# 患者需求变化下的药品供应链稳定性仿真研究

肖彩云[1]，王奇巍[1,2]，刘 悦[1]，郭 文[1,2]*
（1. 中国医药工业研究总院，上海 201203；2. 中国医药工业信息中心，上海 200040）

**摘要：**本文基于原料药生产、药品生产及医疗机构采购 3 个药品供应链的主要节点，建立系统动力学模型，探讨不同患者需求条件下各节点供应情况的变化。实现对跃迁函数变化、周期函数变化以及随机函数变化的患者需求模型仿真，分析其对供应链稳定性产生的不同影响。建议供应链规划根据需求变化灵活调整策略，以确保药品供应的稳定性与患者需求的满足。

**关键词：**供需关系；药品供应链管理；系统动力学
**中图分类号：**R95 **文献标志码：**A **文章编号：**1672-9188（2024）06-0678-07
DOI：10.13683/j.wph.2024.06.018



# Simulation study on supply chain stability under drug market demand changes

XIAO Caiyun[1], WANG Qiwei[1,2], LIU Yue[1], GUO Wen[1,2]*
（*1. China State Institute of Pharmaceutical Industry, Shanghai 201203, China;*
*2. China National Pharmaceutical Industry Information Center, Shanghai 200040, China*）

**Abstract:** Based on the main nodes of the pharmaceutical supply chain, including raw material production, drug production, and healthcare institution procurement, a system dynamics model was established to investigate the variations in supply at each node under different patient demand conditions. Simulation of market demand models with transition function changes, periodic function changes, and stochastic function changes was conducted to analyze the different effects on the stability of the supply chain. It is recommended that supply chain planning should flexibly adjust strategies according to demand changes to ensure the stability of drug supply and meet patient demands.

**Key words:** supply and demand relation; drug supply chain management; system dynamic

当前药品市场中，供需关系的复杂性正不断凸显。药品供应受多种因素影响，其中包括但不限于原料药生产的稳定性、药品生产的技术要求、供应链的可靠性、患者需求的波动性以及政策法规的变化等，这些因素相互作用，给药品供应链的管理带来挑战[1]。药品市场作为医疗产业链的重要组成部分，其供需关系的平衡对医疗服务和患者健康具有至关重要的影响。研究表明，患者需求的波动是导致药品短缺的主要原因之一[2—3]，患者需求的突然减少或增加可能导致供应链中的库存不足或过剩，从而影响药品的供应和分配。因此，深入研究患者需求变化对药品供应链的影响，加强药品供应链管理和监测，提高供应链的灵活性和适应性，对于预防和减少药品短缺事件具有重要意义。这将有助于患者及时获得所需药物，提高医疗服务的质量和效率。

为更好地理解患者需求对药品供应链的影响，本研究基于系统动力学建立药品供应模型，旨在探究不同类型需求变化下药品供应链的表现。通过仿真研究，深入分析患者需求变化对药品供应链稳定

**收稿日期：**2024-03-21
**作者简介：**肖彩云，硕士研究生，研究方向：医药政策与法规。
**通信作者：**郭文，研究员，博士生导师，研究方向：社会与管理药学研究。

性的影响，为提高药品供应的稳定性和可持续性提供新的思路和参考。

## 1 药品供应模型建立

### 1.1 药品供应链的界定

药品供应链即在药品生产和流通过程中，由上游与下游各个企业共同建立的网链状组织，涉及药品原料药采购、生产制造、仓储物流及分销销售等环节的全过程，涵盖生产、物流及信息流等方面，旨在确保药品的供应稳定、质量可靠，并满足患者的需求[4—5]。其稳定性是指供应链在面对各种内外部变化和冲击时能够保持正常运作和持续供应药品的能力。诸多学者从不同环节对药品供应链稳定性影响因素进行评估，并提出优化方案。在原料药供应环节，Mazer-Amirshahi 等[6]提出原料药短缺是影响药品供应链稳定性的重要原因之一，原料药可能由于运输过程中发生变质、作为原料药来源的动植物产量低等原因发生短缺，进而导致潜在的药品短缺。中国作为多种药品的主要原料药供应国[7]，当原料药出口量低时，可能导致多个国家和地区的药品供应不稳定。Li 等[8]和 Yani 等[9]认为药品生产企业的生产计划直接影响药品供应，且当对患者需求预测准确性提高时，能够显著提高供应链稳定性，减少供应链中断的情况。在需求端，Weraikat 等[10]认为医疗终端的库存管理显著影响药品供应链的稳定性以及效率。Wu 等[11]通过构建由供应链 - 医院 / 药店构成的简化供应链模型来研究药价与供应稳定之间的关系，为影响供应链稳定性相关因素提供参考。综上所述，在药品供应链稳定性研究中，原料药生产、药品生产以及医疗机构库存管理被认为是 3 个重点环节，提高各环节的管理效率对药品保障供应至关重要。

### 1.2 模型假设

原料药供应节点是药品生产的基础，其中断将直接影响整个供应链的运作；药品生产节点影响着药品的生产效率和质量，对供应链的稳定性至关重要；医疗机构作为药品的终端，其采购行为对供应链的需求和稳定性具有重要影响。因此，对这些节点进行系统建模分析，能够全面评估供应链的稳定性与患者需求满足之间的关系，并提出建议优化药品供应保障。本文将基于原料药生产、药品生产及医疗机构采购建立系统动力学模型，通过改变患者需求函数，探讨不同用药需求下各节点供应变化情况。

此外，参考既往供应链模型，为实现对模型的简化并聚焦于研究主要环节，本文系统动力学模型的建立基于以下假设：①原料药生产企业结合实际情况，原材料生产方案主要根据药品生产企业的需求信息，并且剔除库存中不合格的原料药产生的影响，与此同时，生产材料的供应量能够满足生产加工需求，即原料药生产企业的生产率能够快速变化。②原材料及药品在运输、储存中发现的变质、损坏不计，每 1 批原材料及药品不存在差异，质量、特性均相同。③本模型研究处方药供应情况，以医疗机构为例研究患者需求变化对零售终端的影响。

### 1.3 参数设置

在对系统动力学仿真模型进行参数设置时，通常采用整百个单位的库存量作为仿真初值，以便对模型进行简化，无论患者需求函数是什么，信息延迟及库存量均从上游到下游逐层减少[12]。故原料药生产企业、药品生产企业以及医疗机构的初始库存与在途流通数量均呈现递减的趋势，各环节库存总量降低的情况下，收货延迟时间、库存调整时间、期望库存覆盖时间以及平滑时间相应减少。参考系统动力学库存管理理论并结合本模型结构[13]，在符合上述变化趋势的前提下对模型参数进行设置，并对参数进行调试以提高模型灵敏度，最终对模型中的变量做出赋值，见表 1。

## 2 结果

### 2.1 阶跃函数变化的患者需求

在仿真分析中，可以利用阶跃函数模型来模拟突发事件对患者药品需求的影响。例如，在暴发传

**表 1 仿真参数设置**

**Table 1 Simulation parameters settings**

| 项目 | 原料药生产企业 | 药品生产企业 | 医疗机构 |
|---|---|---|---|
| 初始库存 | 300 | 200 | 100 |
| 在途流通数量 | 200 | 100 | – |
| 收货延迟时间/周 | – | 2 | 1 |
| 库存调整时间/周 | 3 | 2 | 1 |
| 期望库存覆盖时间/周 | 6 | 4 | 2 |
| 缺货平滑时间/周 | 6 | 4 | 2 |
| 患者需求平滑时间/周 | | 2 | |

染病或自然灾害后，急需大量抗病毒药物或伤口救治药物，此类突发事件引发的需求激增会导致患者需求出现明显的阶跃式增加[14]。对阶跃函数变化的患者需求进行仿真，设定患者需求率 1 为 50 单位 / 周，仿真期间保持不变；患者需求率 2 为 100 单位 / 周，仿真期间保持不变；患者需求率 3 = STEP(50，20) + 50，20 周前为 50 单位 / 周，20 周突然增加 50 ～ 100 单位并持续到仿真结束，以各节点平均短缺率作为评价指标。仿真结果如下，计算各节点缺货率均值与全距见表 2，以评估短缺的平均水平与波动水平。

**表 2 药品缺货率随患者需求阶跃变化**

**Table 2 Analysis of drug stockout rate under step function changes in patient demand**

| | 原料药生产企业缺货率 | | 药品生产企业缺货率 | | 医疗机构缺货率 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 均值 | 全距 | 均值 | 全距 | 均值 | 全距 |
| 患者需求率1 | 0.00 | 0.00 | 6.15 | 68.93 | 8.79 | 49.45 |
| 患者需求率2 | 0.07 | 6.61 | 7.30 | 125.14 | 17.23 | 70.55 |
| 患者需求率3 | 0.00 | 0.00 | 14.44 | 190.24 | 16.48 | 83.61 |

由图 1 可看出，原料药生产企业的生产能力能够稳定维持患者需求率 1 时的原料药供应，故整个仿真周期中原料药生产企业缺货率为 0。当患者需求率为 100 单位 / 周时，医疗机构、药品生产企业预测到原料药需求存在逐级放大的现象，故此时原料药生产企业出现短缺。由于在途流通药品的使用以及各原料药生产库存调整存在延迟现象，故原料药出现短缺的时间节点是第 4 周。在本研究的模型中，为简化药品供应链以便研究，未设置原料药生产企业上游供应环节，故原料药生产企业能够快速调整生产以应对短缺情况。患者需求率 3 与患者需求率 1 初始需求相同，故供应初期原料药未出现短缺，后因原料药企业生产率快速调整，能够满足突变的原料药需求，患者需求率 3 条件下整个仿真周期中原料药生产企业缺货率为 0。

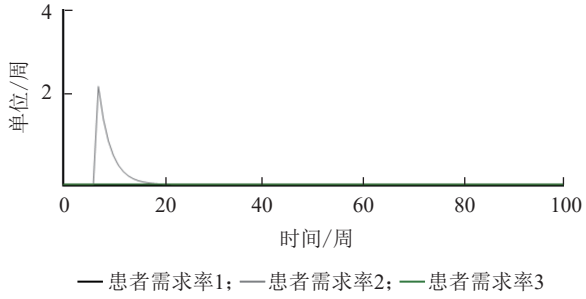



**图 1 原料药生产企业缺货率随患者需求阶跃变化**

**Figure 1 Average stockout rate of raw material pharmaceutical production enterprises under step function changes in patient demand**

由图 2 可知，药品生产环节中，随着初始库存的消耗，3 种患者需求变化条件下均出现不同程度的短缺。患者需求率 1 条件下药品生产企业平均缺货率较低且相对稳定；患者需求率 2 条件下药品生产企业平均缺货率相比患者需求率 1 处于更高水平，缺货率均值增加 18.7%，并且由于初始库存消耗速度增加，短缺出现的时间点提前。但 20 周后，供应链各节点通过生产调整能够适应增加的患者需求率，其短缺程度明显下降，与患者需求率 1 短缺水平相当。整体波动性相当于患者需求率 1 更大，全距变化值增加 81.5%；患者需求率 3 条件下药品生产企业平均缺货率前 20 周与患者需求率 1 的相同，20 周后由于患者需求突变，此时缺货率突增，并由其变化趋势可见突变的患者需求对供应链的稳定供应影响较大且持续时间长，总体缺货率均值相较于患者需求率 2 增加 97.7%，全距变化率增加 52%。

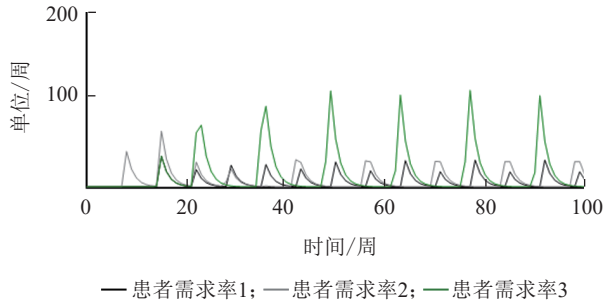



**图 2　药品生产企业缺货率随患者需求阶跃变化**

**Figure 2　Average stockout rate of drug manufacturing enterprises under step function changes in patient demand**

由图 3 可知，医疗机构药品使用环节中，3 个节点首次出现短缺的时间相近。患者需求率 1 条件下缺货率保持在较低且相对稳定的状态；患者需求率 2 条件下缺货率相对于患者需求率 1 处于更高水平，均值提高 96.1%，全距变化率增加 42.7%；患者需求率 3 条件下，前 20 周缺货水平与患者需求率 1 完全相同，第 20 周患者需求突变后，短缺率剧增，以较大幅度波动 20 周后与患者需求率 3 变化水平一致，相对于患者需求率 1 短缺率均值增加 87.5%，与患者需求率 2 短缺率相当，全距相对患者需求率 2 增加 18.5%，供应稳定显著降低。与原料药生产企业相比，药品生产企业突变 20 周后即与常数供应变化一致，表明医疗机构更贴近患者需求终端，需求突变后回到相对稳定供应的时间更短，灵活性更高。

**2.2**　周期函数变化的患者需求

在仿真分析中，可以利用周期函数模型来模拟季节性因素对患者药品需求的影响。如过敏性鼻炎药物、流行性感冒用药，需求量可能会受季节性因素的影响而呈现周期性波动[15]。对周期函数变化的患者需求进行仿真分析，设定患者需求率 4 使用正弦函数进行周期性变化，具体公式为 $50\times\sin(2\pi\times time/20)+50$，其中的 time 是指目前处在的时间节点。仿真结果如下，计算各节点缺货率均值与全距见表 3，以评估短缺的平均水平与波动水平。

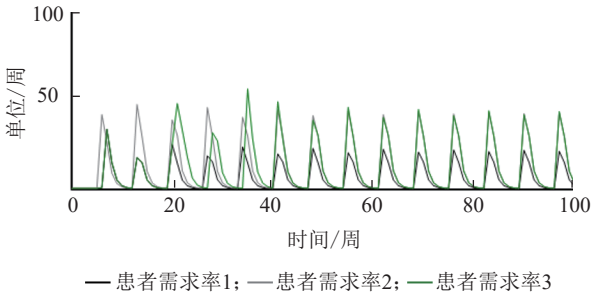



**图 3　医疗机构缺货率随患者需求阶跃变化**

**Figure 3　Average stockout rate of healthcare institutions under step function changes in patient demand**

**表 3　药品缺货率随患者需求周期变化分析**

**Table 3　Analysis of drug stockout rate under periodic function changes in patient demand**

| | 原料药生产企业缺货率 | | 药品生产企业缺货率 | | 医疗机构缺货率 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 均值 | 全距 | 均值 | 全距 | 均值 | 全距 |
| 患者需求率1 | 0.00 | 0.00 | 6.15 | 68.93 | 8.79 | 49.45 |
| 患者需求率2 | 0.07 | 6.61 | 7.30 | 125.14 | 17.23 | 70.55 |
| 患者需求率4 | 0.00 | 0.00 | 7.01 | 163.86 | 17.07 | 99.12 |

由图 4 可知，在患者需求率为 4 的条件下，在第 0 周，当患者需求率为 50 单位 / 周时，起始需求率与患者需求率为 1 时相同，且未发生原料药短缺，后期随着原料药生产企业产率灵活调整，患者需求率 4 条件下整个仿真周期中原料药生产企业缺货率为 0。

由图 5 可知，患者需求呈现周期变化时，在药品生产环节中，出现波动较大且不规律的短缺现象。相较于患者需求率为 1 时，缺货率水平增加 13.9%，相较于患者需求率为 2 时降低 4.1%，而全距相较于患者需求率为 2 时增加 30.9%。

由图 6 可知，在医疗机构节点，药品平均缺货率相较于患者需求率为 1 时增加 48%，与患者需求率为 2 时的药品缺货率均值接近，然而，全距相较

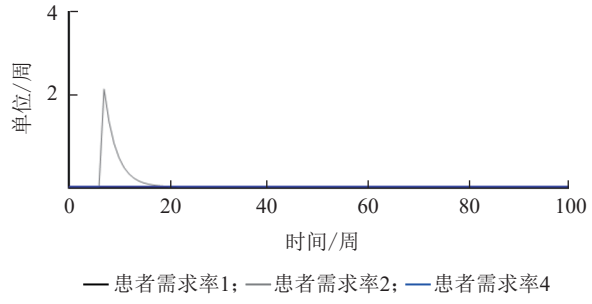



**图 4 原料药生产企业缺货率随患者需求周期变化**

**Figure 4 Average stockout rate of raw material pharmaceutical production enterprises under periodic function changes in patient demand Figure**

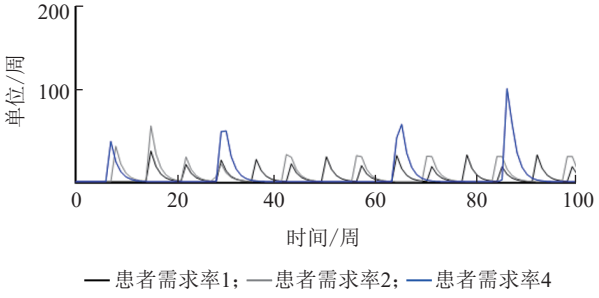



**图 5 药品生产企业缺货率随患者需求周期变化**

**Figure 5 Average stockout rate of drug manufacturing enterprises under periodic function changes in patient demand**

于患者需求率为 2 时增加 40.5%，这使得药品库存管理的复杂度显著增加。

**2.3** 随机函数变化的患者需求

在仿真分析中，可以利用随机函数模型来模拟难以预测的患者药品需求。通过引入随机因素，模拟患者对治疗某些疾病药品需求的波动情况，尤其是对于罕见病药物。由于罕见病患者数量相对较少且需求不稳定，患者需求可能受到随机因素的影响而呈现出随机性变化。对周期函数变化的患者需求进行仿真，设定患者需求率 5 为 50 ～ 100 之间，平均数为 75 的随机生成的数值，以其中一组随机需求率为例进行分析。仿真结果如下，计算各节点缺货率均值与全距见表 4，以评估短缺的平均水平与波动水平。

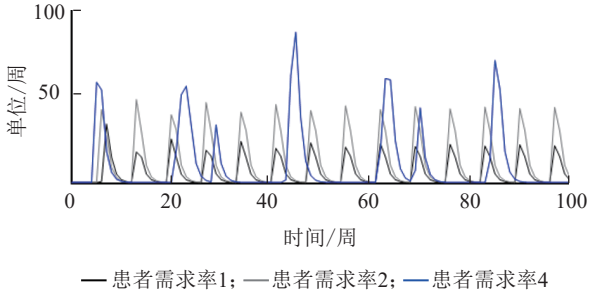



**图 6 医疗机构缺货率随患者需求周期变化**

**Figure 6 Average stockout rate of healthcare institutions under periodic function changes in patient demand**

**表 4 药品缺货率随患者需求随机变化分析**

**Table 4 Analysis of drug stockout rate under random function changes in patient demand**

| | 原料药生产企业缺货率 | | 药品生产企业缺货率 | | 医疗机构缺货率 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 均值 | 全距 | 均值 | 全距 | 均值 | 全距 |
| 患者需求率1 | 0.00 | 0.00 | 6.15 | 68.93 | 8.79 | 49.45 |
| 患者需求率2 | 0.07 | 6.61 | 7.30 | 125.14 | 17.23 | 70.55 |
| 患者需求率5 | 0.00 | 0.00 | 9.11 | 138.21 | 18.13 | 89.97 |

由图 7 可知，本次随机函数变化下未发生原料药短缺情况。这是由于在患者需求条件为 5 的情况下，随机函数在第 0 周产生的需求率为 64.7 单位 / 周，并且初期的随机需求呈现下降趋势，后期随着原料药生产企业产率灵活调整，本次患者需求率 5 条件下整个仿真周期中原料药生产企业缺货率为 0。然而，当随机因素发生变化时，即在其他随机情况下，存在产生原料药短缺的可能性。由此可见，随机变化的患者需求使得潜在短缺难以预测，增加药品供应不足的风险。

由图 8 可知，在药品生产环节中，缺货率均值相较于患者需求条件为 1 时增加 48.0%，相较于患者需求条件为 2 时增加 24.7%，全距变化率相对于患者需求条件为 2 时增加 10.4%。

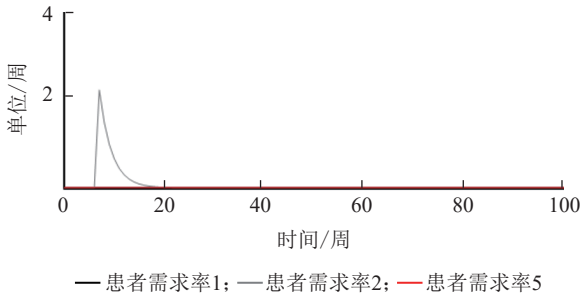



**图 7 原料药生产企业缺货率随患者需求随机变化**

**Figure 7 Average stockout rate of raw material pharmaceutical production enterprises under random function changes in patient demand**

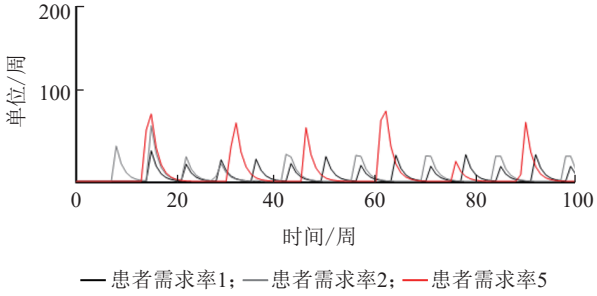



**图 8 药品生产企业缺货率随患者需求随机变化**

**Figure 8 Average stockout rate of drug manufacturing enterprises under random function changes in patient demand**

由图 9 可知，在医疗机构药品使用环节，缺货率均值相较于患者需求条件为 1 时增加 106.3%，相较于患者需求条件为 2 时增加 5.2%，全距变化率相对于患者需求条件为 2 时增加 27.5%。

## 3 讨论

原料药生产企业在需求稳定（患者需求率 1）和初期需求较低（患者需求率 3 前期）时，能够保持稳定供应，无明显短缺。然而，当需求骤增（患者需求率 2、患者需求率 3 后期）时，短缺率显著上升，表明其生产调整能力在高需求情况下存在压力。在周期性需求变化（患者需求率 4）下，尽管原料药短缺率保持稳定，但波动性较大，显示出周期性需求对供应链稳定性的影响。

药品生产企业在需求稳定时（患者需求率 1），

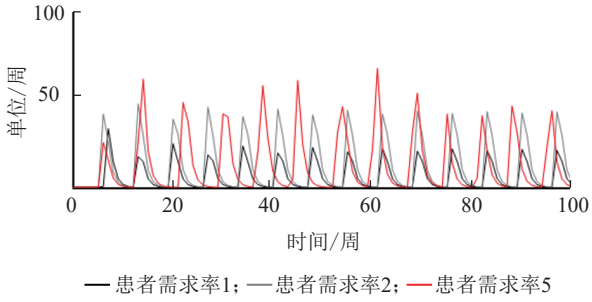



**图 9 医疗机构缺货率随患者需求随机变化**

**Figure 9 Average stockout rate of healthcare institutions under random function changes in patient demand**

短缺率较低且相对稳定，但在需求骤增（患者需求率 2、需求率 3）时，短缺率显著增加且波动性大，初始库存消耗速度加快，短缺现象提前出现。在面对周期性（患者需求率 4）和随机需求（患者需求率 5）时，药品生产企业的短缺率和波动性均有所增加，特别是随机需求下，显示出其对不确定性需求的应对存在挑战。

医疗机构作为药品供应链的终端，其采购行为对供应链的需求和稳定性具有重要影响。仿真结果显示，医疗机构在需求稳定（患者需求率 1）时缺货率较低，但在需求骤增（患者需求率 2、患者需求率 3）时，缺货率显著上升，波动性大。在周期性需求变化（患者需求率 4）下，缺货率和波动性显著增加，而在随机需求（患者需求率 5）下，缺货率和波动性最高，表明医疗机构对需求突变的敏感性最大。

总体而言，各节点对不同需求变化的反应差异显著，原料药生产企业需提高生产灵活性，药品生产企业需优化库存管理策略，而医疗机构需增强需求预测和应对能力。

## 4 建议

药品作为一种特殊商品，其供应受到国家政策管控的影响。针对定点生产、带量采购药品、国家基本药品以及医保目录内的药品等，存在相关配套

措施以保障供应。在对具体药品进行分析时，应根据其特点构建模型，并将相关政策纳入考量。例如，将政策因素视为模型的外部影响因素，考虑其对药品生产、流通和使用方面的影响。此外，可以针对特定药品品种调整模型参数或引入新变量，以研究政策对供应链各环节带来的影响，为供应链优化提供参考。

针对以上仿真结果和分析，为药品保障供应提出以下建议：①库存管理优化：针对突发事件引发的患者需求激增，药品生产企业和医疗机构应优化库存管理策略，确保在需求激增时能够及时供应足够的药品。定期审查库存水平，根据患者需求的变化调整库存量，避免过度积压或短缺。②生产调整和响应能力：针对突变的患者需求和周期性波动的需求，药品生产企业需提高生产调整和响应能力，以缩短供应短缺的时间和降低影响程度；需建立灵活的生产计划和供应链管理系统，以适应需求的突发变化。③风险管理和预测能力：针对随机变化的患者需求，应加强风险管理和预测能力，通过数据分析和患者需求趋势预测来提前应对潜在的需求波动。建议建立预警机制，及时调整供应计划以应对不确定性。

## 5 结语

本文利用系统动力学模型研究不同患者需求条件下药品供应链的稳定性。通过对跃迁函数、周期函数和随机函数变化的仿真分析，揭示患者需求变化对供应链的影响，建议供应链规划应灵活调整策略，以确保药品供应的稳定性和患者需求的满足，为供应链管理提供启示。



**参考文献：**

[1] Abu Zwaida T, Pham C, Beauregard Y. Optimization of inventory management to prevent drug shortages in the hospital supply chain[J]. Appl Sci, 2021, 11(6): 2726.

[2] Pulk RA, Leber M, Tran L, *et al.* Dynamic pharmacy leadership during the COVID-19 crisis: optimizing patient care through formulary and drug shortage management[J]. Am J Health Syst Pharm, 2020, 77(22): 1874-1884.

[3] Shukar S, Zahoor F, Hayat K, *et al.* Drug shortage: causes, impact, and mitigation strategies[J]. Front Pharmacol, 2021, 12: 693426.

[4] 梁旭, 汤宁, 魏亚男. 供应链视角下我国药品质量问题研究[J]. 卫生经济研究, 2016, (5): 44-46.

[5] Mendoza RL. Continuity and change in the drug supply chain: actors, actions, and aversions[J]. J Med Econ, 2021, 24(1): 689-697.

[6] Mazer-Amirshahi M, Goyal M, Umar SA, *et al.* US drug shortages for medications used in adult critical care (2001—2016)[J]. J Crit Care, 2017, 41: 283-288.

[7] Ayati N, Saiyarsarai P, Nikfar S. Short and long term impacts of COVID-19 on the pharmaceutical sector[J]. J Pharm Sci, 2020, 28: 799-805.

[8] Li J, Almentero BK, Besse C. Explainable machine learning for drug shortage prediction in a pandemic setting[C]// International Conference on Machine Learning, Optimization, and Data Science. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022: 141-155.

[9] Yani LPE, Aamer A. Demand forecasting accuracy in the pharmaceutical supply chain: a machine learning approach[J]. Int J Pharm Healthc, 2023, 17(1): 1-23.

[10] Weraikat D, Zanjani MK, Lehoux N. Improving sustainability in a two-level pharmaceutical supply chain through vendor-managed inventory system[J]. Oper Res Health Care, 2019, 21: 44-55.

[11] Wu S, Luo M, Zhang J, *et al.* Pharmaceutical supply chain in China: pricing and production decisions with price-sensitive and uncertain demand[J]. Sustainability, 2022, 14(13): 7551.

[12] Abideen A, Mohamad FB. Improving the performance of a malaysian pharmaceutical warehouse supply chain by integrating value stream mapping and discrete event simulation[J]. J Model Manag, 2021, 16(1): 70-102.

[13] 王雯. 基于系统动力学的库存控制研究[J]. 管理科学与工程, 2019, 8(1): 89-98.

[14] Badreldin HA, Atallah B. Global drug shortages due to COVID-19: impact on patient care and mitigation strategies[J]. Res Social Adm Pharm, 2021, 17(1): 1946-1949.

[15] 江志斌, 文静, 耿娜, 等. 面向重大传染性疾病的应急资源管理研究综述[J]. 工业工程, 2020, 23(6): 1-9.

（编辑：沈 盈）