策部门和学术界共同关

注的热点问题^[1]。在公共卫生防控工作中, 疫苗接种是成本最低、社会影响最小的疾病预防与治疗手段^[2], 随着公众对病毒防控和预防接种工作的认识加深, 预防接种工作受到政府和社会群众的广泛关

收稿日期: 2021-06-04 修回日期: 2021-07-23

基金项目: 广东省自然科学基金(2018A030313444)

第一作者: 董振宁(1977-), 男, 博士, 副教授, 硕导, 研究方向为供应链管理、仿真优化。E-mail: 5393966@qq.com

注^[3],同时预防接种人数规模和服务覆盖范围也在不断扩大^[4]。疫苗接种站作为预防接种基础设施,其网络布局将直接影响居民出行距离与接种体验,同时影响其运营成本等。突发疫情对医疗机构的人力资源应急与管理体系提出挑战^[5],如何解决疫苗接种站点网络布局、成本控制、人力资源分配等问题,对供应链进行综合优化,提高居民接种便捷性基础上降低成本,成为卫生管理部门迫切需要解决的问题。

王志伟等^[6]采用随机抽样,对广州市居民的新冠疫苗认知情况、接种意愿等影响因素进行检验分析。徐健^[7]研究了 COVID-19 疫情对公共卫生服务及传染病防治的影响,提出疫情对医疗策略、医疗资源分配等应急措施的挑战。欧燕玲等^[8]分析了基层医疗卫生机构在疫情防控中出现的问题,提出建立基层、疾控中心、医院三方的激励约束机制。Kumar 等^[9]对 3 种控制策略进行对比研究,证明了将疫苗接种与治疗相结合的混合策略相比接种或者治疗的单一策略更具有效率性与经济性。

上述研究更多从管理角度展开,缺乏对设施网络选址问题研究。目前在公共医疗服务站点选址的研究中,周愉峰等^[10]考虑多情景灾时应急特性,结合日常运行成本与预算约束,建立了一个国家血液战略储备库的鲁棒优化模型。彭春等^[11]构建了 4 类不确定需求集的应急医疗服务站鲁棒配置模型,提出应急医疗服务站的选址配置方案。杜浩国等^[12]采用智能蚁群优化算法研究应急避难场所的选址问题,建立基于蚁群优化算法的应急避难场所选址模型。陈业华等^[13]建立了一种多阶段带时间约束的应急救援物资配送选址-路径优化模型,通过选址-路径编码与均衡协作设计了启发式算法。周宇阳等^[14]根据应急医疗设施的特点,提出分层递进式选址方法对应急医疗设施进行选址,通过设计改进的免疫优化算法进行求解。

上述研究多是关于应急医疗设施选址问题的研究,更多考虑时间限制,对成本往往考虑较少。而普通医疗设施布局则更多考虑成本和居民便利

性的平衡。Ahmadi-Javid 等^[15]在医疗设施定位问题上,通过 10 个维度进行分类,明确每种 HCF 类型的差异并分析每种类型未来可能的研究方向。Sahar K. Elkady 等^[16]提出一种与非支配排序相结合的改进粒子群算法来解决医疗设施的多目标选址问题,试图在最大化需求覆盖与最小化出行距离 2 个目标之间进行平衡。Xin Lin 等^[17]构建多目标混合整数非线性规划来进行疫苗接种站位置选址,考虑居民出行距离以及疫苗接种站运营成本等因素,实现多目标选址规划。

由于数学模型求解困难,所以也有学者探索运用计算机技术研究医疗设施选址问题。Yevgeni Dudko 等^[18]采用将统计数据与地理信息系统 (Geographic Information System, GIS)相结合的方法,确定区域内新建初级卫生保健设施的地区并进行优先级排序。Huairan Ye 等^[19]阐明了 GIS 整合应用于选址问题的方法,并以案例详细阐述了 GIS 在选址问题中的应用步骤。Ralf Krohn 等^[20]通过应用 GAMS 与 CPLEX 软件,根据人工数据和经验数据的案例研究,在 1 小时内优化了多达 400 个需求节点和 15 个候选点的实例,显示了较快的计算速度。

综合以上研究存在的不足:①医疗设施网络布局研究较多采用规划求解,未考虑人力资源问题;②在运用仿真软件研究时,更多是将软件用于模型的求解证明,而不能运用仿真软件直接解决问题;③设施网络布局仿真研究缺乏对供应链整体布局优化的思考。因此本文将以南山区疫苗接种网络为研究对象,运用 Supply Chain Guru (SCG)软件进行网络优化、库存优化,并运用 SCG 软件的仿真功能对人力资源优化方案带来的服务水平、人员利用了、成本等进行评估,该方法优化更加简答,评估更加直观,为决策人员提供参考更加便利。

1 模型构建

1.1 背景资料

南山区目前设置 1 个疾病预防控制中心

(Center for Disease Control and Prevention, CDC), 76 个疫苗接种站(Regional Distribution Center, RDC)。由于区内人口基数大且分布分散, 因此根据居住地将疫苗接种人群划分成了 101 个社区^[17]。

为了优化疫苗接种网络, 疾控中心应确定: ①每个疫苗接种站所服务的社区; ②每个疫苗接种站应该完全\部分开放\关闭? ③疫苗接种站具体开放时间; ④每个疫苗接种站配备医疗人员数量; ⑤每次接种站疫苗采购规则。

政府部门需要综合考虑居民的便利性和成本, 因此本文的决策目标为最小化固定成本、采购成本、运输成本(即疫苗的变动运输成本和居民前往疫苗接种站的旅行成本)、库存成本和人力成本的总成本。

其中, 固定成本为疫苗接种站租金成本; 采购成本由固定成本(300 元/次)和变动成本(疫苗需求量 \times 单价)组成; 运输成本包括疫苗的变动运输成本($1.5 \text{ 元}/(\text{支}\cdot\text{km}^{-1})\times$ 疾控中心到疫苗接种站的距离)和居民旅行成本($30 \text{ 元}/(\text{支}\cdot\text{km}^{-1})$); 库存成本由疫苗持有成本(年需求量 \times 年化持有成本率 $12\%\times$ 疫苗单价 166 元/支)构成; 人力成本为医生薪酬(15 万元/(人/年))。

1.2 SCG 软件介绍

SCG(Supply Chain Guru)是 LLamasoft 公司开发的一款可以使复杂的供应链体系可视化的仿真建模软件, 通过运用网络优化和库存优化技术实现供应链优化设计, 并以仿真技术对供应链运营成本、服务水平、库存变化等运营绩效进行评价, 并以简洁图形展示给研究人员, 直观形象地供决策人员参考。

1.3 基准模型构建

首先运用 SCG 软件构建基准模型, 用来模拟现实世界, 为后续优化仿真提供基础。

1.3.1 角色构建

将“疾控中心”定义为“CDC”; 76 个“疫苗接种

站”定义为“RDC”; 101 个“社区”定义为“Customer”; “疫苗”定义为“Product”。并在产品表、客户表、站点表分别构建这 4 个角色, 其中产品的“单位价值”设定为“166 元/支”。

1.3.2 供需构建

把“社区需求”当作“客户需求”构建需求端。在“客户需求表”中, “产品”为“疫苗”; “P(34)”填入“需求量”一列中, 表示需求服从期望为 34 的泊松分布; 将“需求时间”设置为“1 d”; “需求次数”为 365。

在供应端假设“CDC”为“工厂”, 为下游提供疫苗。在“生产规则”中设置疫苗生产规则, 把“疫苗”填入“产品”列; “CDC”填入“站点”列; “生产规则”为“Make”。

1.3.3 供需关系构建

供需关系构建主要通过设置站点采购规则以及客户采购规则, 建立各节点之间路由关系。

在“站点采购规则”中限定 RDC 在 CDC 进行疫苗采购。我们先在站点表中新建一个过滤器“RDC-疫苗站”, 用于筛选所有疫苗接种站; 将所有 RDC 的产品始发地设为“CDC”; 同时将 RDC 采购规则设为“Single Source (Select Closest)”, “固定采购成本”设为 300 元; “采购提前期”设为 2 d。

1.3.4 配送模式构建

在“运输规则表”中, 设置 2 条疫苗运输规则。从“CDC”到“RDC-疫苗站”的运输规则设为“Full TL”, “时间间隔”为“1 d”, “变动运输成本”为“ $1.5 \text{ 元}/(\text{支}\cdot\text{km}^{-1})$ ”; 将“RDC”到“All_Customers”运输方式设为“LTL”, “变动运输成本”为“ $30 \text{ 元}/(\text{支}\cdot\text{km}^{-1})$ ”。

1.4 社区最近接种站点选择

在基准模型上以“将成本降至最低”作为优化目标, 运行“网络优化”技术, 可以将各个社区分配至最近的疫苗接种站, 并得到其总成本为 19 252 828 元, 其中疫苗接种站固定运营成本 5 504 928 元, 运输成本 13 747 900 元。疫苗接种站与社区对应关系如图 1 所示。

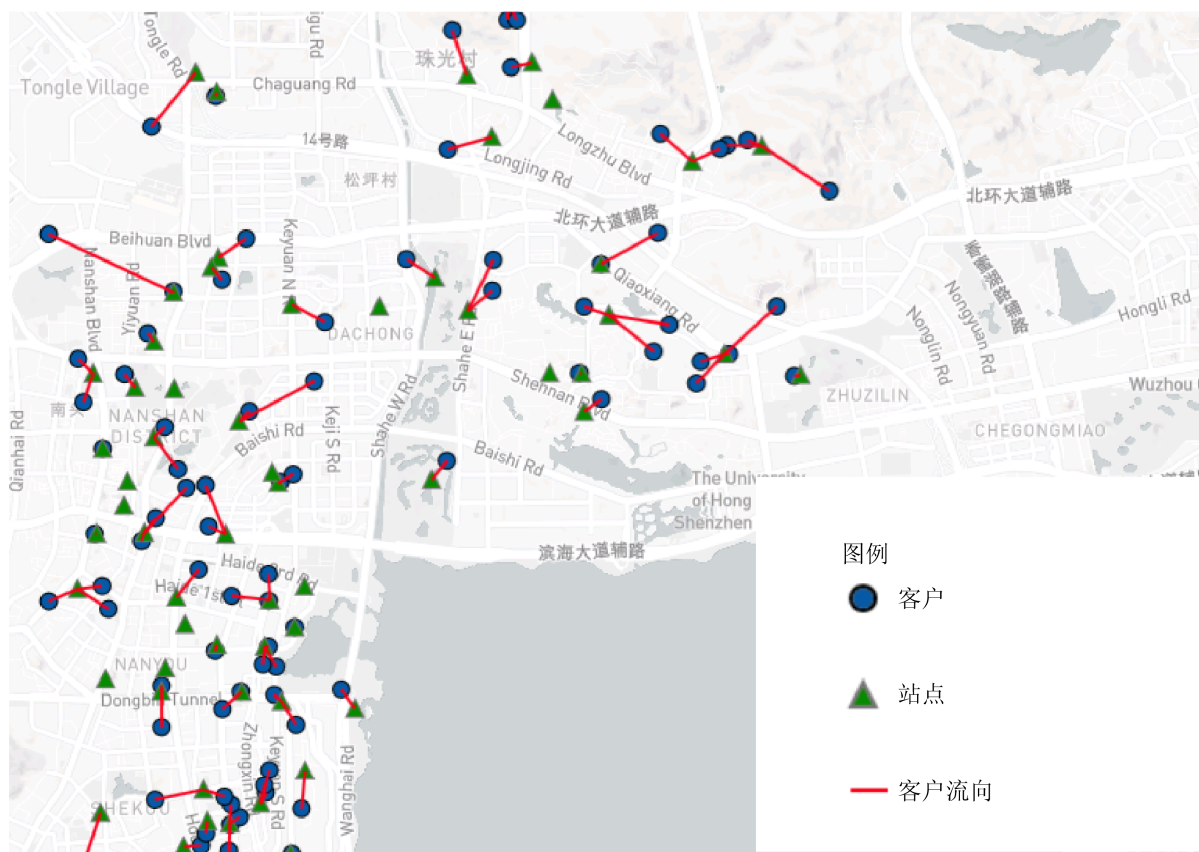


图 1 疫苗接种网络布局图
Fig. 1 Network of 76 vaccination stations

2 网络与库存优化

将运用 SCG 软件在基准模型上通过网络优化, 选择运营成本和运输成本总和最小的接种站点选址方案, 并通过库存优化为每个接种站点设置采购规则。

2.1 网络优化

在“站点”表中将所有疫苗接种站“状态”从“Include”修改为“Consider”, 表示每个站点可以考虑“开放”或者“关闭”。

然后运行网络优化, 可以得到使得固定运营成本和运输成本总和最小的疫苗接种网络设计方案。该方案关闭 26 个疫苗接种站, 保留开放 50 个疫苗接种站。

从表 1 可以看到通过网络优化关闭 26 个疫苗接种站点后, 虽然居民前往疫苗接种站点的成本上

升了 4.3%, 但是关闭 26 个站点可以节省固定运营成本 44.4%, 使得总成本节约 9.62%。

表 1 网络优化前后成本对比
Tab. 1 Comparison of cost while network optimization

| 站点数量 (个) | 总成本/元 | 固定运营成本/元 | 运输成本/元 |
|----------|------------|-----------|------------|
| 76 | 19 252 828 | 5 504 928 | 13 747 900 |
| 50 | 17 401 104 | 3 060 612 | 14 340 492 |
| 变化/% | -9.62 | -44.4 | 4.3 |

通过表 2 可知, 优化前开放 76 个站点实际只有 63 个站点有居民前往, 另外 13 个站点处于闲置状态; 优化后开放的 50 个站点都处于工作状态, 没有浪费。同时, 优化前后都是 RDC-23 服务居民最多, 为 33 945 个, 但优化后服务居民最少的 RDC-41 能够服务 2 555 位居民, 而优化前 RDC-74 只能服务 1 095 位居民, 所以优化后各站点利用率更高。

表 2 站点流量对比
Tab. 2 Comparison of site traffic

| 疫苗接种 站数量 | 实际有 效站点 | 最小 流量 | 最大 流量 | 平均值 |
|-------------|------------|----------|----------|----------|
| 76 | 63 | 1 095 | 33 945 | 10 903.7 |
| 50 | 50 | 2 555 | 33 945 | 13 738.6 |

2.2 库存优化

在得到 50 个开放站点后可以运用库存优化工具为每个疫苗接种站点推荐最优库存策略。

2.2.1 库存优化模型构建

首先根据网络优化结果, 在站点表中, 将 26 个应关闭疫苗接种站点状态从“Consider”更改为“Exclude”, 同时将其余站点状态更改为“Include”。

在网络优化输出表中, 可以从客户流量表看到为每个社区推荐的最近疫苗接种站点, 将其固定为新的顾客采购规则导入“客户采购规则”表。

然后设置站点库存成本参数, 在“库存规则”表中, 将“库存持有成本计算百分比”设为“12”, “服务要求”设为“0.95”, 表示年化库存持有成本占疫苗价值 12%, 希望缺货率低于 5%。

2.2.2 库存优化结果

运行“库存优化”中的“安全库存优化”, 可以从“库存规则总结”中看到系统为每个疫苗接种站点均推荐了(R, Q)采购策略, 并分别给出了每个站点的参数值, 如 RDC1 的再订货点 $R=311$, 订货批量 $Q=1\ 007$ 。

同时, 在“库存总结”表可以看到整个网络的“安全库存总成本”为 13 297.83 元, “周转库存总成本”为 220 772.54 元, “库存总成本”为 234 202.70 元。

3 固定站点数量的网络优化和仿真

本文在不考虑库存成本的情况下进行网络优化, 得到 50 个站点的选址方案之后再进行库存优化, 而这样得到的方案在考虑库存成本后未必是最优方案。为此将通过固定站点数量为 46~52 来寻找不同网络方案。

3.1 固定站点数量的网络优化

首先在站点中将所有 RDC 状态设为“Consider”, 然后在“站点限制表”添加一条记录, 在站点列输入“RDC-疫苗站”, 将限制类型设为“Fixed”, 将限制值设为“46”, 接着运行网络优化, 即可得到固定运营成本和运输成本总和最小的包含 46 个疫苗接种站的网络方案。

通过分别将限制值设为 47~52, 可以得到不同接种站数量的最优网络设计方案。

3.2 网络仿真及方案比较

在得到 46 个接种站的网络优化方案后, 参照 2.2 小节进行库存优化, 可以得到每个站点的推荐库存策略, 并将其导入库存规则表。

运行模拟技术, 可以根据订单数据模拟所有订单执行过程, 并得到其固定运营成本、基于仿真模拟的运输成本和库存持有成本。

通过重复以上过程, 能够得到包含 47~52 个站点的不同网络优化方案的成本, 整理如表 3 所示。从表 3 中看出, 相较于原来开放 76 个疫苗接种站点, 库存总成本大幅降低, 并且总成本在开放 48 个接种站时最小。相比于 76 个站点的原始方案, 总成本下降 950 026.7 元, 下降 4.93%。

4 人力资源分配优化

以该网络方案为基础, 优化人力资源分配, 为疫苗接种站安排开放天数并配备相应医疗人员。

4.1 医疗人员及工作时间初次分配

从“设施间订单流量”表, 导出各个疫苗接种站点服务的详细订单数据, 进而整理得到每个站点每周平均订单数量, 如 RDC-1 全年订单量为 24 168, 则每周订单量为 $24\ 168/52=464.769$ 。

根据测算, 每个医护人员(实际可能为 2 个医务人员组成的组合)每天服务能力为 100 人次, 假如该站点开放 5 天, 则可以服务 500 人次。据此, 可以计算每个接种站的医疗人员利用率, 如 RDC-1 的利用率为 93%。

表 3 8 种方案成本对比
Tab. 3 Cost comparison of 8 solutions

| 站点数量(个) | 总成本(元) | 固定运营成本(元) | 运输总成本(元) | 库存持有成本(元) |
|---------|---------------|--------------|---------------|------------|
| 46 | 18 332 843.35 | 2 862 612.00 | 14 741 540.72 | 426 590.63 |
| 47 | 18 327 057.48 | 2 878 608.00 | 14 712 862.41 | 430 187.07 |
| 48 | 18 321 740.80 | 2 910 612.00 | 14 668 181.33 | 433 947.47 |
| 49 | 18 322 601.95 | 2 980 608.00 | 14 592 550.83 | 437 143.12 |
| 50 | 18 327 164.35 | 3 060 612.00 | 14 511 121.65 | 440 130.70 |
| 51 | 18 342 266.68 | 3 092 616.00 | 14 488 904.04 | 442 746.64 |
| 52 | 18 359 620.76 | 3 124 620.00 | 14 468 332.94 | 445 667.83 |
| 76 | 19 271 767.50 | 5 504 928.00 | 13 747 900.20 | 18 939.30 |

然后设置医疗人员利用率 α 的服务阈值为 60% 及 35%，作为划分疫苗接种站每周开放 2 天、3 天和 5 天的界限，如表 4 所示。

表 4 医疗人员利用率对应开放天数
Tab. 4 Corresponding opening days of medical staff utilization rate

| 医疗人员利用率 $\alpha/\%$ | 开放天数/d |
|---------------------|--------------|
| $\alpha > 100$ | 5 (新增医生) |
| $\alpha \geq 60$ | 5 |
| $35 < \alpha < 60$ | 3 (即周一至周三开放) |
| $\alpha \leq 35$ | 2 (即周四至周五开放) |

其中，当医疗人员利用率 $\alpha > 100\%$ 时，说明该 RDC 只分配一个医疗人员时属于工作量超负荷，RDC 需每周开放 5 天，并根据其超额数量对应开放阈值为其增加相应医疗人员。如表 5 所示，RDC-46 医疗人员利用率 α 为 106.7%，超过医疗人员负荷的服务率余数为 6.7%，其余数小于 35%，因此需要再为 RDC-46 多分配 1 个医生工作 2 天。

表 5 医疗人员数及开放天数(部分站点)
Tab. 5 Number of medical staff and open days

| 订单目的地 | 订购数量 | 每周需求 | 医疗人员数量 | 开放天数 α/d | 医疗人员利用率 $\alpha/\%$ |
|--------|--------|-------|--------|-----------------|---------------------|
| RDC-1 | 24 168 | 464.8 | 1 | 5 | 93.0 |
| RDC-23 | 25 376 | 488.1 | 1 | 5 | 98.0 |
| RDC-28 | 13 338 | 256.5 | 1 | 5 | 51.3 |
| RDC-46 | 27 742 | 533.3 | 1 | 5 | 106.7 |

4.2 客户需求划分

调整站点开放时间后，会出现部分居民需要接

种时，疫苗接种站点关闭的问题。为此假设该社区当日 70% 居民选择继续等待，30% 居民将重新选择就近开放站点接种疫苗，并将一个社区划分为 2 个需求组，分别命名为“big-Xdays-Y (70% 选择等待)”和“small-Xdays-Y (30% 重新选择)”。以某个仅周四、五开放的站点为例，该站点服务社区属于“big-Xdays-Y”的周一、周二、周三的居民就会等待到周四或周五再去接种；而周一、周二、周三产生的属于“small-Xdays-Y”30% 居民则会选择到就近开放的站点进行接种。

在“订单报告”表中导出 101 个社区的每天订购数量，根据各个社区对应疫苗接种站开放天数，将站点未开放时间的所有订单按照 70% 和 30% 的比例进行划分。以社区 4 为例(见图 2)，当社区 4 所对应疫苗接种站 RDC-34 开放 3 天(即周一至周三)，将该社区周四至周五订单的 70% 平均分到周一至周三的订单之上，继续等待 RDC-34 开放(第 4 列所示)，周四周五订单的 30% 将重新选择就近开放疫苗接种站进行接种(第 3 列所示)。

| 日期 | 原始订单 | 70% 30% 将重新选择的订单 (small-3days-4) | 留在该疫苗站的订单 (big-3days-4) |
|----|------|----------------------------------|-------------------------|
| 周四 | 32 | 22 | 10 |
| 周五 | 44 | 31 | 13 |
| 周一 | 33 | / | / |
| 周二 | 35 | / | / |
| 周三 | 32 | / | / |

$33 + (22+31)/3 = 51$
 $35 + (22+31)/3 = 53$
 $32 + (22+31)/3 = 50$

图 2 客户需求划分具体操作

Fig. 2 Specific operation of customer requirement division

4.3 顾客重新选择疫苗接种站点

根据上述需求划分, 将社区需求划分为 5 种类型, 分别是“5days-”, “big-3days-”, “big-2days-”, “small-3days-”以及“small-2days-”。其中“small-3days-”和“small-2days-”的社区需要重新确定与疫苗接种站的路由关系。

可以利用网络优化工具确定所有社区的路由。以“small-3days-Y”客户的疫苗接种站重新选择为例, 将 4.2 节得到的订单数据导入“客户订单表”, “站点表”则把仅开放 3 天的站点状态设置为“Exclude”, 其余站点为“Include”。在“客户表”中, 则把“small-3days-Y”客户状态设置为“Include”, 其余设为“Exclude”。然后运行网络优化后从客户流量表可以看到这些社区被重新分配给了其他站点。

同理可得客户“small-2days-Y”重新选择后的站点。

4.4 人力资源分配优化

社区重新选择疫苗接种站点后, 可以重新计算各站点订单数量, 并再次计算医疗人员利用率 β , 据此调整疫苗接种站开放天数与医疗人员数量。当 β 超过 100% 时优先考虑增加开放天数(如 2 天改为 3 天, 3 天改为 5 天), 开放 5 天的疫苗接种站则增加医疗人员数量。

以 RDC-28 和 RDC-23 为例, RDC-28 原定开放天数为 3 天, 调整后医疗人员利用率为 105%, 因此, 将其开放时间从 3 天增加为 5 天; RDC-23 开放天数为 5 天, 医疗人员利用率为 115%, 说明 RDC-23 在仅有 1 名医疗人员情况下, 将超负荷工

作 5 天, 因此需要对 RDC-23 增派一名医疗人员工作 2 天。

由于部分 β 超过 100% 的疫苗接种站将更改开放天数, 因此需要重复上述步骤再次为部分居民重新选择接种站点, 并调整站点开放时间和医疗人员配置, 直到所有开放站点的医疗人员利用率小于 100%。

4.5 结果分析

通过人力资源分配优化, 缩短疫苗接种站开放时间, 并安排部分医疗人员可以在开放 2 天和 3 天的站点间轮换, 有效减少医疗人员数量, 降低人工成本。优化后医疗人员数量从 76 个降为 33 个, 医疗人员利用率达 64.08%, 人工成本为 495 万元, 节省 645 万。

4.6 多种方案对比

为了提供更多方案供决策人员选择, 首先进一步调整医疗人员利用率 α 阈值、改变开放天数和开放时间, 从而得到其他 4 个方案(见表 6)。然后分别进行库存优化, 根据库存优化得到的库存策略进行仿真, 可以得到各种方案的成本、客户服务水平等指标供决策人员参考, 详见表 7。

从表 7 看出, 方案三客户流失率、1 km 覆盖率等服务质量指标最好, 但其医疗人员数量相对较多, 同时总成本最高。所以一般来说增加医疗人员数量, 降低人员利用率, 会提高成本, 但居民接种更加方便, 出行距离更短。

表 6 其他方案实施内容
Tab. 6 Implementation content of other programs

| 方案二 | | 方案三 | | 方案四 | | 方案五 | |
|------------------------|---------|------------------------|---------|------------------------|---------|------------------------|---------|
| 服务阈值 | 开放时间 | 服务阈值 | 开放时间 | 服务阈值 | 开放时间 | 服务阈值 | 开放时间 |
| $\alpha \geq 0.60$ | 5 天 | $\alpha \geq 0.60$ | 5 天 | $\alpha \geq 0.60$ | 5 天 | $\alpha \geq 0.60$ | 5 天 |
| $0.30 < \alpha < 0.60$ | 3 天 | $0.40 < \alpha < 0.60$ | 3 天 | $0.35 < \alpha < 0.60$ | 4 天 | $0.35 < \alpha < 0.60$ | 3 天(周一、 |
| | (周一至周三) | | (周一至周三) | | (周二至周五) | | 周三、周五) |
| $\alpha \leq 0.30$ | 2 天 | $\alpha \leq 0.40$ | 2 天 | $\alpha \leq 0.35$ | 1 天(周一) | $\alpha \leq 0.35$ | 2 天 |
| | (周四至周五) | | (周四至周五) | | | | (周二、周四) |

表7 总体方案对比
Tab. 7 Comparison of the full program

| | 方案一 | 方案二 | 方案三 | 方案四 | 方案五 |
|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 总成本(元) | 20 864 058.78 | 20 278 981.63 | 22 103 710.27 | 21 336 824.57 | 20 892 989.09 |
| 固定运营成本(元) | 2 910 612 | 2 910 612 | 2 910 612 | 2 910 612 | 2 910 612 |
| 运输成本(元) | 12 271 983.24 | 11 988 740.39 | 12 935 576.91 | 11 733 809.51 | 12 323 162.46 |
| 库存持有成本(元) | 514 563.54 | 512 729.24 | 490 921.36 | 472 803.07 | 491 714.63 |
| 采购成本(元) | 216 900 | 216 900 | 216 600 | 219 600 | 217 500 |
| 医疗人员数量(个) | 33 | 31 | 37 | 40 | 33 |
| 人工成本(元) | 4 950 000 | 4 650 000 | 5 550 000 | 6 000 000 | 4 950 000 |
| 客户出行总距离/km | 243 347.93 | 234 746.99 | 252 090.29 | 226 759.27 | 243 478.02 |
| 客户流失率/% | 8.94 | 8.74 | 8.63 | 4.18 | 8.92 |
| 1 km 覆盖率/% | 89.48 | 89.35 | 91.91 | 90.92 | 89.49 |
| 2 km 覆盖率/% | 97.79 | 92.92 | 98.20 | 97.63 | 97.79 |
| 3 km 覆盖率/% | 98.72 | 96.59 | 98.83 | 99.21 | 98.71 |

5 结论

本文以南山区疫苗接种网络为例,研究了如何运用 SCG 进行接种疫苗接种网络优化问题。

本文设计方法首先以接种站点固定运营成本最小和居民便利为目标研究备选接种站点的开放与关闭问题,并为每个社区分配最近疫苗接种站点;然后仍以上述成本最小化为目标设计了固定开放站点数目的站点选址方法。

然后本文设计了库存优化方法,为每个疫苗接种站点推荐库存采购策略;在此基础上运用模拟仿真评估各个方案成本(包括库存成本),发现最优方案比原始方案节省成本 95 万元,节约率 4.93%。

最后我们设计了一套医疗人员配置优化方法,可以有效提高医疗人员利用率,节省人工成本 645 万,节约率 56.6%。同时仿真模拟可以得到多种方案的成本、服务率等指标,供决策人员参考后综合决策。

参考文献:

- [1] 陶克涛, 张术丹, 赵云辉. 什么决定了政府公共卫生治理绩效? ——基于 QCA 方法的联动效应研究[J]. 管理世界, 2021, 37(5): 128-138.
Tao Ketao, Zhang Shudan, Zhao Yunhui. What Does Determine Performance of Government Public Health Governance? A Study on Co-movement Effect Based on QCA[J]. Management World, 2021, 37(5): 128-138.

- [2] 余文周, 王雷, 王青, 等. 新型冠状病毒肺炎疫情期间及过后免疫规划策略与预防接种工作方法建议[J]. 中国病毒病杂志, 2020, 10(2): 95-97.
Yu Wenzhou, Wang Lei, Wang Qing, et al. Immunization Program Strategies and Recommendations for Vaccination During and After the Novel Coronavirus Pneumonia Epidemic[J]. Chinese Journal of Viral Diseases, 2020, 10(2): 95-97.
- [3] 齐晔, 陈刘欢, 张栗, 等. 新型冠状病毒肺炎的公众认知、态度和行为研究[J]. 热带医学杂志, 2020, 20(2): 145-149.
Qi Ye, Chen Liuhuan, Zhang Li, et al. Public Practice, Attitude and Knowledge of Coronavirus Disease[J]. Journal of Tropical Medicine, 2020, 20(2): 145-149.
- [4] 孙辉峰, 曹玲生, 余文周, 等. 中国不同时期常规免疫接种单位和人员变化[J]. 中国疫苗和免疫, 2020, 26(2): 193-197.
Sun Hui Feng, Cao Lingsheng, Yu Wenzhou, et al. Routine Immunization Unit and Staff Changes Over Time in China[J]. Chinese Journal of Vaccines and Immunization, 2020, 26(2): 193-197.
- [5] 蔡娟, 高凤莉, 游兆媛, 等. 新冠肺炎疫情下综合医院护理人力应急管理体的紧迫问题及其对策建议[J]. 中国病原生物学杂志, 2021, 16(2): 235-237.
Cai Juan, Gao Fengli, You Zhaoyuan, et al. Urgent Problems with the Emergency Nurse Staffing Management System in General Hospitals and Suggested Countermeasures Amidst COVID-19[J]. Journal of Pathogen Biology, 2021, 16(2): 235-237.
- [6] 王志伟, 李智, 黄惠民, 等. 广州市居民对新型冠状病毒疫苗的认知与接种意愿调查[J]. 现代预防医学, 2021, 48(4): 732-737.

- Wang Zhiwei, Li Zhi, Huang Huimin, et al. Investigation on Residents' Awareness of COVID-19 Vaccines and Vaccination Willingness in Guangzhou[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2021, 48(4): 732-737.
- [7] 徐健. COVID-19 疫情给其它传染病防治带来的挑战与机遇[J]. *现代预防医学*, 2021, 48(5):777-780, 798.
- Xu Jian. Challenges and Opportunities Presented by the COVID-19 Epidemic to Other Infectious Diseases[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2021, 48(5): 777-780, 798.
- [8] 欧燕玲, 王高玲, David Qian. 后疫情时代基层医疗卫生机构常态化防控模式构建[J]. *卫生经济研究*, 2021, 38(2): 67-69.
- Ou Yanling, Wang Gaoling, David Qian. Construction of Normalized Prevention and Control Model for Primary Health Care Institutions in Post-epidemic Era[J]. *Health Economics Research*, 2021, 38(2): 67-69
- [9] Anuj K, Prashant K. Srivastava. Vaccination and treatment as control interventions in an infectious disease model with their cost optimization[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation (S1007-5704)*, 2017, 44.
- [10] 周愉峰, 李志, 刘思峰. 基于随机 p-鲁棒优化的国家血液战略储备库选址-库存模型[J]. *中国管理科学*, 2018, 26(10): 52-63.
- Zhou Yufeng, Li Zhi, Liu Sifeng. Location-inventory Model of National Blood Strategic Reserve Based on Stochastic P-robust Stochastic Optimization Method[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(10): 52-63.
- [11] 彭春, 李金林, 冉伦, 等. 需求不确定下应急医疗服务站鲁棒配置模型与算法[J]. *运筹与管理*, 2017, 26(9): 21-28.
- Peng Chun, Li Jinlin, Ran Lun, et al. Emergency Medical Service Station Robust Location Model and Algorithm Under Demand Uncertainty[J]. *Operations Research and Management Science*, 2017, 26(9): 21-28.
- [12] 杜浩国, 林旭川, 张方浩, 等. 基于蚁群优化算法的应急避难场所选址模型研究[J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(2): 89-101.
- Du Haoguo, Lin Xuchuan, Zhang Fanghao, et al. Study on Emergency Shelter Location Model Based on Ant Colony Optimization Algorithm[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(2): 89-101.
- [13] 陈业华, 白静, 李兴源. 多阶段灾后救援选址-路径模型及求解算法[J]. *工业工程与管理*, 2017, 22(5): 150-157.
- Chen Yehua, Bai Jing, Li Xingyuan. Model and Algorithm for Location-Routing of Multi-Stage Post-Disaster Emergency Rescue[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2017, 22(5): 150-157.
- [14] 周宇阳, 张惠珍, 马良. 求解应急医疗设施分层递进式选址问题的改进免疫算法[J]. *运筹学学报*, 2021, 25(2): 15-34.
- Zhou Yuyang, Zhang Huizhen, Ma Liang. An Improved Immune Algorithm for Solving Hierarchical and Progressive Location Problem of Emergency Medical Facilities [J]. *Operations Research Transactions*, 2021, 25(2): 15-34.
- [15] Ahmadi-Javid A, Pardis S, Syam S S. A Survey of Healthcare Facility Location[J]. *Computers and Operations Research(S0305-0548)*, 2016, 79(3): 223-263.
- [16] Sahar K E, Hisham M A. A Modified Multi-Objective Particle Swarm Optimisation Algorithm for Healthcare Facility Planning [J]. *International Journal of Business and Systems Research(S1751-200X)*, 2016, 10(1): 1-22.
- [17] Li X, Pan Y C, Jiang S Q, et al. Locate Vaccination Stations Considering Travel Distance, Operational Cost, and Work Schedule [J]. *Omega(S0305-0483)*, 2020, 101(6): 1-13.
- [18] Dudko Y, Robey D E, Kruger E, et al. Selecting a Location for a Primary Healthcare Facility: Combining a Mathematical Approach with a Geographic Information System to Rank Areas of Relative Need[J]. *Australian Journal of Primary Health(S1448-7527)*, 2018, 24(2): 130-134.
- [19] Ye H R, Hyun K. Locating Healthcare Facilities Using a Network-based Covering Location Problem[J]. *Geo Journal (S0343-2521)*, 2016, 81(6): 875-890.
- [20] Ralf K, Sven M, Knut H. Preventive Healthcare Facility Location Planning with Quality-conscious Clients[J]. *OR Spectrum (S0171-6468)*, 2020, 43(1): 59-87.