arXiv:2304.05290v1 [econ.GN] 11 Apr 2023

适应中断：灵活性作为供应链韧性的支柱

Ambra Amico、Luca Verginer、Giona Casiraghi、Giacomo Vaccario、Frank Schweitzer

瑞士苏黎世联邦理工学院系统设计系主任，
Weinbergstrasse 56/58，8092 苏黎世

摘要

供应链中断会导致原材料和产品短缺。为了增强韧性，即应对冲击的能力，在既有供应链中替代商品可能成为创建新的分销链接的有效替代方案。我们通过对美国阿片类药物分销系统进行详细分析，展示了这种做法对供应缺口的影响。通过重建400亿条实证分销路径，我们的数据驱动模型能够独特地审视那些提升替代灵活性的政策。我们的方法使政策制定者能够量化提高灵活性（即减少供应缺口）与增加供应链复杂性之间的权衡，而后者可能使运营成本更高。

引言

供应链连接着制造商、分销商、零售商和最终买家，其复杂程度在过去一个世纪里不断增加，引发了人们对其韧性的担忧 [3]。近期事件，如 COVID-19 疫情、乌克兰战争以及美中贸易争端，都严重扰乱了全球原材料和商品的 分销 ，从而影响了供应链。COVID-19 疫情之后，美国政府宣布“公共卫生供应链”是国家安全的首要议题，并正在寻求“构建多样性和 灵活性的新方法” [30]。为此，政策制定者和企业必须量化并制定政策来提升韧性，即在产品供应突然减少时缓解短缺的能力。

应对商品短缺有多种方法 [27, 11]。然而，只有两种应对措施可以立即采取：配给和替代。随着短缺加剧，配给可能变得必要；但替代通常是首选，因为它对最终买家的影响最小。分销商有两种实施替代的策略：（i）与新的 分销商建立关系，或（ii）利用现有的 关系获取替代商品。

第一种策略要求寻找新的分销商并建立新的商业关系，这可能既昂贵又耗时 [25]。第二种策略则要求放宽对产品的偏好，接受现有上游分销商提供的替代商品。受 Tang 和 Tomlin [24], 、Dolgui等人 [5], Ivanov 等人 [10],开创性研究的启发，我们将后一种策略称为灵活性。我们表明，促进灵活性的政策能够显著缓解短缺。

研究灵活性力量的理想数据集是 ARCOS [22]。它记录了2006年至2014年美国阿片类药物分销系统中的所有药品货运；该系统经常受到短缺影响，并造成严重后果 [26, 32,13, 29, 8]。这个数据集以前所未有的视角，展现了分销系统层面的全貌，在供应链研究中独一无二 [1]。借助这些数据，我们重建了400亿条分销路径，这些路径将制造商与一千多家分销商以及20万名最终买家相连，其中包括药房、医院和执业人员。基于

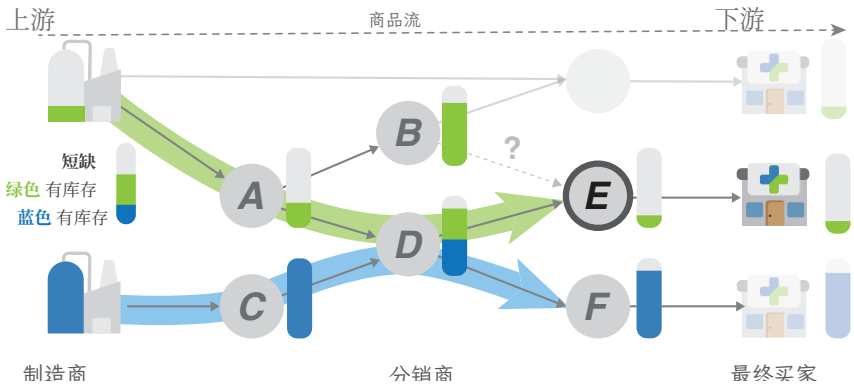


图 1： 两种完全可替代产品（蓝色和绿色）的分销系统示意图。商品从上游分销商流向下游分销商，而订单则沿相反方向流动。灰色箭头表示商品从一个分销商运往另一个分销商的货运。两条粗彩色箭头表示分销路径，即商品通过其抵达目的地（最终买家）的一系列分销商。在此示例中，绿色存在短缺，表现为两家分销商和最终买家处的绿色均出现短缺，而蓝色供应充足。分销商 E 对绿色有需求，且该需求超过了 D上游可用的库存。 D 可以用蓝色这一替代品来满足需求。只有当E 放宽其对绿色的上游偏好并改为接受蓝色时，这才有可能实现。或者， E 可以与B 建立新的关系以获得绿色（虚线）。假设建立新关系的成本高于用蓝色替代绿色的成本， E 应选择后者。本研究聚焦于这种替代，即放宽上游偏好。

这些重建的路径，我们构建并估计了一个数据驱动模型，以探究：（i）供应冲击如何导致短缺；（ii）如何通过提升灵活性来缓解短缺。

上游偏好与灵活性

为了在分销系统中将灵活性付诸实践，我们关注商品的分销商，而非商品本身。要理解这种视角的转变，请看图 1 中的示例。图中展示了一个包含两种可替代商品（绿色和蓝色）的分销系统。分销商 E 更偏好来自 A（绿色）的商品，而非来自 C（蓝色）的商品。我们将这些上游偏好形式化为具有记忆的随机链 [15, 2]。这些链对应于 E 向 D 下单，订购来自 A 或 C 的商品的概率。在此例中，$\Pr(E \to D \to A) = 1$，$\Pr(E \to D \to C) = 0$。然而，如果 E 对来自 A（绿色）或 C（蓝色）的商品没有特定偏好，那么它收到的商品将仅取决于这些商品在 D 的可用情况。这意味着 E 会适应其上游分销商 D 的偏好。因此，$\Pr(E \to D \to A) = \Pr(D \to A) = 0.5$，且 $\Pr(E \to D \to C) = \Pr(D \to C) = 0.5$。灵活性 ϕ_E 是指分销商 E 为顺应上游偏好而放宽自身偏好的倾向。形式上，

$$\begin{aligned} \Pr(E \to D \to A | \phi_E) &:= \phi_E \Pr(E \to D \to A) + (1 - \phi_E) \Pr(D \to A) \\ \Pr(E \to D \to C | \phi_E) &:= \phi_E \Pr(E \to D \to C) + (1 - \phi_E) \Pr(D \to C) \, . \end{aligned} \tag{1}$$

当 $\phi_E > 0$ 时，分销商 E 在偏好上变得更加灵活，并开始从 C采购商品，从而开辟了一条替代分销路径：$C \to D \to E$。通过这条新路径，E 可以用来自 C 的替代品（蓝色）替换其所需的商品（绿色），以满足需求。例如，假设 E 有

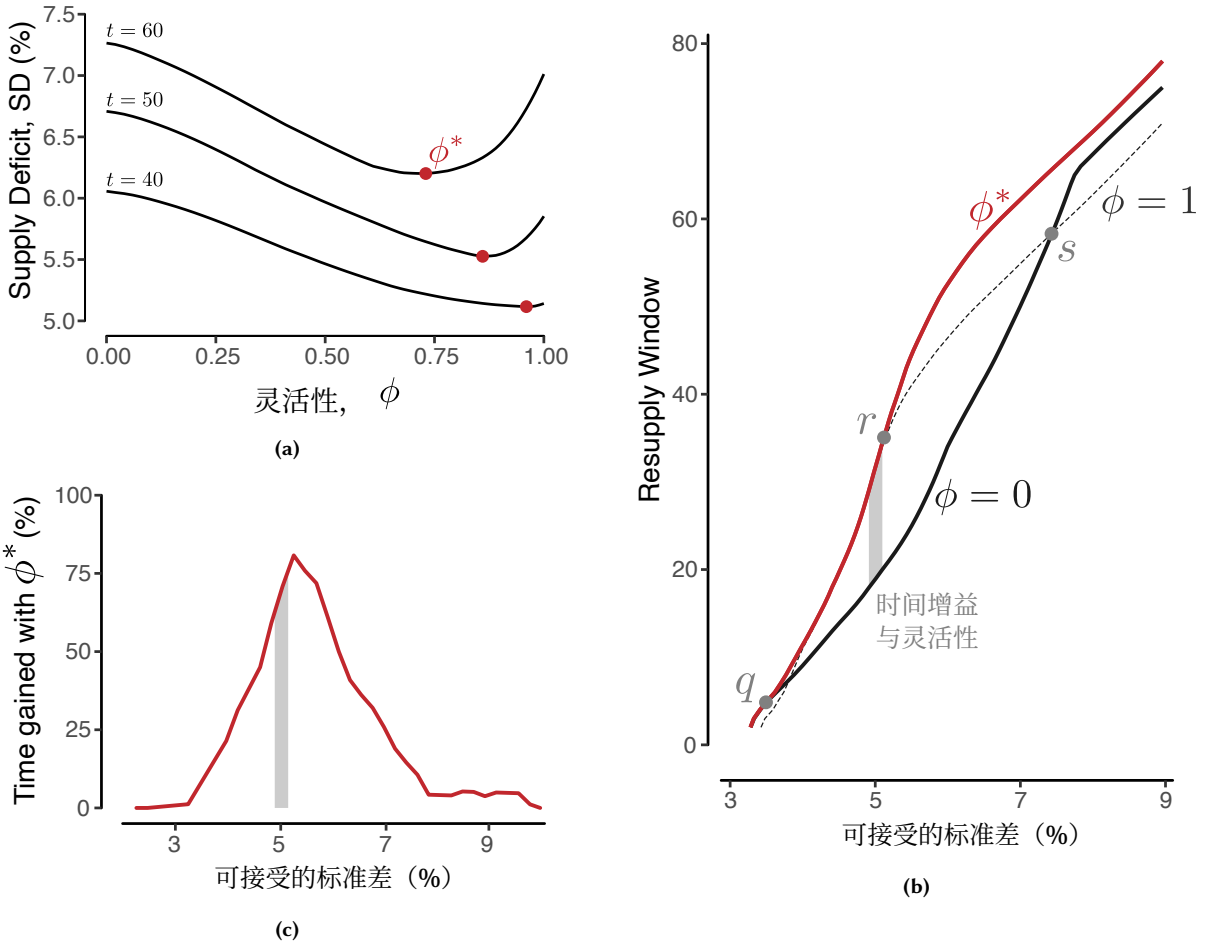


图2： 2012年羟考酮分销系统的压力测试模拟结果。**(a)** 对于灵活性取值 $\phi \in [0, 1]$，未能满足的最终买家总需求比例，以短缺表示。结果分别显示在停产后第40、50和60天。红色标出可实现最大缺口减少量的灵活性取值 ϕ^*。**(b)** 可用补货窗口，即在超过可接受供应缺口（可接受供应缺口）之前可用于补货的时间，以黑线表示。通过 $\phi = \phi^*$ 获得的延长补货窗口以红色表示，始终高于黑线。完全灵活性（$\phi = 1$）所获得的补货窗口以虚线表示。在点 q 之前，$\phi = 0$ 和 ϕ^* 的补货窗口相同。超过点 r 后，$\phi^* < 1$ 可获得最大的补货窗口。超过点 s 后，完全灵活性（$\phi = 1$）的效果不如没有灵活性（$\phi = 0$）。**(c)** 灵活性带来的时间增益，显示在给定可接受供应缺口的情况下，可用于补货的时间增加量。

4 个绿色单位的短缺，而 D 的总库存为 4 个单位（2 个绿色单位和 2 个蓝色单位）。如果 $\phi_E = 0$，E 只能通过获得 2 个绿色单位来满足 2 个单位的需求。相反，如果 E 部分放宽其上游偏好（$\phi_E = 0.5$），E 就能进一步减少短缺，额外减少 1 个单位。

灵活性缓解短缺

分销系统压力测试。我们通过压力测试模拟，探究现实中的分销系统可能如何应对供应冲击。我们采用数据驱动的基于智能体的模型，模拟分销商根据需求下订单，并根据订单分销商品。为了模拟 $t = 0$ 处生产突然停止的情况，我们将上游分销商的库存设定为根据数据推算出的最大容量的 70%。随后，我们分析这一上游短缺如何影响最终买家的供应缺口，以及在生产停滞期间，该缺口如何随时间扩大。有关模拟的详细说明，请参见第 1.5 节。

图 2 展示了羟考酮分销系统的模拟结果。图 2a 显示了最终买家在不同时点的供应缺口。40 天后，在没有灵活性的情况下，最终买家面临 6% 的供应缺口。这个数字看似不大，但相当于缺少了 300 多万剂羟考酮。随着短缺持续未能解决、库存不断耗尽，这一缺口还会随时间继续扩大。

缓解供应短缺。我们考察不同程度的灵活性如何影响最终买家的供应短缺，其中 ϕ 在 0 到 1 之间变化。我们为所有分销商分配相同的灵活性 ϕ。图 2a 显示，灵活性显著减少了最终买家的短缺。当 t=40时，随着 ϕ 从 0 增至 1，短缺率从约 6% 降至 5%。这意味着，得益于灵活性，如今约有 50 万剂羟考酮能够额外送达最终买家。短缺降幅最大时对应某个 ϕ^*值，该值对应于供应短缺最低的 ϕ 值。重要的是，我们发现 ϕ^* 可能小于 1。

可接受供应缺口。对于药品等必需商品，必须保证最低供应水平。我们使用术语 可接受供应缺口（可接受供应缺口）来指代在仍能维持既定标准的前提下，允许缺少的商品最大数量。对于羟考酮，可接受供应缺口（可接受供应缺口）是指不会危及患者安全的最大短缺量。可接受供应缺口的概念类似于服务水平协议（SLA），后者在公司层面设定绩效保证。不过，可接受供应缺口与服务水平协议不同，它是一项考虑所有最终买家的系统性指标。

给定一个可接受供应缺口，我们将补货窗口定义为补货必须发生的最晚时间 t，否则短缺将超过可接受供应缺口。我们发现，借助灵活性，补货窗口可以显著延长。在图2b 中，我们展示了给定可接受供应缺口时，借助灵活性可实现的补货窗口最大延长幅度。对于较小的可接受供应缺口，灵活性带来的收益微乎其微。然而，对于较大的数值，补货窗口可以大幅延长。例如，如果5% 的供应缺口是可以接受的，那么在没有灵活性的情况下，必须在 20天内完成补货。借助足够的灵活性，补货窗口最多可以延长 38 天。

在图 2c 中，我们展示了不同可接受供应缺口（ASD）水平下可获得的增益百分比。我们发现，补货窗口最长可延长 80%。然而，如果可接受供应缺口（ASD）非常低，例如 2%，那么很快就会突破这一可接受供应缺口（ASD）。因此，灵活性没有时间缓解短缺。如果可接受供应缺口（ASD）非常高，例如 10%，那么达到该供应缺口时，库存将因正常需求而耗尽。因此，我们确定了一个灵活性特别有效的可接受供应缺口（ASD）范围。

灵活性的实证证据。灵活性可以缓解供应短缺。现在，我们将提供证据，说明分销商确实能够调整其上游偏好，从而提高灵活性。我们考察实证分销系统如何随时间演变，并探讨每个分销商的年度灵活性。

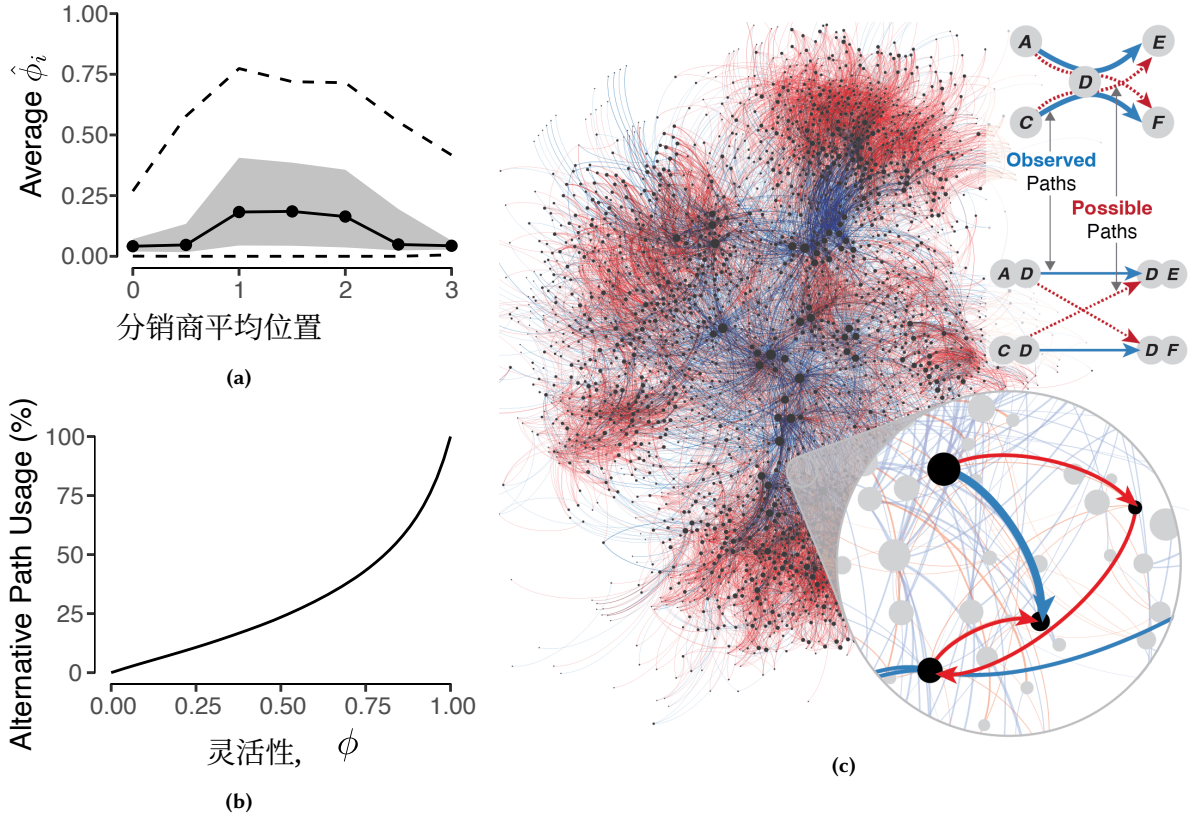


图3： **(a)** 分销商 i 在羟考酮分销系统中的年度灵活性 ϕ_i，从2006年至2014年显示为分销商在分销路径上的位置函数。黑线表示平均灵活性，阴影区域表示数据中间的50%，虚线表示95%。**(b)** 在生产停止180天后，通过替代分销路径运输的商品比例，对应不同程度的灵活性 ϕ，**(c)** 2012年羟考酮的分销系统表示为二阶网络。在此表示中，长度为二的路径，例如 $A \rightarrow D \rightarrow E$，由连接两个"元节点"（$A$，$D$）→（$D$，$E$）的边表示（如左侧插图所示）。蓝色边表示观测到的分销路径，而红色边表示可能存在的替代分销路径。在此表示中增加参数 ϕ，会提高这些红色替代路径可用于分销的概率，同时保留观测到的蓝色分销路径。放大功能突出显示了：创建替代分销路径（红色）可以使先前不连通的节点相互连接。然而，需要注意的是，这些替代路径可能不如观测到的蓝色路径直接，需要产品沿更长的路线运输。

我们评估每个分销商的年度灵活性 $\phi_i(y)$。$\phi_i(y)$衡量分销商 i 从年份 $y-1$ 到年份 y放宽其上游偏好的程度。具体而言，我们采用最大似然估计（MLE）方法，根据年份 $y-1$ 的上游偏好以及年份 y观察到的分销路径，推断 $\phi_i(y)$。详情请参见第 1.3 节。

我们发现，每一年都存在一定程度的灵活性。虽然分销商的平均灵活性较低，但偶尔也会观察到较高的灵活性值。为了解哪些分销商更加灵活，我们计算分销商在其分销路径上的平均位置。例如，图 1 中的分销商 D

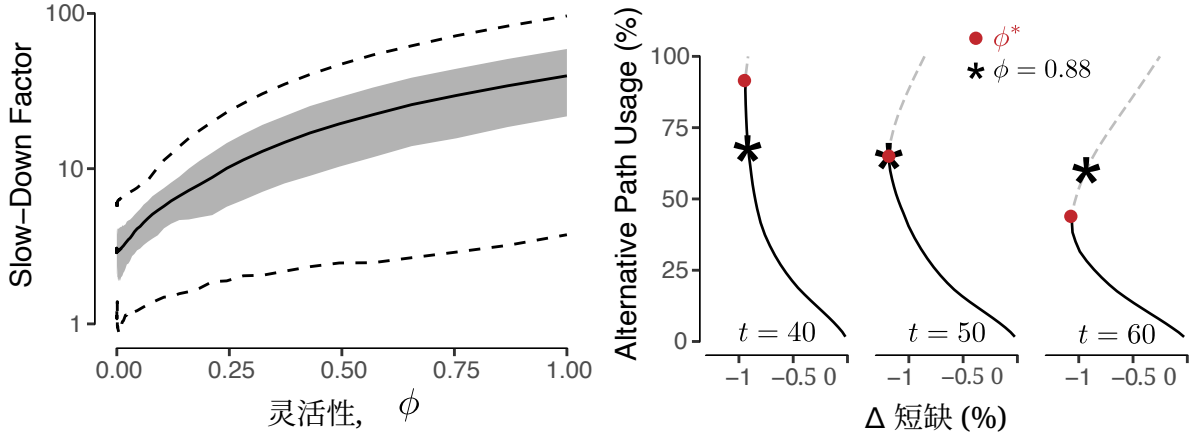


图4：（a）2007年至2014年羟考酮分销系统的减速因子均值，随 ϕ变化。实线表示均值；虚线表示自助法95%置信区间，阴影区域表示50%置信区间。所有自助法统计量均基于10 000个样本估算。**（b）**缺口缩减（Δ）与替代路径使用率的关系，分别绘制了停产后40、50和60天的数据。沿曲线从下至上，ϕ 逐渐增大。实线表示 ϕ的有效值，虚线表示在 $\phi^*(t)$ 处分界的无效值。红色标出对应于 ϕ^*(50)的点；该点在 $t = 40$时有效，在 $t = 50$时缺口缩减幅度最大，并在 $t = 60$时变为无效。

$\hat{}$在绿色和蓝色分销路径中都处于位置 2。在图3a中，我们看到平均 ϕ_i 如何随位置变化。出现在路径开端的分销商灵活性较低，位于路径末端的分销商也是如此，即接近最终买家的分销商。相反，占据中间位置的分销商更加灵活，平均$\sim\phi_i(t)$最高可达 0.25。事实上，分销系统中占据中间位置的分销商中，有95%的灵活性高达0.75。这表明：(i) 分销商能够调整其偏好；(ii) 最大灵活性取决于其位置。

平衡缺口缩减与灵活性的成本

灵活性带来了替代分销路径。我们计算了随着灵活性提升，通过替代路径分销的商品比例。在图3b中可以看到，替代路径使用率随 ϕ单调上升。换言之，灵活性越高，分销商就越有可能使用替代分销路径。这使最终买家能够从多个来源获得商品。

为了了解这些替代分销路径是在何处引入的，我们在图 3c 中对分销系统进行了可视化。蓝色边表示实证分销路径，而红色边表示在完全灵活性条件下可用的替代路径，即 $\phi = 1$。图 3c 的放大视图显示，增加替代路径（红色）后，原本不相连的分销商之间也可以进行分销。重要的是，从图 3c 可以看出，灵活性所带来的大部分替代分销路径都位于分销系统的外围区域。

灵活性的代价。 路径使用量的增加可能会带来成本。例如，处理、劳动力和复杂性增加都可能导致成本上升。使用替代路径也可能减慢分销速度，因为它们可能不如直接路径短，如图 3c 的放大视图所示。因此，替代分销路径可能会延迟向最终买家的分销。

为估算这种配送延迟，我们计算 Scholtes 引入的减速因子等人 [17]。该因子表示到达最终买家所需的额外配送步骤比例。通过将商品的配送建模为扩散过程，我们能够估算平均配送时间如何随灵活性变化。详见第 1.4 节。

在图 4a 中，我们观察到，增加 ϕ 会使分销系统的运行速度持续减慢。因此，随着灵活性提高，商品会经过更多分销商，可能导致处理成本上升。这表明灵活性与替代路径的使用之间存在权衡。

灵活性的递减收益。在图 4b中，我们看到缺口缩减与替代路径使用率之间的权衡。该图突出显示了曲线上方（虚线）的一个非有效集合。对于该集合中的点，给定的缺口缩减也可以通过更低的灵活性实现。换言之，相同的短缺可以使用更少的分销路径实现，因此成本也更低。这种情况发生时对应的点集就是有效集合。此外，在图4b中我们显示，$t = 40$处的一个有效点会在$t = 60$处变为无效点。这是因为将有效集合与无效集合分隔开的 $\phi^*(t)$ 的值会随时间推移而降低，这在图 2 中也清晰可见。

讨论

自然灾害、地缘政治紧张局势和公共卫生危机可能严重扰乱供应链，导致短缺。我们的研究表明，灵活性，即通过现有分销路径替代商品的能力，可以缓解短缺，而且至关重要的是，能够延长达到关键短缺之前的时间。具体而言，为量化分销系统缓解供应缺口的能力，我们开发了一种使用带有记忆 [15, 2]的随机链分析分销系统的新工具。

加强供应链韧性，即承受冲击并从中恢复的能力 [9, 23], , 曾于 2012 [14]被美国总统Obama宣布为国家安全的首要任务。要在中断后恢复商业流动，需要采取主动措施和应对措施。主动措施通过采取预防行动来增强供应链承受冲击的能力，在中断发生之前 [4, 21], 采取行动，旨在完全避免短缺。主动措施的例子包括要求更高的安全库存、投资于以防万一的产能，以及推进多元化 [26]。相比之下，应对措施优先考虑在短缺出现之后迅速作出反应，使系统能够适应中断并减轻其影响 [20, 18, 19]。主动措施可能需要大量前期投资，而且至关重要的是需要时间；相比之下，应对措施可以立即采取。

灵活性是一种应对措施，它利用基础设施、商业关系和商品等现有资源，使其能够立即投入使用，而无需建立新的联系。然而，由于处理时间增加以及分配复杂性提高，灵活性的成本较高。因此，其收益与成本之间存在权衡。为了管理这种权衡并促进灵活性，监管机构和政策制定者必须持续监测分销路径，以深入了解灵活性如何延长达到关键短缺所需的时间。

我们的工作提供了评估灵活性并持续对系统进行压力测试所需的工具。我们的分析表明，最有效的灵活性水平会随时间变化，而灵活性的影响在短缺初期最大。在制定促进灵活性的政策时，这一点十分重要。我们的方法适用于广泛的产品，而不仅仅是药品；它尤其适合具有可替代性且分销系统部分重叠的产品，例如谷物、天然气和石油。通过审慎平衡促进灵活性的政策与相关成本，供应链能够变得更具韧性，从而适应中断。

参考文献

[1] Bier, T.; Lange, A.; Glock, C. H.（2020年）。复杂供应链结构中缓解中断的方法：系统性文献综述。《国际生产研究杂志》**58(6)**，1835–1856。[2] Buhlmann, P.; Wyner, A. J.（1999年）。变长马尔可夫链。《统计学年鉴》**27(2)**，480–513。[3] Burkholz, R.; Schweitzer, F.（2019年）。国际作物贸易网络：冲击与级联效应。*arXiv:1901.05872 [nlin, physics:physics,q-fin]*。[4] Casiraghi, G.; Schweitzer, F.（2020年）。提升在线社交网络的稳健性：网络干预的模拟方法。《机器人学与人工智能前沿》**7**。[5] Dolgui, A.; Ivanov, D.; Sokolov, B.（2018年）。供应链中的涟漪效应：分析与近期文献。《国际生产研究杂志》**56(1-2)**，414–430。[6] Gote, C.; Casiraghi, G.; Schweitzer, F.; Scholtes, I.（2020年）。使用多阶网络模型预测图中遍历节点的序列。*arXiv:2007.06662*。[7] Hallegatte, S.（2014年）。在评估自然灾害的经济成本时对库存与异质性作用的建模。《风险分析》**34(1)**，152–167。[8] Hollingsworth, H.; Herndon, CPE, C.（2018年）。肠外阿片类药物短缺：原因与解决方案。《阿片类药物管理杂志》**14(2)**，81。[9] Hollnagel, E.; Woods, D. D.; Leveson, N.（2007年）。韧性工程：概念与准则。Ashgate出版社。[10] Ivanov, D.; Sokolov, B.; Dolgui, A.（2014年）。供应链中的涟漪效应：中断管理中“效率—灵活性—韧性”的权衡。《国际生产研究杂志》**52(7)**，2154–2172。[11] J ongh, Thyra de；Becker, Dominik；Boulestreau, Mathieu；Davé, Anoushka；Dijkstal, Felix；King, Robert；Petrosova, Liana；Varnai, Peter；Vis, Christiaan；Spit, Wim；Moulac, Maxime；Pelsya, Florent（2021年）。药品法规的未来保障：药品短缺研究。技术报告，欧盟委员会卫生与食品安全总司，卢森堡。

[12] LaRock, T.; Nanumyan, V.; Scholtes, I.; Casiraghi, G.; Eliassi-Rad, T.; Schweitzer, F.（）。HYPA：网络时间序列数据中的路径异常高效检测。在：*2020*年*SIAM*国际数据挖掘会议（*SDM*）论文集。工业与应用数学学会，第460–468页。[13] Miller, F. A.; Young, S. B.; Dobrow, M.; Shojania, K. G.（2021年）。医疗产品供应链的脆弱性：COVID-19敲响的警钟。《*BMJ*质量与安全》**30(4)**，331–335。[14] Obama, B.（2012年）。《全球供应链安全国家战略》。https://www.dhs.gov/national-strategy-global-supply-chain-security。[15] Rissanen, J.（1983年）。一种通用数据压缩系统。《*IEEE*信息论汇刊》**29(5)**，656–664。[16] Scholtes, I.（2017年）。网络何时才是网络？路径与时序网络中的多阶图模型选择。在：第*23*届*ACM SIGKDD*国际知识发现与数据挖掘会议论文集。KDD '17，美国纽约州纽约市：计算机协会，第1037–1046页。[17] Scholtes, I.; Wider, N.; Pfitzner, R.; Garas, A.; Tessone, C. J.; Schweitzer, F.（2014年）。非马尔可夫时序网络中扩散的因果驱动减速与加速。《自然通讯》**5(1)**，1–9。[18] Schweitzer, F.（2022年）。群体关系、韧性与《易经》。《物理学*A*：统计力学及其应用》**603**，127630。[19] Schweitzer, F.; Andres, G.; Casiraghi, G.; Gote, C.; Roller, R.; Scholtes, I.; Vaccario, G.; Zingg, C.（2022年）。社会韧性建模：问题、答案与开放问题。《复杂系统进展》**25(08)**，2250014。[20] Schweitzer, F.; Casiraghi, G.; Tomasello, M. V.; Garcia, D.（2021年）。脆弱却有韧性：企业协作网络中的适应性衰退。《应用数学与统计学前沿》**7**，6。[21] Schweitzer, F.; Zhang, Y.; Casiraghi, G.（2020年）。增强企业网络知识转移的干预情景。《物理学前沿》**8**，382。[22] SLCG Economic Consulting, S.（2019年）。阿片类药物数据。https://www.slcg.com/opioid-data/。[23] Sterbenz, J. P. G.; Hutchison, D.; Çetinkaya, E. K.; Jabbar, A.; Rohrer, J. P.; Schöller, M.; Smith, P.（2010年）。通信网络中的韧性与生存能力：策略、原则与学科综述。《计算机网络》**54(8)**，1245–1265。[24] Tang, C.; Tomlin, B.（2008年）。灵活性对于缓解供应链风险的力量。《国际生产经济学杂志》**116(1)**，12–27。[25] Trent, R. J.; Monczka, R. M.（2005年）。实现全球采购卓越。《麻省理工斯隆管理评论》。

[26] Tucker, E. L.; Cao, Y.; Fox, E. R.; Sweet, B. V. (2020). 药品短缺时代：对2001–2019年文献的范围综述。《临床药理学与治疗学》**108(6)**, 1150–1155.[27] Urahn, S. K.; Coukell, A.; Jungman, E.; Snyder, E.; Bournas, J. E.; Kourti, T. (2017). 药品短缺。技术报告，皮尤慈善信托基金会与国际制药工程学会。[28] 美国食品药品监督管理局（2019）。药品短缺：根本原因与潜在解决方案。技术报告，美国食品药品监督管理局。[29] Wang, B.; Downing, N. L. (2019). 疫情中的危机：美国医院的阿片类药物严重短缺。《研究生医学杂志》**95(1127)**, 515–516.[30] Whitehouse, T. (2021). 国家公共卫生供应链韧性战略。技术报告，白宫。[31] 世界卫生组织（2020）。*TRS 1025* - 附件7：医疗产品的良好储存和分销规范。技术报告，世界卫生组织。[32] Woodcock, J.; Wosinska, M. (2013). 仿制无菌注射药物短缺的经济与技术驱动因素。《临床药理学与治疗学》**93(2)**, 170–176.[33] Yeung, K.; Basu, A.; Hansen, R. N.; Sullivan, S. D. (2018). 价值导向处方集环境下药品的价格弹性。《卫生经济学》**27(11)**, 1788–1804。

1 材料与方法

1.1 ARCOS 数据集

我们研究了阿片类药物货运数据集 ARCOS， [22], 并将其作为分销系统模型。美国缉毒局（DEA）维护该数据集，并追踪每批受管制物质从生产到分销商的完整交接链。ARCOS 是“自动化报告与综合订购系统”（Automated Reports and Consolidated Ordering System）的缩写，是一个数据收集系统，制造商和分销商在其中向 DEA 报告受管制物质交易。ARCOS 记录的交易信息包括发送方和接收方、所运货物的数量与品种以及日期。药品通过其国家药品代码识别，从而使我们能够区分标签商、货物品种和包装形式，例如 12 毫升小瓶或 120 片装药盒。值得注意的是，ARCOS 追踪的最后一环是药房、医院和执业人员，而非患者；下文将其称为“最终买家”。

可替代性与价格弹性。替代能在多大程度上缓解短缺，取决于产品的可替代性。美国食品药品监督管理局（FDA）将药物定义为“药理学等效”，条件是它们（1）含有相同的活性成分，（2）剂型相同，且（3）效价和浓度相同。本研究沿用这一界定，但放宽了“效价相同”和“剂型相同”的要求。

尽管价格差异会影响产品的可替代性，我们在本研究中选择不对其进行建模。这一决定基于 Yeung等人 [33], 的研究，该研究发现，止痛药等医疗必需药物受到短期涨价的影响并不显著。此外，正如美国食品药品监督管理局在其药品短缺报告中所指出的，价格上涨不会刺激供应 [28]。这主要是由于处方药的价格弹性较低，而这又是由必需药品的报销方式造成的。这些药物通常由保险机构和联邦项目，而非患者承担费用。

从运输交易到分销路径。在本研究中，我们通过按照记录顺序追踪所有 ARCOS 交易，同时监测分销商的库存水平，重建阿片类药物的分销路径。具体而言，我们追踪单个包裹离开生产设施、经过分销商并抵达最终买家的过程，例如医院、药房或执业医师。

为此，我们假设分销系统遵循先进先出（FIFO）的库存管理政策，即最先到达的包裹也是最先发出的包裹。该政策可最大限度地减少对产品保质期的影响，这对于药品等易腐产品至关重要。事实上，世界卫生组织在其《良好分销规范》中建议 [31] 分销商遵循“先到期先出”的库存管理政策。

利用 ARCOS 中 2006—2014年的 5亿笔交易记录，我们重建了400亿条单个药品包装的分销路径。重建的路径集合表示为 $P := \{p_1, p_2, \ldots, p_S\}$，其中集合中的每个元素都是单个药品包装的一条独立路径。每条路径表示为一个元组 $p_s = (M \rightarrow k \rightarrow j \cdots \rightarrow i)$。此处， M 表示制造商， k， j， i 表示分销商。该路径以最后一个发运

发送给最终买家。换句话说， p_s 表示某个包裹从制造商到最终买家的旅程中所经过的分销商序列。

1.2 高阶马尔可夫链分销系统模型

从分销路径到上游偏好。重构路径的长度在 1 到 4 之间变化。不过，这些路径大多数长度为 2。这意味着，在大多数情况下，分销过程仅涉及一个制造商和其后的两个分销商。鉴于这一观察结果，我们选择将上游偏好建模至上游 2 步。为支持这一假设，LaRock 等人 [12] 已表明，这种方法特别适合捕捉系统内的重要路径。此外，我们通过执行 [16, 6]提出的模型选择检验，验证了这一建模选择。检验表明，在现有数据条件下，将分销系统建模为考虑上游 2 步在统计上是最优的。

让我们考虑长度为 2 的分销路径 $p_s = (k \to j \to i)$，其中 k 是制造商，而 j 和 i 是两个分销商。在我们的数据中，每条长度为 2 的路径可能作为完整观测出现，也可能作为更长分销路径的子路径出现，即 $(\cdots \to k \to j \to i \to \cdots)$。我们用 A_{kji} 表示数据中 p_s 的出现总次数，将其作为独立路径的所有出现次数与作为更长分销路径子路径的出现次数相加。

为了进一步推进，我们假设系统内实现了完美的市场出清。在这一假设下，供给等于需求。这意味着货运量与已下达的订单相对应。也就是说，$A_{kji} = A_{ijk}$，其中 A_{ijk} 表示 i 通过中间方 j向 k下达的订单量。为了对分销系统进行建模，我们运用高阶马尔可夫链并构建二步张量 $T^{\text{2-step}}$。 $T^{\text{2-步}}{}_{ijk}$ 的每个条目都包含 i 通过中间方 j向 k 提交订单的概率：

$$T^{\text{2-step}}_{ijk} = \frac{A_{ijk}}{\sum\limits_{j'k'} A_{ij'k'}} \tag{2}$$

其中，求和遍历所有子路径 $(j' \to k')$。形式上， $T^{\text{2-步}}$中的每个元素都表示订单沿路径 $(i \to j \to k)$移动的转移概率。因此， $T^{\text{2-步}}$捕获了最多向上游追溯2步的所有 上游偏好。请注意，公式 (2)确保了 i 向 j下达的订单（的概率）与 j 向 k下达的订单（的概率）之间的依赖关系，即 $P(i \to j \to k)$。

放宽上游偏好。 分销商可能会放宽其上游偏好；在最极端的情况下，无论商品来自何处，它们都会接受。为刻画这一倾向，我们引入一个 1 步转移矩阵 S。给定元素 S_{ij} 表示 i 向 j下订单的概率。形式上，我们写作 $S_{ij} = \sum_k T^{\text{2-步}}{}_{ijk}$ 其中，求和遍历所有分销商 k。利用这个 1 步转移矩阵，我们构造一个新的张量 $T^{\text{1-step}}$，用于刻画最多向上游 1 步的偏好，同时对长度为 2 的路径进行建模：

$$T^{\text{1-step}}_{ijk} = \frac{S_{jk}}{\sum\limits_{k'} S_{jk'}} \cdot \Theta\left(\sum_{k'} A_{ijk'}\right) \tag{3}$$

其中，当 $x \leq 0$ 时， $\Theta(x)$等于 0；否则等于 1。这样可以确保只有在 i 至少向 j下过一笔订单时，我们才会考虑分销商 j 。请注意，除 Θ之外，等式右侧只有两个（jk），而式（3）左侧有三个指标（ijk）。这并非错误。我们假设 i 已完全放宽其上游偏好，使其与中间商 j的偏好一致。因此，i 向 k 下订单的比例不再取决于 i ，而只取决于 j 向 k下订单的比例。

灵活性。根据分销商不同程度的灵活性，放宽上游偏好。为了对不同程度的灵活性进行建模，我们将 $T_{ijk}^{\text{1-step}}$和 T^{2}-步 ijk结合如下：

$$T(\phi_i)_{ijk} = (1-\phi_i)T_{ijk}^{\text{2-step}} + \phi_i T_{ijk}^{\text{1-step}} \tag{4}$$

其中， ϕ_i 是一个参数，用于在两个极限情形之间插值：（i）由 $T^{\text{1-step}}$ 表示的完全灵活情形；（ii）由 $T^{\text{2-step}}$ 表示的零灵活性系统。其取值范围为 0 到 1，表示分销商收到的商品中不受其上游偏好影响的比例。当灵活性为 0 时，$T(\phi_i = 0)$ 会简化为二步张量，即 $T^{\text{2-step}}$。当灵活性为 1 时， $T(\phi_i = 0)$ 会简化为一步张量，即 $T^{\text{1-step}}$。

我们可以使用二阶图形表示同时将 $T^{\text{1-step}}$和 T^{2}步可视化（图 3c）。在该表示中，长度为 $2\ i \rangle j \rangle k$ 的路径由两个“元节点”$(i,\ j) \to (j,\ k)$之间的一条边表示（见图右下角的插图）。该图显示了观测到的长度为两步的蓝色路径，即 $T^{\text{2-step}}$中的正值项。红色路径是可能存在但尚未观测到的路径，对应于 $T^{\text{1-step}}$ 中的正值项。在该表示中增加 ϕ，相当于在观测到的路径（蓝色边）中加入红色边（可能的路径）。

1.3 估计经验灵活性

我们采用最大似然方法，估计给定时间范围 h内系统的经验灵活性。具体而言，我们通过计算一段时期 $[t-b, t]$内的货运转移张量 $B(b,\ \boldsymbol{\phi})$，来估计每个分销商的上游偏好，其中 b 是估计偏好的时期， $\boldsymbol{\phi}$ 是一个 n 维向量，其各项 ϕ_i 对应于分销商 i的灵活性。

具体而言，我们将 $B(b, \boldsymbol{\phi})$ 作为在（4）中定义的订单转移张量 $T(\boldsymbol{\phi}, b)$ 的按行归一化转置。其依据在于，我们将预期货运定义为预期订单量，前提是假设每个分销商都已针对观测到的数量下达订单。形式化地，

$$B_{ijk}(b, \phi_k) := \frac{T_{kji}(b, \phi_k) \cdot v_k}{\sum_{k'j'} T_{k'j'i}(b, \phi_{k'}) \cdot v_{k'}} \tag{5}$$

其中， $T_{ijk}(b,\ \phi_k)$在 $[t-b, t]$ 期间根据公式（4）定义， $v_k = \sum_{lm} A_{klm}$ 是 k订购的总量。˜随后，我们根据 $[t, t+h]$ 期间观测到的货运构建货运张量 $A(h)$。条目$\tilde{}A_{ijk}(h)$表示 $[t, t+h]$期间从 i 经由 j 运往 k 的货运数量。最后，我们计算

似然观测货运的似然，给定由 $\boldsymbol{\phi}$ a参数化的估计转移张量 $B(b, \boldsymbol{\phi})$ s:

$$\mathcal{L}(\phi) = \prod_{i,j,k} B_{ijk}(b, \phi_k)^{\tilde{A}_{ijk}(h)} \propto \log \mathcal{L}(\phi) = \sum_{i,j,k} \tilde{A}_{ijk}(h) \log B_{ijk}(b, \phi_k) \tag{6}$$

^^^ 最有可能生成观测到的货运数据的参数，对应于使似然达到最大值的灵活性向量$\boldsymbol{\phi}$ 。

$$\hat{\boldsymbol{\phi}} = \arg\max_{\boldsymbol{\phi}} \log \mathcal{L}(\boldsymbol{\phi}) \tag{7}$$

在图 3a 中，我们估计一年的上游偏好（$b = 1$ 年），然后使用估计出的转移矩阵预测下一年（$h = 1$ 年）的货运情况。

1.4 减速因子

为了比较灵活上游偏好与严格上游偏好之间的分布速度，我们采用 Scholtes 提出的减速因子等人 [17]。令 M 表示描述网络上随机游走的行随机转移矩阵。已有研究表明，从任意初始条件出发，节点访问概率收敛至平稳分布所需的时间 t 与初始条件呈.....的尺度

$$t \approx \frac{1}{\log |\lambda_2 [M]|}, \tag{8}$$

其中， $\lambda_2 [M]$ 是 M的第二大特征值。

现在考虑式（5）中定义的 $B(b, \boldsymbol{\phi})$ 张量，并令向量为 $v = \mathbb{1}$。其元素 $B_{ijk}(b, \boldsymbol{\phi})$ 表示货物从 i 经由 j 运往 k 的概率，是灵活性 $\boldsymbol{\phi}$ 的函数。我们可以将表示两步转移的 $B(b, \boldsymbol{\phi})$ $n \times n \times n$ 张量映射为等价的 $n^2 \times n^2$ 二阶转移矩阵 $\tilde{B}(b, \boldsymbol{\phi})$，如下所示。二阶节点 (i, j) 表示 i 在分销系统中向 j 发货。如果不存在从 i 到 j 的货运，则二阶节点 (i, j) 不存在 [17, 16]。在其他情况下，

$$\tilde{B}_{(i,j)(m,k)}(b, \boldsymbol{\phi}) = \begin{cases} B_{ijk}(b, \boldsymbol{\phi}) \text{ iff } m = j, \\ 0 \text{ otherwise.} \end{cases} \tag{9}$$

令 Ω 表示最终分销商集合，即将商品运往下游最终买家（患者、医院、药房）的分销商。通过将每个最终分销商 $\omega \in \Omega$ 连接到一个终端节点 †，我们可以对分销路径终止于最终分销商这一事实进行建模（更多详情请参见 [6]）：

$$\tilde{B}_{(\omega,\dagger)(\dagger)}(\phi) > 0 \text{ iff } \omega \in \Omega, \tag{10}$$

其中，宽松地使用记号，我们用 (†) 表示终端节点的二阶表示。最后，
~ ~我们设定 $B_{(\dagger)(\dagger)}(b, \boldsymbol{\phi}) = 1 \forall \boldsymbol{\phi}$。这样做可确保由 $B(b, \boldsymbol{\phi})$ 定义的马尔可夫链是吸收态的，并且具有唯一的平稳分布 $(0, \ldots, 0, 1)$，其中最后一个元素对应于终端节点 (†)。因此，所有随机游走都会收敛到 (†)。

令 $\lambda_2\left[\tilde{B}(b,\boldsymbol{\phi})\right]$ 为 $\tilde{B}(b,\boldsymbol{\phi})$ 的第二大特征值。然后，我们可以将减速因子 $\sigma(\boldsymbol{\phi})$定义为：与基准情况 $\boldsymbol{\phi}=\mathbb{0}$相比，访问概率收敛到其平稳分布所需的额外步数。形式化地，根据式 (8)：

$$\sigma(\phi) := \frac{\log\left|\lambda_2\left[\tilde{B}(b,\mathbb{0})\right]\right|}{\log\left|\lambda_2\left[\tilde{B}(b,\boldsymbol{\phi})\right]\right|}. \tag{11}$$

这一结果的完整推导见 [17]。

1.5 利用上游偏好对分销动态建模

当冲击袭击分销系统时，分销系统可以通过不同程度的灵活性来应对。为了对分销动态如何随所考虑的灵活性水平而变化进行建模，我们扩展了 [7] 提出的 ARIO（自适应区域投入产出）模型。在这一扩展中，我们提出纳入分销商的上游偏好。根据 ARIO 原则，分销商下订单以（i）满足需求，以及（ii）通过将库存维持在恒定的目标水平 s^T 或安全缓冲水平，避免库存耗尽，即：

$$o_{(i|j)}(t) = d_{(i|j)}\,(t-1) + \frac{1}{\tau}\left[s^T_{(i|j)} - s_{(i|j)}(t)\right] \tag{12}$$

在式（12）中，$o_{(i|j)}$ 是 i 向 j 下达的订单，而 $d_{(i|j)}$ 是 i 对从 j 收到的商品的需求。需求 $d_{(i|j)}$ 包含两项：收到的（a）最终买家的订单，以及（b）其他分销商的订单。（a）项由向量 c 表示，（b）项由订单矩阵 O 表示。遵循 Hallegatte [7], 的做法，我们分别对这两项进行建模。

参数 τ 表示分销商 i 希望多快恢复其库存。为使模型保持简单，我们假设 τ 在各分销商之间同质，并且随时间保持不变。在我们的研究中，我们将其设定为一个工作周，即 $\tau = 5$天。

$s_{(i|j)}$ 表示用于存储从 j收到的商品的 i 子库存。请注意，与ARIO 模型的原始版本不同，在所呈现的模型中，分销商持有划分为子库存的库存。子库存$s_{(i|j)}$表示 i 用于存储来自 j的商品的库存部分。通过这种方式，我们可以跟踪商品进入仓库之前的阶段。子库存根据总发货量和总收货量进行更新：

$$s_{(i|j)}(t) = s_{(i|j)}(t-1) + W^{\text{in}}_{(i|j)}(t-1) - \left[W^{\text{out}}_{(i|j)}(t-1) + \omega_{(i|j)}(t-1)\right] \tag{13}$$

右侧的第二项表示从 j 收到的商品 i 总量。第三项，即括号内的项，表示 i 在收到来自 j 的商品后发出的商品总量。发货总量既包括发往最终买家的商品 $\omega_{(i|j)}$，也包括发往其他分销商的商品 $W^{\text{out}}_{(i|j)}$。

更新库存后，分销商会按照张量 T_{ijk} 所记录的上游偏好下单：

$$O_{ijk}(t) = o_{(i|j)}(t) T_{ijk}\,(\phi) \tag{14}$$

其中， $T(\phi)$ 的定义见式 (4)。因此，在灵活性为零的情况下， $\phi = 0$，上游偏好保持不变。在灵活性处于中等水平的情况下， $\phi \neq 0$，上游偏好会放宽。

最后，假设分销商希望尽可能满足需求。某个分销商 i 的发货量始终取 i所面临的订单量与其库存水平之间的最大值。

1.6 使用真实世界数据初始化模型

在压力测试方法中，我们希望从最贴近真实系统的表示出发，并模拟系统在可能遭遇供应冲击时的偏离情况。基于这一思路，我们使用实证数据初始化来自最终买家的需求和分销商的库存水平。首先，我们假设分销商在观测年份 y 内能够完全满足需求。根据这一假设，我们确定分销商 i 面临的每日恒定需求为：

$$c_i = \frac{\omega_i(y)}{365} \tag{15}$$

其中， $\omega_i(y)$表示在 y年运往最终买家的 i 数量。然后，根据观察到的数量比例，我们得到 i 面临的、以分销商 j 为条件的需求：

$$c_{(i|j)} = c_i \frac{W^{\text{in}}_{(i|j)}(y)}{\sum_{j'} W^{\text{in}}_{(i|j')}(y)} \tag{16}$$

接下来，我们假设所有分销商都在观测年度内完成其计划，并据此确定目标库存。在这一假设下，目标库存取年末观测到的经验缓冲量[1], ，即：

$$s_i^T = W_i^{\text{in}}(y) - \left[W_i^{\text{out}}(y) - \omega_i(y)\right] \tag{17}$$

其中，右侧第一项表示 i 在 y年的总入货量；第二项表示 i 在 y年的总出货量。然后，根据观测到的数量比例，计算以分销商 j 为条件的 i 目标子库存：

$$s^T_{(i|j)} = s_i^T \frac{W^{\text{in}}_{(i|j)}(y)}{\sum_{j'} W^{\text{in}}_{(i|j')}(y)} \tag{18}$$

模拟开始时，所有库存均初始化为其目标值。

1.7 模拟供应冲击

我们考虑一种使总生产减少 σ percentage 的外部冲击，即：

$$s_i(t = t^*) = (1 - \sigma)s_i(t - 1) \quad \forall i \in \{m_1, m_1, \ldots, m_n\} \tag{19}$$

[1]请注意，在某些情况下，出货量大于入货量。这表明：(i) 在给定年份开始时，其库存并非空置；或 (ii) 他们没有规划目标（安全）库存。对于这些分销商，我们将最小缓冲量设为 1。

其中， σ 是冲击的规模， s_i 表示制造商的库存水平（用于储存其生产），而t^* 是冲击影响系统的时间。

1.8 测量供应缺口

为评估灵活性在缓解短缺方面的作用，我们测量最终买家的供应短缺 减少量。具体而言，我们将时刻 t 的供应缺口 $\delta(t)$定义为最终买家未满足需求的（累计）百分比，即：

$$\delta(t) = \frac{\sum_{t'=0}^{t} \sum_{i} \omega_i(t') - c_i}{t \times \sum_{i} c_i} \tag{20}$$

其中， i 遍历所有向最终买家发货的分销商。我们的指标基于以下假设构建：订购的商品将在下一个工作日内发货。

1.9 测量替代路径使用率

灵活性引入了替代分销路径，可通过这些路径采购可替代商品，从而缓解短缺。因此，灵活性会改变常规运营，原因是分销路径的使用情况发生了变化。为量化这些变化，我们考察两种情景下的发货量：灵活性为零时，以及灵活性不为零时。这两个数量之差反映了放宽上游偏好后，每对分销商之间的商品发货量变化。我们将这一绝对差值除以可能的最大差值进行标准化，该最大差值出现在 $\phi = 1$ 时，从而得到：

$$\Gamma(t) = \frac{\sum_{ij} \left| W_{(i|j)}(\phi, t) - W_{(i|j)}(\phi = 0, t) \right|}{\sum_{ij} \left| W_{(i|j)}(\phi = 1, t) - W_{(i|j)}(\phi = 0, t) \right|} \tag{21}$$