控制与决策
Control and Decision

韧性视角下考虑供应商失效的应急物资供应链决策优化

伍佳妮, 龙燕妮

引用本文:
伍佳妮, 龙燕妮. 韧性视角下考虑供应商失效的应急物资供应链决策优化[J]. 控制与决策, 2025, 40(8): 2439-2449.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2025.0058

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

平台品牌赋能情境下考虑信息不对称的供应链渠道冲突

Supply chain channel conflicts considering asymmetric information under platform brand empowerment

控制与决策. 2021, 36(9): 2123-2132 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0098

信息非对称下考虑制造商回收行为的闭环供应链协调

Coordination of closed supply chain under asymmetric information considering manufacturer's recycling behavior

控制与决策. 2021, 36(7): 1723-1731 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1657

不同担保模式下考虑零售商公平关切的闭环供应链博弈模型

Game models of closed-loop supply chain under different warranty modes considering retailer's fairness concerns

控制与决策. 2021, 36(6): 1489-1498 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1328

考虑效率和公平的跨区域协同应急救援路径选择

Routing optimization of cross-regional collaborative emergency rescue considering efficiency and fairness

控制与决策. 2021, 36(2): 483-490 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0919

风险规避制造商市场入侵策略

Market encroachment strategy of risk-averse manufacturer

控制与决策. 2021, 36(10): 2528-2536 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1819

韧性视角下考虑供应商失效的应急物资供应链决策优化

伍佳妮†，龙燕妮

(长安大学 经济与管理学院，西安 710064)

摘　要: 为确保应急物资的持续供应和有效分配, 使应急物资供应链在供应商失效时仍能保持一定的供应能力并快速响应, 继而恢复到良好的运行状态, 从而提升应急管理效率, 将韧性理论引入自然灾害应急物资供应链决策中. 基于韧性预防策略 (产能储备与多源采购)、韧性响应策略 (备用供应商) 及韧性恢复策略 (原供应商产能修复), 在政企联合模式的前提下, 建立以供应链总成本最小和供应链总韧性值最大为目标的灾前灾后两阶段混合整数随机规划模型. 通过算例求解得到不同情景和多种不确定因素下的应急物资供应链相关决策方案, 并通过对比分析和灵敏度分析证明模型的有效性与韧性策略的适用性. 结果表明: 韧性策略可以有效提升应急物资供应链应对供应中断的预防能力、响应能力与恢复能力; 韧性预防策略更适用于供应链失效程度较小的情况; 供应商失效时间越长、失效情景越严重, 备用供应商发挥的作用越大, 反之则原供应商产能修复发挥的作用更大.

关键词: 应急物资供应链；韧性策略；供应商失效；政企联合；应急物资分配；双目标决策优化

中图分类号: X913；F274　　**文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.0058

引用格式: 伍佳妮, 龙燕妮. 韧性视角下考虑供应商失效的应急物资供应链决策优化 [J]. 控制与决策, 2025, 40(8): 2439-2449.

Decision optimization of emergency materials supply chain considering supplier failure from perspective of resilience

WU Jia-ni†，*LONG Yan-ni*

(School of Economics and Management，Chang'an University，Xi'an 710064，China)

Abstract: In order to ensure the continuous supply and effective allocation of emergency materials, enable the supply chain of emergency materials to maintain a certain supply capacity when the supplier fails, respond quickly and recover to a good operating state, and thus improve the efficiency of emergency management, this paper introduces the theory of resilience into emergency materials supply chain decision-making for natural disasters. Based on the resilience prevention strategies (capacity reserve and multi-source procurement), resilience response strategy (standby suppliers) and resilience recovery strategy (original supplier capacity repair), a two-stage mixed-integer stochastic programming model encompassing pre-disaster and post-disaster phases with the goal of minimum total supply chain cost and maximum total supply chain resilience is established under the premise of the government-enterprise joint model. The decision-making solutions for the emergency supply chain under different scenarios and multiple uncertainties are derived through numerical example analysis. The validity of the model and the applicability of the resilience strategy are proved by comparative analysis and sensitivity analysis. The results show that the resilience strategy can effectively improve prevention, response and recovery abilities of the supply chain to cope with supply interruptions. The resilience prevention strategy is only applicable when the degree of supplier failure is small. The longer the supplier's failure time and the greater the degree of failure, the greater the role played by the standby supplier, conversely, the greater the role played by the original supplier's capacity repair.

Keywords: emergency materials supply chain；resilience strategy；supplier failure；combination of government and enterprise；emergency materials allocation；dual-objective decision optimization

收稿日期: 2025-01-13；**录用日期:** 2025-03-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72104037)；陕西省创新能力支撑计划项目 (2024ZC-YBXM-126)；中央高校基本科研业务费专项资金项目 (300102231647).

†通信作者. E-mail: jianiwu@chd.edu.cn.

本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

0 引 言

应急管理环节中, 应急物资的储备与分配是影响应急效果的两大关键决策, 二者相互关联, 应急物资储备是进行物资分配的必要前提, 最优分配方案可以使有限的储备物资发挥最大效用[1]. 因此, 决策者在制定应急方案时, 应重点关注应急物资的灾前储备与灾后分配方案. 然而, 我国应急物资储备结构不合理、储备主体单一等短板导致应急物资在灾害发生后经常出现供应中断的现象. 如 2021 年河南特大暴雨灾害中, 由于应急物资储备库实物储备不足, 缺乏协议企业生产能力储备与备用供应商, 使得冲锋舟等水上救援工具供应中断, 进而导致多个受灾地区无法及时获得物资救援. 此外, 自然灾害带来的不确定因素亦增加了供应商失效的风险, 使得已有应急方案难以有效实施. 研究表明, 韧性越强, 则供应链在突发事件中抵御、响应及恢复的能力越强, 进而面对供应中断风险时的持续供应能力越强. 因此, 提升应急物资供应链的韧性对应急决策有重要意义.

在应急物资决策研究中, 学者们针对应急物资储备体系中存在的储备模式缺乏多样性、储备规模不足等问题, 对不同主体的应急物资储备模式展开研究. 多数学者认为政企联合的储备模式能够解决政府单独储备应急物资面临的储备量不足与经济压力过大的困境. 张萌等[2] 将拍卖机制引入应急物资政企联合储备研究中, 通过报童模型和竞胜标决定模型解决应急物资的采购和代储问题, 发现拍卖机制能够帮助政府与多家企业达成协议, 且具有经济效率. Chen 等[3] 针对多物资、多灾害, 通过多产品报童模型建立协议企业实物储备模型, 提出了由救灾部门与供应商共同储备救灾物资的柔性储备政策. 张琳等[4] 将数量柔性契约引入政企联合模式中, 考虑了企业实物储备与生产能力储备的多源采购定价模型, 认为政企联合中的协议企业应尽量使用产能储备而非大量进行实物储备.

应急物资的分配研究多是基于情景、阶段与不同因素的数学模型优化, 分配决策目标逐渐由单目标转向多目标. Wan 等[5] 为提高灾后突发事件中救灾物资分配的合理性, 考虑不同受灾地区的灾情程度, 建立了需求不确定条件下以需求未满足率最小、物资分配成本最小以及分配路径风险最小为目标的多周期动态应急物资分配模型. 刘长石等[6] 考虑到灾民具有攀比心理, 为提升应急效率与公平性, 建立了以损失攀比之和最小和时间攀比之和最小的双层优化模型. 张国富等[7] 考虑到应急物资消耗的连续性, 建立了多供应点、多物资和单需求地的兼顾时效性与供应连续性的多目标分配模型. 也有学者将应急物资的分配与其他供应链环节展开联合优化, 如储备、选址、路径优化等[1,8-9].

供应链韧性的研究从其定义、量化及提升策略等方面展开. Ponomarov 等[10] 将供应链韧性定义为供应链应对突发事件的事前准备、快速响应中断并从中恢复的适应能力. 供应链韧性度量方面, Torabi 等[11] 基于韧性能力提出评价供应链韧性的指标, 该指标是关于吸收能力、适应能力和恢复能力的函数, 能够测量供应商供应能力的损失. Zhao 等[12] 将供应链中断后与中断前的生产能力之比作为量化供应链韧性的指标. 在供应链韧性优化方面, 学者们提出了多种韧性策略, 根据供应中断前、中、后 3 个阶段, 可将其分为韧性预防策略、韧性响应策略和韧性恢复策略. 3 类韧性策略分别包括多源采购、产能储备、加固基础设施, 备选供应商、重新设计与分配, 失效供应商修复等[11,13-14].

以往研究中, 关于应急物资的研究集中在应急救援的单一环节, 从灾前延伸到灾后的不多. 在政企联合方面, 大多考虑单个供应商的政企联合模式, 落在实物储备而未考虑生产能力储备, 研究视角多聚焦于政企合作博弈, 鲜少关注应急物资的具体配置. 将韧性策略用于自然灾害下应急物资供应链决策的研究体量较小, 忽略了应急物资供应链遭到灾害冲击时的实际供应能力的表现, 较少从供应商失效而导致的供应中断的角度优化应急决策. 同时, 在实际应急管理过程中, 供应商失效无法完全避免, 因此还应进一步研究失效后的响应与恢复策略. 另外, 大部分学者没有考虑相关策略在实际应用时的时间延迟, 在合理性与实用性方面较弱.

鉴于此, 本文基于韧性视角, 将自然灾害发生前后作为一个整体, 在政企联合的基础上, 考虑生产能力储备和供应商失效情景, 引入时间窗, 对灾后一个救援周期内相应时段的应急物资供应链服务水平、各韧性策略的延迟时间做出要求, 同时考虑需求、产能、成本与价格等不确定因素, 使其更符合实际. 在此基础上建立一个集成韧性预防策略、韧性响应策略和韧性恢复策略的以供应链总韧性最大和供应链总成本最小为目标的灾前灾后两阶段混合整数随机规划模型, 旨在提升应急物资供应链在自然灾害突发事件下的预防、响应与恢复能力, 从而保证应急物资的持续供应与有效分配. 解决的问题包括: 供应节点的选择, 应急物资的生产、储备与分配方案等. 其中, 政企联合储备模式采用政府实物储备 + 供应商实物储备 + 供应商生产能力储备模式; 韧性预防策

略采用多源采购和产能储备策略; 韧性响应策略采用备用供应商策略; 韧性恢复策略采用原供应商产能修复策略. 将各情景下供应链在一个周期内的总供应能力与供应商失效前供应链上的总供应能力之比作为衡量供应链韧性的指标.

1　模型构建

1.1　问题描述

本文设计一个自然灾害背景下的由若干原供应商、备用供应商、政府应急物资储备库和受灾需求地组成的三级应急物资供应链, 供应链上每个供应商都存在两种状态: 正常运行或失效状态, 假设有n个供应商, 根据供应商失效的个数, 可分为$n+1$种情景, 即供应商全部正常运行和供应商失效个数由1增加到n. 灾害发生前, 政府分别选择多个符合条件的原供应商和备用供应商签订合作协议, 原供应商为政府生产一定数量的物资, 分别储存在政府储备库和供应商仓库作为政府实物储备和供应商实物储备, 并为政府保留其产能上限一定比例的产能作为供应商产能储备. 灾害发生后, 政府和供应商实物储备的物资于第一时间送往需求地, 同时供应商通过当前可用的生产能力紧急生产额外的应急物资作为补充. 若有供应商失效, 则在原供应商恢复之前, 由未失效的供应商和备用供应商代替失效的供应商为需求地配送应急物资, 保证应急物资持续供应. 原供应商产能恢复后将根据供需情况选择是否继续为需求地供应相关应急物资.

1.2　符号说明

模型符号说明如表 1 所示.

表1　模型符号说明

符号	含义	符号	含义
I	供应商集合, $i \in I$	d_{ik}	供应商到需求地的运输距离
G	政府储备库集合, $j \in G$	G_t	政府储备库的单位应急物资运输成本
D	需求地集合, $k \in D$	d_{jk}	政府储备库到需求地的运输距离
A	备用供应商集合, $a \in A$	A_t	备用供应商的单位应急物资运输成本
S	供应商失效情景, $s \in S$	d_{ak}	备用供应商到需求地的运输距离
T	灾害发生的时段, $t \in T$	$G_{h,j}$	政府储备库单位应急物资库存持有成本
P_S	失效情景发生的概率	$I_{h,i}$	供应商单位应急物资库存持有成本
r	最大缺货率	δ_j	政府储备库对相关物资的最大储存容量
L_k	单位缺货成本	M	一个很大的正整数
I_{fc}	原供应商协议成本	D_k	需求地的需求量
A_{fc}	备用供应商协议成本	λ_k	灾后需求随机增量
β_i	原供应商单位生产成本	C_t	供应链总成本
λ_i^p	供应商生产成本与供应价格随机增量	E_t	供应链总服务水平
α_i	供应商的产能上限	R_t	供应链总韧性
k_i	供应商产能储备量	x_i	与供应商i合作则取1, 反之为0
k_{is}	灾后各情景下原供应商产能储备中剩余可用产能	x_a	与备用供应商a合作则取1, 反之为0
λ_i^c	灾后供应商供应能力损失随机变量	x_{ats}	灾后情景s下t时段内备用供应商a生产应急物资则取1, 反之为0
m_i	供应商实物储备量	x_{ij}	灾前政府储备库j选择供应商i生产应急物资则取1, 反之为0
μ	供应商产能储备占其产能上限的比例	x_{its}^r	情景s下t时段内选择恢复供应商i则取1, 反之为0
η	供应商实物储备占其产能上限的比例	Q_{ij}	政府储备库j灾前在供应商i处的采购量
v_i	供应商产能储备单位成本	G_{jkts}	情景s下t时段内政府储备库j向需求地k运送的应急物资量
γ_a	备用供应商单位生产成本	I_{its}^c	灾后供应商i在情景s下t 时间段内来源于产能储备的应急物资产量
θ_a	备用供应商单位供应价格	I_{ikts}^c	灾后供应商i在情景s下t时间段向需求地k运送的来源于产能储备的应急物资
λ_a^p	备用供应商生产成本与供应价格随机增量	I_{ikts}^m	灾后供应商i在情景s下t时间段向需求地k运送的灾前实物储备中的应急物资
z_{is}	供应商i在情景s下失效则取1, 反之为0	I_{its}^r	产能恢复后供应商i在情景s下t时间段内的应急物资产量
$r_{c,i}$	供应商单位生产能力恢复成本	I_{ikts}^r	产能恢复后供应商i在情景s下t时间段内向需求地k运送的应急物资量
$l_{o,i}$	灾前供应商对政府储备库的供应量下限	A_{ats}	备用供应商a在情景s下t时间段内的应急物资产量
$c_{b,i}$	灾前供应商的单位应急物资供应价格	A_{akts}	备用供应商a在情景s下t时间段内向需求地k运送的应急物资量
$c_{a,i}$	灾后供应商的单位应急物资供应价格	G_{ks}	灾后需求地k在情景s下获得的总物资量
I_t	供应商的单位应急物资运输成本	C_s^a	灾后各情景下供应链在一个周期内的总供应能力
d_{ij}	供应商到政府储备库的运输距离	C^b	供应商失效前供应链上的总供应能力

1.3 基本假设

1) 备用供应商的产能可以完全覆盖原供应商, 不对备用供应商灾后的产能上限做出限制.

2) 本文应急主体由政府、原供应商和备用供应商组成, 不考虑社会捐赠、家庭储备等来源.

3) 为保证救援效率, 原供应商实物储备与产能储备生产的物资以及备用供应商生产的物资由相关供应商直接送往需求地[15].

4) 为提高应急救援的效率, 本模型将一个救援周期设置为 72 小时, 并将其分成 6 个时段, 每个时段 12 小时, 对灾害发生后一个救援周期内各时段的供应链服务水平做出约束.

5) 以棉被和 12 m^2 救灾帐篷等生产工序较多、生产周期适中且灾害发生时需求量高的生活类救灾物资作为研究对象[16].

1.4 模型建立

$$\begin{cases}\min z_1=\min C_t=\min(C_{t1}+C_{t2}),\\ \min z_2=\max R_t.\end{cases}\tag{1}$$

$$\begin{aligned}C_{t1}=&\sum_{i=1}^{I}I_{fc}x_i+\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{G}C_{b,i}Q_{ij}+\\&\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{G}G_{h,j}Q_{ij}+\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{G}\beta_iQ_{ij}x_{ij}+\\&I_t\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{G}Q_{ij}d_{ij}x_{ij}+\sum_{i=1}^{I}C_{b,i}m_ix_i+\\&\sum_{i=1}^{I}\beta_im_ix_i+\sum_{i=1}^{I}I_{h,i}m_ix_i+\\&\sum_{i=1}^{I}k_iv_ix_i+\sum_{a=1}^{A}A_{fc}x_a.\end{aligned}\tag{2}$$

$$\begin{aligned}C_{t2}=&\sum_{s=1}^{S}P_s\Big(\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{T}C_{a,i}(1+\lambda_i^p)I^c_{ikts}+\\&G_t\sum_{j=1}^{G}\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{T}G_{jkts}d_{jk}+\\&\sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}\beta_i(1+\lambda_i^p)I^c_{its}x_i+\\&I_t\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{T}I^c_{ikts}d_{ik}x_i+\\&I_t\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{T}I^m_{ikts}d_{ik}x_i+\\&\sum_{a=1}^{A}\sum_{t=1}^{T}\gamma_a(1+\lambda_a^p)A_{ats}x_{ats}+\\&\sum_{a=1}^{A}\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{T}\theta_a(1+\lambda_a^p)A_{akts}x_{ats}+\\&A_t\sum_{a=1}^{A}\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{T}A_{akts}d_{ak}x_{ats}+\\&\sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}r_{c,i}I^r_{its}x^r_{its}+\\&\sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}\beta_i(1+\lambda_i^p)I^r_{its}x^r_{its}+\\&I_t\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{T}I^r_{ikts}d_{ik}x^r_{its}+\\&\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{T}C_{a,i}(1+\lambda_i^p)I^r_{ikts}x^r_{its}+\\&\sum_{k=1}^{D}(L_k(D_k(1+\lambda_k)-G_{ks}))\Big).\end{aligned}\tag{3}$$

$$R_t=\sum_{s=1}^{S}\frac{C_s^a}{C^b}\Big/(n+1).\tag{4}$$

$$\begin{aligned}C_s^a=&\sum_{i=1}^{I}m_i+\sum_{i=1}^{I}(1-z_{is})k_i(1-\lambda_i^c)+\\&\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{G}Q_{ij}+\sum_{a=1}^{A}\sum_{t=1}^{T}A_{ats}+\sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}I^r_{its}.\end{aligned}\tag{5}$$

$$C^b=\sum_{i=1}^{I}m_i+\sum_{i=1}^{I}k_i(1-\lambda_i^c)+\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{G}Q_{ij}.\tag{6}$$

式 (1) ∼ (6) 为目标函数表达式. 供应链总成本C_t由灾前总成本C_{t1}和灾后总成本C_{t2}组成, 包含合作协议成本、采购成本、库存成本、生产成本、运输成本、产能储备成本、产能恢复成本和缺货成本. 供应链总韧性值等于每种情景下的韧性值之和除以情景数, 反映了所有情景的综合韧性. 灾后供应链在一个周期内的总供应能力C_s^a由供应商实物储备量和剩余实际可用产能、政府实物储备量、备用供应商产量、原供应商产能恢复后的产量组成; 供应商失效前供应链的总供应能力C^b由政府和供应商的实物储备量及实际可用产能储备量组成.

每个政府储备库至少由两个供应商提供物资, 有

$$\sum_{i=1}^{I}x_{ij}\geqslant 2,\ \forall j\in G.\tag{7}$$

被选择的供应商与政府储备库建立供应关系, 有

$$x_{ij}\leqslant x_i,\ \forall i\in I,\ j\in G.\tag{8}$$

被选择的备用供应商才能在灾后启用, 有

$$x_{ats}\leqslant x_a,\ \forall a\in A, s\in S.\tag{9}$$

未被选择合作的供应商不考虑失效情况，有

$$z_{is}\leqslant x_i,\ \forall i\in I, s\in S.\tag{10}$$

失效的原供应商才会启用产能修复策略, 有

$$x^r_{its} \leqslant x_i z_{is},\ \forall i \in I,\ t \in T,\ s \in S. \tag{11}$$

政府储备库采购量不超过其库存容量上限, 有

$$\sum_{i=1}^{I} Q_{ij} \leqslant \delta_j,\ \forall j \in G. \tag{12}$$

供应商产能储备量约束为

$$k_i \leqslant [\mu\alpha_i],\ \forall i \in I. \tag{13}$$

灾后供应商剩余可用产能为

$$k_{is} = k_i(1-\lambda^c_i)(1-z_{is}),\ \forall i \in I,\ s \in S. \tag{14}$$

供应商实物储备量约束为

$$m_i \leqslant [\eta\alpha_i],\ \forall i \in I. \tag{15}$$

供应商实物储备进出流量平衡, 有

$$\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{T} I^m_{ikts} = m_i,\ \forall i \in I,\ s \in S. \tag{16}$$

供应商产能储备进出流量平衡, 有

$$I^c_{its} = \sum_{k=1}^{D} I^c_{ikts},\ \forall i \in I,\ t \in T,\ s \in S. \tag{17}$$

供应商产能储备生产量约束为

$$\sum_{t=1}^{T} I^c_{its} \leqslant (1-z_{is})k_i(1-\lambda^c_i),\ \forall i \in I,\ s \in S. \tag{18}$$

供应商失效前后供应链的总供应能力约束为

$$\sum_{t=1}^{T} I^c_{its} + \sum_{i=1}^{T} A_{ats} + \sum_{t=1}^{T} I^r_{its} \leqslant k_i(1-\lambda^c_i),\ \forall i \in I,\ a \in A,\ s \in S. \tag{19}$$

政府实物储备量约束为

$$l_{o,i}x_{ij} \leqslant Q_{ij} \leqslant \alpha_i x_{ij},\ \forall i \in I,\ j \in G. \tag{20}$$

灾前供应商总流量约束为

$$\sum_{j=1}^{G} Q_{ij} \leqslant \alpha_i,\ \forall i \in I. \tag{21}$$

政府储备库进出流量平衡, 有

$$\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{T} G_{jkts} \leqslant \sum_{i=1}^{I} Q_{ij},\ \forall j \in G,\ s \in S. \tag{22}$$

被选择的供应商至少为一个政府储备库生产应急物资, 有

$$x_i \leqslant \sum_{j=1}^{G} x_{ij},\ \forall i \in I. \tag{23}$$

被启用的备用供应商为需求地提供应急物资, 有

$$A_{ats} \leqslant M \cdot x_{ats},\ a \in A,\ t \in T,\ s \in S. \tag{24}$$

备用供应商进出流量平衡, 有

$$A_{ats} = \sum_{k=1}^{D} A_{akts},\ a \in A,\ t \in T,\ s \in S. \tag{25}$$

产能恢复的原供应商才能继续为需求地提供应急物资, 有

$$I^r_{its} \leqslant M \cdot x^r_{its},\ i \in I,\ t \in T,\ s \in S. \tag{26}$$

原供应商产能恢复后的进出流量平衡, 有

$$I^r_{its} = \sum_{k=1}^{D} I^r_{ikts},\ \forall i \in I,\ t \in T,\ s \in S. \tag{27}$$

为保证灾害发生后第一时间的救援效果, 各政府储备库在第 1 个时段内为各需求地分配的应急物资总量占其总分配量的 50% 以上, 有

$$\sum_{j=1}^{G}\sum_{k=1}^{D}\sum_{s=1}^{S} G_{jk1s} \geqslant 0.5\sum_{j=1}^{G}\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{T}\sum_{s=1}^{S} G_{jkts}. \tag{28}$$

第 1 个时段的供应链服务水平至少达到 50%, 有

$$\sum_{j=1}^{G}\sum_{k=1}^{D}\sum_{s=1}^{S} G_{jk1s} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{D}\sum_{s=1}^{S} I^m_{ik1s} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{D}\sum_{s=1}^{S} I^c_{ik1s} + \sum_{a=1}^{A}\sum_{k=1}^{D}\sum_{s=1}^{S} A_{ak1s} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{D}\sum_{s=1}^{S} I^r_{ik1s} \geqslant 0.5(n+1)\sum_{k=1}^{D} D_k(1+\lambda_k). \tag{29}$$

前两个时段的供应链服务水平至少达到 70%, 有

$$\sum_{j=1}^{G}\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{2}\sum_{s=1}^{S} G_{jkts} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{2}\sum_{s=1}^{S} I^m_{ikts} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{2}\sum_{s=1}^{S} I^c_{ikts} + \sum_{a=1}^{A}\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{2}\sum_{s=1}^{S} A_{akts} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{2}\sum_{s=1}^{S} I^r_{ikts} \geqslant 0.7(n+1)\sum_{k=1}^{D} D_k(1+\lambda_k). \tag{30}$$

前 4 个时段的供应链服务水平至少达到 90%, 有

$$\sum_{j=1}^{G}\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{4}\sum_{s=1}^{S} G_{jkts} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{4}\sum_{s=1}^{S} I^m_{ikts} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{4}\sum_{s=1}^{S} I^c_{ikts} + \sum_{a=1}^{A}\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{4}\sum_{s=1}^{S} A_{akts} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{D}\sum_{t=1}^{4}\sum_{s=1}^{S} I^r_{ikts} \geqslant 0.9(n+1)\sum_{k=1}^{D} D_k(1+\lambda_k). \tag{31}$$

供应商产能储备策略延迟时间为t_c个时段, 有

$$\sum_{t=1}^{t_c} I_{ikts}^{c}=0,\ \forall i\in I,k\in D,s\in S. \tag{32}$$

备用供应商策略延迟时间为t_a个时段, 有

$$\sum_{t=1}^{t_a} A_{akts}=0,\ \forall a\in A,\ k\in D,\ s\in S. \tag{33}$$

原供应商产能修复策略延迟时间为t_r个时段, 有

$$\sum_{t=1}^{t_r} I_{ikts}^{r}=0,\ \forall i\in I,\ k\in D,\ s\in S. \tag{34}$$

所有需求地获得的总供应量约束为

$$(1-r)\sum_{k=1}^{D}D_k(1+\lambda_k)\leqslant\sum_{k=1}^{D}G_{ks}\leqslant \sum_{k=1}^{D}D_k(1+\lambda_k),\ \forall s\in S. \tag{35}$$

需求地获得的总供应量表达式为

$$\begin{aligned}G_{ks}=&\sum_{j=1}^{G}\sum_{t=1}^{T}G_{jkts}+\sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}I_{ikts}^{m}+\\&\sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}I_{ikts}^{c}+\sum_{a=1}^{A}\sum_{t=1}^{T}A_{akts}+\\&\sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}I_{ikts}^{r},\ \forall k\in D,\ s\in S.\end{aligned} \tag{36}$$

任意一个需求地获得的总供应量约束为

$$(1-r)D_k(1+\lambda_k)\leqslant G_{ks}\leqslant D_k(1+\lambda_k),\ \forall k\in D,\ s\in S. \tag{37}$$

供应链总服务水平表达式为

$$E_t=\sum_{k=1}^{D}\sum_{s=1}^{S}G_{ks}\Big/\sum_{k=1}^{D}D_k(1+\lambda_k). \tag{38}$$

供应链总服务水平约束为

$$E_t\geqslant 1-r. \tag{39}$$

决策变量取值范围为

$$\begin{aligned}&Q_{ij},G_{jkts},I_{its}^{c},I_{ikts}^{c},I_{ikts}^{m},I_{its}^{r},I_{ikts}^{r},A_{ats},\\&A_{akts},G_{ks}\geqslant 0,\\&z_{is}\in\{0,1\},\ x_i\in\{0,1\},\ x_a\in\{0,1\},\\&x_{ats}\in\{0,1\},\ x_{ij}\in\{0,1\},\ x_{is}^{r}\in\{0,1\},\\&\forall i\in I,\ j\in G,\ k\in D,\ a\in A,t\in T,\ s\in S.\end{aligned} \tag{40}$$

各随机变量分别服从某正态分布, 有

$$\begin{aligned}&\lambda_k\sim N(e_k,\sigma_k),\lambda_i^{c}\sim N(e_c,\ \sigma_c),\lambda_i^{p}\sim N(e_i^{p},\ \sigma_i^{p}),\\&\lambda_a^{p}\sim N(e_a^{p},\ \sigma_a^{p}),\ \forall i\in S,\ k\in D,\ a\in A,\ s\in S.\end{aligned} \tag{41}$$

1.5 模型转换

本文采取ε约束法将上述双目标优化模型转化为单目标优化模型. 由于模型添加了多个韧性策略约束以及服务水平约束, 虽保证了供应链的供应能力, 但会导致供应链总成本大幅上升. 于是将供应链总成本最小作为主要目标, ε作为韧性系数, 给出供应链总韧性值的取值范围, 将供应链总韧性值大于等于ε作为副目标放入约束条件中. 由此将所建双目标规划模型转化为

$$\min z=\min C_t=\min(C_{t1}+C_{t2}). \tag{42}$$

式 (2) ∼ (41) 改写为

$$\Big\{R_t=\sum_{s=1}^{S}\frac{C_s^{a}}{C^{b}}\Big/(n+1)\Big\}\geqslant\varepsilon, \tag{43}$$

$$C_b\varepsilon\leqslant C_s^{a}, \tag{44}$$

$$\varepsilon\geqslant 0. \tag{45}$$

2 算例分析

2.1 算例数据

以某地区洪涝灾害为算例背景, 政府应急物资储备库、符合条件的供应商和备用供应商以及受灾地各有 4 个. 以棉被作为关键应急物资, 相关参数参见文献 [16-18].

$(P_s)=(0.8,0.1,0.072,0.024,0.004)$; $r=0.05$; $\varepsilon=0.95$; $I_{fc}=A_{fc}=50\ 000$元; $(\gamma_a)=(45,60,40,55)$; $(\theta_a)=(130,145,130,140)$; $\mu=0.25$; $\eta=0.15$; $(r_{c,i})=(2,3.5,2.5,4)$; $e_k=0.02$, $\sigma_k=0.01$, $e_c\sim U(0.02,0.05)$, $\sigma_c=0.01$, $e_i^{p}=e_a^{p}=0.04$, $\sigma_i^{p}=\sigma_a^{p}=0.01$; $D_k\sim U(6\,000,16\,000)$; $\alpha_1\sim U(18\,000,20\,000)$, $\alpha_2,\alpha_3\sim U(15\,000,17\,000)$, $\alpha_4\sim U(10\,000,12\,000)$; $l_{o,i}\sim U(500,2\,000)$; $(\beta_i)=(40,55,45,60)$; $(C_{b,i})=(45,60,50,65)$; $(C_{a,i})=(125,140,135,145)$; $(G_{h,j})=(5,4,4,3)$; $(\delta_j)=(10\,000,8\,000,8\,000,6\,000)$; $(l_{t,j})=(1\,500,1\,500,1\,500,1\,500)$; $t_c=1$, $t_a=2$, $t_r=5$; $(d_{ij})=\begin{bmatrix}210&340&470&490\\90&490&350&370\\580&430&200&200\\545&260&440&350\end{bmatrix}$; $I_t=G_t=A_t=1.5$元/(床·km); $(d_{ik})=\begin{bmatrix}135&220&420&525\\425&485&150&390\\220&100&365&245\\320&485&375&290\end{bmatrix}$; $L_k=200$元; $(d_{jk})=\begin{bmatrix}200&200&380&80\\240&370&260&50\\495&70&280&290\\190&350&340&335\end{bmatrix}$; $(v_i)=(2,3,2,4)$; $(d_{ak})=\begin{bmatrix}240&120&275&430\\145&345&580&105\\450&570&180&290\\390&235&620&335\end{bmatrix}$; $(I_{h,i})=(3,5,4,5)$.

2.2 算例求解

使用 Matlab R2022b 通过 YALMIP 调用求解

器 CPLEX12.10.0 求解模型, 求解结果如下.

供应链总韧性 $R_t=0.96$, 供应链总成本 $C_t=25\,871\,548.33$ 元, 供应链总服务水平 $E_t=96.76\%$. 供应商产能上限 $(\alpha_i)=(19\,907,15\,069,15\,192,10\,326)$; 供应商灾前供应量下限 $(l_{o,i})=(1\,309,638,1\,096,1\,072)$; 供应商产能储备量 $(k_i)=(4\,976,3\,767,3\,798,2\,581)$; 供应商产能储备实际可用产能 $(k_i(1-\lambda_i^c))=(4\,789,3\,640,3\,718,2\,527)$; 供应商实物储备量 $(m_i)=(2\,986,2\,260,2\,278,1\,548)$.

供应商选择结果: $(x_i)=(1,1,1,1)$, $(x_a)=(1,1,1,0)$, $(x_{ij})=\begin{bmatrix}1&1&0&0\\1&0&1&1\\0&0&1&1\\0&1&0&0\end{bmatrix}$. 供应商失效情况: $(z_{is})=\begin{bmatrix}0&1&0&1&1\\0&0&1&1&1\\0&0&0&0&1\\0&0&1&1&1\end{bmatrix}$. 灾后各情景下原供应商剩余可用产能: $k_{is}=\begin{bmatrix}4\,789&0&4\,789&0&0\\3\,640&3\,640&0&0&0\\3\,718&3\,718&3\,718&3\,718&0\\2\,527&2\,527&0&0&0\end{bmatrix}$.

原始需求量: $D_k=(15\,761,8\,560,14\,598,6\,289)$. 考虑灾后需求随机增量的需求量: $(D_k(1+\lambda_k))=(16\,580,9\,019,15\,295,6\,663)$.

灾前各政府储备库应急物资储备量见表 2.

表2　灾前各政府储备库在各供应商处的采购量

供应商	政府储备库在供应商处的采购量Q_{ij}/床				总计
	1	2	3	4	
1	1309	1309	0	0	2618
2	8691	0	638	638	9967
3	0	0	7362	1422	8784
4	0	2849	0	0	2849
总计	10000	4158	8000	2060	24218

由表 2 可知, 灾前政府实物储备、企业实物储备及企业产能储备总量分别占总储备量的 50.02%、18.74% 和 31.24%, 实物储备总占比为 68.76%, 符合由政府主导、实物储备为主、产能储备为辅的战略方针. 决策者在考虑韧性预防策略、韧性响应策略和韧性恢复策略时的政企联合储备模式下, 可初步将棉被等生活类应急物资的政府实物储备、企业代储实物储备以及企业产能储备占总储备量的比例分别设置在 50% 左右、20% 左右以及 30% 左右.

灾后各情景下的应急物资总分配量见表 3.

由表 3 可知, 灾害发生后, 当供应链上没有供应

表3　各情景下的总分配方案

分配来源		各需求地分别从不同来源处获得的应急物资总量/床				总计
		1	2	3	4	
第1种情景	政府储备库	8290	4510	7648	3332	23780
	供应商实物储备	2986	2278	2260	1548	9072
	供应商产能储备	5304	2231	5356	1783	14674
	备用供应商	0	0	0	0	0
	恢复后的原供应商	0	0	0	0	0
第2种情景	政府储备库	8290	4510	7648	3770	24218
	供应商实物储备	2986	2278	2260	1548	9072
	供应商产能储备	2019	2231	4623	1012	9885
	备用供应商	0	0	0	0	0
	恢复后的原供应商	2456	0	0	0	2456
第3种情景	政府储备库	8290	4510	7648	3770	24218
	供应商实物储备	2986	1323	3808	955	9072
	供应商产能储备	4789	2978	440	300	8507
	备用供应商	0	0	0	1005	1005
	恢复后的原供应商	0	0	2635	300	2935
第4种情景	政府储备库	8290	4510	7648	3770	24218
	供应商实物储备	3737	1527	2899	909	9072
	供应商产能储备	736	2982	0	0	3718
	备用供应商	1224	0	2919	1651	5794
	恢复后的原供应商	1764	0	1065	0	2829
第5种情景	政府储备库	8290	4510	7648	3770	24218
	供应商实物储备	2986	2278	2865	943	9072
	供应商产能储备	0	0	0	0	0
	备用供应商	2011	2166	3718	1617	9512
	恢复后的原供应商	2464	0	300	0	2764

商失效时, 只采用多源采购和产能储备策略, 政府和原供应商可以满足需求地绝大部分需求, 无需启用备用供应商策略和原供应商产能修复策略; 当有1个供应商失效时, 由于灾前采用了多源采购和产能储备的韧性预防策略, 应急物资的供应能力受冲击较小, 对供应链的影响不大, 此时供应链更倾向于选择原供应商产能修复策略而非改变供应链结构, 且原供应商产能修复后仅需生产少量应急物资即可达到良好的应急效果; 当有2个供应商失效时, 供应链遭受的冲击变大, 备用供应商开始发挥作用, 确保需求地在短时间内得到有效的应急物资分配; 当有3个供应商失效时, 供应商产能储备策略严重失效, 但仍保留一定的供应能力, 备用供应商的替代能力增强, 此时备用供应商策略发挥的作用开始超过原供应商产能修复策略; 当供应商全部失效时, 供应商产能储备策略完全失效, 备用供应商的分配量大幅增加, 远超原供应商产能修复策略的分配量, 代替原供应商成为应急物资分配的第2大来源.

不同情景下各时段各分配来源的累计总分配量、供应链韧性值及服务水平变化趋势见图1.

由图1可知, 5种情景下, 供应链服务水平在第2个时段的提升均通过供应商产能储备策略, 尤其当供应链上没有供应商失效时, 供应链服务水平由第1个时段的50.15%骤升至第2个时段的80.58%, 产能储备策略发挥巨大优势. 随着供应商失效程度的增加, 备用供应商的分配量占比越来越大, 此时供应链服务水平升至90%以上主要得益于备用供应商策略. 原供应商产能修复后生产的应急物资在第6个时段根据当前的应急物资分配情况弥补剩余未满足的需求量, 进一步提升应急物资供应链的韧性水平和服务水平.

与此同时, 随时间推移, 各失效情景下供应链的韧性水平均呈上升趋势. 5种情景下灾害发生后第1个时段的供应链韧性值分别为1、0.9、0.87、0.77、0.69, 随供应商失效个数的增加, 灾害发生的初始阶段供应链的韧性值逐渐降低, 但所有失效情景下的供应链韧性值均于最后一个时段恢复到0.95以上. 说明供应商失效将直接导致供应链韧性降低, 影响应急物资的分配方案与救援效果, 而备用供应商策略和原供应商产能修复策略可以明显提升供应链韧性, 在保持应急物资连续供应的同时将供应能力在短时间内迅速恢复到高水平, 从而有效保障应急救援的效率和受灾人民的基本生活.

2.3 对比分析

为探究不同的韧性策略组合对结果产生的影响,

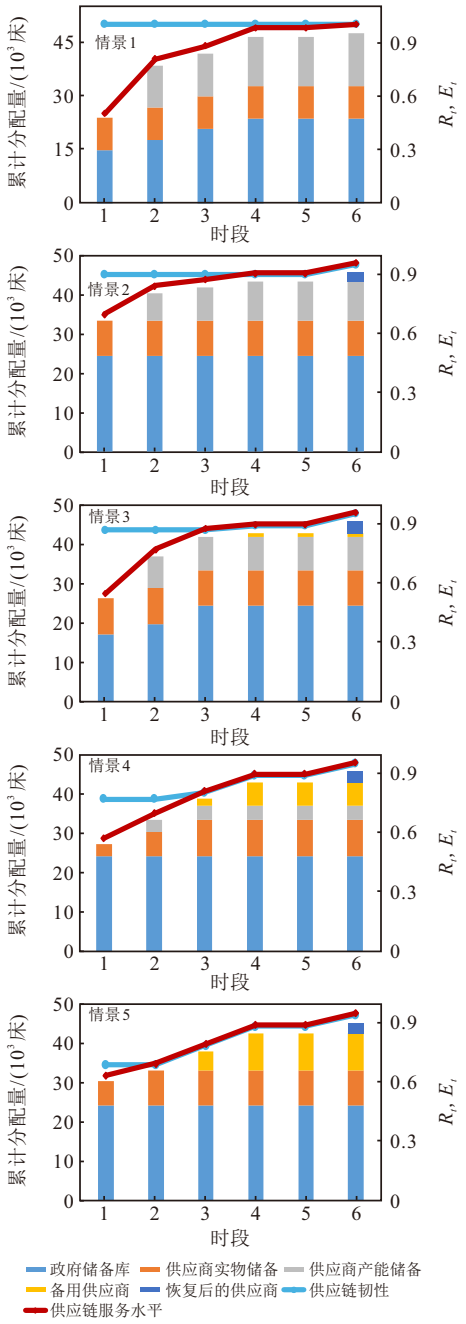

图1 各情景下各时段内各分配来源的累计总分配量及R_t、E_t的变化趋势

本小节将对比: 只采用韧性预防策略、同时采用韧性预防策略和韧性响应策略、三类策略都采用的综合韧性策略, 这3种组合下应急物资供应链的总韧性值以及总服务水平的对比情况见表4. R_1、R_2、R_3分别代表预防策略下的R_t、预防 + 响应策略下的R_t、预防 + 响应 + 恢复策略下的R_t; E_1、E_2、E_3分别代表预防策略下的E_t、预防 + 响应策略下的E_t、预防+响应+恢复策略下的E_t.

由表4可知, 随供应商失效情景严重程度增加, 仅采用韧性预防策略的模型中供应链总韧性值与总服务水平越来越低, 而3类策略都采用的综合模型中, 供应链总韧性保持在高水平, 且所有情景下都能

表4　不同策略组合下各情景下的R_t与E_t对比

策略组合	1	2	3	4	5
R_1	1	0.91	0.89	0.80	0.74
R_2	1	0.95	0.95	0.95	0.95
R_3	1	0.95	0.95	0.95	0.95
E_1/%	100	100	100	94.18	86.36
E_2/%	99.93	95.81	95.81	95.81	95.81
E_3/%	99.93	95.95	96.17	95.95	95.81

满足需求地绝大部分的物资需求. 表明多源采购和产能储备的韧性预防策略更适用于供应链正常运行及失效程度较小的情况. 对比后两种策略组合发现, 当供应链遭受自然灾害冲击, 且供应商失效时间较长时, 仅采用韧性预防策略 + 备用供应商响应策略也可高效应对突发事件, 降低供应中断风险.

2.4　灵敏度分析

1) 韧性系数ε对R_t、E_t和C_t的影响.

以 0.01 为步长, 观察ε从 0.9 到 0.99 时R_t、E_t与C_t的变化趋势, 如图 2 所示.

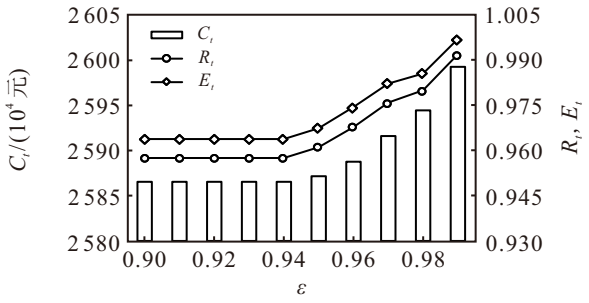

图2　R_t、E_t和C_t随ε的变化趋势

当$\varepsilon \leqslant 0.94$时, R_t、E_t和C_t均保持不变, 此时供应链总韧性值和总服务水平均在较高水平, 供应链总成本处于较低水平; 当$\varepsilon \in (0.94, 0.99]$时, R_t、E_t和C_t均呈上升趋势, R_t值增加 0.0344, E_t上升 3.32 个百分点, C_t仅上升 0.49%. 由此可见, 决策者在制定应急方案时, 如果由政府储备库和供应商作为分配主体, 不考虑其他来源的应急物资, 则供应链韧性系数越高越好, 此时只需增加一小部分成本, 不仅可以实现供应链服务水平最大化, 提升应急救援的效果, 而且能够使应急物资供应链具有极高的韧性, 为下一应急周期做好准备.

2) 最大缺货率r对R_t、E_t和C_t的影响.

以 0.01 为步长, 观察r从 0 到 0.1 时R_t、E_t与C_t的变化趋势, 如图 3 所示.

缺货率$r < 0.05$时, 随着r的增加, R_t和E_t均呈下降趋势, 但数值下降幅度很小, 由极高水平下降至高水平. $r > 0.05$时, R_t与E_t在高水平保持平稳; C_t虽不断下降, 但斜率逐渐变小. 由此可见, 供应链

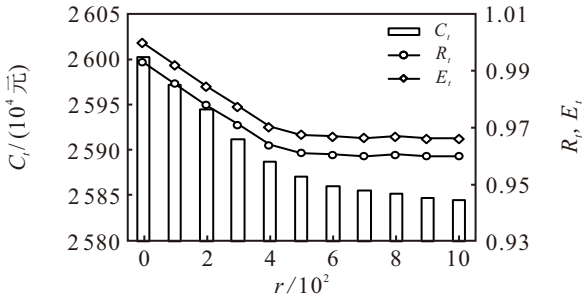

图3　R_t、E_t和C_t随r的变化趋势

缺货率的增加会导致供应链总韧性和总服务水平的降低. 而由于供应链韧性系数很高, 供应链的总供应能力最低值依旧很高, 缺货成本的增量小于因供应链服务水平降低而减少的储备与分配等相关成本的减量, 供应链总成本下降. 结果表明, 当应急物资供应链具有高韧性时, 能够良好地抵御自然灾害冲击, 从而较小地受到缺货率上升的影响.

3) 需求随机增量λ_k对R_t、E_t和C_t的影响.

以 0.02 为步长, 观察λ_k的期望值e_k从 0.05 到 0.25 时R_t、E_t与C_t的变化趋势, 如图 4 所示.

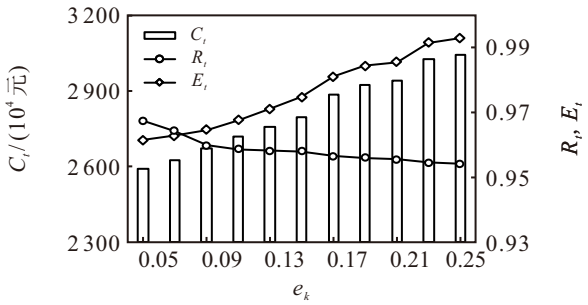

图4　R_t、E_t和C_t随e_k的变化趋势

随着λ_k的增加, C_t和R_t均呈上升趋势, E_t呈缓慢下降趋势, C_t上涨 17.56%, R_t增加 0.03, E_t下降 1.33 个百分点. 原因在于为了应对需求不确定性, 政府会寻找更多的供应商或备用供应商, 或增加灾前实物储备量, 在增加库存、合同谈判、生产和运输调度等成本的同时, 亦增强了供应链的适应与恢复能力. 而大幅增长的需求量超出了原有供应计划的预期, 尽管供应链系统努力应对, 但相对供应能力仍有所下降, 进而导致供应链服务水平下降.

当需求随机增量剧烈变动时, 尽管供应链的总成本有较大幅度的上升, 但供应链总韧性和总服务水平受影响较小, 均处于较高层级, 再一次证明采用韧性预防策略、响应策略和恢复策略能够对应急物资供应链产生较为显著的积极效用, 进而有力促进应急物资在关键时刻的高效分配与合理运用.

4) 韧性策略延迟时间的变化对结果的影响.

令产能储备策略的延迟时间$t_c = 1$, 以 1 个时段为步长, 观察t_a从 2 到 6、t_r从 2 到 6 时R_t、C_t、

表5 t_a和t_r对结果的影响

t_a	t_r	R_t	C_t/元	E_t/%	S_a	S_r
2	2	0.9609	25 705 205.31	96.74	否	是
2	3	0.9609	25 705 205.31	96.74	否	是
2	4	0.9613	25 871 548.33	96.76	是	是
2	5	0.9613	25 871 548.33	96.76	是	是
2	6	0.9600	26 028 601.77	96.64	是	否
3	2	0.9609	25 705 205.31	96.74	否	是
3	3	0.9609	25 705 205.31	96.74	否	是
3	4	0.9613	25 871 548.33	96.76	是	是
3	5	0.9613	25 871 548.33	96.76	是	是
3	6	0.9600	26 028 601.77	96.64	是	否
4	2	0.9609	25 705 205.31	96.74	否	是
4	3	0.9609	25 705 205.31	96.74	否	是
5	2	0.9609	25 705 205.31	96.74	否	是
5	3	0.9609	25 705 205.31	96.74	否	是
6	2	0.9609	25 705 205.31	96.74	否	是
6	3	0.9609	25 705 205.31	96.74	否	是

E_t的变化, 结果如表 5 所示. 其中: S_a表示是否启用备用供应商策略, S_r表示是否启用原供应商产能修复策略.

由表 5 可知, 当$t_a = 2, 3$, $t_r = 6$时, 不启用原供应商产能修复策略, 备用供应商随t_a延长会加大其产量与分配量, 使得R_t基本稳定, E_t上升 0.77 个百分点, C_t上浮 0.58%. 表明当备用供应商响应速度足够快时, 即使原供应商的产能在既定周期内没有修复, 也不影响物资分配效果.

当$t_a = 2, 3, 4, 5, 6$, $t_r = 2, 3$时, 只采取原供应商产能修复策略而不采用备用供应商策略, R_t、E_t和C_t均保持不变, 表明当中断事件持续时间较短, 原供应商的产能可以快速修复时, 备用供应商策略的响应作用被原供应商所代替, 其延迟时间不再是影响应急物资分配决策的关键因素.

当$t_a = 4, 5, 6$, $t_r = 4, 5, 6$时, 模型无解, 表明当备用供应商策略和原供应商产能修复策略的延迟时间均较长时, 无法在最佳时效期内满足受灾地的应急需求. 因此, 为保证供应商失效时应急物资的持续供应, 应侧重于至少提升韧性响应策略或韧性恢复策略其中一种的响应或恢复速度.

3 结 论

本文综合考虑了自然灾害背景下的供应商失效场景与多种不确定因素, 在设计应急物资供应链时嵌入韧性预防策略、韧性响应策略与韧性恢复策略, 旨在提升应急物资供应链的韧性与服务水平, 使应急物资的储备与分配方案在供应链遭受冲击时仍能有效实施. 得到结论如下:

1) 政企联合模式充分保障了应急物资的灾前储备量, 保证灾害发生前 24 小时达到 70% 的服务水平. 决策者可初步将洪涝灾害生活类物资的政府实物储备比例、企业实物储备比例以及企业生产能力储备比例设置在 50%、20% 和 30% 左右.

2) 韧性预防策略能够大幅提升应急物资供应链的服务水平, 没有供应商失效时, 仅采用韧性预防策略即可高效满足受灾地区的需求; 供应商失效个数较少时, 在韧性预防策略的基础上, 供应链系统更倾向于采用原供应商产能修复策略为需求地供应应急物资; 随供应商失效情景严重程度增加, 备用供应商策略和原供应商产能修复策略逐渐代替产能储备策略, 且供应链失效程度越大, 备用供应商策略在提升应急物资供应能力方面发挥的作用越大.

3) 韧性预防策略更适用于供应链正常运行及失效程度较小的情况, 当供应商全部失效时, 备用供应商策略和原供应商产能修复策略能在短时间内将供应链韧性由 0.69 恢复至 0.95, 供应链总服务水平可达 95.81%. 当备用供应商响应速度较快且供应商失效时间较长时, 可以仅采用韧性预防策略与响应策略. 在韧性预防能力方面, 政府应完善供应商名录, 加强与资质良好的企业开展合作, 并维持适当数量的主供应商与备用供应商冗余, 以确保在需求波动较大或供应商失效时能快速从其他供应商处获取物资; 为防止产能失效, 企业可以采取基础设施加固、应急预案体系优化等防御措施. 在韧性响应能力方面, 企业可采用动态生产管理, 在灾害高发期之前提前生产应急物资, 并采用分布式库存系统, 将物资存储在靠近生产基地、需求地及交通枢纽的仓库中.

4) 决策者在设计应急物资供应链时, 应尽量提高韧性系数. 本文所建模型在最大化供应链韧性和服务水平的同时亦能良好地控制成本. 决策者在多储备主体、多韧性策略、多随机变量、多情景的综合考量下提升应急物资供应能力的同时, 应当在各种决策目标之间做出权衡, 比如对服务水平、韧性、总成本的平衡.

5) 供应链缺货率的增加会导致供应链总韧性和总服务水平降低, 需求增量变大会使供应链总韧性上升而总服务水平下降, 但二者均保持在高水平, 证明本文所建模型有较强的适应性.

6) 韧性策略延迟时间的变化会改变韧性策略的选择与应急物资分配方案. 供应商失效时间越长, 越应注重提升应急物资供应链的响应能力. 供应商失效时间较短, 则无需启用备用供应商, 那么政府在选择原供应商时, 还应将与修复能力相关的资质纳入选择指标, 并适当为合作企业提供补贴. 对于此, 企

业应保留充足的备用资金用于在突发事件下修复基础设施或购置新的设备与原材料, 并掌握产能修复所必需的技术.

参考文献 (References)

[1] 李珍萍, 张煜炜, 田歆, 等. 应急医疗物资储备与分配问题研究[J]. 系统科学与数学, 2021, 41(12): 3422-3445.
(Li Z P, Zhang Y W, Tian X, et al. Research on reserve and distribution problem of emergency medical supplies[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2021, 41(12): 3422-3445.)

[2] 张萌, 孔昭君. 应急物资采购及代储服务交易的逆向组合拍卖机制设计[J]. 控制与决策, 2024, 39(5): 1527-1536.
(Zhang M, Kong Z J. A reverse combinatorial auction mechanism for transaction of emergency material purchase and reserve services[J]. Control and Decision, 2024, 39(5): 1527-1536.)

[3] Chen J X, Liang L, Yao D Q. Pre-positioning of relief inventories: A multi-product newsvendor approach[J]. International Journal of Production Research, 2018, 56(18): 6294-6313.

[4] 张琳, 田军. 实物与生产能力双储备下的应急物资多源采购模型与采购定价决策研究[J]. 中国管理科学, DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0143.
(Zhang L, Tian J. Research on multi-sourcing procurement model and procurement pricing decision of emergency materials under dual reserves of physical goods and production capacity[J]. Chinese Journal of Management Science, DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0143.)

[5] Wan M R, Ye C M, Peng D J. Multi-period dynamic multi-objective emergency material distribution model under uncertain demand[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 117: 105530.

[6] 刘长石, 罗亮, 周鲜成, 等. 震后初期应急物资分配-运输的协同决策: 公平与效率兼顾[J]. 控制与决策, 2018, 33(11): 2057-2063.
(Liu C S, Luo L, Zhou X C, et al. Collaborative decision-making of relief allocation-transportation in early post-earthquake: Considering both fairness and efficiency[J]. Control and Decision, 2018, 33(11): 2057-2063.)

[7] 张国富, 王永奇, 苏兆品, 等. 应急救援物资多目标分配与调度问题建模与求解[J]. 控制与决策, 2017, 32(1): 86-92.
(Zhang G F, Wang Y Q, Su Z P, et al. Modeling and solving multi-objective allocation-scheduling of emergency relief supplies[J]. Control and Decision, 2017, 32(1): 86-92.)

[8] Wang Q Y, Nie X F. A location-inventory-routing model for distributing emergency supplies[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2023, 175: 103156.

[9] 于冬梅, 高雷阜, 赵世杰. 中断情境下可靠性应急设施选址-分配多目标优化模型[J]. 控制与决策, 2020, 35(6): 1415-1420.
(Yu D M, Gao L F, Zhao S J. A multi-objective optimization model for reliable emergency facility location-allocation under disruptions[J]. Control and Decision, 2020, 35(6): 1415-1420.)

[10] Ponomarov S Y, Holcomb M C. Understanding the concept of supply chain resilience[J]. The International Journal of Logistics Management, 2009, 20(1): 124-143.

[11] Torabi S A, Baghersad M, Mansouri S A. Resilient supplier selection and order allocation under operational and disruption risks[J]. Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review, 2015, 79: 22-48.

[12] Zhao S P, You F Q. Resilient supply chain design and operations with decision-dependent uncertainty using a data-driven robust optimization approach[J]. AIChE Journal, 2019, 65(3): 1006-1021.

[13] Rezapour S, Farahani R Z, Pourakbar M. Resilient supply chain network design under competition: A case study[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 259(3): 1017-1035.

[14] Szyliowicz J, Zamparini L. Freight transport security and the robustness of global supply chains[J]. Transport Reviews, 2022, 42(6): 717-724.

[15] 董银红, 郑琪, 李龙. 考虑供应风险的多源应急物资采购双层规划模型[J]. 中国管理科学, 2021, 29(11): 170-178.
(Dong Y H, Zheng Q, Li L. Bi-level programming model for multi-source emergency materials procurement considering supply risks[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(11): 170-178.)

[16] 刘阳, 田军, 冯耕中, 等. 基于期权契约的政企联合储备应急物资模型与利润分配机制研究[J]. 中国管理科学, 2020, 28(8): 162-171.
(Liu Y, Tian J, Feng G Z, et al. The model of joint relief supplies pre-positioning by the governmentand two suppliers based on option contractsand suppliers' profits allocation mechanism[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(8): 162-171.)

[17] 伍佳妮, 龙燕妮. 考虑韧性的两阶段应急物资供应链决策优化[J]. 安全与环境学报, DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2023.2384.
(Wu J N, Long Y N. Decision optimization of two-stage emergency material supply chain considering toughness[J]. China Industrial Economics, DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2023.2384.)

[18] 孙莹, 刘慧萍, 颜瑞, 等. 基于韧性和社会福利的应急医疗物资供应链均衡优化[J]. 中国管理科学, 2023, 31(8): 132-141.
(Sun Y, Liu H P, Yan R, et al. Equilibrium optimization of the supply chain of emergency medical supplies based on resilience and social welfare[J]. Chinese Journal of Management Science, 2023, 31(8): 132-141.)

作者简介

伍佳妮 (1984−), 女, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为应急物流与供应链管理、管理决策优化, E-mail: jianiwu@chd.edu.cn;

龙燕妮 (2000−), 女, 硕士生, 主要研究方向为应急物流与供应链管理, E-mail: longyanni2022@163.com.