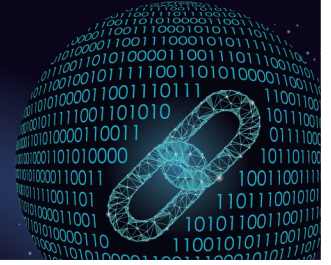




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



应急物资采购及代储服务交易的逆向组合拍卖机制设计

张萌, 孔昭君

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1603>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

现货市场补充作用下基于总量折扣的运输服务采购问题研究

Transportation service procurement based on total discount under complementary effect of spot market

控制与决策. 2021, 36(11): 2794–2802 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0274>

基于模糊-两阶段超效率SBM的电网应急能力动态综合评价

Dynamic comprehensive evaluation of power grid emergency capability based on fuzzy-two-stage super efficiency SBM

控制与决策. 2021, 36(6): 1333–1341 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1128>

考虑社会网络邻接关系的群体判断矩阵决策方法

Group preference relations decision making approach based on social network adjacency relations

控制与决策. 2021, 36(4): 983–992 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0817>

基于前景理论和模糊理论的在线多属性采购拍卖 供应商选择决策

Decision method of supplier selection for online multi-attribute procurement auction based on prospect theory and fuzzy theory

控制与决策. 2020, 35(11): 2637–2645 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1768>

考虑时间序列的动态大群体应急决策方法

Dynamic large group emergency decision-making method considering time series

控制与决策. 2020, 35(11): 2609–2618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0088>

应急物资采购及代储服务交易的逆向组合拍卖机制设计

张萌, 孔昭君[†]

(北京理工大学 管理与经济学院, 北京 100081)

摘要: 建立市场化的政企联合储备模式已经成为应急物资储备体系建设的重要方式. 基于此, 着眼于应急物资采购及代储服务的交易问题, 设计一个逆向组合拍卖机制. 在此拍卖机制中, 政府是拍卖的买方兼委托人, 企业是拍卖的卖方兼竞拍者, 应急物资采购及代储服务是拍卖商品. 首先, 通过一个报童模型建立政府决策行为与拍卖活动之间的关系, 并提出企业的投标策略; 其次, 建立最小化供需偏差和最大化供给数量的竞胜标决定模型; 最后, 提出一个符合实际背景的数值算例对拍卖机制进行模拟和验证. 研究表明, 所提出的逆向组合拍卖机制不仅具有经济效率, 还能够促进政府一次性达成与多家企业在多个周期的合作. 由此可见, 运用拍卖机制解决应急物资政企联合储备的交易问题具备理论的优越性和现实的适用性.

关键词: 应急物资采购; 政企联合储备模式; 逆向组合拍卖机制; 报童模型; 供需匹配; 竞胜标决定原则

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1603

引用格式: 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.

A reverse combinatorial auction mechanism for transaction of emergency material purchase and reserve services

ZHANG Meng, KONG Zhao-jun[†]

(School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The establishment of a market-oriented government-enterprise joint reserve mode has become an important way to construct the emergency material reserve system. Based on this, this paper focuses on the transaction of emergency material procurement and reserve services, and designs a reverse combinatorial auction mechanism. In this auction mechanism, the government is the buyer and client of the auction, while enterprises are sellers and bidders of the auction. The auction commodities are the emergency material procurement and reserve services. First of all, this paper establishes a relationship between the government's decision-making and the enterprises' bidding behaviors through a newsvendor model, and proposes the enterprises' bidding strategies. Then, the winner determination principle (WDP) model is established to minimize the supply-demand deviation and maximize the supply quantity. Finally, a numerical example corresponding to the practice is proposed to simulate and verify the auction model. The research shows that the auction mechanism proposed not only has economic efficiency, but also can promote the government and several enterprises to reach a one-time cooperation for many periods. It can be seen that the utilization of auction mechanism to solve the practical problems faced by the government-enterprise joint reserve mode has theoretical applicability and practical advantages.

Keywords: emergency material purchase; government-enterprise joint reserve mode; reverse combinatorial auction mechanism; newsvendor model; supply-demand matching; winner determination principle

0 引言

应急物资储备不仅是应急准备建设的重要环节, 也是应急响应阶段物资供应的首要来源. 由于大规模灾害爆发的突然性与不确定性, 我国应急物资储备

供应常常面临捉襟见肘的局面. 例如, 2008年汶川地震发生后的48h内, 10个中央级救灾物资储备库中的15万顶帐篷全部调空^[1]. 政企联合储备模式是为解决政府储备不足问题应运而生的先进理念, 具体做

收稿日期: 2022-09-09; 录用日期: 2023-01-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71841051).

责任编辑: 李登峰.

[†]通讯作者. E-mail: Kongzi@bit.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.

法是政府通过市场化机制利用企业闲置的仓储资源与专业化的库存管理能力储备应急物资,有利于节省政府建库的成本并增加企业收益,同时扩充应急物资储备的品种与数量.国家已经专门出台了相关的法律法规予以支持,如《中华人民共和国突发事件应对法》第三十二条规定:“县级以上地方各级人民政府应当根据本地区的实际情况,与有关企业签订协议,保障应急救援物资、生活必需品和应急处置装备的生产、供给.”

在学术领域,已经对政企联合储备模式开展了广泛且深入的探讨.文献[2]提出了一个包含政府奖励的固定框架协议模型,可以确定救济物资的质量、数量和价格,同时能够激励供应商缩短交货期.文献[3]运用数量柔性契约构建了一个由政府主导的双源应急物资采购模型,分析了灾害事件发生概率、政府自身储备量、现货市场采购价格对政府采购成本与供应方利润的影响.文献[4]考虑灾害发生概率、应急物资需求量和灾害破坏程度,提出了地方政府与当地企业或商店联合储备救济物资的分配策略.文献[5]着眼于政企之间的利益分配问题,构建了基于期权契约的联合储备模型,并分析了降低政府成本和增加企业利润的最优决策策略.文献[6]提出了一个基于期权契约的两阶段随机规划模型,可以确定合作供应商的产能储备水平以及库存预定位水平.文献[7]设计了政企联合储备的单期激励合同和多期激励合同,并确定了合同激励模式下政企之间的最佳合作期限与最大联合利润.

上述研究表明,国内外学者通过建立框架协议、数量柔性契约、期权契约、激励合同、合作博弈模型等方式来研究政企合作年限、物资采购定价、物资存储数量以及政企之间的利益分配等问题.这些研究奠定了政企联合储备模式构建的基础,但也存在一定的局限性和进一步拓展的空间.首先,上述研究着重探究政府与既定企业关于采购成本和代储收益的决策行为,并未涉及合作伙伴的选择与确定;其次,这些研究大多只注重政府与企业之间的博弈,却忽视了企业间的竞争行为,所以企业数量一般仅仅限制在两个以内;最后,大多数研究的时间线较短,并未考虑多个年限的政企合作,不利于应急物资储备建设的长期统筹.在实际的采购活动中,政府一方面希望通过企业间的竞争减少采购支出,另一方面又希望一次性达成多个周期的合作降低交易费用,所以迫切需要可以达成上述目标的交易机制.

拍卖机制可以通过竞价的方式引导出潜在竞拍者愿意支付的信息,具备真实反映市场供需与快速发现均衡价格的功能,尤其适用于交易没有标准价格的商品或服务^[8-9].应急管理领域的拍卖研究集中在国外,主要用于解决救灾物资采购^[10-12]、人道主义粮食采购^[13]和运输服务采购^[14]等问题.在我国,学术界对应急管理领域拍卖机制设计的论证还不够充足,缺乏完善的理论指导,大范围运用拍卖机制交易应急物资的时机还不够成熟.在这样的背景下,本文尝试将拍卖理论引入应急管理领域,运用拍卖机制的优势解决应急物资的交易问题.

在应急物资采购与代储服务的拍卖活动中,参与者包括政府、企业与拍卖商.政府是拍卖的委托方,也是应急物资及其储备服务的需求者;企业是拍卖的竞标方,也是应急物资及其储备服务的供给者;拍卖商是主持拍卖的第三方,也是决定供需匹配关系的宣布者.由于供需双方构成的拍卖关系是买方委托,卖方竞标,拍卖形式是逆向拍卖.政府对多个周期的物资及服务进行集中采购,企业则针对这些周期进行分散化决策和竞标,这意味着政府对于每个周期都有需求,而企业可以自由选择投标周期的组合.与传统拍卖不同的一点是每一周期允许多个企业同时中标,所以只要符合拍卖规则,那么赢家数量就没有限制.拍卖活动的上述特征决定了拍卖机制不仅是逆向的,还具有组合性.

组合拍卖是单物品拍卖方式的拓展,广泛应用于多物品采购实践.文献[15]构造了一个捆绑拍卖框架来解决如何在双边交易的运输网络上实现承运人合作的问题,能够为运营商协作网络节约可观的成本.文献[16]建立了XOR投标语言来描述竞拍者对多种不同资源组合的偏好,并设计了改进最大-最小蚁群算法来解决基于XOR标集的获胜者确定问题.文献[17]提出了一种灵活表达的投标语言,能够更加有效地传达多个单位物品的定价变化.文献[18]对可拆分拍卖机制的有效性进行了研究,这种拍卖形式允许供应商针对单独物品或全部物品组合进行投标.文献[19]提出了一种新的匿名出价方式,将捆绑商品的价格添加到商品线性价格中,弥补了线性出价方式的局限性.本文在上述研究的基础上,针对竞拍者对多个物品中标组合的偏好差异,提出“或”投标和“与”投标两种投标方式,分别代表分散中标和捆绑中标的意愿,并据此将所有竞拍企业分为两种类型,更加贴近应急物资采购实践.

综上所述,本文着眼于应急物资储备的政企合作模式,设计逆向组合拍卖机制来探讨企业选择、资源配置和供需匹配等问题,为应急物资储备的市场化机制构建提供一个崭新的视角.本文着重探讨政府的决策行为和企业的投标策略,在此基础上提出拍卖的竞标决定原则确定胜出企业.为了说明拍卖机制的可行性与优越性,提出一个数值算例来展示机制的运行过程.本文将拍卖理论引入政企联合储备应急物资的研究中,有助于政府有针对性地开展代储服务委托工作,具备较强的理论意义与现实意义.

1 问题描述

1.1 基本场景与规则

在应急物资政企联合储备的拍卖机制中,政府部门根据本地区的历史受灾情况、当前人口、资金预算等因素预测未来的存储需求,向社会发布采购物资种类、代储周期、存储条件、资质要求等信息,并委托第三方拍卖商主持拍卖事宜.由于不同种类应急物资存储条件不一致,在一次拍卖中难以同时交易多种物资及其代储服务,政府每次拍卖需要代储的物资只有一种,并且具有固定的保质期限.每一周期的代储服务可以看作一个“商品”,每个“商品”是加性可分割的,所有企业对同一个周期投标数量与价格,每个周期多个企业中标数量之和就是这一周期代储服务总的供给量.每个周期的跨度不能超过应急物资的保质期限.当一个周期结束后,代储的物资需要轮转出去,并在下一周期存储更新的物资.

拍卖形式是第一价格密封拍卖.竞标企业之间存在信息不对称,意味着它们只拥有自身的完全信息和其他主体的不完全信息,需要根据自身成本及掌握到的对手信息自行决定投标价格.由于政府既采购应急物资又购买其代储服务,企业的报价是出售物资单价及其代储服务单价的价格之和.每个企业可以对多个周期进行投标,代表企业对多个“商品”感兴趣.企业可以希望投标的任意周期组合中标,也可以要求所有周期组合同时中标,由此将所有企业分为I型竞拍者(“或”投标)和II型竞拍者(“与”投标).投标具有一定的时间限制,逾期不可投标,且投标一经提交不可更改.拍卖商主导拍卖过程,按照一定的竞标决定原则确定胜出企业.胜标信息公开后,政府与中标企业签订契约,并向其支付预付款,企业根据中标信息向政府提供物资及存储服务.拍卖系统的整体架构如图1所示.

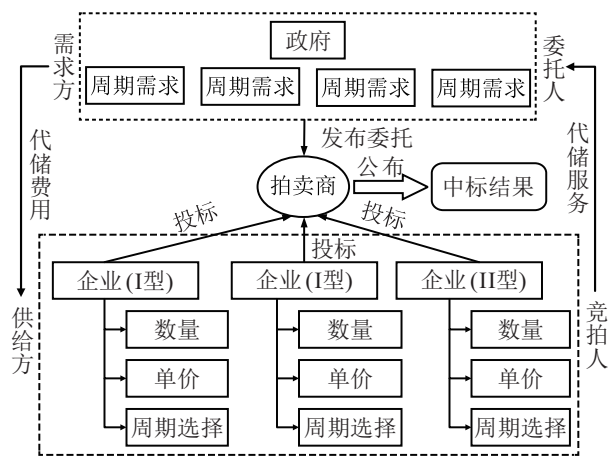


图1 拍卖系统整体架构

1.2 假设条件

基于以上规则,本文根据研究边界和应急管理实践做出以下假设条件.

假设1 政府与企业均是完全理性、风险中性的行为人.此假设的目的是保证政府和企业均按照自身效用最大化或利润最大化的原则进行决策.

假设2 参与竞标的企业之间是独立且对称的.独立性保证了企业的决策行为互不干扰,对称性则体现了每个企业的成本服从相同的分布并且实施相同的投标策略.除了一些专门性的研究,这两个性质在经典拍卖理论的研究^[20-21]中往往作为基本假设存在.

假设3 政企双方之间的交易费用、双方支付给拍卖商的佣金、企业代储收入缴纳的税金等费用忽略不计.由于拍卖理论主要研究的是参与者的均衡策略、期望收益与供需匹配关系,而这些费用数额很小且不会影响研究结果,在经典拍卖理论的研究^[20-21]中也往往被忽略.

1.3 符号说明

本文涉及的主要变量及参数符号(均省略下标)如下所示.

M : 应急物资代储服务的周期集合,一共包含 m 个跨度相等的周期.

N : 参与拍卖的企业集合,可以表示为 $N = \{1, 2, \dots, n\}$. 其中:I型企业的集合为 $N_I = \{1, 2, \dots, k\}$, II型企业的集合为 $N_{II} = \{k + 1, k + 2, \dots, n\}$, $N_I \cup N_{II} = N$.

X : 灾后应急物资的需求量,服从 $[0, +\infty)$ 上随机分布的形式,其实现值为 x .

U : 政府效用,代表政府采购与存储应急物资总价值与总成本之间的差值.

z : 政府预期采购和存储的应急物资数量.

v : 政府认为单位数量应急物资所包含的价值,也可以看作政府的单位预算.

\bar{p} : 政府采购及存储应急物资所支付的单位价格,也表示每一周期所有中标企业的平均价格.

o : 政府处理剩余应急物资的单位残值收益.

A : 企业生产应急物资的单位成本,服从 $[a, \bar{a}]$ 上随机分布的形式,其实现值为 a .

B : 企业存储应急物资的单位成本,服从 $[b, \bar{b}]$ 上随机分布的形式,其实现值为 b .

C : 企业生产与存储应急物资的单位成本,服从 $[c, \bar{c}]$ 上随机分布的形式,其实现值为 c .

δ : 企业的投标策略,将成本转化为投标价格.

p : 企业的单位投标价格.

q : 企业的投标数量.

π : 企业的单位利润.

s : 中标企业供给的应急物资总量.

t_{ij} : 企业中标情况,所有企业的中标矩阵为

$T_{m \times n}$.

2 参与者决策策略

2.1 政府决策策略

在政企联合储备应急物资的问题中,政府的决策目标就是确定最优的物资采购数量与价格. 应急物资采购量取决于应急物资需求量,而应急物资需求量来源于对未来需求的预测. 由于信息不完备,政府难以确定精确的物资需求数量 X ,而将其视为一个随机变量. 在已有研究中,大都假设需求数量服从均匀分布^[22]、指数分布^[23]或正态分布^[24]. 本文着眼于应急物资需求预测的特定场景,提出 X 服从拉普拉斯分布,记作 $X \sim \text{Laplace}(\mu, \sigma)$,其概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{2\sigma} e^{-\frac{|x-\mu|}{\sigma}}. \quad (1)$$

其中: $\mu > 0$ 是位置参数, $\sigma > 0$ 是尺度参数. 其均值为 μ , 方差为 $2\sigma^2$. 拉普拉斯分布的概率密度曲线具有“尖峰厚尾”的特点,关于 $x = \mu$ 对称并在 $x = \mu$ 处取得最大值 $f(\mu) = 1/(2\sigma)$, 具有集中性与对称性. 随着 x 远离 μ , $f(x)$ 下降的速度由快变慢,并在两端留下较为平坦的“厚尾”,这说明使得 $f(x)$ 取到较大数值的 x 的值维持在一个较小的区间内,而“厚尾”则占据了较大的区间. 因此,在随机取样时,拉普拉斯分布更容易抽样到均值附近和远离均值的样本.

在应急物资需求预测的具体场景中,均匀分布假设在特定的需求区间内分布概率完全相等,适用于拟合应急物资需求变化不大的情形;指数分布假设随

着需求数量的增加分布概率不断下降,适用于拟合发生大规模灾害概率较小的情形. 正态分布具有“圆峰细尾”的特点,适用于拟合应急物资需求平滑变动的情形. 与具有相同参数 μ 和 σ 的正态分布相比,拉普拉斯分布在均值附近和最两端有更高概率密度,这说明政府需求预测的精度越来越高,并为极端需求量保留了更高的概率值. 这既有可能得益于历史数据的逐步完备,又有可能得益于科技水平的不断提高,体现了需求预测的总体趋势. 因此,拉普拉斯分布适用于拟合应急物资需求集中且精确的情形.

由于应急物资需求不能为负数,而拉普拉斯分布的定义域为 $(-\infty, +\infty)$,需要将其负半轴上的部分截断. 为了方便建模与论述,允许 $F(x)$ 的支撑域为非负实轴 $[0, +\infty)$,这样便可近似看作 $x = \infty$. 考虑到拉普拉斯分布具有十分明显的厚尾特征,将 $+\infty$ 作为区间端点并不会影响分析结果. 因此,应急物资需求 X 服从 $[0, +\infty)$ 上的截尾拉普拉斯分布,其概率密度函数为

$$\tilde{f}(x) = \frac{f(x)}{\int_0^{\infty} f(x)dx} = \frac{e^{-\frac{|x-\mu|}{\sigma}}}{2\sigma[1-F(0)]}, \quad x > 0. \quad (2)$$

令 $\lambda = \frac{1}{1-F(0)}$, X 的累积分布函数为

$$\tilde{F}(x) = \begin{cases} \frac{\lambda}{2} e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}}, & 0 < x \leq u; \\ \lambda - \frac{\lambda}{2} e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}}, & x > u. \end{cases} \quad (3)$$

政府的应急物资采购数量与需求数量息息相关. 如果采购数量过少,则会出现物资短缺;如果采购数量过多,则会造成物资浪费,这两种情况都会降低政府的效用. 因此,存在一个最优采购数量 z^* 使得政府效用最大. 如果用 v 表示政府认为单位数量应急物资所能发挥的价值, \bar{p} 表示单位采购价格, o 表示残值,则政府效用 U 是一定数量应急物资的价值与采购成本之间的差值. 因为物资需求是随机的,进而政府效用也是随机的,所以政府的决策目标是期望效用最大化,可以表示为

$$U(z) = \int_0^z [(v - \bar{p})x - (\bar{p} - o)(z - x)] \tilde{f}(x) dx + \int_z^{+\infty} (v - \bar{p})z \tilde{f}(x) dx. \quad (4)$$

其一阶导数与二阶导数分别为

$$\frac{dU(z)}{dz} = (v - \bar{p}) \int_z^{+\infty} \tilde{f}(x) dx - (\bar{p} - o) \int_0^z \tilde{f}(x) dx, \quad (5)$$

$$\frac{d^2U(z)}{dz^2} = (o - v) \tilde{f}(z). \quad (6)$$

不失一般性,令 $v > \bar{p} > o > 0$, 有式(6)小于0.

由于

$$\int_0^z \tilde{f}(x)dx = \text{prob}\{X \leq z\} = \tilde{F}(z),$$

有

$$\int_z^{+\infty} \tilde{f}(x)dx = 1 - \int_0^z \tilde{f}(x)dx = 1 - \tilde{F}(z).$$

令式(5)等于0,可以得到

$$\tilde{F}(z) = \frac{v - \bar{p}}{v - o}. \tag{7}$$

联立式(3)与(7),可以得到

$$z^* = \begin{cases} \mu + \sigma \ln \frac{2(v - \bar{p})}{\lambda(v - o)}, & z \leq \mu; \\ \mu - \sigma \ln 2 \left[1 - \frac{v - \bar{p}}{\lambda(v - o)} \right], & z > \mu. \end{cases} \tag{8}$$

至此,通过一个报童模型求解出了政府的最优采购数量.

然而,与经典报童模型不同的是,在本文研究的问题中政府的单位采购价格 \bar{p} 并不是一个常量,它取决于拍卖阶段各企业的投标价格,所以 \bar{p} 也表示每一周期中标企业的平均价格.因此,式(8)表示的是政府的预期采购数量与中标企业平均价格之间的关系.对 z^* 求一阶导数,有

$$\frac{dz^*}{d\bar{p}} = \begin{cases} \frac{\lambda\sigma(o - v)}{v - \bar{p}}, & \bar{p} \geq \frac{(2 - \lambda)v + \lambda o}{2}; \\ \frac{\lambda\sigma(o - v)}{(\lambda - 1)v - \lambda o + \bar{p}}, & \bar{p} < \frac{(2 - \lambda)v + \lambda o}{2}. \end{cases} \tag{9}$$

在式(9)中, $\bar{p} \geq \frac{(2 - \lambda)v + \lambda o}{2}$ 等价于 $z \leq \mu$, $\bar{p} < \frac{(2 - \lambda)v + \lambda o}{2}$ 等价于 $z > \mu$.因为 $v > \bar{p} > o > 0$ 并且 $\lambda > 1$,所以 $o - v < 0$, $v - \bar{p} > 0$, $(\lambda - 1)v - \lambda o + \bar{p} = \lambda(v - o) - (v - \bar{p}) > \bar{p} - o > 0$.因此,式(9)小于0,说明 z^* 与 \bar{p} 是负相关关系.也就是说,随着中标企业平均价格的升高,政府预期采购数量会下降,反之亦然.这说明政府最优采购存储数量和价格的确定不仅取决于自身的决策行为,也受到企业竞标行为的影响.因此,具体的价格与数量将在下文的拍卖环节得以确定.

2.2 企业投标策略

应急物资代储企业根据自身成本以及对其他企业成本的估计来确定投标价格构成了企业的投标策略.企业的单位代储成本 C 由单位生产成本 A 与单位储备成本 B 两部分构成.由于信息不对称,每个企业只知道本企业的成本实现值,但不知道其他企业的具体成本.每个企业的 A 与 B 都是随机变量,分别独立同分布于 $[a, \bar{a}]$ 和 $[b, \bar{b}]$ 上的均匀分布,具有递增的分布函数 $F_A(a)$ 和 $F_B(b)$,以及连续的密度函数

$f_A(a) \equiv F'_A(a)$ 和 $f_B(b) \equiv F'_B(b)$.对于任意一个企业,分布函数和密度函数都是共同知识.这样一来,每个企业都知道其他企业的成本分布信息,并据此做出投标决策.

设 D 为 \mathbf{R}^2 中由 A 与 B 围成的一个有界区域,那么 (A, B) 服从 D 上的二维均匀分布.考虑到一般情况下生产成本与储备成本并无关联,所以 A 与 B 相互独立,则其联合概率密度函数为

$$f(a, b) = f_A(a)f_B(b) = \begin{cases} \frac{1}{(\bar{a} - \underline{a})(\bar{b} - \underline{b})}, & (a, b) \in D; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{10}$$

为了节省篇幅,下文使用符号 ω 代表 $f(a, b)$,即 $\omega = f(a, b)$.由于 $C = A + B$,企业的单位成本 C 也是一个随机变量,其分布区间为 $[\underline{c}, \bar{c}] = [\underline{a} + \underline{b}, \bar{a} + \bar{b}]$,分布函数为

$$F_C(c) = \text{prob}(A + B \leq c) = \iint_{a+b \leq c} f(a, b)dadb.$$

考虑到一般情况下单位生产成本大于单位储备成本,所以 $\bar{a} > \bar{b} > \underline{a} > \underline{b}$.

当 $\underline{a} + \underline{b} \leq c < \underline{a} + \bar{b}$ 时,有

$$F_C(c) = \int_{\underline{a}}^{c-\underline{b}} da \int_{\underline{b}}^{c-a} \omega db = \int_{\underline{a}}^{c-\underline{b}} \omega(c - a - \underline{b})da = \frac{\omega(c - \underline{a} - \underline{b})^2}{2};$$

当 $\underline{a} + \bar{b} \leq c < \bar{a} + \underline{b}$ 时,有

$$F_C(c) = F_C(\underline{a} + \bar{b}) + \int_{\underline{b}}^{\bar{b}} db \int_{\underline{a} + \bar{b} - b}^{c-b} \omega da = F_C(\underline{a} + \bar{b}) + \int_{\underline{b}}^{\bar{b}} \omega(c - \underline{a} - \bar{b})db = \frac{\omega(\bar{b} - \underline{b})^2}{2} + \omega(\bar{b} - \underline{b})(c - \underline{a} - \bar{b});$$

当 $\bar{a} + \underline{b} \leq c \leq \bar{a} + \bar{b}$ 时,有

$$F_C(c) = 1 - \int_{c-\bar{b}}^{\bar{a}} da \int_{c-a}^{\bar{b}} \omega db = 1 - \int_{\underline{a}}^{c-\bar{b}} \omega(\bar{b} - c + a)da = 1 - \frac{\omega}{2}(c - \bar{a} - \bar{b})^2.$$

因此,企业单位成本的分布函数为

$$F_C(c) = \begin{cases} \frac{(c - \underline{a} - \underline{b})^2}{2(\bar{a} - \underline{a})(\bar{b} - \underline{b})}, & \underline{a} + \underline{b} \leq c < \underline{a} + \bar{b}; \\ \frac{2c - 2\underline{a} - \underline{b} - \bar{b}}{2(\bar{a} - \underline{a})}, & \underline{a} + \bar{b} \leq c < \bar{a} + \underline{b}; \\ 1 - \frac{(c - \bar{a} - \bar{b})^2}{2(\bar{a} - \underline{a})(\bar{b} - \underline{b})}, & \bar{a} + \underline{b} \leq c \leq \bar{a} + \bar{b}. \end{cases} \tag{11}$$

由于企业之间具有对称性,每个企业实施相同、递增且可微的投标策略 $\delta: [\underline{a} + \underline{b}, \bar{a} + \bar{b}] \rightarrow P$. 对于任一企业 j , 给定任意单位成本 c_j , 可确定它的报价 p_j . 给定这些报价, 企业的单位利润为

$$\pi_j = \begin{cases} p_j - c_j, & p_j < \min_{-j} p_{-j}; \\ 0, & p_j > \min_{-j} p_{-j}. \end{cases} \quad (12)$$

其中 $-j$ 表示除 j 之外的企业. 上式表明, 只要企业 j 递交最低的报价, 即 $\min_{-j} \delta(C_{-j}) > p_j$, 它就一定能够赢得拍卖. 令随机变量 G 表示除企业 j 之外的剩余 $n - 1$ 个企业中的最低成本, 其分布函数为 $F_G(g) = [1 - F_C(g)]^{n-1}$. 由于 δ 递增, 所以企业获胜的概率为 $\text{prob}\{\delta(G) > p_j\} = \text{prob}\{G > \delta^{-1}(p_j)\}$, 其期望利润为 $E\pi_j = (p_j - c_j)F_G[\delta^{-1}(p_j)]$, 对期望利润求最大化可以得到企业的分段投标策略为

$$\delta(c_j) = \begin{cases} c_j + \left\{ \frac{(\bar{b} - \underline{b})^n + (2n - 1)(2\bar{a} - 2\underline{a} + \underline{b} - \bar{b})^n}{2^n n(2n - 1)(\bar{a} - \underline{a})^{n-1}} + \int_{c_j}^{\underline{a} + \bar{b}} \left[1 - \frac{(g - \underline{a} - \underline{b})^2}{2(\bar{a} - \underline{a})(\bar{b} - \underline{b})} \right]^{n-1} dg \right\} / \\ \left[1 - \frac{(c_j - \underline{a} - \underline{b})^2}{2(\bar{a} - \underline{a})(\bar{b} - \underline{b})} \right]^{n-1}, & \underline{a} + \underline{b} < c_j \leq \underline{a} + \bar{b}; \\ c_j + \frac{(\bar{b} - \underline{b})^n}{2n(2n - 1)(2\bar{a} - 2c_j + \underline{b} + \bar{b})^{n-1}} + \frac{2\bar{a} - 2c_j + \underline{b} + \bar{b}}{2n}, & \underline{a} + \bar{b} < c_j \leq \bar{a} + \underline{b}; \\ c_j - \frac{1}{2n - 1}(c_j - \bar{a} - \bar{b}), & \bar{a} + \underline{b} < c_j \leq \bar{a} + \bar{b}. \end{cases} \quad (13)$$

式(13)的推导过程基于文献[25]的研究, 此处略. 式(13)表明, 企业的投标价格大于成本, 并且投标人数越多, 投标价格越接近成本, 这充分体现了竞争机制的作用. 在本文提出的拍卖机制中, 每一周期的中标者可以有多个企业. 由于企业 j 无法获取其他企业投标物资数量的信息, 无法估计每一周期中标企业的可能数量, 也就无法推测自身的报价应该低于几家企业才能保证中标. 因此, $\delta(c_j)$ 是信息不完全情况下企业可以采取的最优投标策略.

3 拍卖竞胜标决定原则

本文研究的应急物资代储服务拍卖活动由政府发起, 主要目的是降低采购单价, 增加采购数量. 由前文可知, 以政府期望效用最大化为目标构建的报童模型确定了预期采购数量与中标企业平均价格的关系, 在此基础上, 胜出企业的选择应该遵循这样一个

过程: 在每一周期中, 按照报价从低到高的顺序依次选择企业, 用它们的平均价格计算政府的预期采购数量, 如果总供给量小于总采购量, 则纳入剩余未中标企业中报价最低的企业. 这样一来, 平均价格与总供给量在增加, 预期采购量在降低. 依此类推, 直到预期采购量与总供给量差值最小甚至相等. 通过这样的方式, 可以在政府期望效用最大化的前提下保证采购均价最低以及采购数量最多. 综合以上分析, 竞胜标决定问题可以用一个非线性混合整数多目标规划模型表示, 即

$$\min \sum_{i=1}^m |z_i - s_i|, \quad (14)$$

$$\max \sum_{i=1}^m s_i. \quad (15)$$

$$\text{s.t. } s_i = \sum_{j=1}^n q_{ij} t_{ij}; \quad (16)$$

$$\bar{p}_i = \frac{\sum_{j=1}^n p_{ij} q_{ij} t_{ij}}{s_i}; \quad (17)$$

$$z_i = \begin{cases} \mu_i + \sigma_i \ln \frac{2(v_i - \bar{p}_i)}{\lambda_i(v_i - o_i)}, \\ \bar{p}_i \geq \frac{(2 - \lambda_i)v_i + \lambda_i o_i}{2}; \\ \mu_i - \sigma_i \ln 2 \left[1 - \frac{v_i - \bar{p}_i}{\lambda_i(v_i - o_i)} \right], \\ \bar{p}_i < \frac{(2 - \lambda_i)v_i + \lambda_i o_i}{2}; \end{cases} \quad (18)$$

$$\left(\sum_{i=1}^m q_{ij} t_{ij} - \sum_{i=1}^m q_{ij} \right) \left(\sum_{i=1}^m q_{ij} t_{ij} \right) = 0, \quad \forall j \in N_{II}; \quad (19)$$

$$0 \leq t_{ij} \leq 1, \quad \forall i \in M, j \in N_I; \quad (20)$$

$$t_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in M, j \in N_{II}; \quad (21)$$

$$p_{ij}, q_{ij} \geq 0, \quad \forall i \in M, j \in N; \quad (22)$$

$$m, n \geq 2, k \geq 1 \text{ 且 } m, n, k \in \mathbf{Z}_+. \quad (23)$$

在上述规划中, 式(14)和(15)是目标函数, 式(16)~(23)是约束条件. 式(14)表示最小化政府预期采购量与企业总供给量的差值. 式(15)表示最大化企业的总供给量. 式(16)是每个周期应急物资供给量的表达式, 也代表了每个周期政府的实际采购量. 式(17)是每个周期中标企业平均价格的表达式. 式(18)代表了每个周期政府预期采购量与中标企业平均价格的关系. 式(19)代表II型竞拍者的约束条件, 即中标数量要么等于投标数量, 要么等于0. 式(20)代表I型竞拍者的中标情况, 允许取0至1之间的任何数. 若

t_{ij} 为小数,则表示企业不完全中标,中标数量是投标数量与 t_{ij} 的乘积. 式(21)代表II型竞拍者的中标情况,由一个0-1变量表示. $t_{ij} = 0$ 表示II型竞拍者未中标; $t_{ij} = 1$ 表示II型竞拍者中标. 式(22)表示企业的投标数量和投标单价非负. 式(23)表示周期数量和企业数量都是正整数,并且周期和企业数量至少为2个,I型竞拍者的数量至少为1个,代表了多物品和多类型竞拍者的特征.

4 数值算例

在我国,粮食安全是国家安全的重要基础. 统计数据表明,2022年前三季度中国受到了大规模洪涝、干旱、风雹、低温冷冻等灾害的影响,农作物受灾面积达到11617千公顷^[26]. 在这种情况下,粮食储备就成为维护社会稳定与应对突发事件的重要保障. 因此,下面以成品粮的代储服务交易为背景,设计了一个数值算例对实际情况进行模拟,直观展现本文提出的逆向组合拍卖机制,验证机制的有效性和适用性.

假设某地每年都会受到不同程度洪涝灾害的影响,为了保障成品粮(以大米为例)的日常供应与救灾需要,当地政府寻求本地粮油企业提供代储服务. 政府部门决定采用拍卖的方式确定代储合作企业. 由于大米的保质期在12个月左右,而按照地方储备粮的管理办法,成品粮的轮换周期一般不超过一年,所以设置每个周期的代储时间跨度为10个月. 考虑到政府各项工作的规划均以5年为基准,所以代储年限定为5年,分为6个储备周期,即 $m = 6$,每个周期结束后进行一次物资轮换. 政府会根据本地历史受灾情况、人口变动、经济状况、防灾减灾水平等因素对需求数量和物资价值进行估计,并确定出每个周期的相关参数数值,如表1所示.

在表1中, μ_i 的单位为kt,由于它代表的是政府期望采购并存储的应急物资数量,在实际中政府可以根据自身制定的规划或计划确定具体的数值. σ_i 是政府需求拉普拉斯分布的尺度参数, λ_i 是 σ_i 的衍生参数,所以它们决定了政府需求的概率分布. σ_i 越小,

表1 政府决策相关参数

	μ_i	σ_i	λ_i	v_i	o_i
周期1	3.0	1.1	1.03	10.2	2.3
周期2	3.1	1.2	1.04	10.0	2.1
周期3	3.2	1.2	1.04	10.3	2.3
周期4	3.2	1.3	1.04	10.1	2.1
周期5	3.3	1.4	1.05	10.3	2.2
周期6	3.4	1.5	1.05	10.1	2.0

说明政府越倾向于采购并存储期望数量的物资; σ_i 越大,说明政府越容易灵活选择采购数量. 因此,政府在实际中可以根据对期望采购数量的把握程度确定参数的数值. v_i 和 o_i 的单位为百万元/kt,由于 v_i 代表政府的单位预算, o_i 代表单位残值收益,在实际中政府可以根据资金与市场情况确定具体数值.

拍卖公告发出后,共有10家符合资质要求的企业参与拍卖,其中I型企业的数量为7个,II型企业的数量为3个,即 $n = 10, k = 7$. 通过对大米市场进行调研发现,每吨大米的出厂价在4000元左右,所以设置大米的生产成本区间为[2.5, 5],存储成本区间为[1.5, 3],总成本区间为[4, 8],即 $a = 2.5, \bar{a} = 5, b = 1.5, \bar{b} = 3, c = 4, \bar{c} = 8$,单位是千元/t. 企业对当期和未来的产能变化、订单分配、经济波动、技术进步等情况预测未来的生产成本与存储成本,并确定自己的报价和供给数量,最终提交投标方案. 表2展示了每个企业的生产成本与存储成本,表3展示了企业的投标数量与投标价格.

在表2和表3中,企业1~企业7为I型竞拍者,企业8~企业10为II型竞拍者. 表2中每个单元格前面的数字代表生产成本,后面的数字代表存储成本. 表3中每个单元格前面的数字代表投标数量,其范围在500t~1000t之间;后面的数字代表投标价格,由成本计算所得. 为了模拟不投标的情况,随机选取20个单元格设置成本、数量和价格均为0. 表格中的数据在实践中可以用实际数值替代.

表2 企业成本数值

	企业1	企业2	企业3	企业4	企业5	企业6	企业7	企业8	企业9	企业10
周期1	4.2,2.6	4.8,2.8	0,0	4.0,2.4	5.0,2.9	4.6,2.7	4.1,2.7	0,0	3.8,2.4	4.3,2.4
周期2	3.3,2.1	0,0	3.4,2.4	0,0	3.4,2.6	3.3,2.4	2.9,2.1	0,0	2.8,1.7	0,0
周期3	0,0	4.3,2.5	0,0	4.5,2.5	3.5,2.6	0,0	4.4,2.9	4.8,2.7	4.0,2.3	4.3,2.4
周期4	0,0	3.8,1.9	3.8,2.5	2.9,2.0	0,0	3.5,2.2	0,0	4.1,2.1	3.2,1.9	0,0
周期5	4.7,2.7	4.6,2.7	3.9,2.8	3.8,2.6	4.7,2.7	0,0	0,0	4.9,2.9	0,0	4.5,2.3
周期6	3.9,2.4	0,0	3.3,2.1	0,0	0,0	3.0,2.3	3.8,2.0	3.9,2.0	0,0	3.9,1.9

表3 企业投标方案

	企业1	企业2	企业3	企业4	企业5	企业6	企业7	企业8	企业9	企业10
周期1	750,6.86	840,7.62	0,0	980,6.49	860,7.91	720,7.34	790,6.86	0,0	730,6.31	570,6.77
周期2	820,5.61	0,0	910,5.95	0,0	960,6.13	800,5.86	750,5.28	0,0	820,4.91	0,0
周期3	0,0	770,6.87	0,0	950,7.05	980,6.22	0,0	810,7.34	660,7.53	740,6.40	670,6.77
周期4	0,0	900,5.86	780,6.40	840,5.17	0,0	870,5.86	0,0	750,6.31	860,5.31	0,0
周期5	830,7.43	900,7.34	850,6.77	780,6.49	930,7.43	0,0	0,0	790,7.81	0,0	530,6.87
周期6	880,6.40	0,0	990,5.61	0,0	0,0	920,5.48	950,5.95	720,6.04	0,0	710,5.95

根据各企业的投标方案和竞胜标原则,编写 matlab 程序进行求解,运行 100 次后取最优值,可以得到企业的中标矩阵为

$$T_{m \times n} = \begin{bmatrix} 0.99 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.99 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.94 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.79 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0.94 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

通过中标矩阵,明确中标方案为:

- 第1个周期中标的企业集合: {1, 4, 9, 10};
- 第2个周期中标的企业集合: {1, 6, 7, 9};
- 第3个周期中标的企业集合: {2, 5, 9, 10};
- 第4个周期中标的企业集合: {2, 4, 6, 9};
- 第5个周期中标的企业集合: {2, 3, 4, 10};
- 第6个周期中标的企业集合: {3, 6, 7, 10}.

中标方案表明,在所有 40 个投标单元中,共有 19 个全部中标单元,5 个不完全中标单元,16 个未中标单元. 中标企业的价格范围在 4.90~7.34 之间. 在所有企业中,只有企业 8 没有中标单元. 根据表 2、表 3 和中标方案,可以发现以下规律:

- 1) 企业生产物资和代储物资的总成本越高,它的投标价格也越高,说明投标价格随总成本的增加而增加;
- 2) 企业总成本越高,投标价格与总成本之间的差值越小,所以投标价格与总成本之间的关系是非线性的,说明企业的单位利润随总成本的增加而减小;
- 3) 每一周期不完全中标企业的投标价格比所有完全中标企业低,同时比所有未中标企业高,说明竞胜标决定原则可以按照投标价格从低到高的顺序选择中标企业;
- 4) 结合前面几条规律,可以推断总成本越低的企业中标可能性越大,说明拍卖机制具有经济效率.

根据中标方案汇总的统计数据如表 4 所示. 由表 4 可以看出,每个周期政府预期采购量与企业供给量

之间的差值均不超过 100 t,说明求解结果精确.

表4 周期相关数据汇总

	z_i	s_i	$ z_i - s_i $	\bar{p}_i
周期 1	2.864	2.926	0.062	6.581
周期 2	3.240	3.156	0.084	5.411
周期 3	3.082	3.086	0.004	6.529
周期 4	3.329	3.353	0.024	5.546
周期 5	2.984	3.028	0.044	6.879
周期 6	3.435	3.423	0.012	5.725
合计	18.934	18.972	0.230	6.112

表 4 的结果揭示了以下规律:

- 1) 其他条件相同的情况下,如果中标企业的平均价格处于高位水平,则政府采购数量会较低;
- 2) 企业供给总量并不会随着平均价格的升高而增加,因为存在拍卖目标的限制;
- 3) 前文提出的规律表明,较高的平均价格水平代表较高的总体成本水平,由于企业单位利润与成本是负相关关系,同时较高的价格水平导致较低的供给数量,可以推断企业群体的成本水平越高,获利(单位利润×供给数量)越低.

综上所述,较高的成本水平对政府与企业都不利.

5 结论

本文着眼于应急物资政企联合储备模式,设计了一个逆向组合拍卖机制来确定应急物资采购及代储服务的交易价格和交易数量. 研究表明,拍卖机制可以迅速达成供需匹配关系,有利于合理配置存储资源并激励市场交易. 与相关领域现有研究相比,本文的创新性主要体现在以下几个方面:

- 1) 将应急物资采购及代储服务抽象为拍卖交易的商品,将交易周期总数抽象为商品的数量,赋予了交易商品加性可分割的特征. 这样一来,本文提出的拍卖机制突破了以往只能有一个胜出者的限制,能够一次性达成政府与多个企业在多个周期下的合作,节

省多次开展交易活动的成本和费用.

2) 通过一个报童模型建立了政府预期采购数量与企业投标价格之间的关系,揭示了政府决策行为与整个拍卖活动的关联性.

3) 将企业代储成本分为物资生产成本与存储成本两部分,并通过二维随机分布模型推导出了企业代储成本的累积分布函数.在此基础上,针对应急物资代储服务不容易定价的问题,提出了企业的投标策略,方便企业更为科学地定价.

4) 在政府预期采购数量与企业投标价格之间关系的基础上,提出了以供需偏差最小化和供给数量最大化为目标的竞胜标决定原则,便于政府有效选择合作企业,增加采购数量,降低采购成本.

本文设计的逆向组合拍卖机制具有较强的理论价值和良好的应用前景,能够广泛应用于应急管理实践.根据本文的研究,可以为政府与企业提供以下几点对策建议:

1) 如果政府想要实际采购的应急物资数量达到期望水平,则需要掌握本地企业物资生产及库存的基本价格水平,做好资金预算,避免预算过低和拍卖价格水平过高导致采购数量低于期望数量.

2) 政府应该建立代储企业公示制度,在社会中树立企业积极履行社会责任的良好形象,激励更多企业参与到代储服务的拍卖活动中,增加竞拍企业间的竞争效应,降低政府采购的价格水平.

3) 企业应该提高技术水平降低生产成本,同时引入科学化管理模式降低库存管理成本,从而在达标的前提下压缩应急物资生产及代储总成本.因此,可以减少投标价格,提高获胜可能性,还可以增加单位利润,争取更高利益.

4) 如果企业不能保证全部或大部分预期投标周期的成本都较低,则不建议选择“与”投标方式,因为具有较高成本的某些投标周期会拉动整体投标价格的升高,容易导致全部不中标.

本文运用拍卖理论对应急物资联合储备的问题进行了初步的探索,充分展现了将拍卖理论应用于应急管理领域的可行性与优越性.然而,本文仍然存在一些可以继续深化和拓展的方面.例如,本文在数值算例部分提出的一些对政府和企业决策产生影响的因素还停留在推测的层面上,后续将开展计量研究探讨实际的影响效果.再如,本文仅仅着眼于一种类型的商品,后续研究将增加应急物资的种类,并着重研究它们之间的可替代关系与互补性关系,设计一个更为聚焦且深入的组合拍卖机制.

参考文献(References)

- [1] 央视网. 48小时10库调空:中央救灾物资储备大考[EB/OL]. (2008-05-24)[2022-06-16]. <http://news.cctv.com/financial/20080524/101856.shtml>.
- [2] Wang X H, Fan Y, Liang L, et al. Augmenting fixed framework agreements in humanitarian logistics with a bonus contract[J]. *Production and Operations Management*, 2019, 28(8): 1921-1938.
- [3] 扈衷权, 田军, 冯耕中. 基于数量柔性契约的双源应急物资采购定价模型[J]. *中国管理科学*, 2019, 27(12): 100-112.
(Hu Z Q, Tian J, Feng G Z. The pricing model of emergency supplies under quantity flexible contracts with dual purchasing sources[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2019, 27(12): 100-112.)
- [4] Zhang L. Emergency supplies reserve allocation within government-private cooperation: A study from capacity and response perspectives[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 154: 107171.
- [5] 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 government and two suppliers based on option contracts and suppliers' profits allocation mechanism[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2020, 28(8): 162-171.)
- [6] Aghajani M, Torabi S A, Heydari J. A novel option contract integrated with supplier selection and inventory prepositioning for humanitarian relief supply chains[J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2020, 71: 100780.
- [7] Gao X N, Tian J. Multi-period incentive contract design in the agent emergency supplies reservation strategy with asymmetric information[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 120: 94-102.
- [8] Wilson R. A bidding model of perfect competition[J]. *Review of Economic Studies*, 1977, 44: 511-518.
- [9] Milgrom P R. Auctions and bidding: A primer[J]. *Journal of Economic Perspectives*, 1989, 3: 3-22.
- [10] Ertem M, Buyurgan N, Rossetti M. Multiple-buyer procurement auctions framework for humanitarian supply chain management[J]. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 2010, 40(3): 202-227.
- [11] Ertem M A, Buyurgan N, Pohl E A. Using announcement options in the bid construction phase for disaster relief procurement[J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2012, 46(4): 306-314.
- [12] Shokr I, Ali Torabi S. An enhanced reverse auction framework for relief procurement management[J].

- International Journal of Disaster Risk Reduction, 2017, 24: 66-80.
- [13] Bagchi A, Aliyas Paul J, Maloni M. Improving bid efficiency for humanitarian food aid procurement[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 134(1): 238-245.
- [14] Qian X H, Chan F T S, Yin M Q, et al. A two-stage stochastic winner determination model integrating a hybrid mitigation strategy for transportation service procurement auctions[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 149: 106703.
- [15] Xu S X, Huang G Q, Cheng M. Truthful, budget-balanced bundle double auctions for carrier collaboration[J]. Transportation Science, 2017, 51(4): 1365-1386.
- [16] 祁宁, 汪定伟. XOR标集的逆向组合拍卖的获胜者确定问题[J]. 系统工程学报, 2013, 28(6): 748-755. (Qi N, Wang D W. Winner determination problem in reverse combinatorial auction with XOR bids[J]. Journal of Systems Engineering, 2013, 28(6): 748-755.)
- [17] Mansouri B, Hassini E. Optimal pricing in iterative flexible combinatorial procurement auctions[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 277(3): 1083-1097.
- [18] Paulsen P, Bichler M, Kokott G M. The beauty of Dutch: Bidding behavior in combinatorial first-price procurement auctions[J]. European Journal of Operational Research, 2021, 291(2): 711-721.
- [19] Briskorn D, Jørnsten K, Zeise P. A pricing scheme for combinatorial auctions based on bundle sizes[J]. Computers & Operations Research, 2016, 70: 9-17.
- [20] Krishna V. Auction theory[M]. Salt Lake City: American Academic Press, 2002.
- [21] Milgrom P R. Discovering prices: Auction design in markets with complex constraints[M]. New York: Columbia University Press, 2017.
- [22] 柴亚光, 李芃萱. 考虑储备周期的应急物资柔性采购模型[J]. 管理学报, 2021, 18(7): 1068-1075. (Chai Y G, Li P X. Flexible procurement model for government's emergency supplies considering reserve period[J]. Chinese Journal of Management, 2021, 18(7): 1068-1075.)
- [23] 林琪, 赵秋红, 倪冬梅. 考虑关联与替代关系的应急物资储备量模型[J]. 管理科学学报, 2018, 21(8): 112-126. (Lin Q, Zhao Q H, Ni D M. Decision-making model for emergency material reserve considering correlation and substitution[J]. Journal of Management Sciences in China, 2018, 21(8): 112-126.)
- [24] 张炜健, 施先亮, 黄安强, 等. 重大公共卫生事件下应急药品储备方式优化分配策略[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(1): 110-122. (Zhang W J, Shi X L, Huang A Q, et al. Optimal allocation policies for emergency medicine reserve methods against major public health events[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2022, 42(1): 110-122.)
- [25] Riley J G, Samuelson W. Optimal auctions[J]. American Economic Review, 1981, 71(3): 381-392.
- [26] 中华人民共和国应急管理部. 应急管理部发布2022年前三季度全国自然灾害情况[EB/OL]. (2022-10-10)[2022-11-23]. https://www.mem.gov.cn/xw/yiglbgzdt/202210/t20221010_423761.shtml.

作者简介

张萌(1994—), 男, 博士后, 从事国民经济动员、应急管理研究, E-mail: mgcerulean@mail.tsinghua.edu.cn;

孔昭君(1963—), 男, 研究员, 博士, 从事国防动员、国防经济学等研究, E-mail: Kongzi@bit.edu.cn.