

基于SEIR-INV模型的季节性流感药品库存优化研究

陈欣池, 邓 华*

湖南人文科技学院数学与数据科学学院, 湖南 娄底

收稿日期: 2026年6月28日; 录用日期: 2026年7月22日; 发布日期: 2026年7月28日

摘 要

针对乡村振兴背景下村卫生室季节性流感药品供应保障的难题, 本文在综合考虑需求波动与药品有效期的基础上, 研究如何制定成本最低、服务可靠的动态库存策略, 以提升农村基层医疗卫生服务韧性。以奥司他韦为研究对象, 构建集预测与优化于一体的决策模型。利用SEIR传染病动力学模型预测不同规模村庄的流感药品动态需求, 建立考虑药品有效期的SEIR-INV库存模型。该模型以总成本最小化为目标, 设置服务水平约束, 采用遗传算法求解最优订货点与订货量。数值实验结果表明, 模型能够为三类典型村庄生成差异化的最优库存策略, 本文优化策略可稳定维持高服务水平, 并大幅降低成本, 实现了服务保障、有效期管控与库存成本的协同优化。敏感性分析显示, 就诊率与处方率是影响最优策略的关键参数, 参数变化会带来订货决策与总成本的明显波动。本文提出的集成模型能够有效应对村卫生室药品需求的季节性波动, 在保障供应水平和药品有效期的同时实现成本管控, 为完善农村药品供应保障体系提供了科学的决策依据。

关键词

乡村振兴, 药品库存, SEIR-INV模型, 季节性流感

Inventory Optimization of Seasonal Influenza Drugs Based on the SEIR-INV Model

Xinchi Chen, Hua Deng*

School of Mathematics and Data Science, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi Hunan

Received: June 28, 2026; accepted: July 22, 2026; published: July 28, 2026

*通讯作者。

文章引用: 陈欣池, 邓华. 基于 SEIR-INV 模型的季节性流感药品库存优化研究[J]. 应用数学进展, 2026, 15(7): 318-332.
DOI: 10.12677/aam.2026.157325

Abstract

Addressing the challenge of ensuring the supply of seasonal influenza drugs to village clinics under the context of rural revitalization, this paper, considering both demand fluctuations and drug shelf-life, explores how to develop a dynamic inventory strategy that minimizes costs and ensures reliable service, thereby enhancing the resilience of rural primary healthcare services. Using oseltamivir as a case study, a decision-making model integrating prediction and optimization is constructed. The SEIR epidemic model predicts dynamic drug demand in villages of different scales, and a SEIR-INV inventory model with drug validity constraints is established. The genetic algorithm solves the optimal reorder point and quantity to minimize total cost under service level constraints, achieving synergistic optimization of service assurance, shelf-life control, and inventory costs. Sensitivity analysis shows that the consultation rate and prescription rate are key parameters affecting the optimal strategy, and changes in these parameters lead to significant fluctuations in ordering decisions and total costs. The ensemble model proposed in this paper can effectively address the seasonal fluctuations in drug demand in village clinics, achieving cost control while ensuring supply levels and drug shelf-life, thus providing a scientific basis for improving the rural drug supply guarantee system.

Keywords

Rural Revitalization, Drug Inventory, SEIR-INV Model, Seasonal Influenza

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

季节性流感是我国农村地区高发的呼吸道传染病, 具有发病急、传播快、季节性明显等特点。村卫生室作为基层医疗卫生服务体系的网底, 承担着流感诊疗与药品供给的关键职责。然而, 流感的突发性和需求波动的高度不确定性, 使村卫生室在药品库存管理中面临两难: 储备不足容易导致药品短缺, 影响村民及时救治; 储备过量则容易造成药品过期, 导致医疗资源浪费。在流感高发季节, 这一问题尤为突出, 直接关系到农村居民的健康权益与基层医疗服务能力的有效发挥。

近年来, 国家高度重视农村基层医疗卫生服务体系建设。《“健康中国 2030”规划纲要》[1]明确提出要“完善药品供应保障体系”“提供优质高效的医疗服务”; 《关于进一步完善医疗卫生服务体系的意见》[2]中强调要“强化城乡基层医疗卫生服务网底”, 提高基层药品供应保障能力; 乡村振兴战略也要求推进健康乡村建设, 强化基层公共卫生服务。在此背景下, 科学预测季节性流感药品需求、优化村卫生室库存管理策略已成为提升农村医疗服务韧性的关键问题。本研究立足湖南省农村实际, 将传染病传播模型与库存管理理论相结合, 为村卫生室提供科学、动态、差异化的药品库存决策支持, 助力乡村振兴与健康乡村建设。

当前关于农村药品库存及医疗资源调配的研究, 主要集中于三个层面:

一是宏观政策与定性分析层面, 该研究集中于分析国家基本药物制度、药品零差率销售[3]、集中采购等政策对基层药品可及性的影响, 多采用问卷调查、访谈、描述性统计等方法。二是中观库存管理模型应用层面, 该研究将经典的库存模型(如 EOQ 经济订货批量模型[4]、报童模型[5]等)应用于药品管理, 通常假设需求服从某种概率分布(如正态分布、泊松分布等), 建立随机库存模型, 以成本最小化为目

标求解。三是传染病模型与资源预测层面, 研究借助 SEIR [6]、SIR 等传染病动力学模型预测流感发展, 为医疗资源的宏观规划提供依据, 多以微分方程数值求解与参数估计为主要方法。

现有研究的短板在于“需求预测”和“库存优化”之间存在脱节, 一方面是使用不贴合农村流感药品需求特性的简单模型, 另一方面忽略了药品有效期这一现实因素, 未能实现从传染病传播机理到库存执行策略的端到端闭环优化。基于现有文献, 本文开展以下工作:

(1) 将 SEIR 传染病动力学模型与考虑效期的 INV 库存优化模型创新性融合, 构建 SEIR-INV 集成预测与优化模型。

(2) 引入模拟优化方法应对非平稳需求和药品有效期带来的复杂性, 即通过计算机库存模拟来评估 (s, Q) 策略的性能, 结合遗传算法进行智能搜索, 为复杂随机系统问题提供可行方案。其中, (s, Q) 策略指对库存水平进行不间断监测, 当库存水平降至再订货点 s 时, 立即发出固定批量为 Q 的补货指令, 是医疗物资、药品库存管理中应用最广泛的连续型库存控制策略。

(3) 在库存模拟中加入逐日效期检查, 每天更新库存药品的剩余有效期, 及时清除过期药品, 并按照过期数量乘以采购价格计入报损成本, 把药品过期问题量化为可计算的成本, 让模型在优化时既能控制库存成本, 又能避免药品积压过期。

综上所述, 本文的主要创新之处在于: 模型上, 构建了贯通“传染病预测-库存决策”的 SEIR-INV 模型, 弥补了预测与决策脱节的不足; 算法上, 针对非平稳需求与效期约束导致的解析困难, 采用模拟优化方法, 为求解该类复杂随机系统优化问题提供了新思路; 实践上, 通过量化药品有效期成本并为不同类型村庄提供差异化策略, 推动了农村药品库存管理从经验式管理向精细化科学决策转变。

本文的其余结构安排如下: 在第 2 章构建基于 SEIR 的季节性流感药品需求预测模型, 并以库存总成本最小化为目标, 设定 95% 的服务水平约束, 建立考虑药品有效期的 SEIR-INV 库存优化模型。在第 3 章利用湖南省真实统计数据对模型进行参数校准, 通过遗传算法数值实验求解高、中、低三类典型村庄的最优库存策略, 对比传统策略并展开就诊率与处方率的敏感性分析, 验证所提出模型的有效性。在第 4 章总结本研究的主要结论与管理启示。

2. 药品需求预测与动态库存优化模型

2.1. SEIR 需求预测模型

季节性流感是一种呼吸道传染病, 传染性强、传播速度快, 多由流感病毒感染引起。流感暴发时, 村卫生室容易出现药品供不应求的状况, 影响村民的健康状况, 当流感即将结束或者结束时, 村卫生室的药品库存可能出现库存积压与过期浪费。因此, 科学调配村卫生室的药品库存极为重要。为了模拟季节性流感在特定村庄的传播动力学, 预测出规划期内的每日药品需求, 构建如下微分方程模型:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\frac{\beta(t)IS}{N} \\ \frac{dE}{dt} = \frac{\beta(t)IS}{N} - \sigma E \\ \frac{dI}{dt} = \sigma E - \gamma I \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I \end{cases} \quad (1)$$

其中, 感染率 $\beta(t)$ 用于模拟季节性特征, 是一个季节性函数 $\beta(t) = \beta_0(1 + \alpha \cos(2\pi t/365))$ 。每日药品需求量则通过线性映射得到 $D_t = \theta \cdot \sigma E_t$ 。状态变量 t 时刻易感者数量 S 、潜伏者数量 E 、感染者数量 I 、康复者数量 R 均由模型动态求解; 服务总人口 N 、基础感染率 β_0 、季节波动幅度 α 、潜伏期倒数 σ 、恢复

率 γ 为输入参数, 可结合权威数据与临床规范设定; E_0 、 I_0 分别为初始潜伏、感染人数, 即模型初始化的合理假设; D_t 为第 t 天药品需求, 是模型最终输出结果; θ 为需求系数, 由就诊率、处方率与疗程盒数相乘得到, 用于将 SEIR 模型预测的感染者数量转化为村卫生室的每日药品需求量。

上述 SEIR 模型通过对流感传播动力学的精准刻画, 可实现对村卫生室每日药品需求序列的科学预测, 为后续库存优化提供可靠的需求输入。然而, 单纯的需求预测无法直接指导库存决策, 还需进一步考虑药品有效期、订货成本、服务水平等现实约束, 构建集成预测与优化的闭环模型。因此, 本节在 SEIR 需求预测的基础上, 引入库存管理理论, 构建考虑药品有效期的 SEIR-INV 库存优化模型, 实现从需求预测到库存策略优化的衔接。

2.2. 考虑药品有效期的 SEIR-INV 库存优化模型

本节将建立考虑药品有效期的 SEIR-INV 库存优化模型。模型的目标是在规划期 T 内, 考虑药品有效期对总成本的影响, 寻找最优的 (s, Q) 策略, 使系统总成本 TC 最小。总成本由订货成本 O_c 、持有成本 H_c 、缺货成本 S_c 和报损成本 D_c 四个部分构成:

$$TC(s, Q) = O_c + H_c + S_c + D_c, \quad (2)$$

其中, 订货成本为 $O_c = C_o \cdot N_o$, N_o 表示规划期内总订货次数。订货成本 C_o 反应每次补货产生的固定费用, 包括向上级卫生院提交订单所产生的行政成本、药品从乡镇配送至村级的单次运输均摊成本, 以及接收与处理药品所消耗的人工成本。因此, 模型通过优化订货量 Q 与订货点 s 来平衡订货成本, 避免因频繁订货而导致总费用升高。

持有成本:

$$H_c = C_h \cdot \sum_{t=1}^T I_t, \quad (3)$$

其中, I_t 表示第 t 日的库存水平。此项成本反映了维持药品库存所需的持续性资金占用与仓储费用。其构成主要包括采购药品所垫付的资金、药品存放所需空间的管理与维护费用等。该成本与平均库存水平成正比, 促使模型寻找合理的库存水平。

缺货成本:

$$S_c = C_s \cdot \sum_{t=1}^T S_t, \text{ 且 } S_t = \max(0, D_t - I_t), \quad (4)$$

其中, S_t 为第 t 日的缺货量。此项成本是对药品供应中断所带来负面影响的经济量化。其构成不仅包括损失的药品销售收入, 还需要考虑到因患者无法及时获得治疗而病情加重、患者将转向其他医疗机构, 导致村卫生室收入流失和信誉受损等; 因此, 这里设定一个相对较高的缺货成本 C_s , 旨在引导优化算法优先保障药品的可及性, 这与强化基层医疗卫生服务能力的政策目标相契合。

报损成本:

$$D_c = C_p \cdot \sum_{t=1}^T O_t, \quad (5)$$

报损成本直接反映药品过期报废的经济损失, 模型中设定单位报损成本 C_p 等于药品的采购价格, 体现药品过期后价值归零的特性。引入报损成本是区别于传统库存模型的关键, 迫使策略兼顾库存周转与有效期管控, 避免资源浪费。 O_t 表示报损量, 此项成本是药品超过有效期后报废所造成的直接经济损失。

综上所述, 决策变量 s 和 Q 的取值, 通过上述四种成本(2)、(3)、(4)、(5), 共同决定了总成本 $TC(s, Q)$ 的最终结果, 但由于需求 D_t 的非平稳性以及药品有效期约束的存在, 最终的目标函数不能表示为线性函

数, 因此以下的模型将在数值实验部分采用特殊的算法进行求解。

$$\begin{aligned} \min_{s, Q} TC(s, Q) &= C_o \cdot N_o + C_h \cdot \sum_{t=1}^T I_t + C_s \cdot \sum_{t=1}^T S_t + C_p \cdot \sum_{t=1}^T O_t \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} SL(s, Q) \geq \delta, \\ Q_d \leq Q \leq Q_u, \\ s_d \leq s \leq s_u, \\ s \in Z^+, Q \in Z^+ \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

再订货点 s 的下限为 s_d , 上限为 s_u ; 订货量 Q 的下限为 Q_d , 上限为 Q_u 。其中, 决策变量 s 和 Q 的搜索范围需根据三类村庄的需求特征确定这些边界参数的具体取值。 s 的设置应确保有最低限度的安全库存, 以应对提前期内的基础需求; 考虑到村卫生室极小的存储空间和有限的资金, Q 应设定一个远高于任何可能峰值需求的上限, 足以覆盖所有合理场景, 同时避免算法在无效的过大值域中浪费计算资源。

服务水平 SL 表示药品总销售量与总需求量的比值, 每日销售量考虑为当日药品库存与当日需求中较小者, 本文设定目标服务水平不低于 95%。

$$SL = \frac{\sum_{t=1}^T Sales_t}{\sum_{t=1}^T D_t}, \text{ 其中, } Sales_t = \min(I_t, D_t)$$

本文构建的 SEIR-INV 模型将药品有效期纳入库存决策体系, 通过拆分总成本构成、设计算法及设置合理约束条件, 实现对村卫生室流感药品库存的建模, 既贴合农村基层医疗药品配送与存储实际, 又兼顾了服务水平保障与成本控制。模型以 SEIR 输出的动态需求为输入, 通过遗传算法结合库存系统模拟的方式求解最优 (s, Q) 库存策略, 为后续开展数值实验与验证模型有效性奠定理论基础。

3. 数值实验

本章将通过系统的数值实验验证 SEIR-INV 模型在村卫生室季节性流感药品库存管理中的有效性与优越性。实验基于湖南省农村真实数据, 从需求预测、策略优化、对比分析及敏感性测试四个维度展开。

3.1. SEIR 模型参数与需求预测结果

实验在 MATLAB R2021a 编程环境下实现, 所有代码均采用模块化设计。数据来源于统计公报、诊疗方案及相关文献。

SEIR 模型参数及取值依据如下。状态变量有: t 时刻易感者数量 $S(t)$ 、 t 时刻潜伏者数量 $E(t)$ 、 t 时刻感染者数量 $I(t)$ 、 t 时刻康复者数量 $R(t)$, 将由模型动态求解。输入参数中, 服务总人口数 N 的取值见表 1; 基础感染率 β_0 参考流感相关模型经典参数范围取值为 0.45, 该值处于同类研究常用区间 0.43~0.76 内 [7], 能够合理反映季节性流感传播特征; 依据《流行性感冒诊疗方案》[8], 参考其冬季流感高发的季节性特征确定季节波动幅度 α 为 0.4、潜伏期 1~4 天取最高值确定潜伏期倒数 σ 为 0.25、传染期 5~7 天取中值确定恢复率 γ 为 0.17; 初始潜伏人数 E_0 设为 15、初始感染人数 I_0 设为 8。设第 t 天药品需求 D_t 为模型最终输出, 需求系数 θ 中取就诊率 65%与处方率 75%、奥司他韦疗程盒数基于药品说明书。

Table 1. Coverage population statistics of health rooms in Hunan Province by prefecture/city

表 1. 湖南省各地市卫生室需服务人口数表

场景	服务人口 N (人)	代表区域特征	依据
场景 A	800	湘西、湘南地区, 人口外流严重	此数值约为全省平均值的 50%, 以体现其小规模特性

续表

场景 B	1800	湘中丘陵盆地，全省平均水平	湖南省人民政府[9]发布 2022 年总人口 6604 万/村卫生室数 36,129 个，得湖南省总人口数与村卫生室总数之比取整(1800/村)作为基准场景
场景 C	3500	洞庭湖平原	约为全省平均值的 1.9 倍，以体现其大规模特性

由于无法直接获取湖南省各地市村卫生室服务人口数量，本文采用“全省平均数据 + 合理偏差”的方法定义三种场景，如表 1 所示。该分类旨在覆盖从山区小村到平原大村的各类情况，提升结论代表性。

以 B 类村为例，基于模型(1)，构建如下 SEIR 需求预测模型：

感染率函数：

$$\beta(t)=0.45\times\left(1+0.4\times\cos\left(2\pi t/365\right)\right) \tag{7}$$

SEIR 微分方程组：

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt}=-\frac{0.45\times\left(1+0.4\times\cos\left(2\pi t/365\right)\right)\times I\times S}{1800} \\ \frac{dE}{dt}=-\frac{0.45\times\left(1+0.4\times\cos\left(2\pi t/365\right)\right)\times I\times S}{1800}-0.25E \\ \frac{dI}{dt}=0.25E-0.17I \\ \frac{dR}{dt}=0.17I \end{cases} \tag{8}$$

每日药品需求量：

$$D_t=0.4875\times0.25\times E_t\approx0.122\times E_t \tag{9}$$

以 B 类村为例，图 1 直观展现了 SEIR 模型下 120 天周期内村庄易感者、潜伏者、感染者、康复者四类人群在传染病从暴发、传播到消退的动态变化过程。

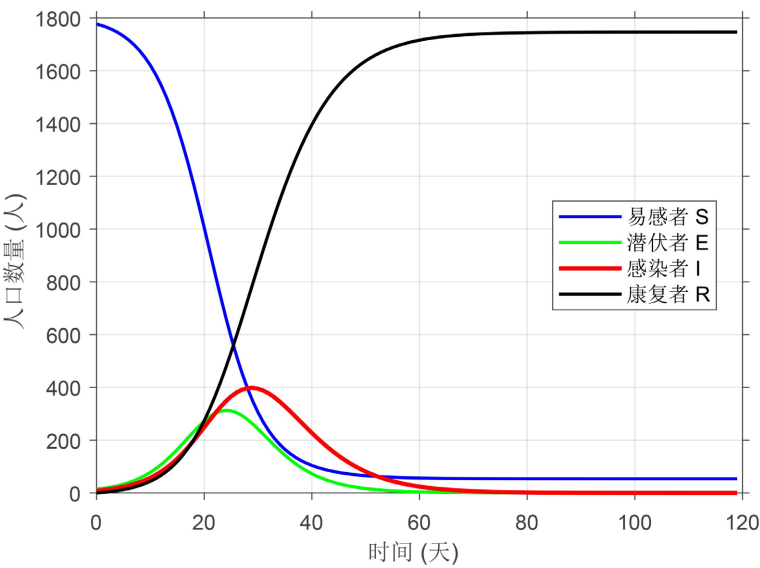


Figure 1. Epidemiological dynamics of the SEIR model for type B village
图 1. B 类村庄 SEIR 模型流行病学动态曲线

从曲线趋势来看, 初始易感者约为设定的村卫生室服务人口, 随着时间快速下降, 在第 35 天左右降至较低水平, 反映病毒在人群中的快速传播。潜伏者与感染者先后呈现先升后降的单峰变化, 分别在第 25、30 天附近达到峰值, 第 60 天左右后趋近于零, 反映出疾病的潜伏期与感染期较短。康复者数量呈典型的 S 型增长, 在约 20~40 天内快速上升并趋于稳定, 最终规模接近初始易感者总数, 说明绝大多数个体均经历感染并康复。

通过需求映射参数(就诊率 65%、处方率 75%、疗程盒数 1)将 SEIR 模型输出的每日新增感染者数量转换为药品需求。A、B、C 三类村庄流感药品需求预测对比曲线如图 2。

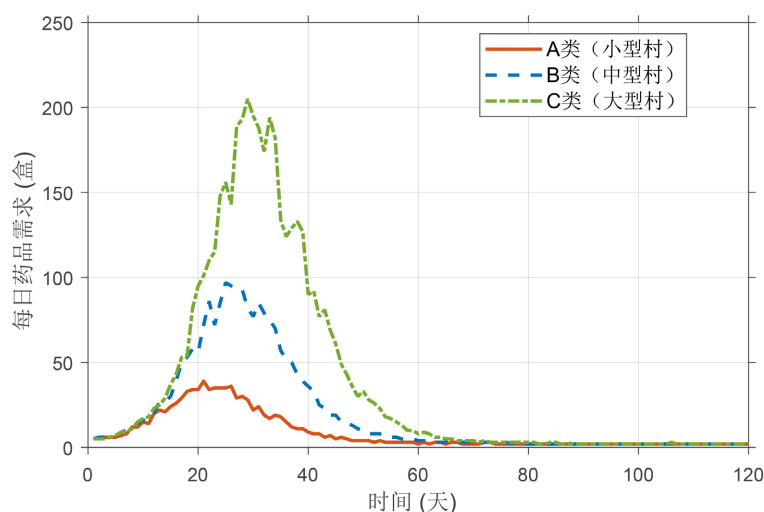


Figure 2. Influenza drug demand forecast for type A, B, and C villages

图 2. A、B、C 三类村庄流感药品需求预测对比

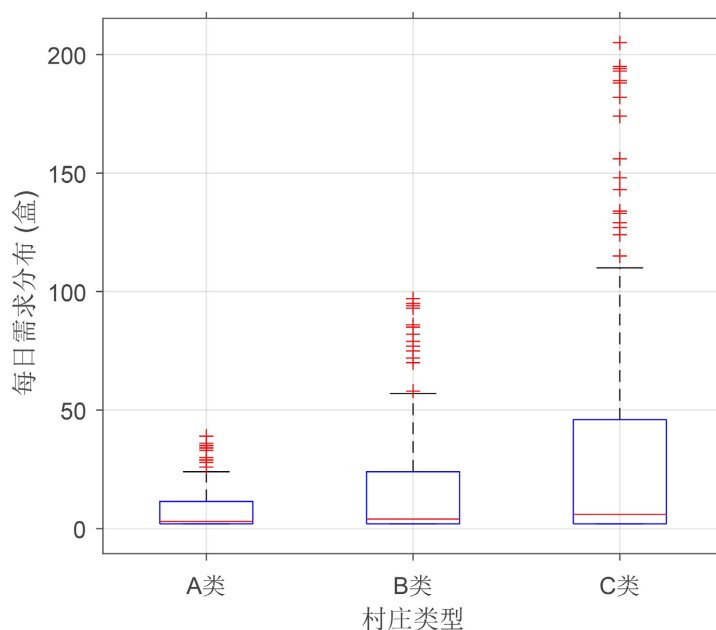


Figure 3. Drug demand boxplot for type A, B, and C villages

图 3. A、B、C 三类村庄药品需求箱线图

三类村庄的流感药品需求曲线均呈现单峰波动特征, 受人口规模差异影响, 其峰值、波动形态及需

求特性差异显著: 小型村庄 A 类村, 流感暴发初期需求快速上升, 于第 20~25 天达到 35~38 盒/天的峰值, 随后在 30~60 天内快速衰减, 60 天后趋于稳定并维持在极低水平, 体现了小型村庄流感传播速度快、需求集中在短期的特点, 为后续库存模型的非平稳需求输入提供量化依据; B 类村需求整体趋势与 A 类村一致, 其峰值约为 A 类村的 2.5 倍(90~98 盒/天), 曲线上升、下降期更平缓, 需求集中性弱化, 对峰值需求冲击的敏感度更低, 系统抗扰动能力更强; 大型村庄 C 类村的需求特征进一步体现了人口规模的影响, 其峰值达到 200~210 盒/天, 约为 A 类村的 5 倍、B 类村的 2 倍, 需求曲线呈现“缓升-宽峰-缓降”形态, 需求波动相对缓和, 但总需求基数大, 对库存总量和补货节奏提出了更高要求。

为进一步量化对比三类村庄的需求规模与波动差异, 本文采用箱线图对 120 天模拟周期内的每日需求数据进行统计分布分析, 结果如图 3 所示。随着村庄规模扩大, 需求中位数、箱体宽度与上侧离群点数量均显著上升, 表明大规模村庄整体需求水平更高、波动幅度更大, 对库存系统的稳定性要求更高。其次, 三类村庄的需求分布均呈现右偏特征, 中位数靠近箱体下边缘, 大量离群点集中于上侧, 这与季节性流感“常态低需求、高峰高冲击”的典型特征高度吻合, 说明了峰值需求管理的必要性。

A、B、C 三类村庄的药品需求关键指标统计结果如表 2 所示。

Table 2. Drug demand statistics for three village types (120 days)

表 2. 三类村庄的 120 天药品需求特征统计表

指标	A 类(小型村)	B 类(中型村)	C 类(大型村)
总需求(盒)	1033	2290	4487
日均需求(盒/天)	8.6	19.1	37.4
峰值需求(盒/天)	39	97	205
需求变异系数	0.72	0.68	0.65

三类村庄的需求异质性特征表明, 采用“一刀切”的库存策略难以同时兼顾供应安全与成本控制: 小型村的核心风险为突发高峰断货, 大型村面临高波动带来的成本压力, 中型村需在两者之间寻求平衡。这一结果也验证了下文构建的 SEIR-INV 模型的鲁棒性, 其可在不同波动场景下, 生成满足服务水平约束的最优策略, 实现成本与服务的协同优化。

3.2. SEIR-INV 库存模型与优化结果

基于模型(6), 以 B 类村为例, 构建如下库存优化模型:

$$\min_{s,Q} TC(s,Q) = 200 \times N_0 + 0.08 \times \sum_{t=1}^T I_t + 180 \cdot \sum_{t=1}^T S_t + 50 \cdot \sum_{t=1}^T O_t \quad (10)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} SL(s,Q) \geq 95, \\ s \in \mathbb{Z}^+, Q \in \mathbb{Z}^+, \\ 57 \leq s \leq 146, \\ 191 \leq Q \leq 916 \end{cases} \quad (11)$$

其中, $SL = \frac{\sum_{t=1}^T Sales_t}{\sum_{t=1}^T D_t}$, $Sales_t = \min(I_t, D_t)$ 。再订货阈值 s 与订货量 Q 由遗传算法优化确定; 订货成本

C_0 为 200 元/次, 综合考虑了农村地区药品运输、装卸及行政处理等常规物流成本; 持有成本 C_h 为 0.08 元/盒/天, 参照药品库存管理通用核算标准[10], 基于采购价格、资金成本及仓储费用估算确定; 缺货成本 C_s 为 180 元/盒, 考虑流感暴发期的健康风险、转诊成本及机构信誉损失等综合社会经济损失; 单位报

损成本 C_p 为 50 元/盒, 以奥司他韦市场主流采购价为依据; 结合行业高标准与我国南方地区冬季流感流行的典型周期, 设定目标服务水平 δ 为 95%、模拟周期 T 为 120 天; 根据湖南省农村药品配送实际情况及相关文献[11]设定订货提前期 L 为 3 天; 根据奥司他韦说明书中 2~5 年的有效期范围, 取药品有效期 T_e 为 2 年作为保守估计。

针对目标函数复杂、无法解析求解的问题, 本文采用模拟优化方法, 将库存系统模拟与遗传算法结合。通过种群初始化、适应度评估、选择、交叉、变异与精英保留流程, 高效搜索最优 (s, Q) 策略。库存模拟严格遵循先进先出规则, 逐日计提报损成本, 还原实际运营逻辑。设计算法 1 如下:

算法 1: 基于遗传算法的库存策略模拟优化

输入: 需求序列 $\{D_t\}$, 库存成本参数 C_o 、 C_h 、 C_s 、 C_p , 目标服务水平 δ , 遗传算法参数 $(M, G_{\max}, p_c, p_m)$

输出: 最优库存策略 (s^*, Q^*) , 最小化总成本 TC

1. 初始化。输入需求序列 $\{D_t\}$, 库存成本参数, GA 参数 $(M, G_{\max}, p_c, p_m)$ 分别为种群大小, 最大代数, 交叉概率, 变异概率

在解空间内随机生成包含 M 个个体的初始种群 p_0 , 每个个体 $X_i = (s_i, Q_i)$

2. 进化循环 For $g=1$ to $G_{\max}$ Do 迭代进化

适应度评估 For 种群 P_g 中的每个个体 X_i Do:

调用**算法 2**: 库存系统模拟, 输入 $(s_i, Q_i, \{D_t\})$, 得到总成本 TC_i 和服务水平 SL_i

使用罚函数法计算适应度 F_i

·选择: 采用轮盘赌选择法, 根据适应度 F_i 从种群 P_g 中选择父代个体进入交配池

·交叉: 对交配池中的个体, 以概率 p_c 进行模拟二进制交叉(SBX), 产生新个体

·变异: 对新种群中的个体, 以概率 p_m 进行多项式变异, 引入随机扰动

保留当代最优个体, 并用新生成的子代种群更新 P_{g+1} 保证最优解不丢失

3. 进化循环结束后, 输出历代最优个体 $X^* = (s^*, Q^*)$ 及其性能指标

在算法 1 的每一代进化过程中, 需要对每组 (s, Q) 策略进行性能评估, 算法 2 详细给出了给定策略下的库存仿真过程, 其中包括效期管理与报损成本的计算。

算法 2: 库存系统模拟(用于评估给定策略 (s, Q))

输入: 库存策略 (s, Q) , 需求序列 $\{D_t\}$, 成本参数, 有效期 T_e , 提前期 L

输出: 总成本 TC , 服务水平 SL

1. 初始化。设置初始库存 I_0 , 清空在途订单 $OO_0 = 0$, 初始化库存队列 $Queue = []$, 重置所有成本累计器

2. 每日循环 For $t = 1$ to T Do

效期检查与报损: 调用算法 3, 检查库存队列前端的药品是否过期(剩余有效期 ≤ 0)。将所有过期药品移出队列, 并记录报损量

收货处理: 检查是否有订单于今日到达(提前期 L 天前发出的订单)。若有, 则收货 Q , 更新库存水平, 并为新药品标记有效期为 T_e

满足需求: 计算当日实际销量 $Sales_t = \min(I_t, D_t)$ 。遵循先进先出(FIFO)原则从库存队列前端移出药品, 计算缺货量

订货决策: 如果当前库存水平 $I_t \leq s$ 且无在途订单 $OO_t = 0$, 则发出一个新订单 Q , 并记录订货成本

成本记录: 累计当日的持有成本与缺货成本

3. 计算绩效。模拟结束后, 计算总成本 TC 和服务水平 SL

算法 2 中每日报损量的计算由算法 3 细化实现，可精准完成效期核查与报损统计。研究中药品按批次管理，同批次货品将同步过期。

算法 3：库存效期检查与报损量确定流程

输入：当前库存队列 *Queue*。按入库时间排序，每个元素为(入库批次 ID，数量，剩余有效天数)。当前日期 *t*。

输出：当日报损量 O_t ，更新后的库存队列 *Queue*。

1. 初始化： $D_c = 0$ 。
2. 逐日老化：遍历库存队列 *Queue* 中的每一个药品批次 *j*，执行：

将该批次药品的剩余有效天数减 1。

$Queue[j].\text{剩余有效天数} = Queue[j].\text{剩余有效天数} - 1$
3. 检查与移除过期品：

While (*Queue* 非空且 $Queue[0].\text{剩余有效天数} \leq 0$) Do

队列最前端的批次已过期。记录该过期批次的数量 $q = Queue[0]$ 。

更新当日报损量： $O_t = O_t + q$ 。

从队列 *Queue* 中移出这个批次。

End While

4. 返回 O_t 和更新后的 *Queue*。
- 算法运行前需设定关键参数。结合预实验试错与表 2 数据划定 *s*、*Q* 搜索区间：研究结果发现 *s* 和 *Q* 搜索范围应适中，*s* 的下限取 20 与 3 倍日均需求这二者的较大值，上限设为峰值需求的 1.5 倍；*Q* 的下限取 10 倍日均需求，上限取总需求的 40%。遗传算法参数同样由预实验优化得到：设种群规模为 100，最大进化代数为 200，交叉概率为 0.85，变异概率为 0.20，精英保留比例 15%，能够在搜索精度与计算效率之间取得良好平衡，遗传算法的搜索范围如表 3 所示。
- Table 3. Search range of decision variables
表 3. 决策变量搜索范围
- | 村庄类型 | 人口 | s 搜索范围 | Q 搜索范围 |
|------|------|------------|-------------|
| A 类村 | 800 | [26, 59] | [86, 413] |
| B 类村 | 1800 | [57, 146] | [191, 916] |
| C 类村 | 3500 | [112, 308] | [374, 1795] |
- 通过绘制 A、B、C 三类村庄在遗传算法求解最优库存策略过程中的收敛曲线，为策略优化结果提供算法层面的支撑。
- 由图 4 的收敛曲线可知，本文采用的遗传算法在三类村庄场景中均表现出高效稳定的优化性能：三类村庄的最优成本曲线均在迭代初期快速下降，于 10 代内完成收敛，最终分别稳定在 1841 元、2763 元与 4246 元，无发散或早熟现象。种群成本散点则从高位快速向最优值靠拢，后期呈小幅波动，其中 C 类村波动幅度最大，但仍保持稳定，验证了算法在复杂大规模系统中的鲁棒性。最优总成本随村庄规模扩大呈阶梯式增长，与前文需求规模梯度变化一致，表明算法具备良好的收敛性与普适性。
- 基于上述算法设置，对三类村庄分别进行优化，得到的最优(*s*, *Q*)策略如表 4 所示。
- DOI: 10.12677/aam.2026.157325

327

应用数学进展

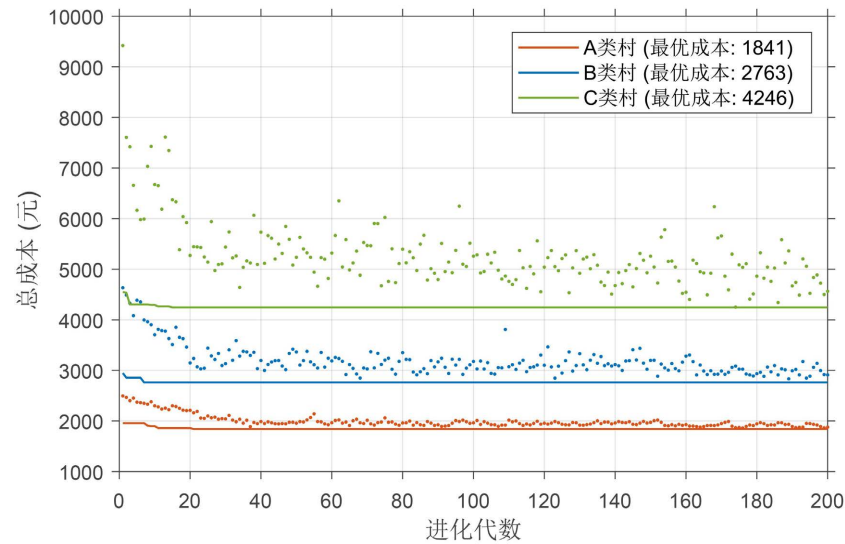


Figure 4. GA convergence for type A, B, and C villages
图 4. A、B、C 三类村庄遗传算法收敛图

Table 4. Optimal inventory strategies for type A, B, and C villages
表 4. A、B、C 三类村庄的最优库存策略表

村庄类型	最优 s	最优 Q	总成本(元)	服务水平	平均库存(盒)
A 类村	26	259	1841	100%	129.3
B 类村	57	382	2763	100%	183.6
C 类村	112	409	4246	100%	233.9

从表 4 可以看出，随着村庄人口规模由 800 人扩大至 3500 人，最优订货点 s 从 26 盒上升至 112 盒，最优订货量 Q 从 259 盒增加到 409 盒，总成本由 1841 元增长至 4246 元，各项决策变量与成本指标均随需求规模扩大呈现显著递增趋势。这表明需求规模与库存策略参数之间存在明显的正向关联。与此同时，平均库存水平随村庄规模逐步提高，分别为 129.3 盒、183.6 盒和 233.9 盒，与需求规模和总成本变化保持一致。三类村庄的服务水平均达到 100%，充分满足预设的 95% 服务水平约束，表明模型能够在严格保障药品供应的前提下实现库存优化，验证了惩罚函数法在处理服务水平约束时的可靠性与有效性。

为直观展示最优策略的运行效果，图 5 绘制了 B 类村最优策略下库存水平与需求的动态变化关系。

如图 5，流感前期，库存水平从初始值 430 盒随需求上升持续下降，消耗速度逐步加快；高峰期，当库存降至订货点 $s=57$ 时系统触发补货，库存迅速回升，形成多次锯齿状波动，在此期间需求维持高位，库存虽多次触及订货点，但始终未断货，服务水平保持 100%；后期需求快速回落并趋于稳定，库存水平在最后一次补货后缓慢下降，无再次补货需求，状态平稳。整体来看，最优(s, Q)策略可根据需求动态精准触发补货，在高峰期保障供应、消退期避免积压，实现了库存与需求的动态匹配。

图 6 展示了 B 类村最优策略下的库存水平频数分布。绿色订货点左侧几乎无频次，说明库存水平始终高于订货点，完全避免缺货风险，与 100% 服务水平结果一致；库存水平主要集中在 50~250 盒区间，峰值出现在 100~150 盒附近，整体呈右偏分布，未出现大面积高库存积压；红色平均库存线位于分布中部偏右，表明库存水平维持在合理区间，实现了供应安全与库存成本的平衡，验证了最优策略的有效性。

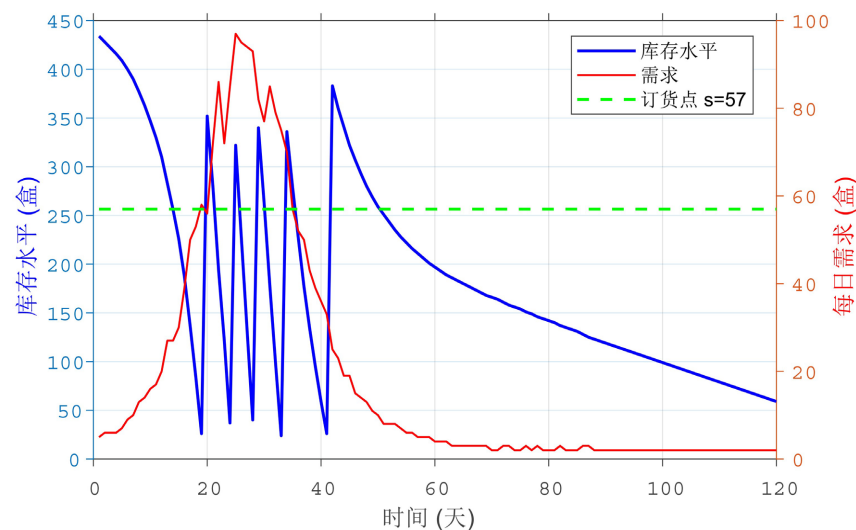


Figure 5. Dynamics of inventory and demand under the optimal strategy for type B villages
图 5. B 类村最优策略下库存水平与需求的动态变化图

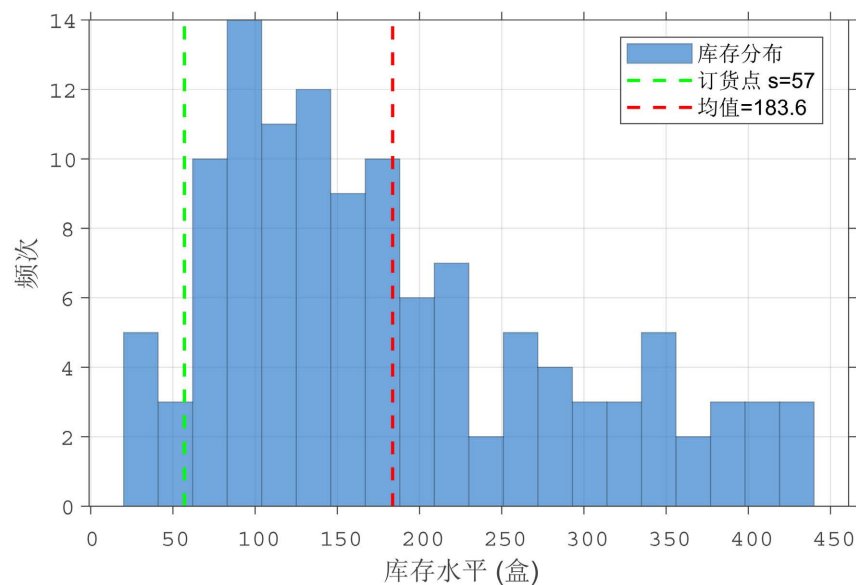


Figure 6. Inventory level distribution
图 6. 库存水平分布图

为全面评估优化策略的性能，本文选取四类具有代表性的对比策略，覆盖从“成本优先”到“服务优先”的完整决策谱系：激进策略以成本最小化为导向，订货点按日均需求与提前期的乘积计算，订货量取日均需求的 2 倍，代表少备货、降成本的管理思路；均衡策略凭经验平衡成本与服务，订货点取日均需求的 1.5 倍，订货量取总需求的 1/4，代表基层常见的折中管理模式；保守策略以保障供应为首要目标，订货点按峰值需求的 1.2 倍计算，订货量取总需求的 1/2，代表多备货、保供应的管理思路；EOQ 策略基于经典经济订货批量模型计算订货量，订货点按日均需求设定，作为理论基准进行对比。

以 B 类村为例进行性能对比，结果见表 5。

基于 B 类村场景，不同库存策略在服务水平与总成本间呈现显著差异，所提出的优化策略优势明显：激进策略以极低订货点和极高订货量为特征，总成本高达 144,663 元，服务水平却仅为 66.9%，既无法保

障药品供应，又造成严重库存资金占用；均衡策略适度提高订货点、降低订货量，将服务水平提升至 96.9%，但总成本仍达 15,621 元，成本控制效果不佳；保守策略通过高订货点和大订货量实现 100%服务水平，却因库存积压导致总成本达 4577 元；EOQ 策略虽也实现 100%服务水平，但总成本高达 16,357 元，因依赖固定需求假设无法适配流感药品非平稳波动特征。相比之下，本文优化策略在保持 100%服务水平的前提下，总成本仅为 2763 元，较四类对比策略分别降低 98.1%、82.3%、39.6%和 83.1%，订货量仅 382 盒，有效避免库存积压，实现了供应保障与成本控制的协同优化。

Table 5. Performance comparison of different strategies
表 5. 不同策略性能对比表

策略	s	Q	总成本(元)	服务水平
激进策略	15	3838	144,663	66.9%
均衡策略	29	573	15,621	96.9%
保守策略	116	1145	4577	100.0%
EOQ 策略	23	3384	16,357	100.0%
优化策略	57	382	2763	100.0%

结合图 7 的就诊率敏感性分析可知，随着就诊率从 50%提升至 80%，最优订货点与总成本整体呈显著上升趋势，过程中存在明显波动：50%~70%区间两者同步快速增长；超过 70%后订货点小幅回落，但总成本仍维持高位并持续上升，至 80%时达约 4750 元，反映了高就诊率下需求刚性增长对成本的推动作用。从图 8 的处方率敏感性分析来看，处方率变化同样带来显著波动：60%~65%区间订货点与总成本同步小幅上升；65%~70%区间订货点回落，总成本仍小幅增长；超过 70%后两者再次快速上升，至 85%时订货点达 132 盒、总成本升至约 4550 元。这种波动表明，中等处方率区间仍有优化空间，超过临界水平后需求放大效应主导，成本控制空间被压缩，体现了服务保障与成本控制间的动态平衡。

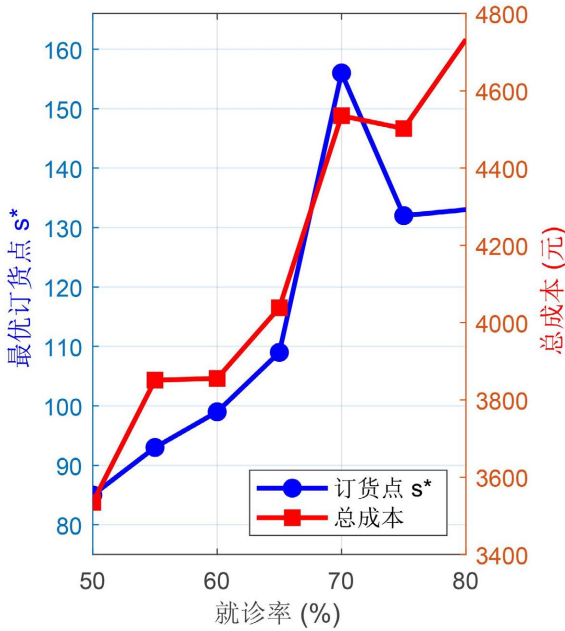


Figure 7. Sensitivity analysis of consultation rate
图 7. 就诊率敏感性分析

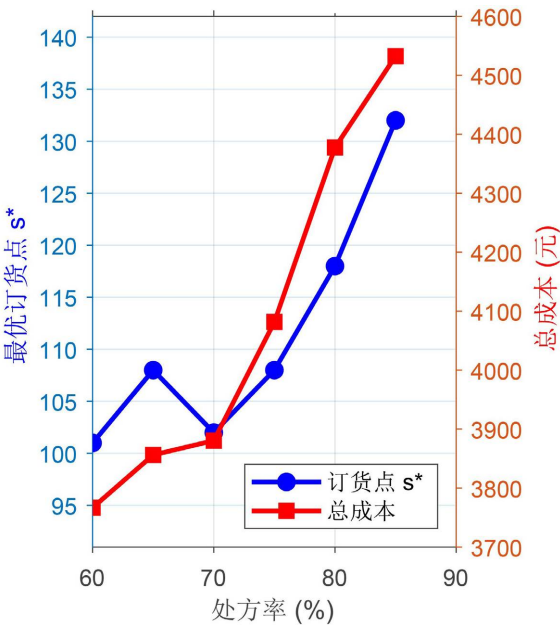


Figure 8. Sensitivity analysis of prescription rate
图 8. 处方率敏感性分析

Table 6. Service levels under different consultation and prescription rates
表 6. 不同就诊率与处方率下的服务水平

就诊率	服务水平	处方率	服务水平
50%	100%	60%	100%
55%	100%	65%	100%
60%	100%	70%	100%
65%	100%	75%	100%
70%	100%	80%	100%
75%	100%	85%	100%
80%	100%	-	-

由表 6 可知，在所有设定的就诊率与处方率参数场景下，模型均能稳定保持 100% 的服务水平，验证了 SEIR-INV 模型在不同参数条件下的鲁棒性。这一结果提示，实际运营中需重点监测两类参数变化，提前调整库存策略，以应对需求波动带来的供应压力与成本风险。

4. 结论

本研究突破传统库存管理中需求预测与策略优化相分离的局限，构建了 SEIR-INV 集成模型，将 SEIR 传染病动力学模型与考虑药品有效期的 (s, Q) 库存模型相结合。其中，SEIR 模型通过微分方程组刻画流感传播特征，生成动态非平稳的药品需求序列；库存模拟引入“先进先出”与“逐日效期检查”机制，将药品有效期转化为报损成本约束，更贴合村卫生室实际场景。

针对非平稳需求下目标函数无法解析求解的问题，本研究采用模拟优化方法，通过遗传算法搜索最优 (s, Q) 策略。数值实验表明，算法收敛性良好，三类村庄服务水平均稳定在 95% 以上；以 B 类村为例，优化策略在 100% 服务水平下总成本仅 2763 元，弥补了激进、均衡策略服务水平不足的短板，避免了保

守策略的库存积压风险, 实现了服务保障、效期管控与成本控制的协同优化。敏感性分析表明, 模型对就诊率、处方率变化具有良好适应性, 服务水平始终保持 100%, 验证了其鲁棒性。

综上所述, 本研究提出的 SEIR-INV 集成模型成功解决了村卫生室季节性流感药品在需求波动与药品有效期影响下的动态库存优化问题, 为完善农村药品供应保障体系提供了科学的决策依据, 对提升基层医疗卫生服务韧性具有重要的理论与实践意义。

基于上述研究结论, 提出以下管理启示和政策建议:

(1) 不同规模村庄的最优库存策略存在显著差异, 建议卫生管理部门摒弃“一刀切”的配送模式, 根据村庄人口规模制定差异化的药品储备标准和配送频次。对于人口较少的小型村, 可适当降低订货点以减少资金占用; 对于人口较多的大型村, 应适当提高安全库存以应对需求波动。

(2) 敏感性分析表明, 就诊率是影响最优策略的高敏感性参数。建议村卫生室在流感高发季前, 重点关注辖区内居民就诊率的变化趋势, 并结合历史数据动态调整库存策略。卫生管理部门可建立就诊率预警机制, 当就诊率异常波动时及时调整药品配送计划。

(3) 本研究将药品效期成本量化为模型中的硬约束, 建议村卫生室在实际运营中严格执行“先进先出”原则, 定期检查库存药品的有效期, 避免因过期造成的资源浪费。对于有效期较短的药品, 可适当降低订货量、提高订货频次。

基金项目

湖南人文科技学院大学生创新创业训练计划资助项目(项目编号: 12)。

参考文献

- [1] 中共中央 国务院印发 《“健康中国 2030”规划纲要》 [EB/OL]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5133024.htm, 2016-10-25.
- [2] 中共中央办公厅 国务院办公厅印发 《关于进一步完善医疗卫生服务体系的意见》 [EB/OL]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2023/content_5750620.htm, 2023-03-23.
- [3] 李熹, 吴群红, 高力军, 等. 国家基本药物制度实施对某省乡镇卫生院卫生服务行为及运营状况的影响评价[J]. 中国药房, 2015, 26(30): 4177-4181.
- [4] 李静, 陈文, 蒋虹丽. 短缺药品供应保障的地方实践进展及启示[J]. 中国卫生资源, 2021, 24(4): 472-475, 487.
- [5] 胡宁波. 经济订货批量模型在医院药品卫生材料管理中的应用[J]. 行政事业资产与财务, 2024(3): 119-122.
- [6] 刘唯一, 焦宏官, 李香平. SEIR 传染病模型动力学分析和 NSFD 离散化[J]. 高等数学研究, 2025, 28(4): 102-107.
- [7] Merler, S., Poletti, P., Ajelli, M., Caprile, B. and Manfredi, P. (2008) Coinfection Can Trigger Multiple Pandemic Waves. *Journal of Theoretical Biology*, 254, 499-507. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2008.06.004>
- [8] 国家卫生健康委办公厅, 国家中医药局综合司. 关于印发流行性感冒诊疗方案(2025 年版)的通知[EB/OL]. 2025-01-20. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202501/content_7000939.htm, 2026-05-18.
- [9] 湖南省人民政府. 湖南省 2022 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. 2023-03-23. https://www.hunan.gov.cn/hnszf/zfsj/tjgb/202303/t20230323_29297460.html, 2026-05-18.
- [10] 王海霞. 医院药品成本精细化管理的重要性及策略[J]. 中国管理信息化, 2025, 28(24): 209-211.
- [11] 李小娟. 农村药品配送系统优化研究[J]. 山东纺织经济, 2018(7): 63-65.