arXiv:2303.01729v1 [math.OC] 3 Mar 2023

韧性绿色供应链设计以缓解涟漪效应：两阶段随机优化模型

Hossein Mirzaee[1,2] Hamed Samarghandi[2]
hossein.mirzaee@usask.ca samarghandi@edwards.usask.ca

Keith Willoughby[2]

willoughby@edwards.usask.ca

摘要

COVID-19大流行等灾害和中断可能严重扰乱供应链和产业。为控制这些中断，决策者必须关注供应链韧性。本文提出一种多阶段、多周期绿色供应链设计模型和六种韧性策略，并将下游和上游中断纳入考量，分别分析涟漪效应和牛鞭效应。为控制上述中断并应对参数估计不确定性，本文设计了一种两阶段随机优化方法。目标

*1通讯作者

*2 加拿大萨斯卡通萨斯喀彻温大学爱德华兹商学院，SK

是最小化中断总成本，以及总量控制与交易机制这一政府排放监管下的 CO_2 排放。本文通过数值实验及后续敏感性分析，验证了所提出的决策框架和求解方法。结果显示了供应链的最优结构，以及缓解涟漪效应的最佳韧性策略。此外，本文还研究了设施产能下降对最优解和所采用韧性策略的影响。本研究为管理实践提供了启示，有助于政府设定适当的排放上限，并帮助供应链管理者在发生中断时预测必需品和非必需品的需求行为。

关键词：韧性绿色供应链设计；中断；涟漪效应；两阶段随机优化。

1 引言

自然灾害或人为灾害造成的中断会从多个方面影响供应链，包括运输延误、劳动力不可用和供给侧短缺。供应链中断公告发布六个月后，企业的股票回报平均下降20%（Hendricks and Singhal，2005年）。诸多案例展现了企业在努力从中断中恢复时面临的挑战：2011年日本海啸发生六个月后，丰田的供应网络遭遇中断，由于零部件短缺，丰田的一些北美工厂停产（Kim et al.，2015）。近来，2019冠状病毒病疫情暴发对供应链造成了长期负面影响，并暴露出其

脆弱性（Liu et al.，2022年）。这些案例凸显了供应链在重大中断发生时适应并增强韧性、以应对新形势的重要性。近年来，学者和业界从业者对此日益关注（Ivanov and Dolgui，2022年）。

为提升供应链适应性而需要审视的一类中断是涟漪效应，它指供应链要素遭受中断后扰动的传播（Ivanov 等人，2016）。涟漪效应的不利影响会沿供应链向下游扩散（Monostori，2021年）。现实案例强调，控制涟漪效应对供应链管理者至关重要。例如，2020年6月，受全球 COVID-19 大流行期间欧洲供应商进口零部件短缺的影响，梅赛德斯-奔驰停止了在阿拉巴马州生产一款越野车（路透社，2020）。

从涟漪效应的影响中高效恢复，理想的方法是构建内在的供应链韧性。在供应链设计阶段制定应急计划，例如设置备用供应商或临时设施，有助于控制涟漪效应（Ivanov 等人，2015）。换言之，必须在设计阶段考虑适当的策略，以缓解供应延迟、需求激增或产能收缩等不可接受事件发生后的困境（Sharma 等人，2022年）。可行的设计策略包括但不限于考虑备用供应商、产能扩张和多重分配（Gholami-Zanjani 等人，2021年）。

另一个冲击 设计供应链时，关注环境因素是一项重要因素 1

，因为这些因素能为企业带来竞争优势（Boskabadi 等人，2022年）。制定减排方案、生产可回收产品以及采用绿色技术，都是推动供应链向绿色化发展的要素（Mirzaee 等人，2022年）。

另一方面，在不确定环境下，对设计参数估计不准确可能导致巨额损失（Wang 等人，2021年）。因此，参数预测值的不确定性也是对供应链绩效产生负面影响的另一个因素，这就需要采用适当的方法。三种最常见的不确定性控制方法是随机优化、鲁棒优化和模糊优化（Tordecilla 等人，2021年），其中随机优化是涟漪效应文献中最受欢迎的技术。

随机优化通过基于情景的建模来考虑中断（Oksuz 和 Satoglu，2020）；而鲁棒优化尽管有诸多优点，却直接关注最坏情景，而这并不总是切合实际（Ivanov 等人，2019）。相反，模糊优化会忽略一些与涟漪效应有关的情景¨（Oz̧celik 等人，2021年）。此外，构建隶属函数需要深入了解问题的参数，而这并非总是适用（Memon 等人，2015）。因此，为了制定最佳的战略与运营决策，本文采用两阶段随机优化方法来控制不确定性。

本研究旨在探讨以下研究问题：

- 要实现绿色、可持续且具韧性的供应链，需要采取哪些战略与运营决策?

- 哪些策略最能缓解涟漪效应?
- 决策者如何才能最好地控制参数值估算过程中固有的不确定性?

本文其余部分安排如下：第 2 节概述相关研究。第3 节介绍针对韧性绿色供应链设计问题所构建的两阶段随机优化模型。第 4 节专门介绍数值实验及其分析。第 5 节给出结论，并探讨未来研究方向。

2 文献综述

与本研究相关的文献主要关注三个方面。首先是供应链设计的环境视角。其次是旨在缓解涟漪效应的韧性策略。第三个方面涉及采用随机优化来应对参数不确定性和涟漪效应。表 1 列出了相关研究，并突出了它们相互对立的观点。本节其余部分将回顾相关文献、现有研究空白以及本文的贡献。

绿色供应链设计将环境问题纳入战略决策（Foroozesh 等人，2022）。近年来，这些问题的重要性吸引了众多学者的关注（Bhatia 和 Gangwani，2021年）。在供应链网络配置阶段，通过环境投资使供应链更加绿色，这是

Wang 等人（2011年）。在他们的研究中，他们将 CO_2 排放作为衡量供应链绿色度的主要指标。这是环境问题研究中广泛使用的指标，也较容易估算。在一项类似研究中，O' Brien （2013年）通过阐述温室气体排放等有限目标，在 GSCD 中考虑了环境问题。Hasani 等人（2021年）在设计供应链网络时兼顾环境和经济因素，并运用韧性策略来缓解中断。Mohebalizadehgashti 等人（2020）针对 GSCD 问题建立了多目标混合整数线性规划，旨在尽可能减少运输产生的 CO_2排放，并最大限度地提高设施容量的总利用率。

近年来，尤其是在 COVID-19大流行之后，供应链韧性受到了广泛关注。例如，多位研究人员发表了综述论文，全面研究供应链中的韧性策略（Hosseini 等人，2019；Ivanov 等人，2019；Snyder 等人，2016）。Tomlin （2006年）指出，韧性策略分为两大类：中断前方案和中断后方案。例如，当供应链的供应端受到影响时，积累安全库存是一种中断前韧性策略（Foroozesh 等人，2022年）。Yılmaz 等人（2021年）提出了控制涟漪效应的四个阶段，即准备、首次响应、恢复准备和恢复。他们建议在前三个阶段采用中断前韧性策略，并在最后一个阶段采用中断后韧性策略。

倪等人（2018）建议采用中断后的策略，例如使用备用供应商提供的应急供应品或储备系统，以维持客户满意度并应对未满足的需求。Kamalahmadi 和 Mellat-Parast （2016）建立了一个两阶段混合整数规划，以设计灵活性高的采购计划。他们将运输渠道选择问题与供应商选择和订单分配问题相结合，并制定应急计划，以减轻中断的负面影响，最大限度地降低供应链总成本。他们发现，实施应急计划能够提高供应商适应制造商产能的灵活性，并减轻中断的严重程度。

他们考察了运输渠道选择问题以及供应商选择和订单分配问题，并制定了应急计划，以减轻中断的负面影响，最大限度地降低供应链总成本。他们发现，实施应急计划能够提高供应商适应制造商产能的灵活性，并减轻中断的严重程度。Jabbarzadeh 等人（2018）将库存水平和备用供应商作为两种韧性策略加以应用和评估。Hosseini 等人（2020）将供应商隔离视为供应链设计中的一种韧性策略。

防止涟漪效应扩散并避免参数不确定性对预测产生负面影响的一种方法，是采用适当的不确定性控制方法。根据Rezapour 等人（2017年）和Kamalahmadi 和 Mellat-Parast（2016），与确定性模型相比，鲁棒、随机和模糊技术在应对不确定性方面更为突出。Badri 等人（2017年）开发了一个两阶段随机优化模型，以最大化供应链的总价值。Yılmaz 等人（2021年）应用两阶段随机技术，在存在涟漪效应的情况下设计逆向供应链，并指出，结果显示排放水平增加了40%。因此，应实施减排法规以避免这一增长。本文采用两阶段随机优化方法来应对不确定性。有关多阶段随机优化和随机技术实施的更多信息，读者可参阅Khaloie 等人（2020）和Cui 等人（2020）。

表1 总结了近期相关研究。根据文献综述和上述论文可以看出，尽管绿色供应链管理越来越重视减少温室气体排放，但环境考量并非供应链设计问题的主要关注点，

政府减排法规（如总量控制与交易）被视为阻碍利润最大化的因素。此外，涟漪效应作为主要的中断因素之一，在韧性供应链设计研究中鲜少受到关注。

研究涟漪效应的论文主要考察了广义的韧性策略，例如中断前和中断后的方案；而对安全库存和备用供应商等具体韧性策略的研究则很少。换言之，韧性策略更多是按照中断前或中断后的分类进行研究，而临时设施和安全库存等具体策略的细节则被忽视。关于不确定性控制方法，大多数论文采用鲁棒优化（RO）、模糊优化（FO）或随机规划（SP）；只有少数研究考虑采用多阶段随机规划来处理不确定性。与本研究相关的文献仅涉及一般形式的中断，很少研究供应链中受中断影响的环节。据我们所知，目前尚无研究同时考虑供应链中中断的上游传播和下游传播。

本文通过构建多周期、多阶段的绿色韧性供应链，研究缓解涟漪效应和需求不确定性的方法。我们考虑了六种韧性策略，以控制供应链的供给侧和需求侧。我们采用两阶段随机优化方法，以有效控制参数估计不确定性和涟漪效应。

表 1：文献综述摘要

作者	网络阶段	多阶段时期	绿色供应链	涟漪效应	不确定性	韧性策略	中断效应
Kamalahmadi 和 Mellat-Parast (2016)	2	-	-	-	其他	应急计划	供应中断
Fattahi等(2017年)	3	✓	-	-	两阶段随机规划	应急与缓解（一般）	设施容量
Mohammed等(2017年)	3	-	-	-	SP	-	-
Rezapour 等人(2017年)	3	-	-	✓	确定性	零售商的应急库存，备用 p 供应商的产能多源采购	供应商中断
Pavlov 等人（2017年）	4	-	-	✓	FO	-	-
Badri 等人（2017年）	3	✓	-		两阶段随机规划	-	-
Amiri-Aref 等人（2018）	3	✓	-	-	两阶段随机规划	-	-
Zahiri 等人（2018）	3	✓	-	-	FO	-	-
John等(2018)	1	✓	-	-	确定性	-	-
廖(2018)	2	-	✓	-	确定性	-	-
倪等(2018)	1	✓	-	-	两阶段随机规划	备用设施、安全库存，闲置产能储备	需求
Jabbarzadeh 等人 (2018)	2	-	✓	-	SP	备用供应商、生产产能扩张	供应中断
Sawik （2019）	2	✓	-	-	两阶段随机规划	-	-
Darestani 和 Hemmati (2019)	3	✓	✓	-	RO	-	-
Hosseini 和 Ivanov(2019)	2	-	-	✓	其他	-	-
Hosseini-Motlagh 等(2019)	3	-	✓	-	其他	-	-
Zhang 等(2019)	2	-	-	✓	FO	备用制造商，多个分销商	供应中断
Hosseini 等人(2020)	2	-	-	✓	SP	-	供应商中断
Tucker 等人(2020)	3	✓	-	✓	SP	供应商和制造商配置制造商、安全库存	供应中断
Mohebalizadehgashti 等(2020)	3	✓	✓	-	其他	-	-
¨Oz,celik 等(2021年)	2	-	✓	✓	RO	-	-
Hasani 等(2021年)	3	✓	✓	-	RO	备用供应商、设施分散、设施加固	供应中断
Yılmaz 等人 （2021年）	3	-	✓	✓	两阶段随机规划	临时设施	供应中断
Foroozesh 等人 （2022年）	4	✓	✓	-	FO	多源采购，横向协作 ，覆盖半径	供应中断
本研究	4	✓	✓	✓	两阶段随机规划	备用供应商、多源采购、临时设施 ，区块链 ，安全库存、囤积	供给、需求

SP=随机规划，RO= 鲁棒优化，FO=模糊优化

3 韧性绿色供应链设计（RGSCD）模型构建

3.1 问题陈述

韧性绿色供应链设计问题可表述如下：该问题包含四个阶段，分别由集合 I、 J、 K 和 M 表示，即分别对应供应商、制造商、仓库和零售商。供应商向制造商提供原材料（X_{ijt}^{s}）。产品生产完成后，存放在仓库（T_{jkt}^{s}）中，再运送给零售商（Z_{kmt}^{s}）。供应链层级之间有 L 种不同的运输方式，用于运送原材料和产品。该问题设定了 T 个时间段，以确保在长期规划期内作出恰当的决策。通过 S 种可能的情景展现涟漪效应的不同程度。备用供应商以及临时制造和仓储设施被视为中断发生时的额外资源。为满足预先设定的服务水平，当供应链中出现涟漪效应时，可启用这些备用供应商和设施。供应链结构如图 1所示。目标是使供应链运营决策、战略韧性决策的成本，以及产品生产和运输过程中的总 CO_2 排放量最小化。假设采用总量控制与交易机制作为减排机制。

本文提出的模型基于以下假设构建：

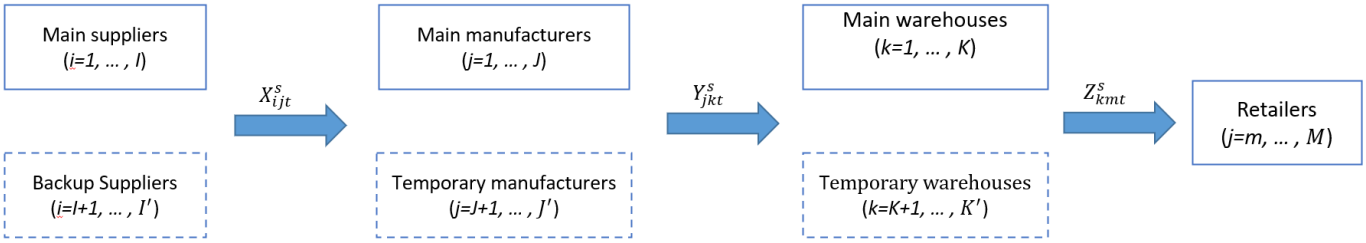


图 1：供应链结构

- CO_2 是在供应链中的运输和生产过程所产生的。

- 排放量受到政府的限制。

- 针对不确定参数考虑了不同的可能情景，以体现中断程度的差异。

- 允许制造商出现短缺，未满足的订单将延期交货。

- 所有临时制造中心和仓库在生产产能和存储能力方面均相同。

3.2 两阶段随机优化模型

本节提出一个两阶段随机混合整数线性优化模型，旨在最大限度地降低总成本和排放。该模型的主要目标是构建一个能够控制涟漪效应的韧性供应链。所提出的模型确保排放水平得到控制，从而满足政府发布的排放限制。

所提出的两阶段随机优化模型如下。

索引和集合

i：主要供应商和备用供应商（$i = 1, \cdots, I, I+1, \cdots I'$）

j：永久和临时制造设施（$j = 1, \cdots, J, J+1, \cdots J'$）

k：永久和临时仓库（$k = 1, \cdots, K, K+1, \cdots K'$）

m：零售商（$m = 1, \cdots, M$）

t：时间段（$t = 1, \cdots, T$）

l：运输方式（$l = 1, \cdots, L$）

s：情景（$s = 1, \cdots, S$）

参数

$TC1_{ijl}^{s}$：在情景 s 下，使用运输方式 l 将产品从供应商 i 运至制造商 j 的运输成本

$TC2_{jkl}^{s}$：在情景 s 下，使用运输方式 l 将产品从制造商 j 运至仓库 k 的运输成本

$TC3_{kml}^{s}$：在情景 s 下，使用运输方式 l 将产品从仓库 k 运至零售商 m 的运输成本

$T1_{ijl}^{s} \geq 0$：运输 供应商 i 至制造商 j 采用运输方式时的延迟 e

l 在情景 s下的一笔订单

$T2^s_{jkl} \geq 0$：情景 s下，制造商 j 使用运输方式 l 向仓库 k 运输一个订单的运输延迟

$T3^s_{kml} \geq 0$：情景 s下，仓库 k 使用运输方式 l 向零售商 m 运输一个订单的运输延迟

Ms_j：开设临时制造中心 $j \in \{j = J+1, \cdots, J'\}$的设立成本

Ws_k：开设临时仓库 $k \in \{K+1, \cdots, K'\}$的设立成本

So：建立信息共享系统的设立成本

$St1_{ijl}$：制造商 j 向供应商 i下达订单时，使用信息共享系统所节省的订货时间（每个订单）

$St2_{jkl}$：仓库 k 向制造商 j下达的每笔订单，使用信息共享系统所节省的订货时间

$St3_{kml}$：零售商 m 向仓库 k下达的每笔订单，使用信息共享系统所节省的订货时间

Dc：每笔订单每天的延迟成本

Tr：员工操作信息共享系统的培训成本Mic^s_j：情景 s 下制造商 j 的单位产品库存成本Msc^s_k：情景 s 下制造商 j 的单位产品缺货成本

D_{mt}^{s}：情景 s 下零售商 m 在时期 t 收到的需求

Mc_j：制造商 j 的生产能力

Wc_k：仓库 k 的产能

Spp：储备产品的额外成本

Sm：供应商最小数量

Cep_j：制造商 j 在生产过程中每件产品的碳排放

$Cet1_{ijl}$：使用运输方式 l 从供应商 i 运输至制造中心 j 的每件产品碳排放

$Cet2_{jkl}$：制造商 j 到仓库 k 使用运输方式 l运输时每件产品的碳排放

$Cet3_{kml}$：仓库 k 到零售商 m 使用运输方式 l运输时每件产品的碳排放

Rce：由于使用信息共享系统，每个产品单位运输所减少的碳排放量

Cap_t：时期 t内的最大允许碳排放量

r_j^s：涟漪效应导致制造商 j 在情景 s 下的产能削减比率

$r_k^{'s}$：情景 s 下仓库 k 因涟漪效应导致的产能削减比率

M：一个很大的正数

Pr^s：情景 s 的发生概率

第一阶段决策变量

XX_{ijtl}：表示时期 t 使用运输方式 l 时制造商 j 与供应商 i 之间物料流的二元变量；$XX_{ijtl}=1$ 表示制造商 j 收到供应商 i 的订单

YY_{jktl}：表示时期 t 使用运输方式 l 时制造商 j 与仓库 k 之间产品流的二元变量；$YY_{jktl}=1$ 表示制造商与仓库之间的产品流

ZZ_{kmtl}：表示时期 t 使用运输方式 l 时零售商 m 与仓库 k 之间产品流的二元变量；$ZZ_{kmtl}=1$ 表示仓库与零售商之间的产品流

第二阶段决策变量

X^s_{ijtl}：一个整数变量，表示在情景 s 下，时期 t 通过运输方式 l 从供应商 i 运输至制造商 j 的产品数量

Y^s_{jktl}：一个整数变量，表示在情景 s 下，时期 t 通过运输方式 l 从制造商 j运输至仓库 k 的产品数量

Z^s_{kmtl}：一个整数变量，表示情景 s下，在时期 t 使用运输方式 l 从仓库 k运往零售商 m 的产品数量

MI_{jt}^{s}：情景 s下，制造商 j^{th} 在时期 t 末的库存MS_{jt}^{s}：情景 s下，制造商 j^{th} 在时期 t 末的短缺量MSS_{jt}^{s}：情景 s下，制造商 j^{th} 在时期 t 的安全库存量SP_{jt}^{s}：情景 s下，制造商 j 在时期 t 订购的储备产品数量

数学表述

本节提出了一个具有两个目标的两阶段随机优化模型。第一个目标引入了所有供应链成本；第二个目标涉及CO_2 排放。第一阶段考虑确定性变量，这些变量不依赖于不确定参数。第二阶段将不确定变量纳入考虑。在本文中，通过考虑可能因中断而发生的不同情景来处理不确定性。第一阶段优化原材料转化为最终产品所经过的渠道。在第二阶段，为不确定变量定义 s 情景。根据所有可能情景及其发生概率，获得所提出模型的最优解。

供应链成本如下：

$$
\begin{aligned}
C_1 = & \sum_{i,i' \in I} \sum_{j,j' \in J} \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} XX_{ijtl} Dc(Tl1_{ijl}^{s} - St1_{ijl}) \\
& + \sum_{j,j' \in J} \sum_{k,k' \in K} \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} YY_{jktl} Dc(Tl2_{jkl}^{s} - St2_{jkl}) \\
& + \sum_{k,k' \in K} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} ZZ_{kmtl} Dc(Tl3_{kml}^{s} - St3_{kml})
\end{aligned}
\tag{1}
$$

公式（1）显示了不同供应链层级之间的运输延迟成本。

$$C_2^s = \sum_{i,i' \in I} \sum_{j,j' \in J} \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} X_{ijtl}^s Tc1_{ijl}^s + \sum_{j,j' \in J} \sum_{k,k' \in K} \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} Y_{jktl}^s Tc2_{jkl}^s + \sum_{k,k' \in K} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} Z_{kmtl}^s Tc3_{kml}^s \tag{2}$$

公式（2）表示整个供应链中的运输成本。公式（3）和（4）分别表示每个时期末的库存持有成本和短缺成本。

$$C_3^s = \sum_{j,j' \in J} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} MI_{jt}^s Mic_j^s \tag{3}$$

$$C_4^s = \sum_{j,j' \in J} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} MS_{jt}^s Msc_j^s \tag{4}$$

运输和生产过程中的 CO_2 排放量由公式（5）计算得出。

$$E^s = \sum_{j,j' \in J} \sum_{k,k' \in K} \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} Y_{jktl}^s Cep_j + \sum_{i,i' \in I} \sum_{j,j' \in J} \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} X_{ijtl}^s Cet1_{ijl} + \sum_{j,j' \in J} \sum_{k,k' \in K} \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} Y_{jktl}^s Cet2_{jkl} + \sum_{k,k' \in K} \sum_{m,m' \in M} \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} Z_{kmtl}^s Cet3_{kml} \tag{5}$$

在两阶段随机优化模型中，目标函数的表达式如下：

$$Min\, Z_1 = C_1 + \sum_{s \in S} Pr^s (C_2^s + C_3^s + C_4^s) \tag{6}$$

$$Min\ Z_2 = \sum_{s \in S} Pr^s E^s \tag{7}$$

第一个目标函数（6）用于最小化供应链总成本；第二个目标函数（7）用于最小化总量 CO_2 排放。在这些目标函数中，不确定变量的最优值基于所有可能的情景确定。

约束

约束（8）-（10）用于指定会使用哪些供应链合作伙伴。

$$X^s_{ijtl} \leq XX_{ijtl} M \qquad \forall i, j, t, l, s \tag{8}$$

$$Y^s_{jktl} \leq YY_{jktl} M \qquad \forall j, k, t, l, s \tag{9}$$

$$Z^s_{kmtl} \leq ZZ_{kmtl} M \qquad \forall k, m, t, l, s \tag{10}$$

约束（11）-（13）确保在不同层级之间运输一批产品时使用一种运输方式。

$$\sum_{l \in L} XX_{ijtl} \leq 1 \qquad \forall i, j, t \tag{11}$$

$$\sum_{l \in L} YY_{jktl} \leq 1 \qquad \forall j, k, t \tag{12}$$

$$\sum_{l \in L} ZZ_{jktl} \leq 1 \qquad \forall k, m, t \tag{13}$$

约束（14）、（15）和（16）展示了制造商的库存平衡、仓-

房屋和零售商，分别。

$$\sum_{i,i'\in I}\sum_{l\in L} X^s_{ijtl} + MI^s_{jt-1} + MS^s_{jt} = \sum_{k,k'\in K}\sum_{l\in L} Y^s_{jktl} + MI^s_{jt} + MS^s_{jt-1} \qquad \forall j,t,s \tag{14}$$

$$\sum_{j,j'\in J}\sum_{l\in L} Y^s_{jktl} = \sum_{m,m'\in M}\sum_{l\in L} Z^s_{kmtl} \qquad \forall k,t,s \tag{15}$$

$$\sum_{k,k'\in K}\sum_{l\in L} Z^s_{kmtl} = D^s_{mt} \qquad \forall m,t,s \tag{16}$$

约束（17）对制造商实施了所定义的 $CO2$ 排放上限。

$$\begin{aligned}&\sum_{j,j'\in J}\sum_{k,k'\in K}\sum_{l\in L}\sum_{s\in S} Y^s_{jktl} Cep_j + \sum_{i,i'\in I}\sum_{j,j'\in J}\sum_{l\in L}\sum_{s\in S} X^s_{ijtl} Cet1_{ijl} \\ &+ \sum_{j,j'\in J}\sum_{k,k'\in K}\sum_{l\in L}\sum_{s\in S} Y^s_{jktl} Cet2_{jkl} + \sum_{k,k'\in K}\sum_{m,m'\in M}\sum_{l\in L}\sum_{s\in S} Z^s_{kmtl} Cet3_{kml} \le Cap_t \qquad \forall t\end{aligned} \tag{17}$$

约束(18)描述了采用多源采购策略时必须选择的供应商最少数量。

$$\sum_{i,i'\in J} XX_{ijtl} \ge Sm \qquad \forall j,t,l \tag{18}$$

约束（19）和（20）计算了正常情况下以及发生中断时制造商和仓库的产能。

$$\sum_{j,j'\in J} Y^s_{jktl} \le \sum_{j,j'\in J} Mc_j(1-r^s_j) \qquad \forall j,t,l \tag{19}$$

$$\sum_{k,k'\in K} Z^s_{kmtl} \le \sum_{k,k'\in K} Wc_k(1-r'^s_k) \qquad \forall j,t,l \tag{20}$$

3.3 韧性策略

3.3.1 备用供应商

备用供应商策略考察了雇用额外潜在供应商的情形。尽管雇用额外供应商会增加供应链的成本，但发生中断时，这些供应商可用的概率更高。考虑这一策略后，索引 i 的范围扩展为 $\{1,2,\cdots,I,I+1,\cdots,I'\}$，其中常规供应商以 $\{1,2,\cdots,I\}$表示，供应商 $\{I+1,I+2,\cdots,I'\}$ 则代表备用供应商。发生中断时，供应商订单可能延迟，或其产能可能下降；备用供应商可以缓解由此造成的中断影响。

3.3.2 多源采购

多源采购可以分散供应商，从而避免供应链过度依赖数量有限的供应商，因为发生中断时，这些供应商可能无法供货。在模型中加入约束（21），可将这一增强韧性的策略应用于我们的RGSCD问题。方程（21）确保选择的供应商数量不低于最小值，以采购所需的原材料。

$$\sum_{i,i'\in I} XX_{ijtl} \geq Sm \qquad \begin{matrix}\forall j、t、\\ l\end{matrix} \tag{21}$$

3.3.3 安全库存

持有安全库存是另一种风险管理策略，可确保供应链能够立即响应客户需求，即使在不同供应链层级之间运输原材料或最终产品时发生延误也不例外。通过对原模型进行两项调整来实现安全库存管理。首先，将安全库存的维护成本$\sum_{j,\ j'\in J}\sum_{t\in T}\sum_{s\in S}MSS^s_{jt}Mic^s_j$计入库存成本。此外，每个时期以最终产品形式持有的额外安全库存也加入方程（14），以更新制造商库存平衡。将这一策略决策应用于模型后，方程14 更新如下。

$$\sum_{i,i'\in I}\sum_{l\in L}X^s_{ijtl}+MI^s_{jt-1}+MS^s_{jt}+MSS^s_{jt-1}=\sum_{k,k'\in K}\sum_{l\in L}Y^s_{jktl}+MI^s_{jt} \\ +MS^s_{jt-1}+MSS^s_{jt} \qquad\qquad \forall j,t,s \tag{22}$$

3.3.4 囤积

库存囤积是指在中断期间，制造商使用中断发生前生产并储存的库存来满足部分需求。这一策略降低了短缺的可能性，具有极高价值，但会产生额外成本，包括显著增加的持有成本。通常，库存囤积在中断发生前不会带来可衡量的收益（Liu 等人，2016）。采用库存囤积系统会使成本函数增加一项等于 $\sum_{j\in J}\sum_{t\in T}\sum_{s\in S}SP^s_{jt}Spp$ 的成本。此外，

制造商库存平衡约束，即公式（14），变更如下。

$$\sum_{i,i'\in I}\sum_{l\in L} X^s_{ijtl} + MI^s_{jt-1} + MS^s_{jt} + MSS^s_{jt-1} + SP^s_{jt} = \sum_{k,k'\in K}\sum_{l\in L} Y^s_{jktl} + MI^s_{jt} \tag{23}$$

$$+MS^s_{jt-1} + MSS^s_{jt} \qquad \forall j,t,s$$

3.3.5 临时设施

临时设施能够加快供应链从结构性中断中恢复（Yılmaz 等人，2021年）。必要时，可启用包括制造中心和仓库在内的临时设施，作为应急响应中心。为采用这一方案，索引域i和 j分别扩展为 $\{1,\cdots,I,I+1,\cdots,I'\}$和 $\{1,\cdots,J,J+1,\cdots,J'\}$。当设施产能下降时，这一策略十分有用，而这种情况在中断事件期间很常见。

3.3.6 信息共享系统

中断的主要后果之一是延迟。使用高效系统在所有供应链成员之间共享信息至关重要。例如，制造商可以监控零售商收到的需求，以检查可能出现的激增，并通过提高生产能力、增加运输最终产品的车辆来避免延迟。尽管使用这一信息共享系统成本高昂，但它有助于供应链降低延迟成本。在我们的模型中应用这一系统会使成本函数增加 $XX_{ijtl}(So+Tr)$，但会使不同层级之间的运输延迟分别减少 $St1_{ijl}$、 $St2_{jkl}$和 $St3_{kml}$所指定的幅度。

4 数值实验

Data

为研究中断对供应链的影响，并找出控制涟漪效应的最佳战略决策，我们使用Python编程语言和从 Ghomi-Avili 等人(2018) 提取的数据进行了数值实验。请注意，由于 Ghomi- Avili 等人 (2018) 提出的模型中未包含所提模型的部分参数，因此这些参数的取值通过模拟确定，具体将在下文讨论。此表（双击链接即可打开文件）汇总了相关数据。模型中考虑了四种情景，以表示不同的中断等级。第一种情景对应正常情况，其余情景则体现了从弱到强的三个中断等级。假设发生中断时将启用三家备用供应商，以及三个用于制造阶段和仓库的临时设施；这将导致运输成本、延误、库存和缺货成本以及必需品需求增加，同时使制造商和仓库的产能下降。假设政府会随时间推移逐步降低排放上限。

安全库存 VS. 囤积

囤积和安全库存都用于应对涟漪效应以及需求激增。尽管来源不同，但这两种策略都通过采购所需产品来控制中断效应，因此被视为相同。对两者进行比较，以便管理者选择成本最低的最佳策略。使用所提供的数据

集，在不同制造商产能中断程度下，分别采用囤积或安全库存策略求解所构建的模型。结果表明，当制造商的生产能力降至 44% 以下时，安全库存是更好的选择。图 2展示了上述两种策略各自占优的条件。如图2所示，随着制造商产能下降，制造商应持有的最优安全库存量会增加，这有助于决策者做好中断前的策略准备。

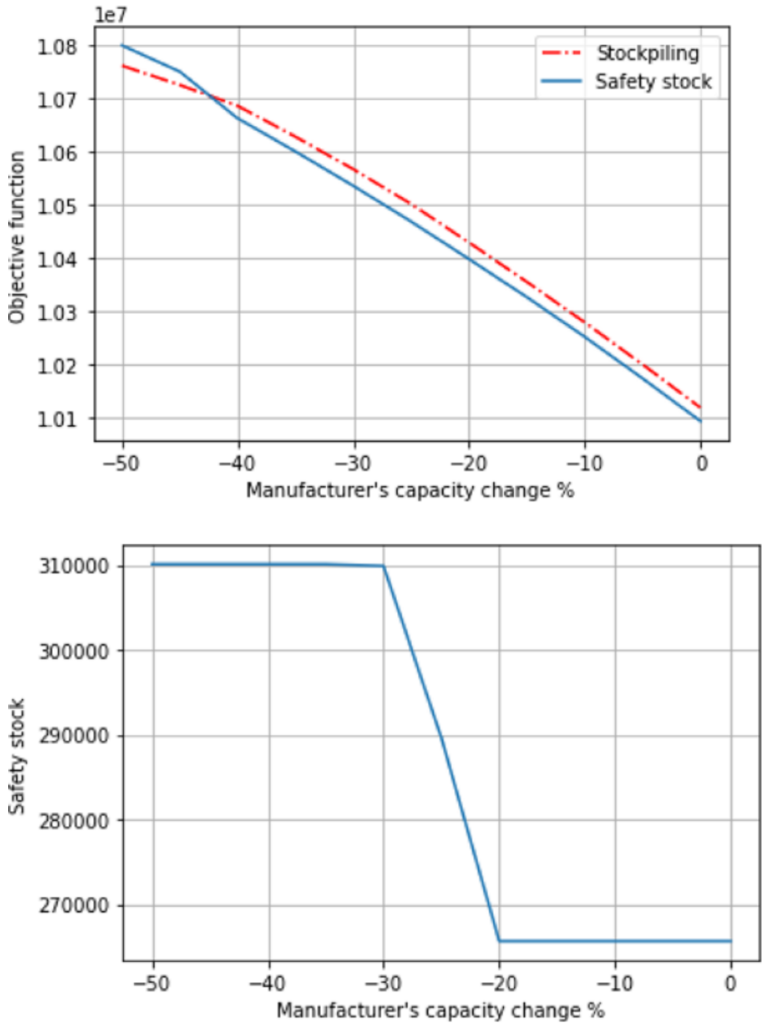


图2：囤积与安全库存囤积

备用供应商与多源采购

控制涟漪效应的另外两种有益的中断前策略是使用备用供应商和采用多源采购。尽管备用供应商成本较高，但它们能为供应端发生中断做好准备，并通过降低风险水平，帮助采购原材料和零部件。多源采购策略通过使供应商多样化、避免依赖有限的供应商群体，也能取得相同的效果。多源采购策略能够降低供应链风险，但也存在一些缺点，例如成本更高、材料质量较低，以及由于在为制造商采购所需材料时，除最佳选定的供应商外还需纳入次级供应商，导致交货时间更长。本节将比较这两种策略，以寻找最优且最具韧性的策略。根据图3，在实现更高总效用方面，使用备用供应商优于多源采购。

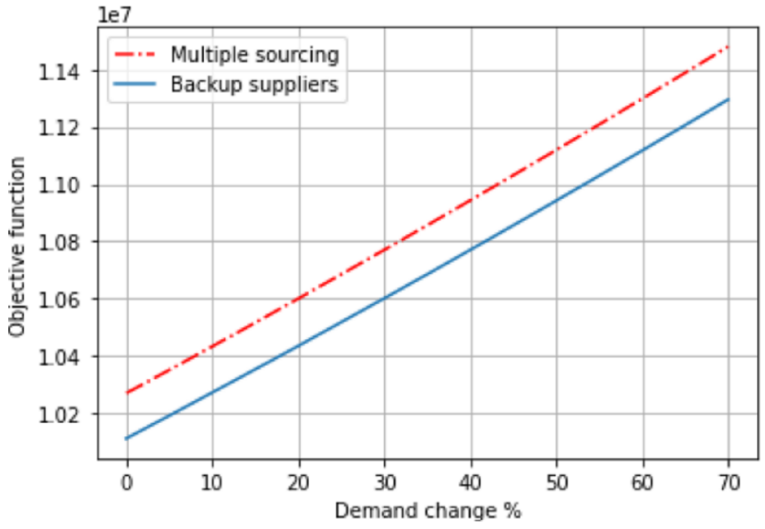


图3：多源采购与备用供应商

最终模型的结果

在比较类似策略并利用所提供的数据集确定占优的博弈方案后，基于四种韧性策略求解综合 RGSCD 模型：a）安全库存；b）备用供应商；c）临时设施；以及 d）信息共享系统。如表2所示，供应链合作伙伴的最佳组合、不同供应链层级之间的最优产品流，以及制造商在各个时期所需的安全库存、库存和短缺量均得以确定。 Z_{Total} 表 2 所示的是所有情景下获得的最佳总效用。这一目标源于一系列帮助供应链从中断中恢复的策略组合。只要拥有足够的存储空间，制造商就可以生产额外的产品。此外，制造商也可以出现短缺，并在未来时期应对该短缺。基于此，每个时期末制造商的最优存储量和短缺量得以确定。例如，对于所给出的测试问题， MSS_{31}^{1}表明，在情景 1 下，制造商 3 应持有 73,874 单位的安全库存，以充分应对需求波动。此外，该表还确定了为在中断期间维持服务水平而应使用的备用供应商以及应启用的临时设施。表格的最后三行规定了供应商与制造商、制造商与仓库，以及仓库与零售商之间的最优产品流。

Table 2: Optimal results of the proposed model

Decision variable	**Optimal Value**
Objective functions	$Z_{Total} = 8,005,492.07$ $Z_1 = 4,451,676.10$ $Z_2 = 3,553,815.97$
Manufacturers' inventory	$MI_{32}^1 = 36,822$
Manufacturers' shortage	$MS_{14}^1 = 14,807$ $MS_{15}^1 = 29,665$ $MS_{16}^1 = 44,465$ $MS_{34}^1 = 36,857$ $MS_{35}^1 = 73,779$ $MS_{36}^1 = 110,633$
Safety stock	$MSS_{111} = 29,604$ $MSS_{112} = 14,780$ $MSS_{131} = 73,874$
Selected suppliers and facilities	$XX_{4321} = 1$, $XX_{4331} = 1$, $XX_{4341} = 1$, $XX_{4351} = 1$, $XX_{4361} = 1$, $XX_{5121} = 1$, $XX_{5131} = 1$, $XX_{5141} = 1$, $XX_{5151} = 1$, $XX_{5161} = 1$ $YY_{1521} = 1$, $YY_{1531} = 1$,$YY_{1541} = 1$,$YY_{1551} = 1$,$YY_{1561} = 1$,$YY_{3421} = 1$,$YY_{3431} = 1$,$YY_{3441} = 1$,$YY_{3451} = 1$,$YY_{3461} = 1$,$YY_{3721} = 1$, $YY_{3731} = 1$,$YY_{3741} = 1$,$YY_{3751} = 1$,$YY_{3761} = 1$,$YY_{3821} = 1$,$YY_{3831} = 1$,$YY_{3841} = 1$, $YY_{3851} = 1$,$YY_{3861} = 1$ $ZZ_{4321} = 1$, $ZZ_{4331} = 1$, $ZZ_{4341} = 1$, $ZZ_{4351} = 1$, $ZZ_{4361} = 1$, $ZZ_{4721} = 1$, $ZZ_{4731} = 1$,$ZZ_{4741} = 1$, $ZZ_{4751} = 1$, $ZZ_{4761} = 1$, $ZZ_{5421} = 1$, $ZZ_{5431} = 1$, $ZZ_{5441} = 1$, $ZZ_{5451} = 1$, $ZZ_{5461} = 1$, $ZZ_{5621} = 1$, $ZZ_{5631} = 1$, $ZZ_{5641} = 1$, $ZZ_{5651} = 1$, $ZZ_{5661} = 1$, $ZZ_{7121} = 1$, $ZZ_{7131} = 1$, $ZZ_{7141} = 1$, $ZZ_{7151} = 1$, $ZZ_{7161} = 1$,$ZZ_{8221} = 1$, $ZZ_{8231} = 1$, $ZZ_{8241} = 1$, $ZZ_{8251} = 1$, $ZZ_{8261} = 1$, $ZZ_{9121} = 1$,$ZZ_{9131} = 1$, $ZZ_{9141} = 1$, $ZZ_{9151} = 1$, $ZZ_{9161} = 1$, $ZZ_{9421} = 1$, $ZZ_{9431} = 1$, $ZZ_{9441} = 1$, $ZZ_{9451} = 1$, $ZZ_{9461} = 1$, $ZZ_{9521} = 1$, $ZZ_{9531} = 1$, $ZZ_{9541} = 1$, $ZZ_{9551} = 1$, $ZZ_{9561} = 1$,$ZZ_{10721} = 1$, $ZZ_{10731} = 1$, $ZZ_{10741} = 1$, $ZZ_{10751} = 1$, $ZZ_{10761} = 1$
Product flow from suppliers to manufacturers	$X_{4321}^2 = 38,643$, $X_{24331}^2 = 38,643$, $X_{4341}^2 = 39,189$, $X_{4351}^2 = 38025$, $X_{4361}^2 = 38,632$, $X_{5121}^2 = 15,671$, $X_{5131}^2 = 15,477$, $X_{5141}^2 = 15,682$, $X_{5151}^2 = 15,720$, $X_{5161}^2 = 15,822$, $X_{4321}^3 = 41,134$, $X_{4331}^3 = 41,717$, $X_{4341}^3 = 41,464$, $X_{4351}^3 = 41,259$, $X_{4361}^3 = 41,127$, $X_{5121}^3 = 16,578$, $X_{5131}^3 = 16,439$, $X_{5141}^3 = 16,428$, $X_{5151}^3 = 16,909$, $X_{5161}^3 = 16,495$, $X_{4321}^4 = 48,711$, $X_{4331}^4 = 46,704$, $X_{4341}^4 = 48,284$, $X_{4351}^4 = 46,340$, $X_{4361}^4 = 47,417$, $X_{5121}^4 = 19,510$, $X_{5131}^4 = 18,789$, $X_{5141}^4 = 18,27$, $X_{5151}^4 = 18,550$, $X_{5161}^4 = 18,305$
Product flow from manufacturers to warehouses	$Y_{1521}^1 = 14,824$, $Y_{1531}^1 = 14,780$, $Y_{1541}^1 = 14,807$, $Y_{1551}^1 = 14,858$, $Y_{1561}^1 = 14,800$, $Y_{3421}^1 = 14,871$, $Y_{3431}^1 = 14,743$, $Y_{3441}^1 = 14,715$, $Y_{3451}^1 = 14,794$, $Y_{3461}^1 = 14,825$, $Y_{3721}^1 = 7,311$, $Y_{3731}^1 = 7,405$, $Y_{3741}^1 = 7,336$, $Y_{3751}^1 = 7,395$, $Y_{3761}^1 = 7.310$, $Y_{3821}^1 = 14,870$, $Y_{3831}^1 = 14,674$, $Y_{3841}^1 = 14,806$, $Y_{3851}^1 = 14,733$, $Y_{3861}^1 = 14,719$, $Y_{1521}^2 = 15,671$, $Y_{1531}^2 = 15,477$, $Y_{1541}^2 = 15,682$, $Y_{1551}^2 = 15,720$,$Y_{1561}^2 = 15,822$, $Y_{3421}^2 = 15,721$, $Y_{3431}^2 = 15,599$, $Y_{3441}^2 = 15,825$, $Y_{3451}^2 = 15,218$, $Y_{3461}^2 = 15,216$, $Y_{3721}^2 = 7,500$, $Y_{3731}^2 = 7,835$, $Y_{3741}^2 = 7,795$, $Y_{3751}^2 = 7,639$, $Y_{3761}^2 = 7,893$, $Y_{3821}^2 = 15,486$, $Y_{3831}^2 = 15,209$, $Y_{3841}^2 = 15,569$, $Y_{3851}^2 = 15,168$, $Y_{3861}^2 = 15,523$, $Y_{1521}^3 = 16,578$, $Y_{1531}^3 = 16,439$, $Y_{1541}^3 = 16,428$, $Y_{1551}^3 = 16,909$, $Y_{1561}^3 = 16,495$, $Y_{3421}^3 = 16,550$, $Y_{3431}^3 = 16,523$, $Y_{3441}^3 = 16,716$, $Y_{3451}^3 = 16,718$, $Y_{3461}^3 = 16,492$, $Y_{3721}^3 = 8,736$, $Y_{3731}^3 = 8,357$, $Y_{3741}^3 = 8,220$, $Y_{3751}^3 = 8,340$, $Y_{3761}^3 = 8,298$, $Y_{3821}^3 = 16,388$, $Y_{3831}^3 = 16,837$, $Y_{3841}^3 = 16,528$, $Y_{3851}^3 = 16,201$, $Y_{3861}^3 = 16,337$, $Y_{1521}^4 = 19,510$, $Y_{1531}^4 = 18,789$, $Y_{1541}^4 = 18,227$, $Y_{1551}^4 = 18,550$, $Y_{1561}^4 = 18,305$, $Y_{3421}^4 = 19,509$, $Y_{3431}^4 = 18,802$, $Y_{3441}^4 = 18,969$, $Y_{3451}^4 = 16,918$, $Y_{3461}^4 = 19,166$ $Y_{3721}^4 = 10,234$, $Y_{3731}^4 = 9,111$, $Y_{3741}^4 = 10,121$, $Y_{3751}^4 = 10,303$, $Y_{3761}^4 = 10,225$, $Y_{3821}^4 = 18,968$, $Y_{3831}^4 = 18,791$, $Y_{3841}^4 = 19,194$, $Y_{3851}^4 = 19,119$, $Y_{3861}^4 = 18,026$
Product flow from warehouses to retailers	$Z_{4321}^1 = 7,439$, $Z_{4331}^1 = 7,317$, $Z_{4341}^1 = 7,378$, $Z_{4351}^1 = 7,311$, $Z_{4361}^1 = 7,417$, $Z_{4721}^1 = 7,432$, $Z_{4731}^1 = 7,426$, $Z_{4741}^1 = 7,337$, $Z_{4751}^1 = 7,483$, $Z_{4761}^1 = 7,408$, $Z_{5421}^1 = 7,492$, $Z_{5431}^1 = 7,421$, $Z_{5441}^1 = 7,364$, $Z_{5451}^1 = 7,378$, $Z_{5461}^1 = 7,453$ $Z_{5621}^1 = 7,332$, $Z_{5631}^1 = 7,359$, $Z_{5641}^1 = 7,443$, $Z_{5651}^1 = 7,480$, $Z_{5661}^1 = 7,347$, $Z_{7121}^1 = 7,311$, $Z_{7131}^1 = 7,405$, $Z_{7141}^1 = 7,336$, $Z_{7151}^1 = 7,395$, $Z_{7161}^1 = 7,310$, $Z_{8221}^1 = 7,411$, $Z_{8231}^1 = 7,318$, $Z_{8241}^1 = 7,393$, $Z_{8251}^1 = 7,335$, $Z_{8261}^1 = 7,400$, $Z_{8521}^1 = 7,459$, $Z_{8531}^1 = 7,356$, $Z_{8541}^1 = 7,413$, $Z_{8551}^1 = 7,398$, $Z_{8561}^1 = 7,319$, $Z_{4321}^2 = 7,806$, $Z_{4331}^2 = 7,871$, $Z_{4341}^2 = 7,957$, $Z_{4351}^2 = 7,701$, $Z_{4361}^2 = 7,608$, $Z_{4721}^2 = 7,915$, $Z_{4731}^2 = 7,728$, $Z_{4741}^2 = 7,868$, $Z_{4751}^2 = 7,517$, $Z_{4761}^2 = 7,608$, $Z_{5421}^2 = 7,975$, $Z_{5431}^2 = 7,622$,$Z_{5441}^2 = 7,740$, $Z_{5451}^2 = 7,983$, $Z_{5461}^2 = 7,907$, $Z_{5621}^2 = 7,696$, $Z_{5631}^2 = 7,855$, $Z_{5641}^2 = 7,942$, $Z_{5651}^2 = 7,737$, $Z_{5661}^2 = 7,915$, $Z_{7121}^2 = 7,500$, $Z_{7131}^2 = 7,835$, $Z_{7141}^2 = 7,795$, $Z_{7151}^2 = 7,639$, $Z_{7161}^2 = 7,893$, $Z_{8221}^2 = 7,904$, $Z_{8231}^2 = 7,507$, $Z_{8241}^2 = 7,677$, $Z_{8251}^2 = 7,612$, $Z_{8261}^2 = 7,758$, $Z_{8521}^2 = 7,582$, $Z_{8531}^2 = 7,702$, $Z_{8541}^2 = 7,892$, $Z_{8551}^2 = 7,556$, $Z_{8561}^2 = 7,765$, $Z_{4321}^3 = 8,365$, $Z_{4331}^3 = 8,489$, $Z_{4341}^3 = 8,279$, $Z_{4351}^3 = 8,461$, $Z_{4361}^3 = 8,335$, $Z_{4721}^3 = 8,185$, $Z_{4731}^3 = 8,034$, $Z_{4741}^3 = 8,437$, $Z_{4751}^3 = 8,257$, $Z_{4761}^3 = 8,157$, $Z_{5421}^3 = 8,220$, $Z_{5431}^3 = 8,173$, $Z_{5441}^3 = 8,108$, $Z_{5451}^3 = 8,428$, $Z_{5461}^3 = 8,213$, $Z_{5621}^3 = 8,358$, $Z_{5631}^3 = 8,266$, $Z_{5641}^3 = 8,320$, $Z_{5651}^3 = 8,481$, $Z_{5661}^3 = 8,282$, $Z_{7121}^3 = 8,376$, $Z_{7131}^3 = 8,357$, $Z_{7141}^3 = 8,220$, $Z_{7151}^3 = 8,340$, $Z_{7161}^3 = 8,298$, $Z_{8221}^3 = 8,096$, $Z_{8231}^3 = 8,380$, $Z_{8241}^3 = 8,377$, $Z_{8251}^3 = 8,133$, $Z_{8261}^3 = 8,041$, $Z_{8521}^3 = 8,292$, $Z_{8531}^3 = 8,457$, $Z_{8541}^3 = 8,151$, $Z_{8551}^3 = 8,068$, $Z_{8561}^3 = 8,296$, $Z_{4321}^4 = 9,283$, $Z_{4331}^4 = 9,653$, $Z_{4341}^4 = 10,209$, $Z_{4351}^4 = 6,849$, $Z_{4361}^4 = 8,975$, $Z_{4721}^4 = 10,226$, $Z_{4731}^4 = 9,149$, $Z_{4741}^4 = 8,760$, $Z_{4751}^4 = 10,069$, $Z_{4761}^4 = 10,191$ $Z_{5421}^4 = 10,002$, $Z_{5431}^4 = 9,902$, $Z_{5441}^4 = 8,760$,$Z_{5451}^4 = 8,953$, $Z_{5461}^4 = 9,047$, $Z_{5621}^4 = 9,508$, $Z_{5631}^4 = 8,887$, $Z_{5641}^4 = 9,467$, $Z_{5651}^4 = 9,597$, $Z_{5661}^4 = 9,258$, $Z_{7121}^4 = 10,234$, $Z_{7131}^4 = 9,111$, $Z_{7141}^4 = 10,121$, $Z_{7151}^4 = 10,303$, $Z_{7161}^4 = 10,225$, $Z_{8221}^4 = 10,300$, $Z_{8231}^4 = 8,898$, $Z_{8241}^4 = 9,872$, $Z_{8251}^4 = 8,748$, $Z_{8261}^4 = 9,256$, $Z_{8521}^4 = 8,668$, $Z_{8531}^4 = 9,893$, $Z_{8541}^4 = 9,322$, $Z_{8551}^4 = 10,371$, $Z_{8561}^4 = 8,770$

为验证所提出的模型和求解方法，并探究供应链行为，进一步进行了如下分析。

必需品与非必需品的行为

对管理者而言，将供应链中的产品区分为必需品和非必需品至关重要。COVID-19大流行期间的情况显而易见：必需品的需求大幅激增，而非必需品的需求则基本没有出现这种变化。为衡量需求变化对所设计模型最优解的影响，我们进行了敏感性分析。为此，我们考虑了不同程度的需求波动，并对结果进行了分析。需求增加可解释为必需品的需求波动；需求减少则代表非必需品所面临的市场不确定性。图 4表明，需求增强促使制造商和仓库扩大对临时设施的使用。此外，根据图4，需求上升会增加临时设施之间的产品流，这表明通过启用临时设施来应对中断是一种理想的响应方式。

碳减排法规的影响

许多国家都采用一系列碳排放法规，以限制供应链对环境造成损害。限制排放水平的一种方法是对制造商的排放设定上限。因此，所提出的模型假设实施了总量控制与交易法规，政府逐步降低排放上限，以减少总 CO_2 排放，并使制造商能够适应法规要

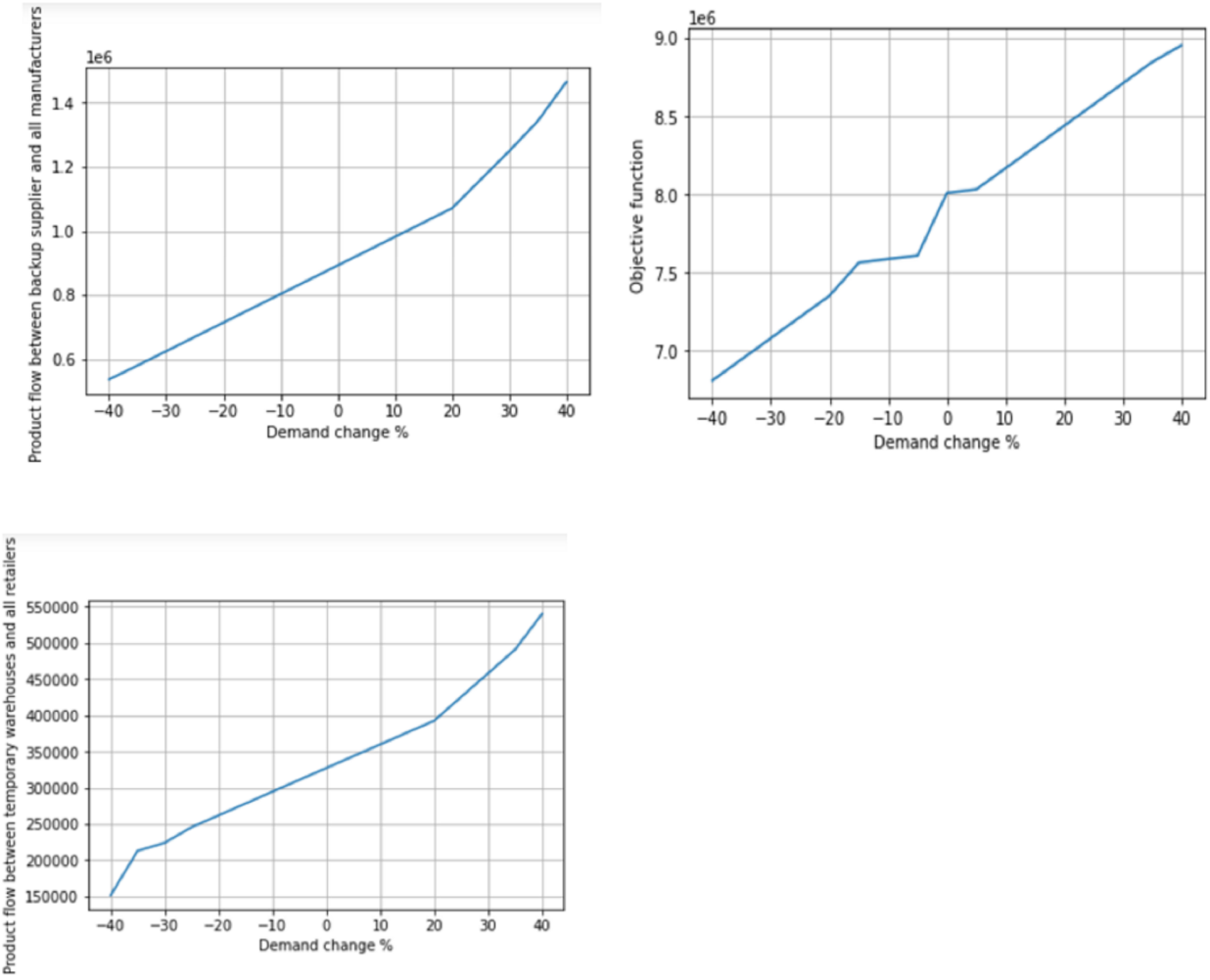


图4：必需品和非必需品需求波动的敏感性分析

求。本节将分析上限调整对供应链的影响。如图所示5，降低排放上限会给供应链带来巨大的排放 CO_2 成本；模型会通过降低排放水平作出响应，从而导致总效用收缩。当排放上限降至原值的76%后，模型将变得不可行。换言之，若排放上限降至某个阈值以下，就无法在遵守最大排放量的同时满足客户需求

要求。因此，建议政府在设定上限数值之前，先认识到供应链限制。关于其他无需降低生产水平即可减少排放水平的方法，详见Mirzaee 等人(2022年。

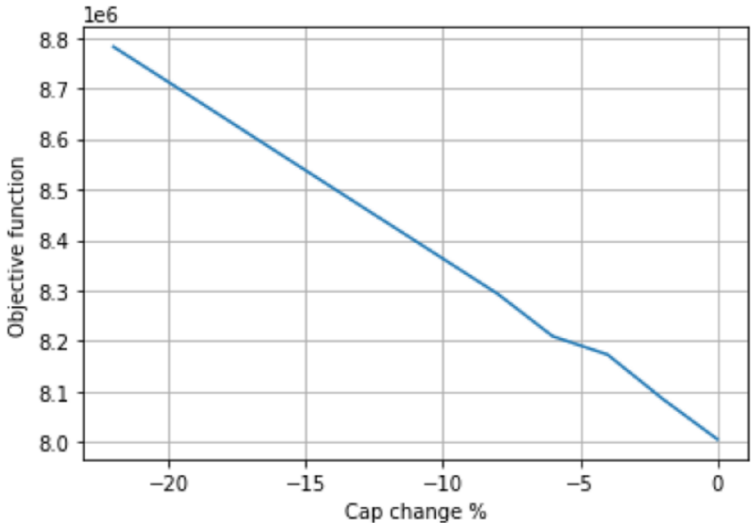


图5：碳减排法规的影响

产能下降效应

涟漪效应通常会影响制造商和仓库的产能（Monos-tori，2021年），因此需要采取适当的风险管理策略，例如通过保持更多安全库存来应对客户需求。在产能下降时，开展敏感性分析以评估正确的策略。如图6 所示，降低供应链设施的产能会使目标函数值恶化，因为这会迫使模型通过保持更多安全库存来应对需求，而持有更多库存的成本更高。产能降至某一阈值以下会导致不可行性，因为有限的产能使其无法处理实际需求。因此，供应链管理者必须考虑保留适量的临时设施

以防止服务水平下降。

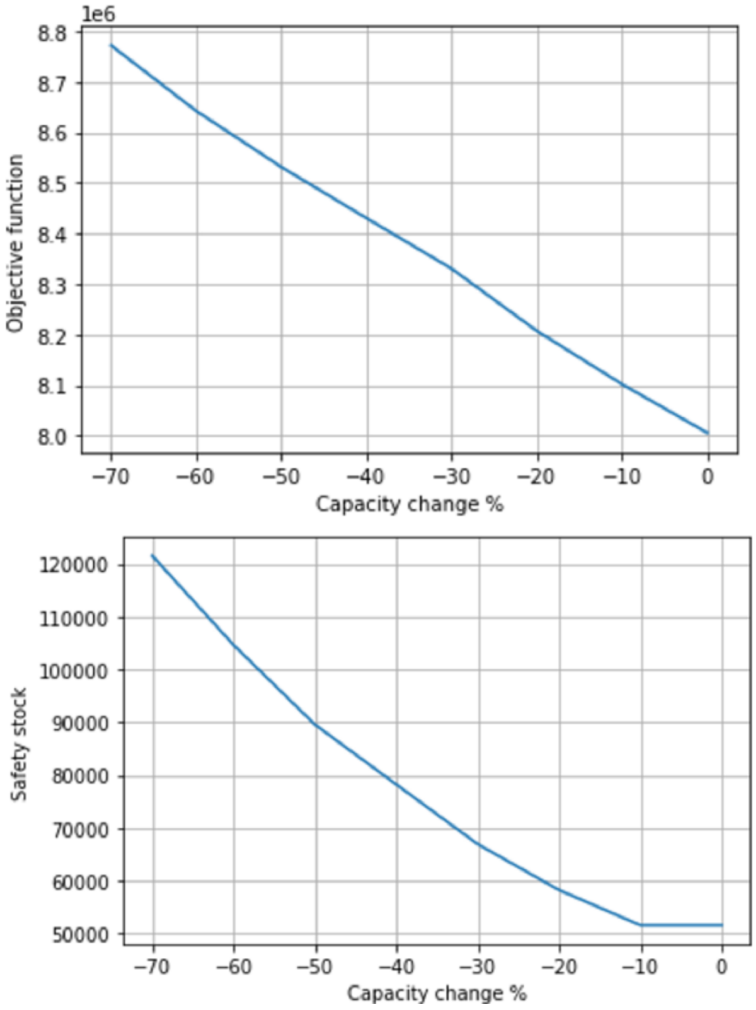


图6：容量效应

5 结论

本文提出了一种韧性绿色供应链设计，以减轻COVID-19大流行期间经历的此类中断所产生的涟漪效应，并探讨了缓解动荡影响的最佳设计策略。因此，本文在所设计的供应链中应用了六种韧性策略，以防止服务水平降低。此外，本文采用了一种两阶段

随机优化方法，以控制涟漪效应以及参数估计中固有的不确定性。换言之，本研究为供应链管理者提供了一个决策框架，帮助他们为物料和最终产品选择最佳运输渠道、提高服务水平，并控制模型参数估计和中断方面的不确定性。

通过数值示例验证了所设计模型和所提出求解方法的有效性。结果证实，在存在随机参数和可能发生中断的情况下，所选策略能够减轻涟漪效应。对需求波动和设施产能变化的分析有助于供应链管理者在面临中断之前，就其采购和生产计划作出尽可能最佳的战略决策。此外，对碳排放上限的敏感性分析表明，政府必须为制造商提供适量的碳配额。

本文率先采用两阶段随机优化方法，在碳排放法规的约束下，研究考虑多种中断前和中断后韧性策略的韧性绿色供应链设计。鉴于这一问题的新颖性及其在 COVID-19大流行后的重要性，有必要在这一领域开展更多研究。在此背景下，研究有限保质期的易腐产品值得关注。将易腐产品作为库存或安全库存会增加供应链的成本，因此囤积或外包可能是更好的选择。此外，考虑恢复常态计划，以降低供应链合作伙伴在中断事件期间承担的额外成本，也是一个有趣的研究课题。此外，深入考察安全库存与服务水平之间的关系，也是值得进一步研究的方向。

参考文献

Amiri-Aref, M., Klibi, W., and Babai, M. Z. (2018). 随机需求下的多源选址库存问题。《欧洲运筹学杂志》, 266(1):72–87.

Badri, H.、Ghomi, S. F. 和 Hejazi, T.-H.（2017年）。一种基于价值的闭环供应链网络设计两阶段随机规划方法。*Transportation ResearchPart E: Logistics and Transportation Review*，105：1–17。

Bhatia, M. S. 和 Gangwani, K. K.（2021年）。绿色供应链管理：科学计量学综述与实证研究分析。《清洁生产杂志》，284：124722。

Boskabadi, A.、Mirmozaffari, M.、Yazdani, R. 和 Farahani, A.（2022年）。需求不确定性下多产品、多周期绿色供应链系统中的分销网络设计。《可持续运营与计算机》，3：226–237。

Cui, L.、Deng, J.、Liu, R.、Xu, D.、Zhang, Y. 和 Xu, M.（2020）。包含缩短提前期举措及其求解方法的随机多品项补货与配送问题。《应用数学与计算》，374：125055。

Darestani, S. A. 和 Hemmati, M.（2019）。考虑排队系统的易腐商品双目标闭环供应链网络鲁棒优化。*Computers &industrial engineering*，136：277–292。

Fattahi, M., Govindan, K. 和 Keyvanshokooh, E.（2017年）。考虑配送提前期的运营风险与中断风险下响应迅速且富有韧性的供应链网络设计

敏感客户。*Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*，101:176–200。

Foroozesh, N.、Karimi, B. 和 Mousavi, S.（2022年）。鲁棒区间值二型模糊不确定性下考虑路线风险和横向协作的易腐产品绿色韧性供应链网络设计：食品行业案例研究。《环境管理杂志》，307：114470。

Gholami-Zanjani, S. M.、Klibi, W.、Jabalameli, M. S. 和 Pishvaee, M. S.（2021年）。易受流行病扰动影响的韧性食品供应链网络设计。*InternationalJournal of Production Economics*，233：108001。

Ghomi-Avili, M.、Naeini, S. G. J.、Tavakkoli-Moghaddam, R. 和 Jabbarzadeh, A.（2018）。存在中断时绿色竞争性闭环供应链网络设计的模糊定价模型。《清洁生产杂志》，188：425–442。

Hasani, A., Mokhtari, H. 和 Fattahi, M.（2021年）。绿色韧性供应链网络设计的多目标优化方法：一项实际案例研究。《清洁生产杂志》，278:123199。

Hendricks, K.B. 和 Singhal, V. R.（2005年）。对供应链中断对企业长期股价表现和股权风险影响的实证分析。*Productionand Operations management*，14(1):35–52。

Hosseini, S. 和 Ivanov, D.（2019）。考虑涟漪效应的供应网络新韧性度量：一种贝叶斯网络方法。《运筹学年鉴》，第 1–27 页。

Hosseini, S.、Ivanov, D. 和 Dolgui, A.（2019）。供应链韧性分析定量方法综述。*Transportation Research Part E: Logistics and TransportationReview*，125：285–307。

Hosseini, S., Ivanov, D., andDolgui, A.（2020）。供应商中断涟漪效应建模：集成马尔可夫链与动态贝叶斯网络方法。*International Journalof Production Research*，58(11)：3284–3303。

Hosseini-Motlagh, S.-M., Nouri-Harzvili, M., Choi, T.-M., and Ebrahimi, S.（2019）。具有双渠道和需求中断的逆向供应链系统优化：可持续性、企业社会责任投资与定价协调。*Information Sciences*，503：606–634。

Ivanov, D. and Dolgui, A.（2022年）。供应链压力测试与可存续生态系统的构建。*Operations Management Research*，15(1)：475–486。

Ivanov, D., Dolgui, A., and Sokolov, B.（2015）。考虑中断因素的供应链设计：供应链涟漪效应研究脉络综述。*IFAC-PapersOnLine*，48(3)：1700–1707。

Ivanov, D., Dolgui, A., and Sokolov, B.（2019）。数字技术和工业4.0对涟漪效应及供应链风险分析的影响。*International Journal of ProductionResearch*，57(3)：829–846。

Ivanov, D., Pavlov, A., Dolgui, A., Pavlov, D., 和 Sokolov, B.（2016）。考虑主动策略和恢复策略的中断驱动型供应链（重新）规划及绩效影响评估。*Transportation Research Part E: Logistics and TransportationReview*，90：7–24。

Jabbarzadeh, A.、Fahimnia, B. 和 Sabouhi, F.（2018）。韧性与可持续供应链设计：中断风险下的可持续性分析。*International Journal of Pro-duction Research*，56(17)：5945–5968。

John, S. T.、Sridharan, R.、Kumar, P. R. 和 Krishnamoorthy, M.（2018）。旧冰箱的多周期逆向物流网络设计。*Applied Mathematical Modelling*，54：311–331。

Kamalahmadi, M. 和 Mellat-Parast, M.（2016）。通过供应商灵活性和可靠性评估开发具有韧性的供应链。*International Journal of Production Re-search*，54(1)：302–321。

Khaloie, H.、Abdollahi, A.、Shafie-Khah, M.、Anvari-Moghaddam, A.、Nojavan, S.、Siano, P. 和 Catal˜ao, J. P.（2020）。采用多阶段模型在能源和旋转备用市场中制定风电—热能储能协调报价策略。*Applied Energy*，259：114168。

Kim, Y.、Chen, Y.-S. 和 Linderman, K.（2015）。供应网络中断与韧性：网络结构视角。*Journal of operations Management*，33：43–59。

Liao, T.-Y. (2018). 面向产品回收与再制造的逆向物流网络设计。*Applied Mathematical Modelling*, 60:145–163.

Liu, F., Song, J.-S., and Tong, J. D. (2016). 通过虚拟库存池化构建供应链韧性。*Production and Operations management*, 25(10):1745–1762.

Liu, M.、Liu, Z.、Chu, F.、Dolgui, A.、Chu, C. 和 Zheng, F.（2022年）。一种优化方法，

旨在通过最小化中断风险提升多级供应链的生存能力。*Omega*，第 102683 页。

Memon, M. S., Lee, Y. H., 和 Mari, S. I.（2015）。结合灰色系统理论与不确定性理论的群体多准则供应商选择。*Expert Systems with Applications*，42(21):7951–7959。

Mirzaee, H., Samarghandi, H., 和 Willoughby, K.（2022年）。具有随机参数的碳排放总量控制与交易机制三方博弈论模型。*Computers & IndustrialEngineering*，页码 108285。

Mohammed, A., Wang, Q., 和 Li, X.（2017年）。一种经济高效的 RFID 赋能 HMSC 网络设计决策算法：多目标方法。*Industrial Management& Data Systems*。

Mohebalizadehgashti, F., Zolfagharinia, H., 和 Amin, S. H.（2020）。绿色肉类供应链网络设计：多目标方法。*International Journal of ProductionEconomics*，219:312–327。

Monostori, J.（2021年）。供应链中涟漪效应的缓解：平衡稳健性、复杂性和效率。*CIRP Journal of Manufacturing Science andTechnology*，32：370–381。

Ni, N., Howell, B. J., 和 Sharkey, T. C.（2018）。在供应链韧性规划中对未满足需求的影响进行建模。*Omega*，81：1–16。

Oksuz, M. K. 和 Satoglu, S. I.（2020）。用于灾害响应的临时医疗中心选址规划两阶段随机模型

。《国际灾害风险削减杂志》，44:101426。

¨ ¨Oz¸celik, G., Faruk Yılmaz, O. 和 Bet¨ul Yeni, F.（2021年）。逆向供应链涟漪效应的鲁棒优化：一项工业案例研究。*International Journal of ProductionResearch*，59(1)：245–264。

O'Brien, C.（2013年）。范式转变的五十年。*International Journal of ProductionResearch*，51(23-24)：6740–6745。

Pavlov, A.、Ivanov, D.、Dolgui, A. 和 Sokolov, B.（2017年）。供应链韧性评估的混合模糊概率方法。*IEEE Transactions on Engineering Man-agement*，65(2)：303–315。

路透社（2020）。

Rezapour, S.、Farahani, R. Z. 和 Pourakbar, M.（2017年）。竞争环境下的韧性供应链网络设计：一项案例研究。《欧洲运筹学杂志》，259(3)：1017–1035。

Sawik, T. (2019). 使用投资组合方法缓解供应链中断并实现恢复。*Omega*, 84:232–248.

Sharma, M., Joshi, S., Luthra, S., 和 Kumar, A.（2022年）。新冠疫情暴发期间的中断与风险管理：区块链技术在构建韧性食品供应链中的作用。*Operations Management Research*，15(1):268–281。

Snyder, L. V., Atan, Z., Peng, P., Rong, Y., Schmitt, A. J., 和 Sinsoysal, B.（2016）。供应链中断的运筹学/管理科学模型：综述。*IIE Transactions*，48(2):89–109。

Tomlin, B.（2006年）。论缓解措施和应急策略在管理供应链中断风险中的价值。*Management Science*，52(5):639–657。

Tordecilla, R. D., Juan, A. A., Montoya-Torres, J. R., Quintero-Araujo, C. L., and Panadero, J.（2021年）。不确定性情景下韧性供应链网络设计与评估的仿真优化方法：综述。仿真建模实践与理论，106:102166。

Tucker, E. L., Daskin, M. S., Sweet, B. V., and Hopp, W. J.（2020）。通过激励韧性供应链设计来预防药品短缺：采用两阶段和多阶段随机规划进行政策分析。*IISE Transactions*，52(4):394–412。

Wang, F., Lai, X., and Shi, N.（2011年）。绿色供应链网络设计的多目标优化。*Decision Support Systems*，51(2):262–269。

Wang, W.、Zhang, Y.、Zhang, W.、Gao, G. 和 Zhang, H.（2021年）。需求不确定性下绿色供应链中的激励机制。《清洁生产杂志》，279：123636。

¨ ¨Yılmaz, O. F.、Oz¸celik, G. 和 Yeni, F. B.（2021年）。涟漪效应发生时确保逆向供应链的可持续性：两阶段随机优化模型。《清洁生产杂志》，282：124548。

Zahiri, B., Jula, P., and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2018). 考虑易腐性和产品可替代性的不确定条件下药品供应链网络设计。*Information Sciences*,423:257–283.

Zhang, S., Zhang, P., and Zhang, M. (2019). 随机供应中断下供应链系统的模糊应急模型和鲁棒应急策略。*Complexity*, 2019.