

## 应急器材柔性采购定价建模与求解\*

汪琳,何成铭,刘旭阳,杜海东

(陆军装甲兵学院 装备保障与再制造系,北京 100072)

**摘要:**由于当前应急器材储备依然存在“多储”或“少储”风险,为提高储备效益,以企业经济效益与军队采购成本为优化目标,提出了应急器材柔性采购策略。通过建立企业储备策略与军队采购定价最优化模型,求解得到了在不同战争爆发概率及器材现货市场价格区间等外部环境因素下的军队最佳柔性定价及对应的企业最优储备策略,并通过实例分析验证了得出的决策结论。结果表明,最优策略的实施将有利于军队与企业共担应急器材数量储备风险。

**关键词:**应急器材;柔性采购;储备策略;风险共担

中图分类号:E258 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2023)04-182-14



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Modeling and solving for flexible procurement pricing of emergency material

WANG Lin, HE Chengming, LIU Xuyang, DU Haidong

(Equipment Support and Remanufacturing Department, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China)

**Abstract:** As the risk of “over-storage” or “under-storage” still exists in the emergency equipment reserve, in order to improve the reserve efficiency, it put forward the flexible procurement strategy of emergency equipment, taking the economic benefit of enterprises and the military procurement cost as the optimization target. By establishing the model of optimizing enterprise reserve strategy and military procurement pricing, the optimal flexible pricing of the military and the corresponding enterprise optimal reserve strategy under the external environmental factors such as the probability of the outbreak of war and the price range of equipment spot market were solved. The decision conclusion was verified by an example analysis. The result shows that the implementation of the optimal strategy would be beneficial for the military and enterprises to share the risk of emergency equipment quantity reserve.

**Keywords:** emergency material; flexible procurement; reserve strategy; risk sharing

应急器材储备品种与数量的准确性是关系我军作战总体保障效益发挥的关键问题。关于需求预测的文献中,马海英等<sup>[1]</sup>在ABC分类法的基础上,提出了基于模糊评判与价值工程理论的备件预测模型;针对飞机备件需求预测,刘登一等<sup>[2]</sup>,王莉莉等<sup>[3]</sup>分别提出了岭回归有偏估计模型和基于分层赋时着色Petri网的预测方法。李振强等<sup>[4]</sup>则建立了回归分析模型以预测战时物资需求。

但面临信息化战争条件下武器装备的快速发展和新型作战样式的层出不穷,应急器材需求变化剧烈,上述文献对于强化应急器材储备的灵活性以应对可能的战争或冲突的保障能力依旧不足。柔性采购策略的提出为应急器材品种与数量

的动态灵活供应提供了一种新的思路。

相关文献中,部分学者对军用物资/装备的采购定价及其过程中可能出现的问题进行了研究。李杰等<sup>[5]</sup>提出了军用物资采购定价流程的五个步骤;文献[6]利用博弈论得出了避免战储物资定价合谋的最佳策略。肖骅等<sup>[7]</sup>就多个战储物资竞争性谈判中军队最优决策的外部条件及合作机制进行了研究。

同时,刘宝平等<sup>[8]</sup>和周沿海等<sup>[9]</sup>分析了现行邀请谈判定价过程中存在的若干问题,提出了利用组合拍卖理论制定新的定价机制。梁新等<sup>[10]</sup>则设计了适当的定价激励机制,用以协调解决现行装备采购定价过程中存在的棘轮效应。进一步,高宏扬等<sup>[11]</sup>在考虑企业存在的市场机会成本

\* 收稿日期:2022-04-07

基金项目:省部级科研基金资助项目(6140001030112)

作者简介:汪琳(1989—),女,浙江金华人,博士研究生,E-mail:wanglin8931@163.com;

何成铭(通信作者),男,黑龙江汤原人,教授,博士,博士生导师,E-mail:hechm8918@sina.com

条件下提出了采购价格制定的新模式。王宗德等<sup>[12]</sup>提出了质量与价格相统一的定价模型。王海兰等<sup>[13]</sup>将期权合约应用于战备物资的合同储备,寻求在某一期权价格范围内的军地供应策略最优化。

关于军队应急器材采购定价问题研究的文献数量有限,但其与地方应急物资采购定价具有一定相关性。巩秀等<sup>[14]</sup>借鉴政府物资采购的制度经验,对军队装备采购的规范化提出了意见建议。孙家悦<sup>[15]</sup>针对应急采购的范围界定、实施流程以及风险防范等进行了探析。一些学者针对应急物资采购的不确定性,将期权契约应用于物资采购定价模型当中,将采购定价与企业代储物资结合起来,并验证了其相对于非期权合约能够使政府与供应商均获得更高效益<sup>[16-22]</sup>。

其他情况或领域的定价策略问题也不乏研究。Qi等<sup>[23]</sup>从供应商角度出发,研究了投标定价的四类价格策略。Kazemi等<sup>[24]</sup>研究了资源均衡和物资订购策略的并行规划问题。Carassus等<sup>[25]</sup>利用概率和函数分析工具证明了一定条件下最优定价策略的存在性。陈崇萍等<sup>[26]</sup>利用博弈论研究了制造商面向不同特质的两类供应商之间原料采购的最优动态价格策略。刘树人等<sup>[27]</sup>则通过引入期望销售柔性概念,研究了逆向拍卖方式下的定价决策问题。

总体而言,目前大部分关于应急器材定价的研究主要集中在通过定性或定量研究维护军队效益方面。本文将军队采购定价与合作企业最佳储备策略的选择联系起来,研究在不同战争爆发概率及器材现货市场价格区间等外部环境因素下的军队最佳柔性定价及对应的企业最优储备策略,对于提高军队应急器材采购定价效益具有较大帮助。

## 1 问题描述

由于战争爆发时间与战场形势变化的不可预见性以及应急器材消耗的历史数据与相关支撑理论的缺乏,应急器材品种与数量的确定一直是困扰军队应急器材储备工作的一大难题。为有效应对战争条件下器材需求的不确定性,同时避免过量储备为军队带来的不必要的军费开支,考虑与器材代储企业签订数量柔性采购契约,与企业共同承担储备风险。

由于应急器材在采购工作完成后并非即时使用,因此在军队与企业签订器材采购柔性契约后,企业可结合对战争爆发概率以及军队所提供的柔

性采购价格等因素的综合判断,以最大化自身经济效益为目的,自行选择确定储备策略(实物储备或生产能力储备)以及相应方式下的储备数量。企业需保证的是,契约期内一旦军队产生在柔性数量范围内的应急器材需求,企业应能够按照先实物储备,后生产能力储备的顺序,立即为其提供相应数量的器材实物以供保障。军队需要考虑的则是,如何制定合理的柔性采购价格,使得企业同意为其储备满足某一最低需求的器材数量,并同时能够最小化己方采购成本。

若储备期内未发生战争,则军队对应急器材的需求量为零,企业将全部实物储备或生产能力储备按残值处理;若战争发生但战后仍有部分器材剩余,也同样按残值处理。若战争爆发后柔性契约下的储备数量仍不能满足军队需求,则将从现货市场临时采购剩余器材。

应急器材柔性采购定价问题的研究不仅考虑了战争爆发情况下军队应急器材数量的不确定需求,同时将战争不爆发情况下的军企最优决策问题也考虑在内,充分体现了应急器材需求的不确定性;另一方面,在求解过程中还需要考虑战争爆发概率与器材现货市场价格各自变动对军队柔性定价所产生的联合影响,这也是本文研究的难点。

### 1.1 符号说明

为便于问题描述与建模分析,对后续符号统一说明。

$\rho$ :战争爆发概率。

$q_1$ :企业选择实物储备的器材数量。

$q_2$ :企业选择生产能力储备的器材数量。

$c_1$ :企业实物储备的单位成本。

$s_1$ :实物器材的单位残值,显然  $s_1 < c_1$ ,否则企业将无须与军队进行实物储备合作。

$c_2$ :企业生产能力储备的单位成本,且  $c_1 > c_2$ 。

$c_z$ :企业将生产能力储备器材转化为实物器材的转化成本,且  $c_1 < c_2 + c_z$ 。

$s_2$ :以生产能力方式储备器材的单位残值,且  $s_2 < c_2, s_2 < s_1$ 。

$\omega$ :军队器材柔性采购价格。

$p$ :器材在现货市场的常规批发价格。

$U$ :战争爆发时应急器材的最大需求量。

$x$ :战争爆发时应急器材的实际需求量,假设  $x$  服从  $(0, U)$  上的随机分布,其概率密度函数为  $f(x)$ ,分布函数为  $F(x)$ ,且  $F(U) = 1$ 。

$\Pi_E$ :器材供应企业的期望利润。

$\Pi_A$ :军队的期望成本。

### 1.2 基本假设

为便于模型建立和理论分析,不失一般性地作出如下假设:

假设 1: 本文所讨论的器材对象是指器材基数。

假设 2: 由于器材实际储备工作周期较长,假设军队与供应商签订的柔性契约期为某一固定周期。

假设 3: 契约期内,企业单位产品生产升本等因素是固定不变的。

假设 4: 对于应急器材采购工作,军队与供应商是完全信息对称的,且是完全理性和风险中立的。

假设 5: 器材的现货市场批发价格会随着市场规律而产生波动。

假设 6: 战争爆发后,若协议内器材数量无法满足需求,此时军队须按市场规则购买现货,不得通过行政命令等强制手段获取。

假设 7: 器材在现货市场的供给量充足,能够满足军队临时采购需求。

假设 8: 作战不同时期的敌方进攻可能会着重造成装备不同部位的损毁,从而产生器材基数内的不同器材需求。将器材基数作为最小单位,从整体考虑时,可近似认为在战争中不同时间段的需求量满足均匀分布,即器材的需求量  $x$  满足  $(0, U)$  之间的均匀分布,  $x \sim U(0, U)$ 。

假设 9: 单契约期内仅可能发生一场战争,且对于战争爆发概率的预测是共同知识。

## 2 模型构建与求解

若企业认可并接受与军队的合作意向,则此时企业必须要承担的生产成本为  $c_1q_1 + c_2q_2$ 。

在满足应急器材保障需求的条件下,由于战争发生的不频繁性,对器材采购的经济性也要进行重点考虑。因此模型将军队应急器材采购成本设为优化目标。

下面分别讨论不同条件下军队成本与企业收益情况:

若契约期内爆发战争,则根据战争对器材的数量需求情况可知:

1) 当需求量  $0 < x \leq q_1$  时,军队将以柔性价格  $\omega$  向企业购买  $x$  数量的器材。此时契约中企业的实物储备即可满足军队需求且有剩余,因此企业须将多余实物器材  $q_1 - x$  与全部生产能力储备  $q_2$  按残值处理,并获得残值收益。该情形下,军队的

采购成本为  $\omega x$ ; 企业收益为  $E_1 = (\omega - c_1)x + (s_1 - c_1)(q_1 - x) + (s_2 - c_2)q_2$ 。

2) 当需求量  $q_1 < x \leq q_1 + q_2$  时,军队采购成本为  $\omega x$ , 企业收益为  $E_2 = (\omega - c_1)q_1 + (\omega - c_2) \cdot (x - q_1) - c_z(x - q_1) + (s_2 - c_2)(q_1 + q_2 - x)$ 。

3) 当需求量  $q_1 + q_2 < x \leq U$  时,军队采购成本为  $\omega(q_1 + q_2) + p(x - q_1 - q_2)$ ; 企业收益为  $E_3 = (\omega - c_1)q_1 + (\omega - c_2)q_2 - c_zq_2$ 。

4) 若契约期内未爆发战争,则军队不进行器材采购,成本为零; 企业则将全部储备进行残值处理,收益为  $E_4 = (s_1 - c_1)q_1 + (s_2 - c_2)q_2$ 。

### 2.1 企业储备决策

#### 2.1.1 企业储备决策

根据上述分析可知,契约期内器材企业的期望利润应为:

$$\Pi_E = \rho \Pi_{E_w} + (1 - \rho) \Pi_{E_n} \tag{1}$$

式中,  $\Pi_{E_w}$  为战争爆发下的企业收益,  $\Pi_{E_n}$  则为不爆发战争的收益。

$$\begin{aligned} \Pi_{E_w} &= \int_0^{q_1} E_1 f(x) dx + \int_{q_1}^{q_1+q_2} E_2 f(x) dx + \int_{q_1+q_2}^U E_3 f(x) dx \\ &= (\omega - c_1)q_1 + (\omega - c_2)q_2 - c_zq_2 - (\omega - s_1) \cdot \int_0^{q_1} F(x) dx - (\omega - s_2 - c_z) \int_{q_1}^{q_1+q_2} F(x) dx \end{aligned} \tag{2}$$

$$\Pi_{E_n} = (s_1 - c_1)q_1 + (s_2 - c_2)q_2 \tag{3}$$

因此,契约期内企业总的期望收益为:

$$\begin{aligned} \Pi_E &= \rho(\omega - s_1)q_1 + \rho(\omega - s_2 - c_z)q_2 + (s_1 - c_1)q_1 + (s_2 - c_2)q_2 + \rho s_1 \int_0^{q_1} F(x) dx + \rho(s_2 + c_z) \cdot \int_{q_1}^{q_1+q_2} F(x) dx - \rho\omega \int_0^{q_1+q_2} F(x) dx \\ \text{s. t. } & q_1, q_2 \geq 0 \end{aligned} \tag{4}$$

不论企业选择何种决策(即决定  $q_1$  和  $q_2$  的数量),均是在衡量军队给出的柔性采购价格  $\omega$  与战争爆发概率  $\rho$  等因素的情况下做出的最有利于企业期望收益最大化的决策。

企业所做决策必然包含在以下四种情况之中:

决策 1:  $q_{11} = 0, q_{21} = 0$ , 即企业不接受合作。

决策 2:  $q_{12} = 0, q_{22} > 0$ , 即企业接受合作,但仅储备能快速转化为  $q_{22}$  实物的生产能力。

决策 3:  $q_{13} > 0, q_{23} = 0$ , 即企业接受合作,但仅储备  $q_{13}$  数量的实物器材。

决策 4:  $q_{14} > 0, q_{24} > 0$ , 即企业接受合作,并分别储备  $q_{14}$  数量的实物器材和能够快速转化为  $q_{24}$  实物的生产能力。

#### 2.1.2 企业决策条件分析

结合极值条件进行企业决策条件讨论。

若企业选择决策 1, 则说明外界环境因素要

求企业拒绝合作。该部分将不进行深入的研究,而仅限于找出临界点。

首先,不论企业最终是否同意与军队进行柔性合作,军队所提供的柔性价格必须同时高于实物储备器材的残值  $s_1$  及生产能力储备向实物的转化成本  $c_z$  与残值  $s_2$  之和,即  $\omega > s_2 + c_z > s_2$ 。

其次,契约期内无战争爆发的概率即为军队对应急器材的需求量为零的概率,显然此概率大于零,即  $f(0) > 0$ 。

因此企业选择决策 1 时,  $\frac{\partial^2 \Pi_E}{\partial q_{11}^2} = \rho(s_1 - \omega) \cdot$

$f(0) < 0$ ,  $\frac{\partial^2 \Pi_E}{\partial q_{21}^2} = -\rho(\omega - s_2 - c_z)f(0) < 0$  显然成立。

分别令  $\frac{\partial \Pi_E}{\partial q_{11}} = 0$ ,  $\frac{\partial \Pi_E}{\partial q_{21}} = 0$ , 可以得到军队采购

价格的两个临界值  $\omega_1 = \frac{c_1 - s_1}{\rho} + s_1$ ,  $\omega_2 = \frac{c_2 - s_2}{\rho} + s_2 + c_z$ , 即无论外界其他环境如何变化,只要  $\omega \leq \omega_1$ , 企业就不会为军队储备实物器材; 只要  $\omega \leq \omega_2$ , 企业就不会为军队储备生产能力。

由于军队提供的柔性价格也必然满足  $c_2 + c_z < \omega < p$ , 即柔性价格大于企业储备生产能力的成本  $c_2$  与生产能力向实物器材转化成本  $c_z$  之和, 且同时小于现货市场价格  $p$ 。因此, 可得战争爆发概率在临界值  $\omega_1$  处需满足条件  $\frac{c_1 - s_1}{p - s_1} < \rho < \frac{c_1 - s_1}{c_2 + c_z - s_1}$ ; 在临界值  $\omega_2$  处需满足条件  $\frac{c_2 - s_2}{p - c_z - s_2} <$

$\rho < 1$ 。

若企业选择决策 2,  $q_{12} = 0, q_{22} > 0$ 。由于生产能力储备成本高于实物储备,但在灵活性方面更优,因此当这一决策为最优时,军队给出的柔性价格较高而预期战争爆发概率相对不高,使得企业选择生产能力储备能取得更高的期望收益。

此时有  $\omega_2 < \omega \leq \omega_1$  成立, 否则企业将在选择生产能力储备的同时也进行实物储备。由柔性采购价格关系可得  $\rho \leq \frac{(c_1 - s_1) - (c_2 - s_2)}{s_2 + c_z - s_1}$ 。

令  $\frac{\partial \Pi_E}{\partial q_{22}} = \rho(\omega - s_2 - c_z) + (s_2 - c_2) - \rho(\omega - s_2 - c_z)F(q_{22}) = 0$ , 可得企业选取生产能力储备下的最佳储备数量  $q_{22}^* = F^{-1}\left[1 - \frac{c_2 - s_2}{\rho(\omega - s_2 - c_z)}\right]$ 。

综上, 当战争概率  $\rho \leq \frac{(c_1 - s_1) - (c_2 - s_2)}{s_2 + c_z - s_1}$ , 且

军队提供的柔性价格满足  $\frac{c_2 - s_2}{\rho} + s_2 + c_z < \omega < p$  时, 企业的最佳决策为  $q_{12}^* = 0, q_{22}^* = F^{-1}\left[1 - \frac{c_2 - s_2}{\rho(\omega - s_2 - c_z)}\right]$ 。

同理可得企业在决策 3 和决策 4 下的外部条件情况。

### 2.1.3 不同情况下企业最优决策

整理得到企业在军队不同采购定价与不同战争概率下所作决策, 如表 1 所示。

表 1 企业在不同情况下的器材储备最优决策

Tab. 1 Optimal decision of material reserve in different situations

情况类型	战争爆发概率区间	柔性采购价格区间	企业最优决策
情况 a	$\left(\frac{c_2 - s_2}{p - s_2 - c_z}, \frac{(c_1 - s_1) - (c_2 - s_2)}{s_2 + c_z - s_1}\right]$	$\left(\frac{c_2 - s_2}{\rho} + c_z + s_2, p\right]$	决策 2
情况 b	$\left(\frac{c_1 - s_1}{p - s_1}, \frac{c_1 - s_1}{c_2 + c_z - s_1}\right)$	$\left(\frac{c_1 - s_1}{\rho} + s_1, p\right)$	决策 3
情况 c	$\left[\frac{c_1 - s_1}{c_2 + c_z - s_1}, 1\right)$	$(c_2 + c_z, p)$	决策 3
情况 d	$\left(\frac{(c_1 - s_1) - (c_2 - s_2)}{s_2 + c_z - s_1}, \frac{c_1 - s_1}{c_2 + c_z - s_1}\right)$	$\left(\frac{c_1 - s_1}{\rho} + s_1, \frac{(c_1 - s_1)(s_2 + c_z) - s_1(c_2 - s_2)}{(c_1 - s_1) - (c_2 - s_2)}\right]$	决策 3
情况 e	$\left(\frac{(c_1 - s_1) - (c_2 - s_2)}{s_2 + c_z - s_1}, 1\right)$	$\left(\frac{(c_1 - s_1)(s_2 + c_z) - s_1(c_2 - s_2)}{(c_1 - s_1) - (c_2 - s_2)}, p\right)$	决策 4

1) 企业选择决策 2 作为最优决策的情形:

情况 a: 在军队未来采购同样数量器材的前提下, 企业选择生产能力储备模式所耗费的成本将大于选择实物储备模式下的成本; 但从灵活性角度来看, 当其选择生产能力储备时, 若军队最终

选择不采购器材, 企业能以更低的代价将该部分生产能力转作他用。因此, 只有在战争爆发概率不高, 即处于区间  $\left(\frac{c_2 - s_2}{p - s_2 - c_z}, \frac{(c_1 - s_1) - (c_2 - s_2)}{s_2 + c_z - s_1}\right]$ , 而军队给出的柔性采购价格较高, 即处于区间

$\left(\frac{c_2 - s_2}{\rho} + c_z + s_2, p\right]$ 的情况下,企业才会选择仅通过生产能力来为军队储备器材。

此时企业其最优储备量为  $q_{12}^* = 0, q_{22}^* = F^{-1}\left[1 - \frac{c_2 - s_2}{\rho(\omega - s_2 - c_z)}\right]$ 。

2) 企业选择决策 3 作为最优决策的情形:

情况 b: 若战争概率处于区间  $\left(\frac{c_1 - s_1}{p - s_1}, \frac{c_1 - s_1}{c_2 + c_z - s_1}\right)$ , 并且军队柔性采购价格满足  $\omega > \frac{c_1 - s_1}{\rho} + s_1$  条件, 则此时企业将选择成本较低的实物方式为军队储备应急器材并从中获利。

情况 c: 当战争概率提升至区间  $\left[\frac{c_1 - s_1}{c_2 + c_z - s_1}, 1\right)$  时, 说明军队采购器材的概率较高。此时, 只要柔性采购价格满足基本条件, 即  $c_2 + c_z < \omega < p$ , 企业就将选择实物方式为军队储备器材并从中获利。

情况 d: 当战争爆发概率的预测下限由  $\frac{c_1 - s_1}{p - s_1}$  提升至  $\frac{(c_1 - s_1) - (c_2 - s_2)}{s_2 + c_z - s_1}$ , 即军队向企业采购器材的最低可能性升高时, 即使军队将柔性价格区间上限由现货市场批发价  $p$  调整至  $\frac{(c_1 - s_1)(s_2 + c_z) - s_1(c_2 - s_2)}{(c_1 - s_1) - (c_2 - s_2)}$ , 企业也将选择实物方式为军队储备器材并从中获利。

当企业选择决策 3 时, 其最优储备量为  $q_{13}^* = F^{-1}\left[1 - \frac{c_1 - s_1}{\rho(\omega - s_1)}\right], q_{23}^* = 0$ 。

3) 企业选择决策 4 作为最优决策的情形:

情况 e: 若企业选择同时采用实物储备与生产能力储备两种方式与军队合作, 则此时一方面必然存在较高的柔性采购价格区间  $\left(\frac{(c_1 - s_1)(s_2 + c_z) - s_1(c_2 - s_2)}{(c_1 - s_1) - (c_2 - s_2)}, p\right)$ , 使企业能够在军队最终不进行采购的情况下依然有利可图, 从而接受生产能力储备; 另一方面必然存在合理的战争爆发概率区间  $\left[\frac{(c_1 - s_1) - (c_2 - s_2)}{s_2 + c_z - s_1}, 1\right)$ , 使企业认为军队最终进行采购的概率较为合理, 从而接受实物储备。

此时企业最优储备量为:

$$q_{14}^* = F^{-1}\left[1 - \frac{(c_1 - s_1) - (c_2 - s_2)}{\rho(s_2 + c_z - s_1)}\right]$$

$$q_{24}^* = F^{-1}\left[1 - \frac{c_2 - s_2}{\rho(\omega - s_2 - c_z)}\right] - q_1^*$$

## 2.2 军队柔性定价决策

根据前述分析可知, 军队在契约期内的期望成本应为:

$$\Pi_A = \rho\Pi_{Aw} + (1 - \rho)\Pi_{An} \quad (5)$$

式中:  $\Pi_{Aw}$  为战争爆发情况下的军队成本;  $\Pi_{An}$  则为无战争情况下的军队成本, 此时军队不进行任何数量的器材采购, 显然  $\Pi_{An} = 0$ 。而  $\Pi_{Aw}$  的表达式应为:

$$\begin{aligned} \Pi_{Aw} = & \int_0^{q_1} \omega x f(x) dx + \int_{q_1}^{q_1+q_2} \omega x f(x) dx + \\ & \int_{q_1+q_2}^U [\omega(q_1 + q_2) + p(x - q_1 - q_2)] f(x) dx \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $\int_0^{q_1} \omega x f(x) dx$  表示当应急器材需求量  $x$  处于  $[0, q_1]$  时, 军队的采购成本;  $\int_{q_1}^{q_1+q_2} \omega x f(x) dx$  表示当应急器材需求量  $x$  处于  $[q_1, q_1 + q_2]$  时的军队采购成本;  $\int_{q_1+q_2}^U [\omega(q_1 + q_2) + p(x - q_1 - q_2)] f(x) dx$  表示当应急器材需求量  $x$  处于  $[q_1 + q_2, U]$  时的军队采购成本。

因此, 军队在契约期内的期望成本应为:

$$\begin{aligned} \Pi_A = & \rho\Pi_{Aw} = \rho(\omega - p)(q_1 + q_2) + \\ & \rho p U - \rho(\omega - p) \int_0^{q_1+q_2} F(x) dx \end{aligned} \quad (7)$$

军队选择的器材柔性采购价格要在企业接受合作, 即企业所选择的最佳决策为 2、3、4 时的基础上最小化自身成本。

企业最终作出的储备量  $q_1, q_2$  决策一定程度上取决于柔性价格  $\omega$ , 对式(7)求  $\omega$  的一阶、二阶偏导数可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi_A}{\partial \omega} = & \rho(q_1 + q_2 - \int_0^{q_1+q_2} F(x) dx) + \rho(\omega - p) \cdot \\ & [1 - F(q_1 + q_2)] \left(\frac{\partial q_1}{\partial \omega} + \frac{\partial q_2}{\partial \omega}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \Pi_A}{\partial \omega^2} = & 2\rho[1 - F(q_1 + q_2)] \left(\frac{\partial q_1}{\partial \omega} + \frac{\partial q_2}{\partial \omega}\right) - \\ & \rho(\omega - p)f(q_1 + q_2) \frac{\partial q_1 + \partial q_2}{\partial \omega} + \\ & \rho(\omega - p)[1 - F(q_1 + q_2)] \frac{\partial^2 q_1 + \partial^2 q_2}{\partial \omega^2} \end{aligned} \quad (9)$$

由于假设 7, 即战争爆发时器材消耗量  $x$  服从  $(0, U)$  上的均匀分布, 因此  $f(x) = U^{-1}, F(x) = U^{-1} \cdot x$ 。

下面讨论在表 1 列出的不同情况基础上细化得到的军队最优定价决策。

当企业最优决策为决策2时,对应表1中的情况a。此时  $q_{12}^* = 0, q_{22}^* = U \left[ 1 - \frac{c_2 - s_2}{\rho(\omega - s_2 - c_z)} \right]$ 。此时军队成本的期望值函数为:

$$\Pi_{A2} = \frac{\rho U}{2}(\omega + p) + \frac{U}{2\rho}(p - \omega) \left( \frac{c_2 - s_2}{\omega - s_2 - c_z} \right)^2 \quad (10)$$

并且,

$$\frac{\partial q_1 + \partial q_2}{\partial \omega} = \frac{c_2 - s_2}{\rho(\omega - s_2 - c_z)^2} U \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 q_1 + \partial^2 q_2}{\partial \omega^2} = -\frac{2(c_2 - s_2)}{\rho(\omega - s_2 - c_z)^3} U \quad (12)$$

因此,

$$\frac{\partial \Pi_{A2}}{\partial \omega} = \frac{\rho U}{2} - \frac{(c_2 - s_2)^2 (2p - \omega - s_2 - c_z)}{2\rho(\omega - s_2 - c_z)^3} U \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_{A2}}{\partial \omega^2} = \frac{(c_2 - s_2)^2 (3p - \omega - 2s_2 - 2c_z)}{\rho(\omega - s_2 - c_z)^4} U \quad (14)$$

由于  $3p - \omega - 2s_2 - 2c_z = (p - \omega) + 2[p - (s_2 + c_z)] > 0$ , 式(14)大于0显然成立,因此  $\frac{\partial \Pi_{A2}}{\partial \omega}$  为增函数;同时说明军队期望成本  $\Pi_{A2}$  将在极值点即  $\frac{\partial \Pi_{A2}}{\partial \omega} = 0$  处取得最小值。

接下来判断  $\frac{\partial \Pi_{A2}}{\partial \omega} = 0$  的极值点是否处于情况

a的区间内。

令  $\omega \rightarrow \frac{c_2 - s_2}{\rho} + c_z + s_2$ , 此时  $\frac{\partial \Pi_{A2}}{\partial \omega}$  取最小值且

$$\min \frac{\partial \Pi_{A2}}{\partial \omega} \rightarrow -\frac{(p - \omega)\rho^2}{c_2 - s_2} U < 0 \text{ 恒成立。}$$

令  $\omega = p$ , 此时  $\frac{\partial \Pi_{A2}}{\partial \omega}$  取最大值且  $\max \frac{\partial \Pi_{A2}}{\partial \omega} =$

$$\frac{U}{2\rho} \left[ \rho^2 - \frac{(c_2 - s_2)^2}{(p - c_z - s_2)^2} \right] = N(\rho), \text{ 随 } \rho \text{ 变化。}$$

由于  $\frac{\partial N}{\partial \rho} = \frac{U}{2} + \frac{U(c_2 - s_2)^2}{(p - c_z - s_2)^2 \rho^2} > 0$  恒成立,故  $N(\rho)$  是  $\rho$

的单调递增函数。故当  $\rho \rightarrow \frac{c_2 - s_2}{p - s_2 - c_z}$  时,  $N$  取最

小,即  $\min \left[ \max \frac{\partial \Pi_{A2}}{\partial \omega} \right] > 0$ 。

因此  $\frac{\partial \Pi_{A2}}{\partial \omega} = 0$  的极值点包含在价格区间

$\left( \frac{c_2 - s_2}{\rho} + c_z + s_2, p \right]$  之内,令  $\frac{\partial \Pi_{A2}}{\partial \omega} = 0$ , 解得情况d

下军队最佳采购价格  $\omega = \omega_2^*, \omega_2^*$  满足  $\rho^2 (\omega_2^* - c_z - s_2)^3 = (c_2 - s_2)^2 \cdot (2p - \omega_2^* - s_2 - c_z)$ 。

同理可求出当企业最优决策为决策3、4时的军队最优采购价格。

结合上述分析,可以整理得到军队在不同战争爆发概率下制定的最佳柔性价格与企业最佳生产决策,如表2所示。

表2 军队在不同外界环境下的最优采购价格与企业最佳决策

Tab.2 Military optimal procurement strategy and enterprise optimal decision in different situations

情况类型	战争爆发概率	军队最优采购价	企业最佳决策
情况 A	$\left( \frac{c_2 - s_2}{p - s_2 - c_z}, \frac{(c_1 - s_1) - (c_2 - s_2)}{s_2 + c_z - s_1} \right)$	$\omega = \omega_2^*$	$q_{12}^* = 0, q_{22}^* = U \left[ 1 - \frac{c_2 - s_2}{\rho(\omega_2^* - s_2 - c_z)} \right]$
情况 B	$\left[ \frac{c_1 - s_1}{p - s_1}, \min(\rho_1, 1) \right)$	$\omega = \omega_3^*$	$q_{13}^* = U \left[ 1 - \frac{c_1 - s_1}{\rho(\omega_3^* - s_1)} \right], q_{23}^* = 0$
情况 C-1	$(\rho_1, 1)$	$\omega^* \rightarrow (c_2 + c_z)^+$	$q_{13}^* = U \left[ 1 - \frac{c_1 - s_1}{\rho(c_2 + c_z - s_1)} \right], q_{23}^* = 0$
情况 C-2	$\left[ \frac{c_1 - s_1}{c_2 + c_z - s_1}, 1 \right)$	$\omega = \omega_3^*$	$q_{13}^* = U \left[ 1 - \frac{c_1 - s_1}{\rho(\omega_3^* - s_1)} \right], q_{23}^* = 0$
情况 D	$\left( \frac{(c_1 - s_1) - (c_2 - s_2)}{s_2 + c_z - s_1}, \frac{c_1 - s_1}{c_2 + c_z - s_1} \right)$	$\omega = \omega_3^*$	$q_{13}^* = U \left[ 1 - \frac{c_1 - s_1}{\rho(\omega_3^* - s_1)} \right], q_{23}^* = 0$
情况 E	$\left( \frac{(c_1 - s_1) - (c_2 - s_2)}{s_2 + c_z - s_1}, 1 \right)$	$\omega = \omega_2^*$	$q_{14}^* = U \left[ 1 - \frac{(c_1 - s_1) - (c_2 - s_2)}{\rho(s_2 + c_z - s_1)} \right],$ $q_{24}^* = U \left[ 1 - \frac{c_2 - s_2}{\rho(\omega_2^* - s_2 - c_z)} \right] - q_{14}^*$

$$\text{表 2 中, } \rho_1 = \frac{c_1 - s_1}{c_2 + c_z - s_1} \sqrt{\frac{2p - c_z - c_2 - s_1}{c_2 + c_z - s_1}},$$

$\omega_2^*$  满足  $\rho^2(\omega_2^* - c_z - s_2)^3 = (c_2 - s_2)^2 \cdot (2p - \omega_2^* - s_2 - c_z)$ ;  $\omega_3^*$  满足  $\rho^2(\omega_3^* - s_1)^3 = (c_1 - s_1)^2(2p - \omega_3^* - s_1)$ 。

表 2 中需要说明的是:对于情况 C 而言,军队制定的最佳采购定价还与器材在现货市场的批发价格  $p$  有关。当现货批发价较低,即  $p < \frac{1}{2} \left[ \frac{(c_2 + c_z - s_1)^3}{(c_1 - s_1)^2} + s_1 + c_z + c_2 \right]$  时,军队选取较低柔性采购价格  $\omega^* \rightarrow c_2 + c_z$  即可在使自身成本最小化的同时最大化企业期望收益;当批发价格升高,即  $p \geq \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{(c_2 + c_z - s_1)^3}{(c_1 - s_1)^2} + s_1 + c_z + c_2 \right]$  时,此时军队也必须将柔性采购价格升高至  $\omega = \omega_3^*$  才能同时最小化自身成本与最大化企业收益。

部分战争区间存在互相包含情况(如情况 D 与情况 E)。此时军队将按照希望企业作出的最优决策来给定最终的柔性采购价格,即若军队希望企业同时采取两种储备模式,则选择  $\omega = \omega_2^*$ ; 若只需企业采取实物储备,则选择  $\omega = \omega_3^*$ 。

### 2.3 相关结论

由 2.2 节分析可得军队与企业双方最优决策、最佳成本及收益与战争爆发概率  $\rho$ 、器材现货市场价格  $p$  之间存在的关系,从而为军队做出最佳采购定价决策提供理论支撑。

**结论 1:**军队最佳柔性价格  $\omega$  是战争概率  $\rho$  的减函数,是器材现货市场价格  $p$  的增函数。

当柔性采购价格  $\omega = \omega_2^*$  时,  $\omega_2^*$  满足  $\rho^2(\omega_2^* - c_z - s_2)^3 = (c_2 - s_2)^2(2p - \omega_2^* - s_2 - c_z)$ , 令  $A_1 = \rho^2(\omega_2^* - c_z - s_2)^3 - (c_2 - s_2)^2(2p - \omega_2^* - s_2 - c_z)$ , 则:

$$\frac{\partial A_1}{\partial \rho} = 2\rho(\omega_2^* - c_z - s_2)^3 \quad (15)$$

$$\frac{\partial A_1}{\partial \omega_2^*} = 3\rho^2(\omega_2^* - c_z - s_2)^2 + (c_2 - s_2)^2 \quad (16)$$

$$\frac{\partial A_1}{\partial p} = -2(c_2 - s_2)^2 \quad (17)$$

故有  $\frac{\partial \omega_2^*}{\partial \rho} = -\frac{\partial A_1}{\partial \rho} / \frac{\partial A_1}{\partial \omega_2^*} = [-2\rho(\omega_2^* - c_z - s_2)^3] / [3\rho^2(\omega_2^* - c_z - s_2)^2 + (c_2 - s_2)^2] < 0$ ,  $\frac{\partial \omega_2^*}{\partial p} = -\frac{\partial A_1}{\partial p} / \frac{\partial A_1}{\partial \omega_2^*} = [2(c_2 - s_2)^2] / [3\rho^2(\omega_2^* - c_z - s_2)^2 + (c_2 - s_2)^2] > 0$ , 结论成立。

当军队定价策略为  $\omega = \omega_3^*$ , 且  $\omega_3^*$  满足  $\rho^2(\omega_3^* - s_1)^3 = (c_1 - s_1)^2(2p - \omega_3^* - s_1)$  时,令  $A_2 = \rho^2(\omega_3^* - s_1)^3 - (c_1 - s_1)^2(2p - \omega_3^* - s_1)$ , 则:

$$\frac{\partial A_2}{\partial \rho} = 2\rho(\omega_3^* - s_1)^3 \quad (18)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial \omega_3^*} = 3\rho^2(\omega_3^* - s_1)^2 + (c_1 - s_1)^2 \quad (19)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial p} = -2(c_1 - s_1)^2 \quad (20)$$

故有  $\frac{\partial \omega_3^*}{\partial \rho} = -\frac{\partial A_2}{\partial \rho} / \frac{\partial A_2}{\partial \omega_3^*} = [-2\rho(\omega_3^* - s_1)^3] / [3\rho^2(\omega_3^* - s_1)^2 + (c_1 - s_1)^2] < 0$ ,  $\frac{\partial \omega_3^*}{\partial p} = -\frac{\partial A_2}{\partial p} / \frac{\partial A_2}{\partial \omega_3^*} = [2(c_1 - s_1)^2] / [3\rho^2(\omega_3^* - s_1)^2 + (c_1 - s_1)^2] > 0$ , 结论成立。

当军队定价策略为  $\omega^* \rightarrow c_2 + c_z$ , 其不随战争爆发概率的变化而变化。

因此,若所预测的战争爆发概率较高,此时军队可以一个较低的柔性采购价格与企业达成合作;若器材现货市场的价格较低,则也更利于军队以低价与企业签订数量柔性契约。否则,军队则需提供一个相对较高的柔性价格才能实现柔性合作。

**结论 2:**企业的器材总储备量是战争概率  $\rho$  和现货市场价格  $p$  的增函数。

当军队定价策略为  $\omega = \omega_2^*$ , 企业的最佳决策为  $q_{22}^* = U \left[ 1 - \frac{c_2 - s_2}{\rho(\omega_2^* - s_2 - c_z)} \right]$ ,  $q_{12}^* = 0$  时,其所

储备的器材总量  $Q_2 = U \left[ 1 - \frac{c_2 - s_2}{\rho(\omega_2^* - s_2 - c_z)} \right]$ 。又

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \rho} = \frac{(c_2 - s_2)[\rho^2(\omega_2^* - c_z - s_2)^2 + (c_2 - s_2)^2]}{\rho^2(\omega_2^* - c_z - s_2)[3\rho^2(\omega_2^* - c_z - s_2)^2 + (c_2 - s_2)^2]}$$

$$U > 0, \quad \text{且} \quad \frac{\partial Q_2}{\partial p} = -\frac{U}{\rho(\omega_2^* - s_2 - c_z)^2}$$

$\frac{2(c_2 - s_2)^3}{3\rho^2(\omega_2^* - c_z - s_2)^2 + (c_2 - s_2)^2} > 0$ , 即企业的器材总储备量  $Q_2$  是战争爆发概率  $\rho$  和现货市场价格  $p$  的增函数。

同理,当军队定价策略为  $\omega = \omega_3^*$ , 企业的最佳决策为  $q_{14}^* = U \left[ 1 - \frac{(c_1 - s_1) - (c_2 - s_2)}{\rho(s_2 + c_z - s_1)} \right]$ ,

$q_{24}^* = U \left[ 1 - \frac{c_2 - s_2}{\rho(\omega_2^* - s_2 - c_z)} \right] - q_{14}^*$  时,其所储备

的器材总量  $Q_4 = Q_2 = U \left[ 1 - \frac{c_2 - s_2}{\rho(\omega_2^* - s_2 - c_z)} \right]$ ,

因此企业的器材总储备量  $Q_4$  也是战争爆发概率  $\rho$  和现货市场价格  $p$  的增函数。

当军队定价策略为  $\omega = \omega_3^*$  时,企业的最佳决策为  $q_{13}^* = U \left[ 1 - \frac{c_1 - s_1}{\rho(\omega_3^* - s_1)} \right], q_{23}^* = 0$ , 其所储备的器材总量  $Q_3 = q_{13}^* + q_{23}^* = U \left[ 1 - \frac{c_1 - s_1}{\rho(\omega_3^* - s_1)} \right]$ 。因此

$$\frac{\partial Q_3}{\partial \rho} = \frac{(c_1 - s_1)[\rho^2(\omega_3^* - s_1)^2 + (c_1 - s_1)^2]}{\rho^2(\omega_3^* - s_1)[3\rho^2(\omega_3^* - s_1)^2 + (c_1 - s_1)^2]} \cdot U > 0, \frac{\partial Q_3}{\partial p} = [3\rho^2(\omega_3^* - s_1)^2 + (c_1 - s_1)^2]^{-1} \cdot \frac{2(c_1 - s_1)^3 U}{\rho(\omega_3^* - s_1)^2} > 0, \text{结论成立。}$$

从器材保障企业的角度而言,所预测的战争爆发概率越高,企业就更倾向于储备总量较大的实物与生产能力器材数量;同样地,当器材的现货市场价格较高时,企业在市场的刺激下也会愿意为军队储备更多数量的应急器材。否则,企业储备的器材总量就会相对减少,需要军队提高定价才能激励其增加储备总量。

**结论 3:** 军队器材采购的期望成本是战争概率  $\rho$  和现货市场价格  $p$  的增函数。

当军队定价策略  $\omega = \omega_3^*$  时,其成本为  $\Pi_{A3} = \frac{\rho(\omega_3^* + p)}{2}U + \frac{(c_1 - s_1)^2(p - \omega_3^*)}{2\rho(\omega_3^* - s_1)^2}U$ 。其关于战争概率的一阶导数  $\frac{\partial \Pi_{A3}}{\partial \rho} = (\omega_3^* - s_1 + \rho \frac{\partial \omega_3^*}{\partial \rho}) \cdot \left( 1 - \frac{q_{13}^*}{2U} \right) q_{13}^*$ 。

由于  $\left( 1 - \frac{q_{13}^*}{2U} \right) q_{13}^* > 0$ , 又  $\omega_3^* - s_1 + \rho \frac{\partial \omega_3^*}{\partial \rho} = \frac{\rho^2(\omega_3^* - s_1)^3 + (c_1 - s_1)^2(\omega_3^* - s_1)}{3\rho^2(\omega_3^* - s_1)^2 + (c_1 - s_1)^2} > 0$ 。故  $\frac{\partial \Pi_{A3}}{\partial \rho} > 0$  恒成立。

期望成本关于现货价格  $p$  的一阶导数  $\frac{\partial \Pi_{A3}}{\partial p} = \rho \frac{\partial \omega_3^*}{\partial p} \left( 1 - \frac{q_{13}^*}{2U} \right) q_{13}^* > 0$ , 结论得证。

同理,当军队定价策略为  $\omega = \omega_2^*$  时,结论成立,此处省略证明过程。

当战争概率增大或器材现货市场价格提高时,军队需要付出的期望成本也随之增大。

**结论 4:** 企业的期望利润是战争爆发概率  $\rho$  和现货市场价格  $p$  的增函数。

当  $\omega = \omega_3^*$  时,企业期望利润为  $\Pi_{E3} = [\rho(\omega_3^* -$

$s_1) - (c_1 - s_1)]q_{13}^* - \frac{\rho}{2U}(\omega_3^* - s_1)q_{13}^{*2}$ 。其关于战争概率的一阶导数  $\frac{\partial \Pi_{E3}}{\partial \rho} = pU - (p - \omega_3^*) \cdot \left( 1 - \frac{q_{13}^*}{2U} \right) q_{13}^*$ 。

由于  $\left( 1 - \frac{q_{13}^*}{2U} \right) q_{13}^* < q_{13}^* < U$ , 又  $p - \omega_3^* < p$ , 所以  $(p - \omega_3^*) \left( 1 - \frac{q_{13}^*}{2U} \right) q_{13}^* < pU$ 。故  $\frac{\partial \Pi_{E3}}{\partial \rho} > 0$  恒成立。

期望收益关于现货价格的一阶导数  $\frac{\partial \Pi_{E3}}{\partial p} = \rho U - \rho \left( 1 - \frac{q_{13}^*}{2U} \right) q_{13}^* > 0$ , 结论得证。

同理,当军队定价策略为  $\omega = \omega_2^*$  时,结论成立,此处省略证明过程。

当战争概率增大或器材现货市场价格提高时,企业所能获得的期望利润也在随之增大。

### 3 算例分析

为作好应急斗争准备,军队选择器材保障企业进行应急器材储备合作。在采购环节,通过给出合理的柔性采购价格,激励企业在签订合同后储备相应数量的应急器材。企业则将综合考虑内外部环境因素,明确自身将以何种储备策略为军队开展应急器材储备工作。

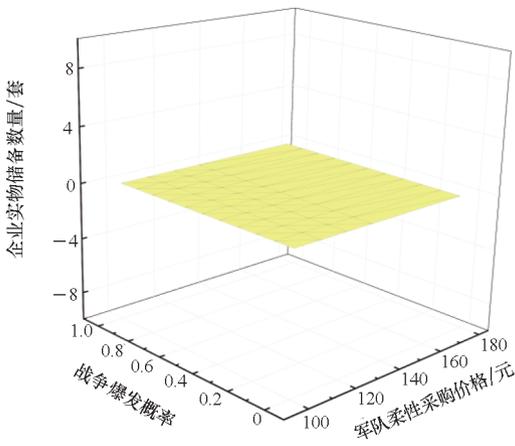
已知合作企业的器材实物储备的单位成本  $c_1 = 50$  元/套,实物器材的单位残值  $s_1 = 20$  元/套;企业器材生产能力储备的单位成本  $c_2 = 30$  元/套,相应器材生产能力储备的单位残值  $s_2 = 10$  元/套,且器材由生产能力转化为实物的转化成本  $c_z = 40$  元/套。

若契约期内战争爆发,应急器材的实际需求量  $x$  服从  $(0, U)$  上的均匀分布,且最大需求量  $U = 20\ 000$  套。

#### 3.1 企业最佳储备策略

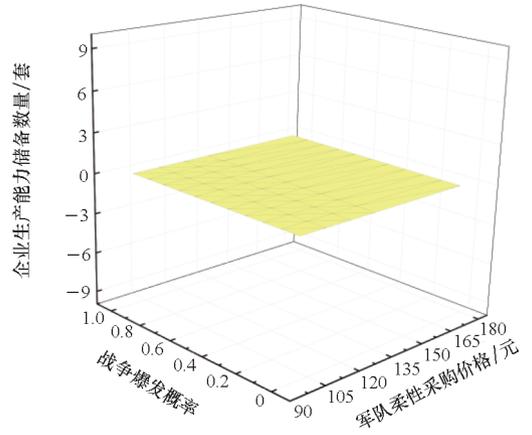
考虑在具体情境下器材柔性采购价格  $\omega$  与战争爆发概率  $\rho$  对企业最佳储备决策的影响。关于器材现货市场定价,由于在企业面对情况 e 时应满足  $p > \frac{(c_1 - s_1)(s_2 + c_z) - s_1(c_2 - s_2)}{(c_1 - s_1) - (c_2 - s_2)} = 100$  元,因此,本小节取现货市场价格  $p = 180$  元进行后续讨论。

为更直观地观察影响情况,绘制如图 1 所示,情况 a、b、c、d、e 下企业最优器材储备策略与战争爆发概率及柔性采购价格关系示意图。



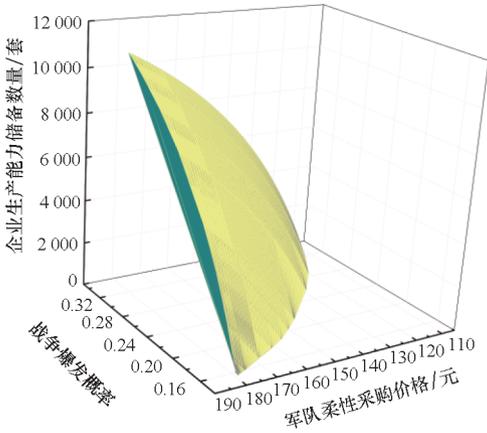
(a) 情况 a 下企业最优实物储备策略示意图

(a) Schematic diagram of enterprise optimal material object reserve strategy under situation a



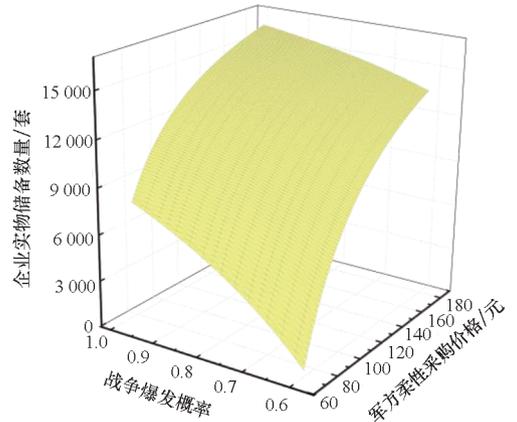
(d) 情况 b 下企业最优生产能力储备策略示意图

(d) Schematic diagram of enterprise optimal production capacity reserve strategy under situation b



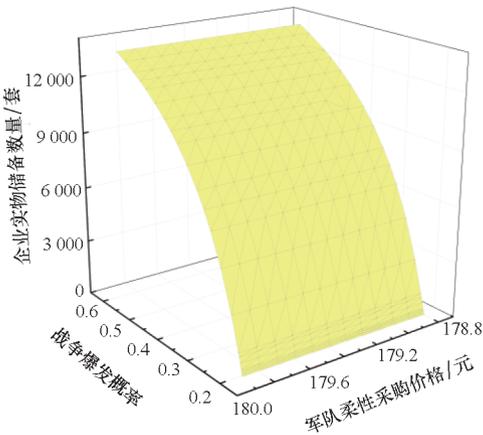
(b) 情况 a 下企业最优生产能力储备策略示意图

(b) Schematic diagram of enterprise optimal production capacity reserve strategy under situation a



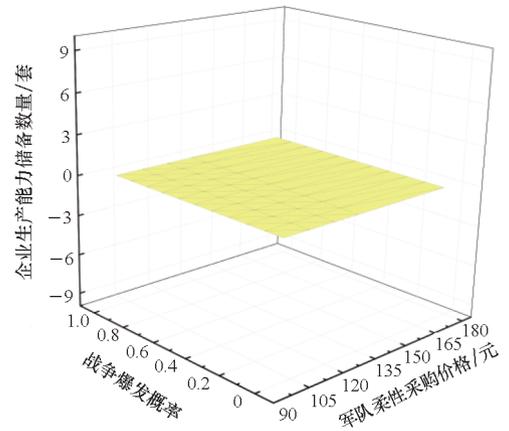
(e) 情况 c 下企业最优实物储备策略示意图

(e) Schematic diagram of enterprise optimal material object reserve strategy under situation c c



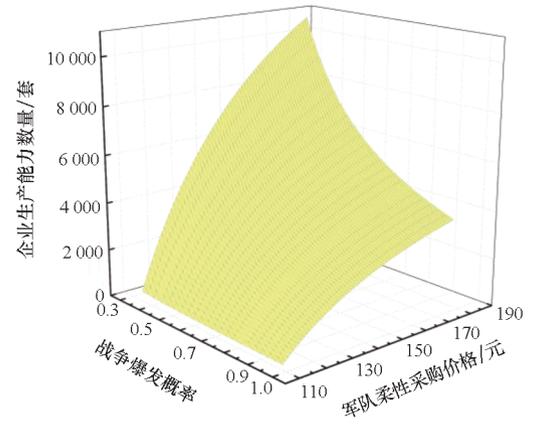
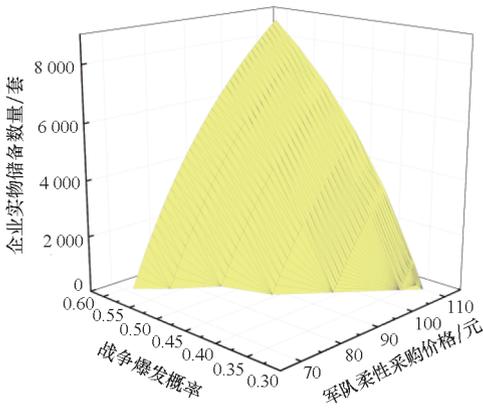
(c) 情况 b 下企业最优实物储备策略示意图

(c) Schematic diagram of enterprise optimal material object reserve strategy under situation b



(f) 情况 c 下企业最优生产能力储备策略示意图

(f) Schematic diagram of enterprise optimal production capacity reserve strategy under situation c



(g) 情况 d 下企业最优实物储备策略示意图  
 (g) Schematic diagram of enterprise optimal material object reserve strategy under situation d

(j) 情况 e 下企业最优生产能力储备策略示意图  
 (j) Schematic diagram of enterprise optimal production capacity reserve strategy under situation e

图1 企业最优器材储备策略示意图

Fig. 1 Schematic diagram of enterprise optimal material reserve strategy

由图1可进一步归纳如下结论:

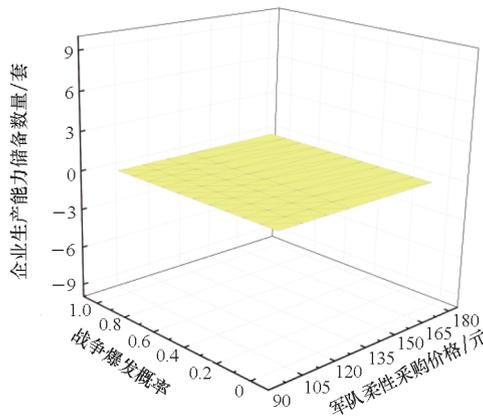
1) 外部环境因素处于情况 a 区间:当战争概率较低时,只有军队提供较高的柔性价格,企业才会愿意进行器材生产能力储备;另外,在某一较高柔性价格下,战争概率处于某一区间时,企业生产能力储备的数量并不发生变化。

2) 外部因素处于情况 b 区间:当战争概率非常小时,即使柔性价格接近器材现货市场价格,企业为军队进行器材实物储备的数量也将非常低;而只要战争概率稍有提升,在相同柔性价格下,企业储备的实物数量将出现大幅度增加。

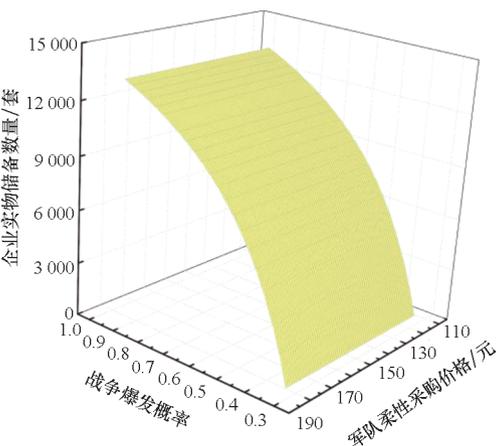
3) 外部因素处于 c 区间:当柔性价格相对现货市场价格不高时,在相同采购价格下,战争概率越大,企业愿意储备的实物数量就越多,但这一数量提升速率会随着采购价格的升高而趋于平缓;同样地,在战争概率相同情况下,柔性价格越高,企业实物器材数量也将越多,其提升速率则随战争概率的提升而减缓。

4) 外部因素处于 d 区间:柔性价格越高,企业越愿意在战争概率较小的情况下进行实物储备;战争概率增大,当柔性价格较低时,企业也能够接受合作进行实物器材储备;而当战争概率和柔性价格都较高时,企业储备实物器材的数量达到最大。

5) 外部因素处于 e 区间:企业实物储备数量示意图与情况 b 类似,但价格区间要远大于情况 b。当战争概率相同时,企业在不同采购价格下,



(h) 情况 d 下企业最优生产能力储备策略示意图  
 (h) Schematic diagram of enterprise optimal production capacity reserve strategy under situation d



(i) 情况 e 下企业最优实物储备策略示意图  
 (i) Schematic diagram of enterprise optimal material object reserve strategy under situation e

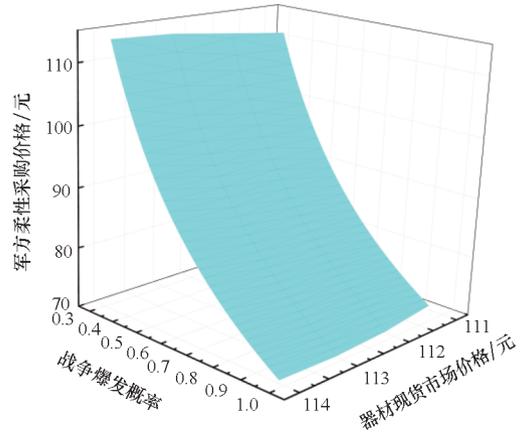
对生产能力储备的接受范围大于实物储备,这一区别体现了生产能力储备较实物储备的灵活性。就生产能力储备而言,在相同战争概率下,随柔性价格的上升,储备数量也逐步提升;但这一提升速率随战争概率的增大而平稳;随战争爆发概率增大,生产能力储备数量则会由于采购价格的提高而下降,采购价格越高,下降趋势越明显。

### 3.2 军队最佳定价决策

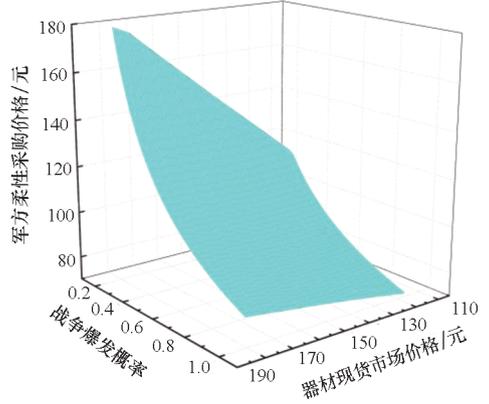
本节考虑在不同战争爆发概率与器材现货市场价格影响下,使军队采购成本最小化的柔性定价变化情况。由于现货价格的临界值  $p < \frac{1}{2} \times \left[ \frac{(c_z + c_2 - s_1)^3}{(c_1 - s_1)^2} + s_1 + c_z + c_2 \right] = 114.44$  元,因此接下来在  $p_1 \in (110, 114.44)$  元区间内对情况 C-1,  $p_2 \in [114.44, 180]$  元区间内对情况 C-2 分别进行讨论,其余情况下对现货市场价格无明确要求,选择  $p_3 \in (110, 180]$  元作为现货市场价格。同时,当  $p$  分别处于和两区间时,表 2 中情况 B 下的取值上限  $\min(\rho_1, 1)$  将分别取  $\rho_1$  和 1,故情况 B 分化出 B-1、B-2 两种情况。

为更直观地观察影响情况,绘制表 2 各情况下军队最优器材采购定价与战争爆发概率及器材现货市场价格之间的关系示意图,如图 2 所示。由图 2 可进一步验证及归纳如下结论:

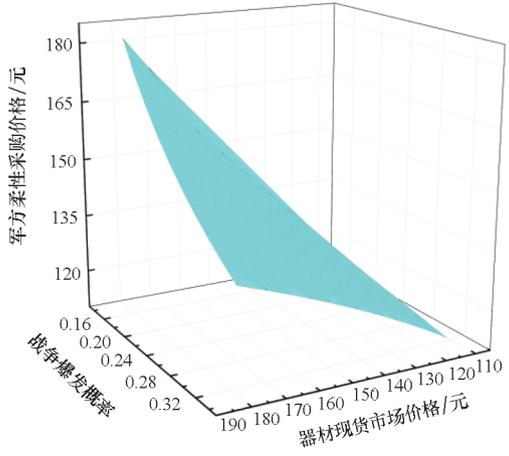
- 1) 在不同战争概率及现货市场价格下,军队柔性采购价格的波动情况均有所不同。
- 2) 当器材现货价格固定时,战争概率越高,则军队可以越低的柔性价格与企业达成合作。这是由于战争概率提高,代表了军队向企业实施器



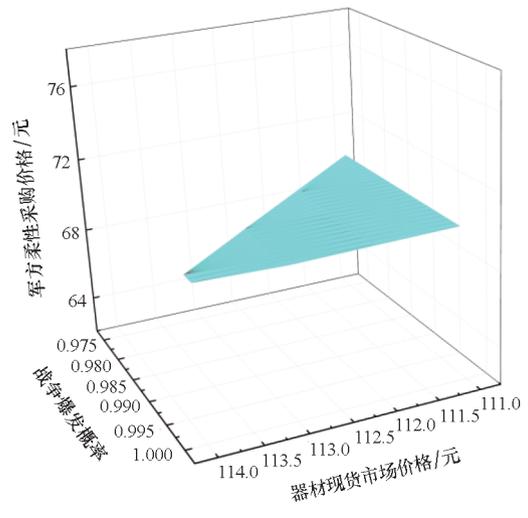
(b) 情况 B-1  
(b) Situation B-1



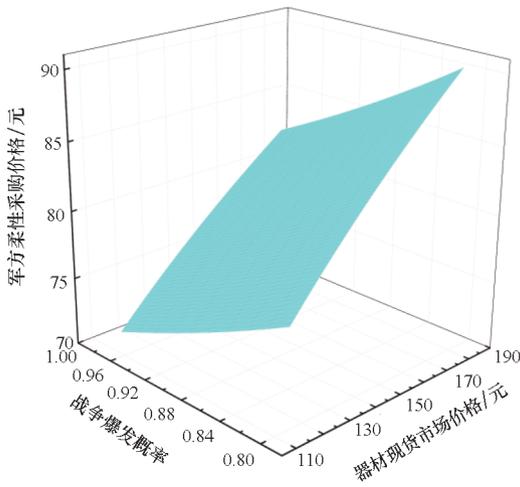
(c) 情况 B-2  
(c) Situation B-2



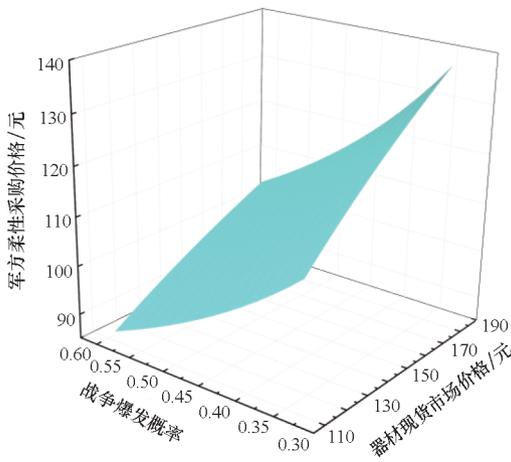
(a) 情况 A  
(a) Situation A



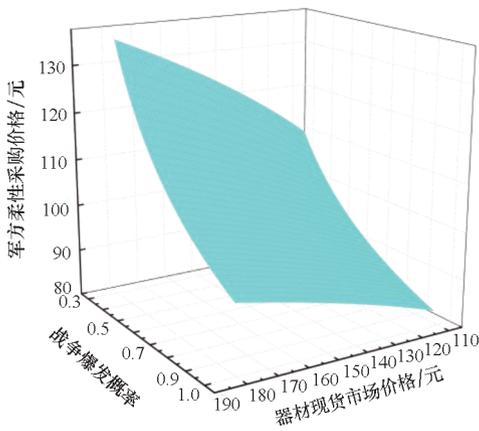
(d) 情况 C-1  
(d) Situation C-1



(e) 情况 C-2  
(e) Situation C-2



(f) 情况 D  
(f) Situation D



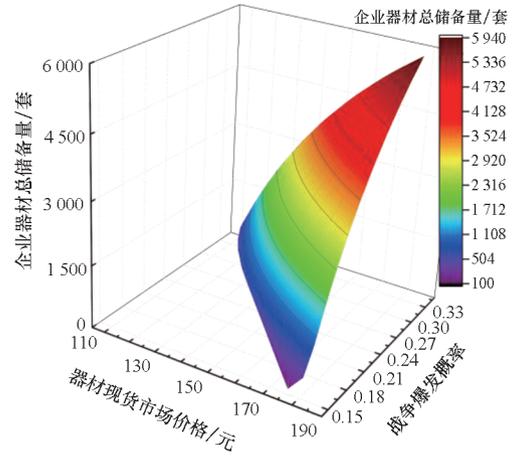
(g) 情况 E  
(g) Situation E

图2 军队最佳柔性采购价格示意图

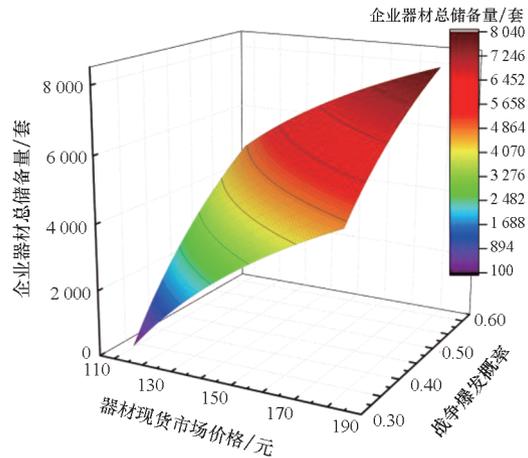
Fig.2 Schematic diagram of military optimal flexible price  
 器材采购行为的可能性增加,企业获利的可能性就增大,此时企业倾向于接受合作。而在战争概率一定时,当器材现货市场价格较高,为补偿企业机

会成本,军队就需要提供较高的柔性采购价格以与企业达成合作。2.3节结论1得证。

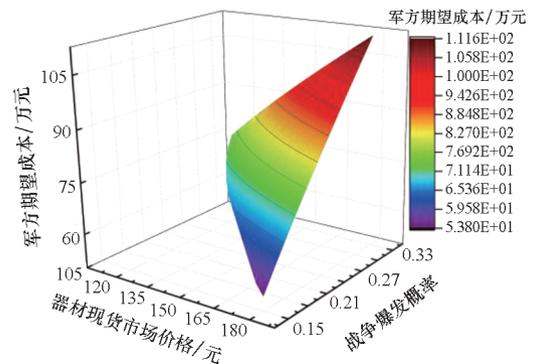
进一步,以情况 A、D 为例,给出企业器材总储备量、企业期望利润以及军队期望成本与战争概率及现货市场价格的关系示意图,如图3所示。由图3可以验证2.3节结论2、结论3、结论4。



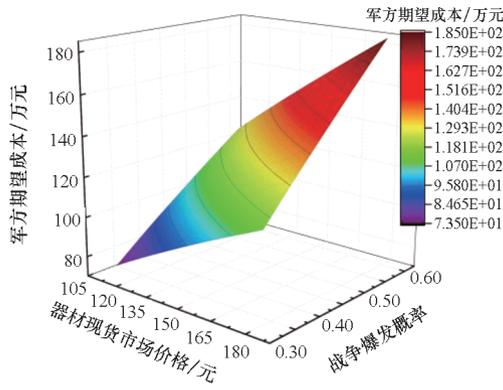
(a) 情况 A 下企业器材储备量示意图  
(a) Schematic diagram of enterprise total material reverse under situation A



(b) 情况 D 下企业器材储备量示意图  
(b) Schematic diagram of enterprise total material reverse under situation D

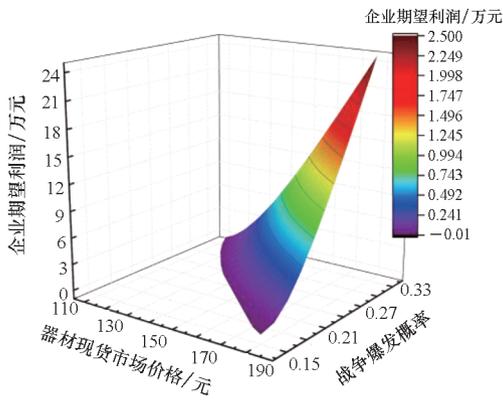


(c) 情况 A 下军队期望成本示意图  
(c) Schematic diagram of military expected cost under situation A



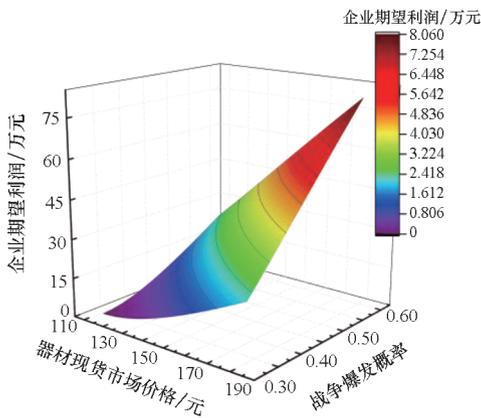
(d) 情况 D 下军队期望成本示意图

(d) Schematic diagram of military expected cost under situation D



(e) 情况 A 下企业期望利润示意图

(e) Schematic diagram of enterprise expected profit under situation A



(f) 情况 D 下企业期望利润示意图

(f) Schematic diagram of enterprise expected profit under situation D

图 3 情况 A、D 下企业总储备量及期望利润、军队期望成本示意图

Fig. 3 Schematic diagram of total reverse of enterprise, expected profit and expected cost of military under situation A and D

### 4 结论

本文以解决应急器材需求不明确问题为目标,对军队与企业之间器材柔性采购的军队最佳定价问题进行了研究。在明确合作双方签订并履行契约的决策过程的基础上建立起了以军队采购期望成本最小化为目标的军队应急器材采购定价模型。通过模型求解,得到了不同外界环境因素下的军队最佳定价与企业最优储备策略。研究结果表明,军队柔性采购价格的确定将受到战争爆发概率以及器材现货市场价格等因素的影响。这一结论对于应急器材储备中采购环节工作的实施具有一定实践意义。

### 参考文献 (References)

[1] 马海英, 周林, 刘力. 基于模糊-价值理论的备件品种预测模型研究[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(6): 39-41. MA H Y, ZHOU L, LIU L. Research on the prediction model of spare parts varieties based on fuzzy value theory [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2012, 33(6): 39-41. (in Chinese)

[2] 刘登一, 侯胜利. 一种基于有偏估计的飞机备件需求预测模型[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(4): 152-157. LIU D Y, HOU S L. Aircraft spare parts demand forecasting model based on biased estimation [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(4): 152-157. (in Chinese)

[3] 王莉莉, 邹旭, 李岩, 等. 基于 HTC PN 的飞机备件需求预测方法[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(8): 12-18, 25. WANG L L, ZOU X, LI Y, et al. A method for prediction of demand for aircraft spare parts based on HTC PN [J]. Fire Control & Command Control, 2021, 46(8): 12-18, 25. (in Chinese)

[4] 李振强, 曹琦. 基于 PCR 的战时物资需求预测研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2021, 35(3): 15-21. LI Z Q, CAO Q. Research on demand forecasting of supplies in wartime based on PCR [J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2021, 35(3): 15-21. (in Chinese)

[5] 李杰, 洋高磊, 马田野. 军用物资采购定价分析[J]. 中国储运, 2011(2): 113-114. LI J, PAN G L, MA T Y. Analysis of military material purchase pricing [J]. China Storage & Transport, 2011(2): 113-114. (in Chinese)

[6] 李杰, 甘明, 王丰. 战储物资采购定价过程中合谋问题的博弈分析[J]. 物流技术, 2011, 30(7): 214-216. LI J, GAN M, WANG F. A game approach to collusion in purchasing and pricing of military reserves [J]. Logistics Technology, 2011, 30(7): 214-216. (in Chinese)

[7] 肖骅, 王梓行, 王丰, 等. 战储物资在竞争性谈判中的定价博弈分析[J]. 军事交通学院学报, 2018, 20(5): 55-58, 67. XIAO H, WANG Z H, WANG F, et al. Pricing game in competitive negotiation for war reserve materials [J]. Journal of Military Transportation University, 2018, 20(5): 55-58, 67. (in Chinese)

- [8] 刘宝平,黄杰. 基于拍卖理论的装备招标采购定价模型研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2009, 31(3): 500-502, 511.  
LIU B P, HUANG J. Pricing model for equipment procurement based on auction theory[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2009, 31(3): 500-502, 511. (in Chinese)
- [9] 周沿海,夏爱军. 装备招标采购定价问题研究[J]. 当代经济, 2012(11): 54-55.  
ZHOU Y H, XIA A J. Research on the pricing problem of equipment bidding and procurement [J]. Contemporary Economics, 2012(11): 54-55. (in Chinese)
- [10] 梁新,张怀强. 现行装备采购定价模式中棘轮效应研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2011, 33(3): 469-471, 487.  
LIANG X, ZHANG H Q. Ratchet effect in pricing mode of equipment procurement[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2011, 33(3): 469-471, 487. (in Chinese)
- [11] 高宏扬,郭鹏飞,徐学文. 机会成本在装备单一来源采购定价中的应用[J]. 军事经济研究, 2006, 27(6): 24-25.  
GAO H Y, GUO P F, XU X W. Application of opportunity cost to fixing the price of arms procurement [J]. Military Economic Research, 2006, 27(6): 24-25. (in Chinese)
- [12] 王宗德,王哲,冯辉锋,等. 论装备采购定价管制机制创新[J]. 军事经济研究, 2012, 33(12): 33-35.  
WANG Z D, WANG Z, FENG H F, et al. Innovation of equipment procurement pricing control mechanism [J]. Military Economic Research, 2012, 33(12): 33-35. (in Chinese)
- [13] 王海兰,赵道致. 基于期权合约的战备物资储备激励机制研究[J]. 工业工程与管理, 2015, 20(1): 154-158.  
WANG H L, ZHAO D Z. Study of incentive mechanism for war material option reserve [J]. Industrial Engineering and Management, 2015, 20(1): 154-158. (in Chinese)
- [14] 巩秀,张明. 政府采购对军队装备采购的启示[J]. 装备制造技术, 2008(9): 35-37.  
GONG X, ZHANG M. The enlightenment of government purchase to the army's equipment procurement [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2008(9): 35-37. (in Chinese)
- [15] 孙家悦. 政府采购中的紧急采购探析[J]. 中国现代教育装备, 2020(15): 37-38.  
SUN J Y. Discussion on the emergency purchasing in government procurement [J]. China Modern Educational Equipment, 2020(15): 37-38. (in Chinese)
- [16] 王熹徽,梁樑. 救灾供应链采购策略及契约协调机制研究[J]. 中国管理科学, 2013, 21(4): 62-73.  
WANG X H, LIANG L. Research of purchasing strategy coordination on relief supply chain [J]. Chinese Journal of Management Science, 2013, 21(4): 62-73. (in Chinese)
- [17] 丁斌,陈锦锦. 基于期权合约的应急物资采购定价模型研究[J]. 华东理工大学学报(社会科学版), 2010, 25(4): 54-59.  
DING B, CHEN J J. Research on the procurement-pricing model of emergency material based on option contract [J]. Journal of East China University of Science and Technology (Social Science Edition), 2010, 25(4): 54-59. (in Chinese)
- [18] 丁斌,刘松林. 基于期权合约的应急物资采购定价策略研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2010, 12(6): 78-81.  
DING B, LIU S L. Research on the procurement-pricing model of emergency material based on option contract [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2010, 12(6): 78-81. (in Chinese)
- [19] 田军,张海青,汪应洛. 基于能力期权契约的双源应急物资采购模型[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(9): 2212-2219.  
TIAN J, ZHANG H Q, WANG Y L. Emergency supplies purchasing model based on capacity option contract with dual purchasing sources [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013, 33(9): 2212-2219. (in Chinese)
- [20] 张海青,田军. 采购方主导的基于能力期权契约的应急物资采购模型[J]. 系统科学与数学, 2011, 31(10): 1317-1327.  
ZHANG H Q, TIAN J. An emergency supplies purchasing model based on capacity option contract led by purchaser [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2011, 31(10): 1317-1327. (in Chinese)
- [21] 刘阳,田军,冯耕中,等. 考虑突发事件状态转移的政府应急物资采购定价模型[J]. 运筹与管理, 2020, 29(4): 1-11.  
LIU Y, TIAN J, FENG G Z, et al. Government's emergency supplies procurement pricing model considering emergency's state transition [J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(4): 1-11. (in Chinese)
- [22] 张琳,田军,杨瑞娜,等. 数量柔性契约中的应急物资采购定价策略研究[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(10): 2590-2600.  
ZHANG L, TIAN J, YANG R N, et al. Emergency supplies procurement pricing strategy under quantity flexible contract [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2016, 36(10): 2590-2600. (in Chinese)
- [23] QI L M, RAMLY Z M, ARIFFIN H L T, et al. Construction tender pricing strategies in traditional procurement system [C]//Proceedings of IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2020.
- [24] KAZEMI S, DAVARI-ARDAKANI H. Integrated resource leveling and material procurement with variable execution intensities [J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 148: 106673.
- [25] CARASSUS L, RÁSONYI M. Risk-neutral pricing for arbitrage pricing theory [J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2020, 186: 248-263.
- [26] 陈崇萍,陈志祥. 海外供应价格可变的国内外双源采购决策[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2017, 19(5): 89-96.  
CHEN C P, CHEN Z X. Domestic and overseas dual-sourcing procurement with dynamic purchasing price for overseas supplier [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2017, 19(5): 89-96. (in Chinese)
- [27] 刘树人,王娜. 价格相依随机需求下的逆向拍卖采购与定价联合决策[J]. 管理工程学报, 2014, 28(2): 196-200, 210.  
LIU S R, WANG N. Joint reverse auction procurement and pricing decision-making under stochastic price-dependent demand [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2014, 28(2): 196-200, 210. (in Chinese)