

doi: 10.19920/j.cnki.jmsc.2023.09.008

# 疫苗制造企业投入决策模型与供应链优化<sup>①</sup>

蔡建湖<sup>1,2</sup>, 张玉洁<sup>2</sup>, 周青<sup>1\*</sup>, 宣丽园<sup>2</sup>, 胡晓青<sup>1</sup>

(1. 杭州电子科技大学数据科学与智能决策实验中心, 杭州 310018; 2. 浙江工业大学管理学院, 杭州 310023)

**摘要:** 产出与需求不确定是疫苗供应链面临的重要挑战. 本研究构建由一个疫苗制造商和一个疫苗零售商(疾控中心和接种单位)组成的三阶段博弈模型, 重点分析了疫苗制造商的最优投入决策, 以及供应链成员的定价和采购策略. 在此基础上, 引入供应链契约来提升疫苗供应链对不确定环境的响应能力. 研究表明, 合理的补贴契约和期权契约设计均能够改进疫苗供应链成员之间的协作机制, 降低产出与需求不确定带来的影响, 实现供应链性能的帕累托改进, 保证疫苗的高效供应.

**关键词:** 疫苗供应链; 产出不确定; 多阶段博弈; 契约设计

**中图分类号:** F272 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2023)09-0141-17

## 0 引言

近年来爆发的重大突发公共卫生事件使得疫苗的研发和量产问题受到广泛关注. 目前, 我国针对重大突发公共卫生事件的疫苗制造能力整体实力较强, 总是能够在有限的时间内及时满足民众的接种需求并且是免费接种的<sup>②③</sup>. 但是, 疫苗的研发与制造往往会经历一个曲折的过程<sup>①</sup>. 从历史上看, 疫苗不仅研发周期长、难度大, 且研发成功后的生产运营面临着巨大挑战<sup>④</sup>. 可以说疫苗研发、生产、采购和接种的整个过程中, 每一个环节都至关重要. 特别是疫苗的生产过程, 对环境要求十分苛刻, 生产工艺高度复杂, 这不可避免地导致了疫苗实际产出与预期的偏差. 例如, 细胞培养灭活疫苗的生产工艺有几十道流程, 其中多道流程需要灭菌生产并对温度有严格的要求, 任何一个环节的出错都有可能部分或整个批次的疫苗不合格<sup>②</sup>. 因此, 疫苗制造商在不确定环境下

的投入决策是一个重要的管理问题. 本研究将疫苗在生产过程中的产出波动称为产出不确定, 并引入由疫苗制造商和疫苗零售商(实际上涵盖了疾控中心和接种单位)组成的两级供应链, 以疫苗制造商在不确定环境下的最优投入决策为研究核心, 构建多阶段博弈模型, 在此基础上设计契约方案来优化疫苗供应链的性能.

本研究重点关注二类疫苗, 这类疫苗未列入国家免疫范畴, 为自费疫苗, 预防的疾病往往具有突发性和不可估计性等特点, 例如流感疫苗<sup>③</sup>. 因此, 二类疫苗制造商不仅面临着产出不确定, 还受到市场需求不确定的影响, 且往往在完成生产之后再定价. 以流感疫苗为例, 每年2月底至3月初, WHO(World Health Organization)会发布北半球流感病毒毒株类型, 我国流感疫苗制造商在获得毒株信息后立即投入生产<sup>④</sup>. 等6月—7月的时间, 流感疫苗生产结束后, 疫苗制造商向中国食品药品检定研究院提出批签发申请. 根据2016年

① 收稿日期: 2020-07-11; 修订日期: 2021-10-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71972171; 71572184; 72202052; 71932005).

通讯作者: 周青(1979—), 男, 湖南株洲人, 博士, 教授, 博士生导师. Email: zhq7980@126.com

② 中国网: [https://www.miit.gov.cn/gzcy/zbft/art/2021/art\\_39019819fec4fb99565f4b0683e81ca.html](https://www.miit.gov.cn/gzcy/zbft/art/2021/art_39019819fec4fb99565f4b0683e81ca.html).

③ 新华社: [https://www.miit.gov.cn/xwdt/szyw/art/2021/art\\_52fccfa0cc8542e1ad5f7181f977a2d4.html](https://www.miit.gov.cn/xwdt/szyw/art/2021/art_52fccfa0cc8542e1ad5f7181f977a2d4.html).

④ 人民网: <http://opinion.people.com.cn/n1/2018/0722/c1003-30162482.html>.

国务院修订的《疫苗流通和预防接种管理条例》，二类疫苗获得签发后，由省级疾控中心组织在省级公共资源交易平台集中采购，由县级疾控中心向疫苗制造商采购后供应给本行政区域内的接种单位。其中，省级疾控中心组织集中采购的方式有直接挂网、招标等。以浙江省为例，疫苗制造商在确定疫苗的采购价格（批发价格）后，参与省级疾控中心组织的招标，由省级疾控中心确定中标的疫苗制造商、品种等，并与疫苗制造商签订中标合同（包含采购价格）。县级疾控中心根据中标结果与疫苗制造商签订采购供应合同，最后通过专业的物流公司将疫苗配送至各行政区域的接种单位<sup>⑤⑥⑦</sup>。

由此可知，流感疫苗制造商通常需要在不确定环境下做出生产投入决策，待疫苗生产完成后再确定批发价，最后由县级疾控中心确定流感疫苗的订购数量。除了流感疫苗，其他疫苗的运作流程也有类似特征。例如，2020年初，尽管针对重大突发公共卫生事件的疫苗仍处于研发阶段，但国药集团中国生物技术股份有限公司仍在北京建成了当时全球最大的疫苗生产车间<sup>⑧</sup>。由此可知，在有效疫苗研发出来前，一些疫苗制造商已经提前投入部分资源，为全面生产做好了准备。这实际上也说明疫苗制造商在决定生产投入时通常面临着巨大的产出与需求不确定。因此，本研究重点关注疫苗制造商在产出与需求不确定环境下的投入决策问题，进一步分析不确定因素消除后疫苗制造商的定价决策，以及疫苗零售商的采购策略。

当前，许多学者对产出不确定环境下的供应链管理问题进行了相关研究。Cai等<sup>[5]</sup>在产出与需求不确定环境下，求解了VMI（vendor-managed inventory）模式下供应商的最优投入决策，并引入期权契约来协调供应链。He和Zhang<sup>[6]</sup>搭建了包含由一个产出随机的供应商和一个零售商组成的两级供应链系统，通过模型分析发现，在某些特定契约方案下，产出不确定可能会降低双边化效应并提高供应链性能。于建红等<sup>[7]</sup>考虑了由两个供应商和单个制造商组成的供应链，在供需不确

定环境下比较分析了MOI（manufacturer owned inventory）和VMI两种模式下的供应链协同模型，发现VMI模式在协调供应链和降低供需不确定影响等方面更有效。Güler<sup>[8]</sup>在装配系统中考虑了产出不确定风险，并引入四种不同的契约来协调装配系统。蔡建湖等<sup>[9]</sup>构建由单个供应商和两个零售商组成的供应链，研究了产出不确定环境下供应链成员的最优投入和定价决策。进一步讨论供应商向零售商提供供货承诺时的竞争模型，发现供货承诺在一定条件下可以提升供应链性能。黄河等<sup>[10]</sup>通过构建由单个上游高技术零部件供应商和单个下游制造商组成的供应链，对面临随机产出风险时，上游高技术零部件供应商采用独占、授权和共享这三种专利运作策略下供应链成员的最优决策进行了比较分析。总体而言，产出不确定环境下的供应链竞争模型可分成两类：1）产出不确定但需求确定的供应链竞争模型；2）产出与需求均不确定的供应链竞争模型。特别地，供应链契约是改进产出不确定环境下供应链性能的重要手段<sup>[11]</sup>。上述研究中，大部分学者关注了单阶段或两阶段的供应链竞争决策问题，较少涉及三阶段博弈。

部分学者关注疫苗行业，构建了产出不确定环境下的竞争模型。Cho<sup>[3]</sup>考虑美国流感疫苗供应链面临的产出与需求不确定问题，研究由社会计划者和疫苗制造商组成的两阶段动态博弈模型。在博弈第一阶段，社会计划者做出疫苗菌株选择（保留、更改或推迟）；在博弈第二阶段，疫苗制造商决定目标生产数量。作者求解了疫苗菌株选择和后续生产数量的最优动态策略。Deo和Charles<sup>[12]</sup>也针对美国的流感疫苗行业，构建了产出不确定环境下疫苗制造商之间的Cournot竞争模型。研究表明一定程度的产出不确定能够吸引更多的企业进入疫苗行业；但当产出不确定程度超出某一阈值后，即使社会计划者希望更多的企业参与疫苗生产以降低产出不确定带来的影响，疫苗行业对企业而言已经不再具有吸引力。

⑤ 中华人民共和国中央人民政府：[http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-04/25/content\\_5067597.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-04/25/content_5067597.htm).

⑥ 搜狐网：[https://www.sohu.com/a/296875762\\_118622](https://www.sohu.com/a/296875762_118622).

⑦ 中国政府采购网：[http://www.ccgp.gov.cn/df/zhejiang/201706/t20170601\\_8316442.htm](http://www.ccgp.gov.cn/df/zhejiang/201706/t20170601_8316442.htm).

⑧ 搜狐网：[https://www.sohu.com/a/412278602\\_703120](https://www.sohu.com/a/412278602_703120).

Cho 和 Tang<sup>[13]</sup> 将疫苗制造商的产能设计成一个外生变量, 分析了产出与需求不确定环境下疫苗供应链的三种销售策略: 动态销售策略、提前销售策略和常规销售策略. 通过对比三种策略下供应链成员的期望利润, 作者分析了不同条件下三种策略的优劣性. 为降低竞争过程中产生的双边际化效应, 目前已有部分研究通过设计供应链契约来优化疫苗供应链的性能. Shamsi 等<sup>[14]</sup> 为应对伊朗可能发生的大型突发性灾难制定了一项疫苗应急供应计划. 他们以疫苗购买商的采购和社会成本最小化为目标, 设计了一个特定的期权契约, 用于支持疫苗购买商从两家疫苗供应商(主供应商和后备供应商)处采购疫苗. Dai 等<sup>[15]</sup> 考虑美国流感疫苗供应链中的交货时间不确定问题, 构建了由单个疫苗制造商和单个疫苗零售商组成的两级供应链, 其中疫苗制造商可以采用提前生产和常规生产两种模式. 为了激励疫苗制造商提前生产, 保证疫苗的及时供应, 设计了交货时间相关的数量柔性契约以及回购和延迟补偿联合契约来协调供应链. Chick 等<sup>[16]</sup> 研究了美国流感疫苗供应链, 假设疫苗的产出率信息是疫苗制造商的私有信息, 构建了由制造商和政府组成的疫苗供应链. 政府必须采取激励措施(设计契约清单)来获取制造商的私有信息, 从而最大化社会效益. 黄远良等<sup>[17]</sup> 同样考虑了流感疫苗产出率信息的不对称问题, 构建了一个由一个产出不确定疫苗供应商和一个社会计划者组成的供应链. 其中, 社会计划者在离散情形时仅知道产出率的部分信息, 而在集中控制情形时知道产出率的全部信息. 他们在分析了上述两种情形后, 提出用短缺惩罚与成本分享契约来协调供应链. 类似的研究还可以在 Chick 等<sup>[18]</sup> 和 Adida 等<sup>[19]</sup> 的工作中观察到.

不同于上述研究, 本研究结合我国二类疫苗供应链的实际生产运作流程, 重点关注以下两个方面的管理问题: 一是分析产出与需求不确定环境下疫苗制造商的投入决策, 以及产出与需求确定后供应链成员的定价和采购策略; 二是结合我国疫苗供应链的实际情况, 设计合理的契约方案来提升疫苗供应链的整体性能. 通过对比现有理论研究, 创新点可概括如下: 1) 当前一些研究假设疫苗制造商会释放其最大产能进行投入生产, 并将产能设计成一个外生变量<sup>[13, 20]</sup>. 本研究结合

我国疫苗行业的现状, 假设疫苗制造商会根据实际情况做出理性的生产投入计划, 并将生产投入假设为一个内生变量. 这样的研究思路更符合目前我国疫苗供应链生产运作的实际情况, 由此获得的结论能更好地指导实践; 2) 为降低疫苗供应链中的双边际化效应, 提升供应链成员的利润, 本研究引入补贴契约和期权契约来增强成员之间的合作. 研究结果表明, 本文设计的两种契约均能实现供应链性能的帕累托改进; 3) 本研究提供的多样化契约设计方案能够适应疫苗供应链多样化的运作管理现状, 可操作性强, 有利于构建面向疫苗供应链的切实可行的合作机制.

## 1 基础模型

考虑由单个疫苗制造商和单个疫苗零售商(包含疾病预防控制中心和接种单位)组成的两级供应链, 制造商生产疫苗并通过零售商将疫苗销售给消费者. 假设疫苗制造商面临产出不确定, 即如果计划投入量为  $Q$ , 则实际产出为  $\tilde{\theta}Q$ . 其中,  $\tilde{\theta}$  为随机产出率, 且服从区间  $\tilde{\theta} \in [0, 1]$  内的任意分布. 令  $f(\tilde{\theta})$  和  $F(\tilde{\theta})$  分别为  $\tilde{\theta}$  的概率密度函数和累积分布函数. 每投入一单位疫苗, 制造商所需支付的单位生产成本为  $c$ . 类似于 Cho 和 Tong<sup>[13]</sup>, 假设市场的逆需求函数为  $p = 1 + \tilde{\varepsilon} - X$ . 这里,  $p$  为零售价格,  $1 + \tilde{\varepsilon}$  表示市场需求潜量, 其中  $\tilde{\varepsilon}$  为需求的随机组成部分, 反映了需求的波动性. 假设  $\tilde{\varepsilon}$  服从区间  $[\underline{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}]$  内的任意分布,  $\bar{\varepsilon}$  越大, 则说明需求的波动程度越大. 令  $g(\tilde{\varepsilon})$  和  $G(\tilde{\varepsilon})$  分别为  $\tilde{\varepsilon}$  的概率密度函数和累积分布函数.  $E[\tilde{\varepsilon}] = 0$ , 即期望需求潜量为  $E[1 + \tilde{\varepsilon}] = 1$ .  $X$  表示疫苗零售商的订购量. 根据 Cho 和 Tang<sup>[13]</sup>、Chod 和 Rudi<sup>[21]</sup> 以及 Erhun 等<sup>[22]</sup> 采用的库存出清规则, 这里假设疫苗零售商不保留库存. 因此,  $X$  即为实际出售的疫苗数量. 另外, 每订购一单位疫苗, 零售商所需支付的批发价为  $w$ . 特别地, 本研究假设  $\tilde{\theta}$  和  $\tilde{\varepsilon}$  相互独立. 如果  $\tilde{\theta}$  和  $\tilde{\varepsilon}$  已知, 则分别表示为  $\theta$  和  $\varepsilon$ .

基于以上假设, 疫苗制造商和疫苗零售商之

间的竞争过程可描述如下(见图1).

- 1) 在产出与需求不确定下(即  $\tilde{\theta}$  和  $\tilde{\varepsilon}$  均不确定), 疫苗制造商决定投入量  $Q$ ;
- 2) 疫苗制造商完成生产, 观察到实际产出

$\theta Q$ , 此时  $\varepsilon$  也随之确定. 在此基础上, 疫苗制造商向疫苗零售商确定批发价  $w$ ;

- 3) 给定疫苗批发价  $w$ , 并结合考虑实际产出  $\theta Q$ , 疫苗零售商确定订购量  $X$ .

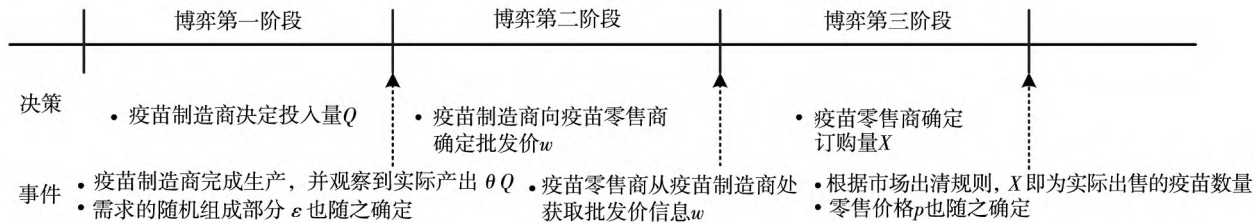


图1 疫苗供应链的动态博弈过程

Fig. 1 The dynamic game process of vaccine supply chain

本研究采用逆向归纳法来分析上述博弈模型. 在博弈第三阶段, 给定批发价  $w$ , 且观察到实际产出  $\theta Q$  和需求潜量  $1 + \varepsilon$  时, 疫苗零售商确定最优的订购量. 此时, 疫苗零售商的利润函数可表示为

$$\pi_R(X) = (1 + \varepsilon - X - w)X \quad (1)$$

显然, 最大化式(1)的订购量为  $X = \frac{1 + \varepsilon - w}{2}$ .

但是, 疫苗零售商需要对比  $X = \frac{1 + \varepsilon - w}{2}$  与实际产出  $\theta Q$  的大小, 来确定最终订购量. 因此, 疫苗零售商的最优订购量  $X^*$  为

$$X^* = \begin{cases} \frac{1 + \varepsilon - w}{2}, & \frac{1 + \varepsilon - w}{2} < \theta Q \\ \theta Q, & \frac{1 + \varepsilon - w}{2} \geq \theta Q \end{cases} \quad (2)$$

此时, 最优零售价格  $p^*$  随之确定, 即为

$$p^* = \begin{cases} \frac{1 + \varepsilon + w}{2}, & \frac{1 + \varepsilon - w}{2} < \theta Q \\ 1 + \varepsilon - \theta Q, & \frac{1 + \varepsilon - w}{2} \geq \theta Q \end{cases} \quad (3)$$

根据式(2)和式(3)可得, 当供货充足 ( $\frac{1 + \varepsilon - w}{2} < \theta Q$ ) 时, 疫苗零售商的最优订购量  $X^*$  是关于批发价  $w$  的递减函数, 而最优零售价格  $p^*$  是关于批发价  $w$  的递增函数. 这是符合直觉的, 疫苗制造商提高批发价会导致疫苗零售商的采购成本上升, 因此零售商会通过减少订购量和提高零售价格来应对批发价上涨带来的风险. 而当供货不足 ( $\frac{1 + \varepsilon - w}{2} \geq \theta Q$ ) 时, 疫苗实际产出有

限, 最优订购量  $X^*$  和最优零售价格  $p^*$  只与实际产出  $\theta Q$  相关.

在博弈第二阶段, 观察到实际产出  $\theta Q$  和需求潜量  $1 + \varepsilon$ , 并预料到疫苗零售商的最优订购量  $X^*$  后, 疫苗制造商确定最优的批发价. 此时, 疫苗制造商的利润函数可表示为

$$\pi_M(w, Q) = \begin{cases} \frac{w(1 + \varepsilon - w)}{2} - cQ, & w > 1 + \varepsilon - 2\theta Q \\ w\theta Q - cQ, & w \leq 1 + \varepsilon - 2\theta Q \end{cases} \quad (4)$$

通过对式(4)进行分析, 可得疫苗制造商的最优批发价  $w^*$  为

$$w^* = \begin{cases} \frac{1 + \varepsilon}{2}, & \frac{1 + \varepsilon}{4} < \theta Q \\ 1 + \varepsilon - 2\theta Q, & \frac{1 + \varepsilon}{4} \geq \theta Q \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)可得, 当供货充足 ( $\frac{1 + \varepsilon}{4} < \theta Q$ ) 时, 疫苗制造商的最优批发价  $w^*$  是关于需求潜量  $1 + \varepsilon$  的递增函数; 而当供货不足 ( $\frac{1 + \varepsilon}{4} \geq \theta Q$ ) 时, 疫苗制造商的最优批发价  $w^*$  不仅随需求潜量  $1 + \varepsilon$  递增, 还随实际产出  $\theta Q$  递减. 这是因为, 疫苗零售商会随疫苗需求的增加而增加订购量. 而疫苗制造商预料到零售商的这种行为, 当疫苗供应充足时, 其会随之提升批发价, 以获得更高的利润; 当疫苗供应不足时, 疫苗制造商的批发价决策与订购量无关, 而是结合实际产出做出合理的决策.

在博弈第一阶段, 当疫苗制造商预料到其最

优批发价决策  $w'$  和疫苗零售商的最优订购量决策  $X'$  后, 在实际产出  $\tilde{\theta}Q$  和需求潜量  $1 + \tilde{\varepsilon}$  均不确定的情况下, 决定最优的投入量. 此时, 疫苗制造商的利润函数可表示为

$$\pi_M(w', Q) = \begin{cases} \frac{(1 + \tilde{\varepsilon})^2}{8} - cQ, & \tilde{\theta}Q > \frac{1 + \tilde{\varepsilon}}{4} \\ (1 + \tilde{\varepsilon} - 2\tilde{\theta}Q)\tilde{\theta}Q - cQ, & \tilde{\theta}Q \leq \frac{1 + \tilde{\varepsilon}}{4} \end{cases} \quad (6)$$

为获得该阶段疫苗制造商期望利润函数  $E_{\tilde{\varepsilon}, \tilde{\theta}}[\pi_M(w', Q)]$  的表达式, 首先对式 (6) 涉及的随机变量  $\tilde{\theta}$  和  $\tilde{\varepsilon}$  进行分析. 如图 2 所示, 分别以  $\tilde{\varepsilon}$  和  $\tilde{\theta}$  为横纵坐标, 并根据  $\tilde{\varepsilon}$  和  $\tilde{\theta}$  的取值范围得到一个矩形. 因此, 矩形内的任意一点表示  $\tilde{\varepsilon}$  和  $\tilde{\theta}$  的取值可能出现的一种组合, 整个矩形则表示所有可能出现的组合. 当  $\tilde{\varepsilon}$  和  $\tilde{\theta}$  满足  $\tilde{\theta}Q > \frac{1 + \tilde{\varepsilon}}{4}$ , 即  $\tilde{\theta} > \frac{1 + \tilde{\varepsilon}}{4Q}$  时, 疫苗制造商的利润函数为  $\pi_M(w', Q) = \frac{(1 + \tilde{\varepsilon})^2}{8} - cQ$ , 该利润函数出现的概率即为图 2 (a) 或图 2 (b) 中 (i) 的面积占整个矩形面积的比例.

例; 当  $\tilde{\varepsilon}$  和  $\tilde{\theta}$  满足  $\tilde{\theta}Q \leq \frac{1 + \tilde{\varepsilon}}{4}$ , 即  $\tilde{\theta} \leq \frac{1 + \tilde{\varepsilon}}{4Q}$  时, 疫苗制造商的利润函数为  $\pi_M(w', Q) = (1 + \tilde{\varepsilon} - 2\tilde{\theta}Q)\tilde{\theta}Q - cQ$ , 该利润函数出现的概率即为图 2 (a) 或图 2 (b) 中 (ii) 的面积占整个矩形面积的比例. 特别地, 若直线  $\tilde{\theta} = \frac{1 + \tilde{\varepsilon}}{4Q}$  与矩形相交的位置不同, 会导致  $E_{\tilde{\varepsilon}, \tilde{\theta}}[\pi_M(w', Q)]$  的最终表达式不同: 1) 当  $\tilde{\theta} = \frac{1 + \tilde{\varepsilon}}{4Q}$  位于  $\tilde{\theta} = \frac{1 + \tilde{\varepsilon}}{1 + \tilde{\varepsilon}}$  下方, 即满足图 2 (a) 中  $l_1$  与  $L$  的相对位置关系时, 易得  $Q > \frac{1 + \tilde{\varepsilon}}{4}$ , 此时疫苗制造商的期望利润函数由下文的情形 I 确定; 2) 当  $\tilde{\theta} = \frac{1 + \tilde{\varepsilon}}{4Q}$  位于  $\tilde{\theta} = \frac{1 + \tilde{\varepsilon}}{1 + \tilde{\varepsilon}}$  上方, 即满足图 2 (b) 中  $l_2$  与  $L$  的相对位置关系时, 易得  $Q \leq \frac{1 + \tilde{\varepsilon}}{4}$ , 此时疫苗制造商的期望利润函数由下文的情形 II 确定. 接下来, 本研究通过构建两种情形下疫苗制造商的期望利润函数, 分析其最优投入决策.

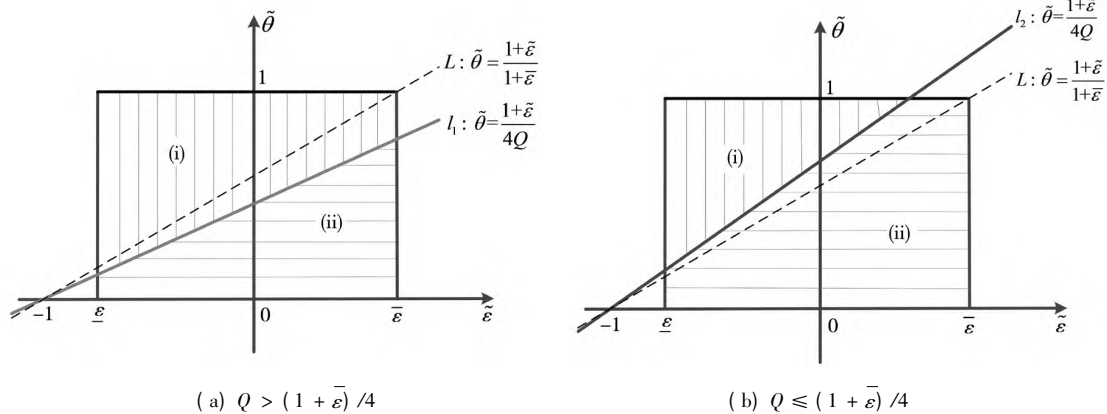


图 2 博弈第一阶段疫苗制造的利润函数分布情况

Fig. 2 The distribution of the profit function of vaccine manufacturer in the first stage of the game

**情形 I** 当疫苗制造商认为  $Q > \frac{1 + \tilde{\varepsilon}}{4}$  时, 其期望利润函数为

$$E_{\tilde{\varepsilon}, \tilde{\theta}}[\pi_M^I(w', Q)] = \int_{\underline{\varepsilon}}^{\bar{\varepsilon}} \int_{\frac{1 + \tilde{\varepsilon}}{4Q}}^1 \frac{(1 + \tilde{\varepsilon})^2}{8} f(\tilde{\theta}) g(\tilde{\varepsilon}) d\tilde{\theta} d\tilde{\varepsilon} - cQ +$$

$$\int_{\underline{\varepsilon}}^{\tilde{\varepsilon}} \int_0^{\frac{1 + \tilde{\varepsilon}}{4Q}} (1 + \tilde{\varepsilon} - 2\tilde{\theta}Q)\tilde{\theta}Q f(\tilde{\theta}) g(\tilde{\varepsilon}) d\tilde{\theta} d\tilde{\varepsilon}$$

易得  $\frac{\partial^2 E_{\tilde{\varepsilon}, \tilde{\theta}}[\pi_M^I(w', Q)]}{\partial Q^2} < 0$ . 令  $\frac{\partial E_{\tilde{\varepsilon}, \tilde{\theta}}[\pi_M^I(w', Q)]}{\partial Q} = 0$ , 可得最大化  $E_{\tilde{\varepsilon}, \tilde{\theta}}[\pi_M^I(w', Q)]$  的  $Q$  满足

$$\int_{\underline{\varepsilon}}^{\bar{\varepsilon}} \int_0^{\frac{1+\bar{\varepsilon}}{4Q'}} [(1+\tilde{\varepsilon})\tilde{\theta} - 4\tilde{\theta}^2 Q'] f(\tilde{\theta}) g(\tilde{\varepsilon}) d\tilde{\theta} d\tilde{\varepsilon} = c \tag{7}$$

情形 II 当疫苗制造商认为  $Q \leq \frac{1+\bar{\varepsilon}}{4}$  时, 其期望利润函数为

$$E_{\varepsilon, \beta}^{\wedge} [\pi_M^{\text{II}}(w', Q)] = \int_{4Q'-1}^{\bar{\varepsilon}} \int_0^1 (1+\tilde{\varepsilon}-2\tilde{\theta}Q) \tilde{\theta} Q f(\tilde{\theta}) g(\tilde{\varepsilon}) d\tilde{\theta} d\tilde{\varepsilon} - cQ + \int_{\underline{\varepsilon}}^{4Q'-1} \int_{\frac{1+\bar{\varepsilon}}{4Q'}}^1 \frac{(1+\tilde{\varepsilon})^2}{8} f(\tilde{\theta}) g(\tilde{\varepsilon}) d\tilde{\theta} d\tilde{\varepsilon} + \int_{\underline{\varepsilon}}^{4Q'-1} \int_0^{\frac{1+\bar{\varepsilon}}{4Q'}} (1+\tilde{\varepsilon}-2\tilde{\theta}Q) \tilde{\theta} Q f(\tilde{\theta}) g(\tilde{\varepsilon}) d\tilde{\theta} d\tilde{\varepsilon}$$

易得  $\frac{\partial^2 E_{\varepsilon, \beta}^{\wedge} [\pi_M^{\text{II}}(w', Q)]}{\partial Q^2} < 0$ . 令  $\frac{\partial E_{\varepsilon, \beta}^{\wedge} [\pi_M^{\text{II}}(w', Q)]}{\partial Q} = 0$ , 可得最大化  $E_{\varepsilon, \beta}^{\wedge} [\pi_M^{\text{II}}(w', Q)]$  的  $Q^*$  满足

$$\int_{\underline{\varepsilon}}^{4Q^*-1} \int_0^{\frac{1+\bar{\varepsilon}}{4Q^*}} [(1+\tilde{\varepsilon})\tilde{\theta} - 4\tilde{\theta}^2 Q^*] f(\tilde{\theta}) g(\tilde{\varepsilon}) d\tilde{\theta} d\tilde{\varepsilon} + \int_{4Q^*-1}^{\bar{\varepsilon}} \int_0^1 [(1+\tilde{\varepsilon})\tilde{\theta} - 4\tilde{\theta}^2 Q^*] f(\tilde{\theta}) g(\tilde{\varepsilon}) d\tilde{\theta} d\tilde{\varepsilon} = c \tag{8}$$

综合以上分析, 博弈第一阶段中疫苗制造商的最优投入决策如命题 1 所示.

命题 1 令  $\Omega = \int_{\underline{\varepsilon}}^{\bar{\varepsilon}} \int_0^{\frac{1+\bar{\varepsilon}}{1+\bar{\varepsilon}}} [(1+\tilde{\varepsilon})\tilde{\theta} - (1+\tilde{\varepsilon})\tilde{\theta}^2] f(\tilde{\theta}) g(\tilde{\varepsilon}) d\tilde{\theta} d\tilde{\varepsilon}$ , 则疫苗制造商的最优投入量  $Q^*$  为 (a) 当  $c < \Omega$  时  $Q^* = Q'$ , 且  $Q^* >$

$\frac{1+\bar{\varepsilon}}{4}$ ; (b) 当  $c \geq \Omega$  时  $Q^* = Q''$ , 且  $Q^* \leq \frac{1+\bar{\varepsilon}}{4}$ .<sup>⑨</sup>

为更好地说明命题 1 的结论, 本文用图 3 来展示疫苗制造商的期望利润函数  $E_{\varepsilon, \beta}^{\wedge} [\pi_M(w', Q)]$  随  $Q$  的变动情况. 其中,  $E_{\varepsilon, \beta}^{\wedge} [\pi_M(w', Q)]$  由两部分实线组成: 带标记的实线表示  $E_{\varepsilon, \beta}^{\wedge} [\pi_M^{\text{II}}(w', Q)]$  随  $Q$  的变动情况, 不带标记的实线表示  $E_{\varepsilon, \beta}^{\wedge} [\pi_M^{\text{I}}(w', Q)]$  随  $Q$  的变动情况. 通过解析证明可知,  $E_{\varepsilon, \beta}^{\wedge} [\pi_M^{\text{I}}(w', Q)]$  和  $E_{\varepsilon, \beta}^{\wedge} [\pi_M^{\text{II}}(w', Q)]$  在  $Q = \frac{1+\bar{\varepsilon}}{4}$  处连续且具有相同的斜率. 因此, 可进一步得到以下结论: (a) 当  $Q = \frac{1+\bar{\varepsilon}}{4}$  处的斜率为正数 ( $c < \Omega$ ) 时,  $Q^* = Q'$ , 且满足  $Q^* > \frac{1+\bar{\varepsilon}}{4}$ , 具体如图 3(a) 所示; (b) 当  $Q = \frac{1+\bar{\varepsilon}}{4}$  处的斜率为非正数 ( $c \geq \Omega$ ) 时,  $Q^* = Q''$ , 且满足  $Q^* \leq \frac{1+\bar{\varepsilon}}{4}$ , 具体如图 3(b) 所示.

命题 1 表明, 疫苗制造商与疫苗零售商之间的博弈存在唯一的子博弈精炼纳什均衡解  $\{Q^*, w^*, X^*\}$ . 需要说明的是, 疫苗的最优批发价  $w^*$  和最优订购量  $X^*$  分别由疫苗制造商和疫苗零售商在产出与需求确定后依次决定, 而疫苗的最优投入量  $Q^*$  则是由疫苗制造商在产出与需求不确定环境下获得. 类似于 Cho 和 Tang<sup>[13]</sup>, 本研究从事前的视角, 用期望值来讨论疫苗供应链成员关于批发价和订购量的最优决策, 并分别表达成最优期望批发价  $E[w^*]$  和最优期望订购量  $E[X^*]$ .

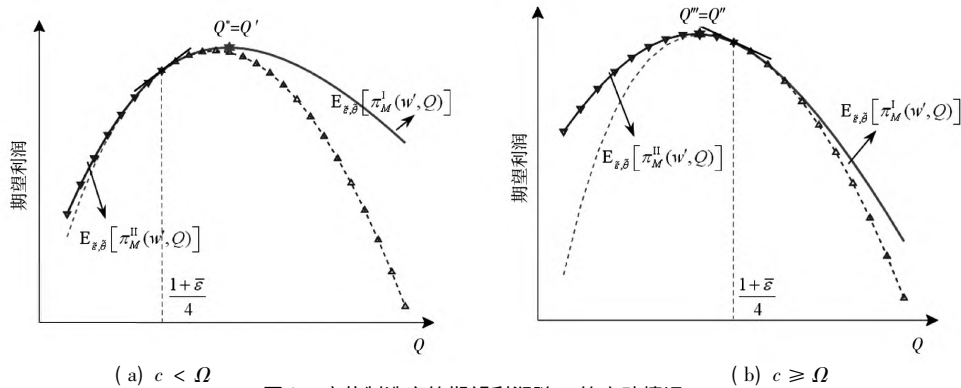


图 3 疫苗制造商的期望利润随  $Q$  的变动情况  
Fig. 3 The expected profit of vaccine manufacturer changes with  $Q$

⑨ 如需证明过程, 可联系作者邮箱获取.

由命题1可知,疫苗制造商的最优投入量 $Q^*$ 与单位生产成本 $c$ 密切相关:当单位生产成本相对较低( $c < \Omega$ )时,疫苗制造商的最优投入量相对较大( $Q^* > \frac{1+\bar{\varepsilon}}{4}$ ),并且由式(7)确定;当单位生产成本相对较高( $c \geq \Omega$ )时,疫苗制造商的最优投入量相对较小( $Q^* \leq \frac{1+\bar{\varepsilon}}{4}$ ),并且由式(8)确定.在以往有关投入(或库存)决策的研究中,大多数研究得到的最优投入(或库存)量由唯一一个反应函数确定,并据此分析最优投入量(或库存量)与单位生产成本之间的关系<sup>[23-25]</sup>.这些研究均发现较高的单位生产成本会导致决策者选择较低的最优投入量(或库存量).本研究针对疫苗供应链的产出与需求不确定环境,获得了类似但又有差异性的结论.这里的差异性是指本文得到的最优投入量根据单位生产成本的高低由两个不同的反应函数确定,而相同点是最优投入量均随单位生产成本的增加而降低.由此可见,高生产成本导致低投入量的问题广泛存在于不同行业及不同供应链运作机制中.例如,《北京科技报》关于脊灰疫苗的一篇报道中指出,低成本更容易实现脊灰疫苗量产<sup>[26]</sup>.

命题2 (a) 疫苗制造商的最优投入量 $Q^*$ 和最优期望利润 $E_{\varepsilon, \theta}[\pi_M(w^*, Q^*)]$ 随单位生产成本的递增而单调递减,而最优期望批发价 $E[w^*]$ 随单位生产成本 $c$ 的递增而单调递增;(b) 疫苗零售商的最优期望订购量 $E[X^*]$ 和最优期望利润 $E_{\varepsilon, \theta}[\pi_R(X^*)]$ 均随单位生产成本 $c$ 的递增而单调递减<sup>⑩</sup>.

由命题2可知,在产出与需求不确定环境下,疫苗制造商的最优投入量、最优期望批发价、以及最优期望利润均受到单位生产成本的影响.当疫苗的单位生产成本较高时,疫苗制造商会选择一个较为保守的投入量,并适当提高批发价,以减轻其在生产运营过程中面临的高投资风险;而当疫苗的生产成本较低时,疫苗制造商的投资风险较小,此时会降低批发价,并选择一个较高的投入量,以期通过提高销售量来获得更高的利润.例如,杨智杰和李明子<sup>[27]</sup>通过调研狂犬疫苗后指

出,控制原材料成本是疫苗制造企业抢占市场和利润的重要方式.然而,也有研究得出了相反的结论.例如,穆昕等<sup>[28]</sup>从产品差异化角度构建了一个双寡头竞争模型,其中厂商1(厂商2)生产的产品为污染产品(清洁产品).研究发现,当厂商2的产品环境质量提高(生产成本也随之增加)时,厂商2的收益也会增加.由此可见,当产品质量和生产成本相关时,生产成本增加不一定会降低企业利润;相反地,一些企业可能通过实行产品质量差异化策略获得更高的利润.对处于供应链下游的疫苗零售商而言,其最优决策和最优期望利润也会受到单位生产成本的影响.疫苗的单位生产成本增加时,疫苗制造商会随之提高疫苗的批发价,当观察到制造商的这种行为后,疫苗零售商会通过减少疫苗的订购量来应对.但命题2表明即使调整了订购量,疫苗零售商的最优期望利润仍随单位生产成本的递增而单调递减.由此可见,在博弈过程中,上游的疫苗制造商能通过竞争在一定程度上将成本压力转移给下游的疫苗零售商,以缓冲单位生产成本上涨带来的影响.总体而言,在基础模型中,疫苗制造商和疫苗零售商之间处于完全竞争的关系,每个成员均基于最大化自身利润的角度进行决策,因此存在双边际化效应,供应链的整体性能存在着可改进的空间.

## 2 供应链契约设计

从疫苗制造商的视角来看,在疫苗的研发和量产过程中,急需外界的资金支持,以缓解其在疫苗研发和生产过程中面临的巨大资金压力和库存压力;从疫苗供应链整体的视角来看,如何改进成员间的协作机制,保证疫苗的及时有效供应是解决当前疫苗供需不匹配问题的关键.下文中补贴契约和期权契约的设计核心就是让疫苗零售商提早介入到疫苗制造商的投入决策中,通过支付补贴或者期权的方式向疫苗制造商事先支付部分费用,支持疫苗制造商在不确定环境下的生产投入,降低成员之间由于竞争造成的双边际化效应.事

⑩ 如需证明过程,可联系作者邮箱获取.

实上,目前许多国家的政府和机构组织都加大了对疫苗制造商的扶持,为疫苗的研发和量产提供了大量资金支持<sup>[29,30]</sup>.与政府直接补贴疫苗制造商有所区别的是,本研究设计的契约方案是从供应链的视角出发,依托处于供应链核心地位的疾控中心对疫苗制造商进行激励.这样的契约方案避免了政府只是单纯地补贴疫苗制造商,而是引导政府通过疾控中心这样的专业机构来影响疫苗制造商的投入决策和定价决策,并利用疾控中心与疫苗制造商之间的竞争与协调机制来实现供应链整体性能的提升.疾控中心作为事业单位,其与政府进行紧密合作是可能的,并且疾控中心还能集成与调动疫苗接种单位的积极性,最终以一个更积极的角色与疫苗制造商进行合作与交易,这是提升疫苗供应链性能的有效途径.

### 2.1 补贴契约设计

假设补贴因子为  $\lambda$ ,即疫苗零售商需要在销售开始前对疫苗制造商的每单位投入支付补贴  $\lambda$ .同时,为防范疫苗制造商的道德风险,参考叶飞等<sup>[31]</sup>的研究,假设疫苗制造商需要在销售开始前向疫苗零售商交纳一定的保证金  $D$ .为了体现契约参数设计的灵活性,将补贴因子和保证金假定为外生变量,在此基础上分析引入补贴契约后供应链成员的最优决策.在供应链的实际运作过程中,这两个参数可以由供应链中的某个成员单独决定,也可以由成员双方共同协商决定,而参数的最终决定权与供应链成员的实际议价能力有关.

根据补贴契约,在销售开始前,疫苗零售商需要为疫苗制造商的所有投入量  $Q$  支付补贴  $\lambda Q$ ,同时疫苗制造商需要向疫苗零售商支付保证金  $D$ ;在销售开始时,根据市场需求和实际产出,疫苗制造商确定批发价  $w$ ,然后疫苗零售商选择订购量  $X$ .这里为保证疫苗制造商不会因为亏损而退出供应链的运作, $c < \lambda + w$  必须成立.基于以上假设可知,给定补贴契约时,疫苗制造商和疫苗零售商之间的竞争过程类似于基础模型.

结合考虑  $\Omega = \int_{\underline{\varepsilon}}^{\bar{\varepsilon}} \int_0^{\frac{1+\bar{\varepsilon}}{1+\underline{\varepsilon}}} [(1+\underline{\varepsilon})\tilde{\theta} - (1+\underline{\varepsilon})\tilde{\theta}^2]f(\tilde{\theta})g(\underline{\varepsilon})d\tilde{\theta}d\underline{\varepsilon}$ ,并参考命题1的求解,可得

在补贴契约中,疫苗制造商的最优投入量如命题3所示.

**命题3** 在补贴契约中,疫苗制造商的最优投入量  $Q_a^*$  为(a)当  $c - \lambda < \Omega$  时,  $Q_a^* = Q_a'$ ,且  $Q_a^* > \frac{1+\bar{\varepsilon}}{4}$ ; (b)当  $c - \lambda \geq \Omega$  时,  $Q_a^* = Q_a''$ ,且

$$Q_a^* \leq \frac{1+\bar{\varepsilon}}{4}. \text{ 这里, } Q_a' \text{ 满足 } \int_{\underline{\varepsilon}}^{\bar{\varepsilon}} \int_0^{\frac{1+\bar{\varepsilon}}{4Q_a'}} [(1+\underline{\varepsilon})\tilde{\theta} - 4\tilde{\theta}^2 Q_a']f(\tilde{\theta})g(\underline{\varepsilon})d\tilde{\theta}d\underline{\varepsilon} = c - \lambda, Q_a'' \text{ 满足 } \int_{\underline{\varepsilon}}^{\bar{\varepsilon}} \int_0^{\frac{1+\bar{\varepsilon}}{4Q_a''}} [(1+\underline{\varepsilon})\tilde{\theta} - 4\tilde{\theta}^2 Q_a'']f(\tilde{\theta})g(\underline{\varepsilon})d\tilde{\theta}d\underline{\varepsilon} + \int_{\frac{1+\bar{\varepsilon}}{4Q_a''}}^{\bar{\varepsilon}} [(1+\underline{\varepsilon})\tilde{\theta} - 4\tilde{\theta}^2 Q_a'']f(\tilde{\theta})g(\underline{\varepsilon})d\tilde{\theta}d\underline{\varepsilon} = c - \lambda.$$

命题3的证明过程与命题1类似,这里予以省略.令  $\{Q_a^*, w_a^*, X_a^*\}$  表示补贴契约中供应链成员之间的子博弈精炼纳什均衡解,  $E_{\underline{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}}[\Phi_M(w_a^*, Q_a^*)]$  和  $E_{\underline{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}}[\Phi_R(X_a^*)]$  分别表示疫苗制造商和疫苗零售商的最优期望利润.本文发现,引入补贴契约后,疫苗制造商的最优期望批发价仍随单位生产成本的递增而单调递增,且最优投入量和最优期望利润仍随单位生产成本的递增而单调递减.由此可见,生产成本仍然是疫苗制造商需要重点关注的管理问题,其很难完全将成本压力通过与疫苗零售商之间的竞争转移出去.与基础模型中有所区别的是,疫苗零售商的最优期望利润不完全随单位生产成本的增加而单调递减,具体原因将在下文的数值实验部分进行详细说明.另外,命题3也表明,除了单位生产成本,补贴契约中的最优投入量  $Q_a^*$  还与补贴因子  $\lambda$  有关.命题4反映了补贴因子对疫苗制造商的最优决策和最优期望利润的影响.

**命题4** 疫苗制造商的最优投入量  $Q_a^*$  随补贴因子  $\lambda$  单调递增,而最优期望批发价  $E[w_a^*]$  随补贴因子  $\lambda$  单调递减<sup>①</sup>.

由命题4可知,在补贴契约中,补贴因子  $\lambda$  的引入进一步缓解了疫苗制造商的成本压力.有了补贴因子的支持,疫苗制造商在做生产投入决策

① 如需证明过程,可联系作者邮箱获取.



时会更加乐观. 同时, 随着补贴因子的增加, 疫苗制造商也会适当降低向疫苗零售商收取的批发价, 以期通过增加销售量来获得更高的利润. 事实上, 类似的研究结论也可以通过与基础模型比较得到支撑, 如命题5所示.

**命题5**  $Q_a^* > Q^*$ ,  $E[w_a^*] < E[w^*]$ ,  $E[X_a^*] > E[X^*]$  ①.

命题5表明, 相对于基础模型, 引入补贴契约后, 无论契约参数  $\lambda$  取何值, 疫苗制造商的最优投入量均有所增加. 同时, 结合命题4可知, 补贴因子  $\lambda$  越大, 疫苗制造商的最优投入量的提升程度越高. 因此, 补贴契约的引入总体上降低了疫苗制造商的压力, 有可能会提升其获利能力. Cai等<sup>[5]</sup>和叶飞等<sup>[31]</sup>的研究也有类似结论, 但提供补贴的方式和本文不同. Cai等<sup>[5]</sup>将补贴契约设置为零售商对VMI供应商季末未销售完的产品进行补贴. 叶飞等<sup>[31]</sup>研究的“公司+农户型”订单农业供应链模型中, 补贴方式为: 对农户生产的所有农产品, 公司都按照销售价格的一定百分比进行补贴. 总体上看, 不论何种补贴方式, 本质上都是协调供应链上下游成员的一种手段. 通过特定的补贴契约, 补贴才能在一定程度上分担被补贴方的投资风险, 缓解被补贴方的资金压力. 事实上, 补贴契约不仅有利于疫苗制造商, 在一定条件下也有利于疫苗零售商. 从疫苗零售商的视角看, 引入补贴契约后: 一方面, 疫苗制造商向其收取的批发价会降低; 另一方面, 随着投入量的增加, 疫苗制造商的实际产出也会得到增加. 因此疫苗零售商能获得更大的订购量选择空间, 其满足市场需求的能力也变得更强. 由此可见, 补贴契约虽然是疫苗零售商提供给疫苗制造商的, 但是疫苗制造商通过制定较高的投入量和较低的批发价在一定程度上弥补了疫苗零售商由于补贴造成的损失.

### 2.2 期权契约设计

期权契约包含期权价格  $o$  和执行价格  $e$  两个参数. 类似于补贴契约, 本文将期权契约的参数假定为外生变量, 且这两个参数可以由供应链中的某个成员单独决定, 也可以由双方成员共同协商

确定. 根据期权契约, 在销售开始前, 疫苗零售商需要对疫苗制造商的所有投入量  $Q$  支付总期权价格  $oQ$ ; 在销售开始时, 根据市场需求和实际产出, 疫苗零售商确定订购量  $X$ , 并为其最终的订购量  $X$  向疫苗制造商支付总执行价格  $eX$ . 为确保双方成员都参与到供应链的运作中, 且疫苗制造商不会无限制生产疫苗,  $o < c < o + e < p$  必须成立. 基于以上假设, 期权契约中供应链成员之间的竞争过程可描述如下.

1) 根据给定的期权契约, 在产出与需求不确定环境下, 疫苗制造商决定投入量  $Q$ ;

2) 疫苗制造商完成生产, 并观察到实际产出  $\theta Q$ , 此时  $\varepsilon$  也随之确定. 在此基础上, 疫苗零售商确定最优的订购量  $X$ .

该博弈过程是一个两阶段博弈. 利用逆向归纳法进行分析, 可得期权契约中疫苗制造商的最优投入量如命题6所示.

**命题6** 令  $K = e \int_{\underline{\varepsilon}}^{\bar{\varepsilon}} \int_0^{\frac{1+\bar{\varepsilon}-e}{1+e-e}} \tilde{\theta} f(\tilde{\theta}) g(\tilde{\varepsilon}) d\tilde{\theta} d\tilde{\varepsilon}$ ,

则期权契约中疫苗制造商的最优投入量  $Q_b^*$  为:

(a) 当  $K > c - o$  时,  $Q_b^* = Q_b'$ , 且  $Q_b^* > \frac{1+\bar{\varepsilon}-e}{2}$ ;

(b) 当  $K \leq c - o$  时,  $Q_b^* = Q_b''$ , 且  $Q_b^* \leq$

$\frac{1+\bar{\varepsilon}-e}{2}$ . 这里  $Q_b'$  满足  $e \int_{\underline{\varepsilon}}^{\bar{\varepsilon}} \int_0^{\frac{1+\bar{\varepsilon}-e}{2Q_b'}} \tilde{\theta} f(\tilde{\theta}) g(\tilde{\varepsilon}) d\tilde{\theta} d\tilde{\varepsilon}$

$\tilde{\varepsilon} = c - o$ ,  $Q_b''$  满足  $e \int_{\underline{\varepsilon}}^{2Q_b''+e-1} \int_0^{\frac{1+\bar{\varepsilon}-e}{2Q_b''}} \tilde{\theta} f(\tilde{\theta}) g(\tilde{\varepsilon}) d\tilde{\theta} d\tilde{\varepsilon} +$

$e \int_{2Q_b''+e-1}^{\bar{\varepsilon}} \int_0^1 \tilde{\theta} f(\tilde{\theta}) g(\tilde{\varepsilon}) d\tilde{\theta} d\tilde{\varepsilon} = c - o$ .

命题6的证明过程与命题1类似, 这里予以省略. 令  $\{Q_b^*, X_b^*\}$  表示期权契约中供应链成员之间的子博弈精炼纳什均衡解,  $E_{\varepsilon, \theta}^{\wedge}[\Gamma_M(Q_b^*)]$  和  $E_{\varepsilon, \theta}^{\wedge}[\Gamma_R(X_b^*)]$  分别表示期权契约中疫苗制造商和疫苗零售商的最优期望利润函数. 根据命题6可知, 引入期权契约后, 疫苗制造商的最优投入量和最优期望利润均随单位生产成本  $c$  的递增而单

① 如需证明过程, 可联系作者邮箱获取

调递减,但随期权价格  $o$  的递增而单调递增. 该结论表明,在期权契约中,疫苗制造商仍然面临着成本压力,但可以通过期权价格  $o$  的引入得到缓解. 特别地,疫苗零售商的最优期望订购量也随期权价格的递增而单调递增. 这一结论反映了较高的期权价格不仅能激励疫苗制造商增加投入量,也能鼓励零售商订购更多的疫苗,进而满足更多的潜在市场需求. 此外,供应链成员的最优决策还受到执行价格  $e$  的影响. 同时,根据利润函数可知,疫苗供应链成员的最优期望利润均受到期权价格和执行价格的影响. 根据以上分析可知,期权契约的引入存在着提升供应链性能的可能性. 作为金融领域的衍生产品,期权契约在供应链采购中已经得到了广泛应用. 例如,苏宁通过使用期权契约降低库存持有量<sup>[32]</sup>,惠普公司的采购(按价值计算)有 35% 是通过期权契约进行的<sup>[33]</sup>.

### 2.3 契约性能的比较分析

本节通过数值实验,以期进一步探索如下问题: ①补贴契约和期权契约中是否存在帕累托改进区间,使各成员的期望利润均获得提升; ②参数的变动如何影响各成员的最优结果(即最优决策和最优期望利润); ③两种契约之间存在哪些共性与差异性.

#### 2.3.1 两种契约下的帕累托改进区间

类似于 Cho 和 Tang<sup>[13]</sup>,假设随机产出率  $\tilde{\theta}$  服从区间  $\tilde{\theta} \in [0, 1]$  内的均匀分布,需求的随机组成部分  $\tilde{\varepsilon}$  服从区间  $\tilde{\varepsilon} \in [\underline{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}]$  内的均匀分布(以上假设在全文中保持一致). 令  $\varpi_1 = \{\underline{\varepsilon} = -0.5000, \bar{\varepsilon} = 0.5000, \rho = 0.2500\}$ . 易得在基础模型中,疫苗制造商选择的最优投入量为  $Q^* = 0.1902$ ,最优期望批发价为  $E[w^*] = 0.8118$ ,疫苗零售商的最优期望订购量为  $E[X^*] = 0.0941$ . 此时,疫苗制造商的最优期望利润为  $E_{\varepsilon, \theta}[\pi_M(w^*, Q^*)] = 0.0235$ ,疫苗零售商的最优期望利润为  $E_{\varepsilon, \theta}[\pi_R(X^*)] = 0.0117$ .

在补贴契约中,假设补贴因子  $\lambda = 0.0200$ ,保证金  $D = 0.0025$ . 易得疫苗制造商的最优投入量为  $Q_a^* = 0.2074$ ,最优期望批发价为  $E[w_a^*] = 0.7962$ ,

疫苗零售商的最优期望订购量  $E[X_a^*] = 0.1019$ . 此时,疫苗制造商的最优期望利润为  $E_{\varepsilon, \theta}[\Phi_M(w_a^*, Q_a^*)] = 0.0250$ ,疫苗零售商的最优期望利润为  $E_{\varepsilon, \theta}[\Phi_R(X_a^*)] = 0.0121$ . 在期权契约中,假设期权价格为  $o = 0.1400$ ,执行价格  $e = 0.4200$ ,易得疫苗制造商的最优投入量为  $Q_b^* = 0.4170$ ,疫苗零售商的最优期望订购量为  $E[X_b^*] = 0.1657$ . 此时,疫苗制造商的最优期望利润为  $E_{\varepsilon, \theta}[\Gamma_M(Q_b^*)] = 0.0237$ ,疫苗零售商的最优期望利润为  $E_{\varepsilon, \theta}[\Gamma_R(X_b^*)] = 0.0127$ . 通过与基础模型的对比分析可以发现,在一定条件下,补贴契约和期权契约均能实现供应链性能的帕累托改进,即疫苗制造商和疫苗零售商的最优期望利润均得到提升. 为更精确地找出两种契约下的帕累托区间,本文进一步分析各成员的最优期望利润随契约参数的变动情况.

首先,在补贴契约中,分析疫苗制造商和疫苗零售商的最优期望利润随补贴因子  $\lambda$  的变动情况,如图 4 所示. 可知,当补贴因子  $\lambda$  在区间  $\lambda \in [0.0128, 0.0231]$  内波动时,供应链成员的最优期望利润相比于基础模型均有所提高. 在该区间内,疫苗制造商和疫苗零售商可以通过调节补贴因子  $\lambda$  来分配供应链总期望利润,并确保所有成员的期望利润都得到提升,而利润如何在两成员之间分配期望利润则取决于双方的谈判能力.

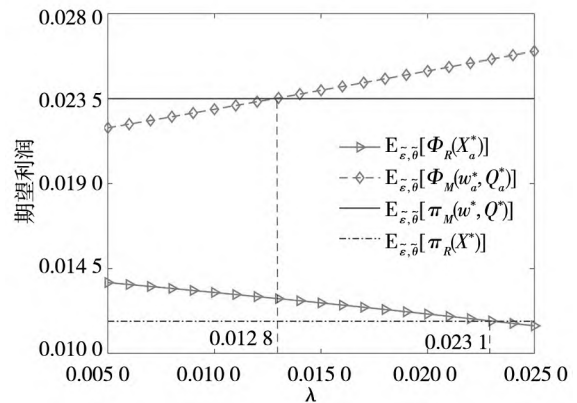
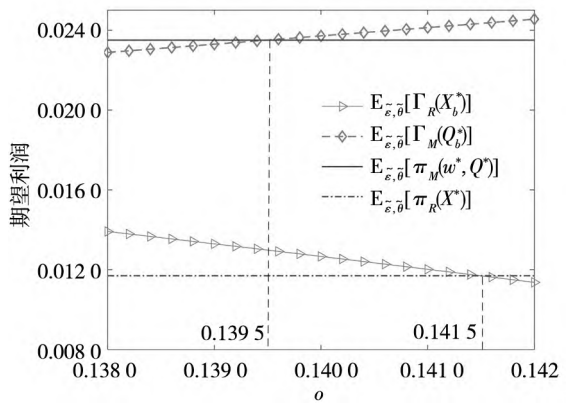


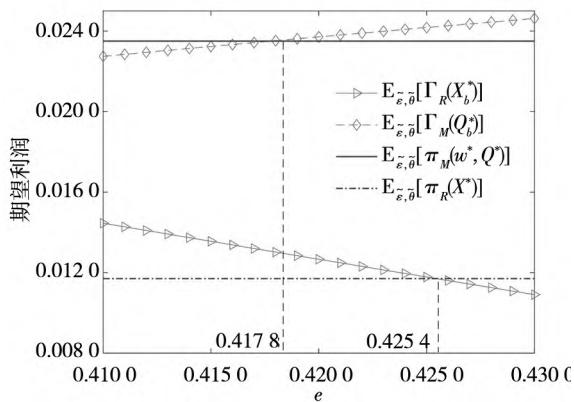
图 4 补贴契约中疫苗供应链成员最优期望利润随  $\lambda$  的变动情况  
Fig. 4 The optimal expected profits of vaccine supply chain members change with  $\lambda$  in subsidy contract

其次,在期权契约中,分析疫苗制造商和疫苗

零售商的期望利润随  $o$  和  $e$  的变动情况, 如图 5 所示. 其中, 图 5(a) 显示了给定  $e = 0.4200$  时, 供应链成员的最优期望利润随期权价格  $o$  的变动情况. 可知, 在区间  $o \in [0.1395, 0.1415]$  内, 疫苗制造商和疫苗零售商的最优期望利润均有所增加, 即供应链的整体性获得提升. 图 5(b) 显示了给定  $o = 0.1400$  时, 供应链成员的最优期望利润随执行价格  $e$  的变动情况. 可知, 当执行价格在区间  $e \in [0.4178, 0.4254]$  内波动时, 疫苗制造商和疫苗零售商的最优期望利润均有所增加, 供应链的整体性能获得提升.



(a) 最优期望利润随  $o$  的变动情况



(b) 最优期望利润随  $e$  的变动情况

图 5 期权契约中疫苗供应链成员最优期望利润随  $o$  和  $e$  的变动情况

Fig. 5 The optimal expected profits of vaccine supply chain members change with  $o$  and  $e$  in option contract

### 2.3.2 模型参数的敏感性分析

#### 1) 需求波动程度对最优结果的影响

令  $\omega_2 = \{c = 0.2800, \lambda = 0.0150, D =$

$0.0025, o = 0.1220, e = 0.5500\}$ , 本文求解了不同需求波动程度下补贴契约和期权契约的最优结果, 并分别与基础模型进行比较, 具体如表 1 所示. 可知, 给定参数条件下, 两组比较中的共性为: 需求波动程度越大, 引入契约前后最优投入量的差值越大. 由此可见, 引入契约后, 有了疫苗零售商的资金支持, 疫苗制造商将做出更加积极的投入决策. 这也进一步说明了本研究设计的契约方案在激励疫苗制造商生产投入方面的有效性. 尤其是当需求波动程度比较大时, 疫苗制造商更倾向于选择一个较高的最优投入量, 以期通过满足高需求实现高收益. 两组比较中的差异为: 当补贴契约 vs. 基础模型时, 随着需求波动程度增加, 引入契约前后疫苗制造商(疫苗零售商)最优期望利润的差值逐渐增加(减小); 而期权契约 vs. 基础模型时, 这一结论刚好相反. 这是因为, 在  $\omega_2$  的参数条件下: (a) 当补贴契约 vs. 基础模型时, 两个模型中疫苗的实际产出均大于需求. 不同于基础模型, 补贴契约中疫苗零售商需要为疫苗制造商的生产投入量提供补贴. 且随着需求波动程度的增加, 增加的疫苗投入量使疫苗制造商获得的补贴额也随之增加, 因此引入契约前后疫苗制造商最优期望利润的差值逐渐增加. 而疫苗零售商由于要支付补贴费用, 因此其最优期望利润的差值逐渐减小; (b) 当期权契约 vs. 基础模型时, 基础模型中疫苗的实际产出均大于需求, 而期权契约中疫苗的实际产出均小于需求. 因此, 在期权契约中, 随着需求波动程度的增加, 增加的疫苗投入量能让疫苗零售商获得一个更大的订购量选择空间, 其满足市场需求的能力也变得更强, 最终导致引入契约前后最优期望利润的差值逐渐增加.

#### 2) 单位生产成本对最优结果的影响

令  $\omega_3 = \{\underline{\varepsilon} = -0.5000, \bar{\varepsilon} = 0.5000, \lambda = 0.0600, D = 0.0025, o = 0.0600, e = 0.4200\}$ , 引入契约前后各成员的最优结果随单位生产成本的变动情况如表 2 所示. 可知, 基础模型、补贴契约和期权契约中疫苗制造商的最优投入量和最优

期望利润均随着单位生产成本的增加而单调递减,该结论与解析分析的结果一致.另外,值得关注的是疫苗零售商的最优期望利润随单位生产成本的变动情况:在基础模型中,最优期望利润随单位生产成本增加而单调递减;在补贴契约和期权契约中,最优期望利润与单位生产成本之间的关系不确定,也就是说,最优期望利润可能随单位生产成本的增加而增加.这是因为:(a)基础模型中,疫苗零售商不需要为疫苗的生产投入提供任何补贴.因此,投入量越高,疫苗零售商能够获得的利润越大.而单位生产成本的增加降低了疫苗的投入量,导致疫苗零售商的期望利润也随之减少.(b)在契约关系中,有了补贴因子和期权价格的约束,疫苗零售商需要为疫苗制造商的高投入量买单.因此,在一定条件下,当单位生产成本较高时,疫苗制造商选择较低的投入量反而能让疫苗零售商获得较高的利润.

### 3) 契约参数对最优结果的影响

令  $\omega_4 = \{ \underline{\varepsilon} = -0.5000, \bar{\varepsilon} = 0.5000, c = 0.2500, D = 0.0025, o = 0.0200, e = 0.4200 \}$ , 补贴契约和期权契约中各成员的最优结果随契约参数的变动情况如表 3 所示.其中,分析期权价格(执行价格)对最优结果的影响时,本文假设给定执行价格  $e = 0.4200$ ;分析执行价格对最优结果的影响时,本文假设给定期权价格  $o = 0.0200$ .由表 3 可知,补贴(期权)契约中,疫苗制造商的最优投入量和最优期望利润均随着补贴因子(期权价格)的增加而单调递增,该结论与解析分析的结果一致.另外,疫苗零售商的最优期望利润随期权价格的增加可能递增,也可能递减.这是因为,随着期权价格的增加,疫苗零售商的最优期望利润受两方面影响:(a)随期权价格递增的投入量使疫苗零售商满足市场需求的能力变得更强,进而获得更高利润的可能性增加;(b)疫苗零售商为疫苗制造商的生产投入提供的资金成本也会随之增加.由于上述两方面的双重影响,疫苗零售商的最优期望利润与期权

价格的关系是不确定的.最后,本研究重点关注各成员的最优决策和最优期望利润随执行价格的变动情况.比较反直觉的一点是,疫苗制造商的最优投入量可能随执行价格的增加而减少.这实际上反映了过高的执行价格有可能会降低疫苗零售商的订购量,最终损害疫苗制造商和疫苗零售商的利益.因此,由表 3 可知,最优投入量、最优订购量以及各成员的最优期望利润与执行价格的关系均不确定.

基于解析结论和数值实验的结果,进一步总结了本研究的主要参数(包括单位生产成本、补贴因子、期权价格和执行价格)对最优结果的影响,如表 4 所示.

### 2.3.3 两种契约的共性与差异性

1) 本研究设计的补贴契约和期权契约均能有效提升疫苗供应链的性能,且存在着相应的帕累托区间,使供应链成员能够获得比基础模型中更高的期望利润.而疫苗供应链总期望利润的具体分配方案则可以通过两成员对契约参数的协商来决定.因此,在设计补贴契约和期权契约中,通过处于供应链核心地位的疾控中心对疫苗制造商的生产进行不同形式的激励,疫苗供应链的整体性能均能获得提升.由此可见,契约设计方案对我国二类疫苗供应链性能的改善具有一定的推动作用,可以为供应链中相关成员的实际运营提供决策依据,具有重要的现实价值.

2) 期权契约是更加柔性的补贴契约形式.在补贴契约中,补贴因子  $\lambda$  是销售季节开始前疫苗零售商针对疫苗制造商所有投入量进行的补贴;而在期权契约中,期权价格  $o$  也有同样的作用,即支持了疫苗制造商的生产投入.但不同于补贴契约,本研究设计的期权契约取消了疫苗制造商的批发价决策权,以更加柔性的执行价格来影响供应链成员的期望利润.同时,如果期权契约中疫苗制造商仍然拥有批发价决策权,那么执行价格就失去了它的效力,此时期权契约的作用实际上和补贴契约一致.

表 1 不同需求波动程度下的最优结果比较：补贴(期权)契约 vs. 基础模型

Table 1 Comparison of optimal results under different degrees of demand fluctuation; Subsidy (Option) contract vs. Basic model

参数		最优结果比较									
		补贴契约 vs. 基础模型					期权契约 vs. 基础模型				
$\underline{\varepsilon}$	$\bar{\varepsilon}$	$Q_a^* - Q^*$	$E[w_a^*] - E[w^*]$	$E[X_a^*] - E[X^*]$	$E_{\delta, \theta}[\Phi_M(w_a^*, Q_a^*)] - E_{\delta, \theta}[\pi_M(w^*, Q^*)]$ ( * $10^{-3}$ )	$E_{\delta, \theta}[\Phi_R(X_a^*)] - E_{\delta, \theta}[\pi_R(X^*)]$ ( * $10^{-3}$ )	$Q_b^* - Q^*$	$E[X_b^*] - E[X^*]$	$E_{\delta, \theta}[\Gamma_M(Q_b^*)] - E_{\delta, \theta}[\pi_M(w^*, Q^*)]$	$E_{\delta, \theta}[\Gamma_R(X_b^*)] - E_{\delta, \theta}[\pi_R(X^*)]$	
-0.90	0.90	0.012 8	-0.012 7	0.006 3	0.259 9	-0.145 9	0.264 0	-0.014 1	-0.060 8	0.036 8	
-0.85	0.85	0.012 6	-0.012 6	0.006 3	0.228 2	0.013 7	0.244 4	-0.007 5	-0.050 0	0.027 7	
-0.80	0.80	0.012 4	-0.012 5	0.006 2	0.196 9	0.171 9	0.246 3	0.004 3	-0.040 7	0.019 4	
-0.75	0.75	0.012 3	-0.012 3	0.006 2	0.165 7	0.329 1	0.205 5	0.004 4	-0.031 9	0.013 8	
-0.70	0.70	0.012 1	-0.012 2	0.006 1	0.134 6	0.485 5	0.186 3	0.009 5	-0.024 4	0.008 7	
-0.65	0.65	0.012 0	-0.012 1	0.006 0	0.103 6	0.641 7	0.167 5	0.014 1	-0.017 9	0.004 8	
-0.60	0.60	0.011 9	-0.011 9	0.005 9	0.072 3	0.798 5	0.149 3	0.018 0	-0.012 4	0.001 9	
-0.55	0.55	0.011 9	-0.011 7	0.005 8	0.040 6	0.957 4	0.131 9	0.021 4	-0.007 7	-0.000 1	
-0.50	0.50	0.012 0	-0.011 5	0.005 7	0.007 6	1.121 3	0.115 9	0.024 1	-0.004 0	-0.001 3	
-0.45	0.45	0.012 6	-0.011 3	0.005 6	-0.028 1	1.296 1	0.102 4	0.026 2	-0.001 1	-0.001 8	
-0.40	0.40	0.015 2	-0.011 6	0.005 8	-0.071 8	1.496 7	0.095 4	0.028 1	0.000 7	-0.001 9	

表 2 单位生产成本对最优结果的影响

Table 2 The impact of unit production cost on optimal results

模型 参数	基础模型					补贴契约					期权契约			
	$Q^*$	$E[w^*]$	$E[X^*]$	$E_{\delta,\beta}[\pi_M(w^*, Q^*)]$	$E_{\delta,\beta}[\pi_R(X^*)]$	$Q_a^*$	$E[w_a^*]$	$E[X_a^*]$	$E_{\delta,\beta}[\Phi_M(w_a^*, Q_a^*)]$	$E_{\delta,\beta}[\Phi_R(X_a^*)]$	$Q_b^*$	$E[X_b^*]$	$E_{\delta,\beta}[\Gamma_M(Q_b^*)]$	$E_{\delta,\beta}[\Gamma_R(X_b^*)]$
$c$														
0.10	0.360 8	0.687 6	0.156 2	0.063 2	0.031 6	0.570 5	0.618 7	0.190 7	0.087 3	0.013 2	0.742 2	0.219 3	0.062 4	0.041 3
0.11	0.343 7	0.696 9	0.151 6	0.059 7	0.029 9	0.510 3	0.632 7	0.183 7	0.081 9	0.014 1	0.663 9	0.211 0	0.055 4	0.043 8
0.12	0.328 2	0.705 9	0.147 1	0.056 4	0.028 2	0.465 8	0.645 3	0.177 3	0.077 0	0.014 3	0.606 0	0.203 4	0.049 1	0.045 2
0.13	0.314 1	0.714 6	0.142 7	0.053 2	0.026 6	0.431 3	0.657 0	0.171 5	0.072 5	0.014 1	0.561 1	0.196 5	0.043 3	0.046 0
0.14	0.300 9	0.723 2	0.138 4	0.050 1	0.025 0	0.403 4	0.667 8	0.166 1	0.068 4	0.013 7	0.524 2	0.189 9	0.037 8	0.046 4
0.15	0.288 5	0.731 7	0.134 2	0.047 1	0.023 6	0.380 4	0.678 0	0.161 0	0.064 5	0.013 2	0.488 4	0.182 7	0.032 5	0.046 6
0.16	0.276 8	0.740 0	0.130 0	0.044 3	0.022 2	0.360 8	0.687 6	0.156 2	0.060 7	0.012 5	0.452 7	0.174 6	0.028 1	0.046 5
0.17	0.265 7	0.748 3	0.125 9	0.041 6	0.020 8	0.343 7	0.696 9	0.151 6	0.057 2	0.011 7	0.417 0	0.165 7	0.023 7	0.046 0
0.18	0.255 0	0.756 4	0.121 8	0.039 0	0.019 5	0.328 2	0.705 9	0.147 1	0.053 9	0.011 0	0.381 2	0.155 9	0.019 7	0.045 2
0.19	0.244 8	0.764 5	0.117 7	0.036 5	0.018 2	0.314 1	0.714 6	0.142 7	0.050 7	0.010 2	0.345 4	0.145 2	0.016 1	0.043 9
0.20	0.235 0	0.772 5	0.113 7	0.034 1	0.017 0	0.300 9	0.723 2	0.138 4	0.047 6	0.009 5	0.309 7	0.133 7	0.012 8	0.042 1

表3 契约参数对最优结果的影响

Table 3 The impacts of contract parameters on optimal results

契约参数	补贴契约				期权契约				契约参数	期权契约			
	$Q_a^*$	$E[w_a^*]$	$E[X_a^*]$	$E_{\delta,\theta}^{\Delta}[\Phi_M(w_a^*, Q_a^*)]$	$E_{\delta,\theta}^{\Delta}[\Phi_R(X_a^*)]$	$Q_b^*$	$E[X_b^*]$	$E_{\delta,\theta}^{\Delta}[\Gamma_M(Q_b^*)]$		$E_{\delta,\theta}^{\Delta}[\Gamma_R(X_b^*)]$	$Q_b^*$	$E[X_b^*]$	$E_{\delta,\theta}^{\Delta}[\Gamma_M(Q_b^*)]$
$\lambda$													
0.000	0.190 2	0.811 8	0.094 1	0.021 0	0.014 2	0.070	0.014 2	0.021 0	0.014 2	0.070	0.014 2	0.021 0	0.014 2
0.005	0.194 4	0.807 9	0.096 0	0.022 0	0.013 8	0.075	0.013 8	0.022 0	0.013 8	0.075	0.013 8	0.022 0	0.013 8
0.010	0.198 6	0.804 0	0.098 0	0.022 9	0.013 2	0.080	0.013 2	0.022 9	0.013 2	0.080	0.013 2	0.022 9	0.013 2
0.015	0.203 0	0.800 1	0.099 9	0.023 9	0.012 7	0.085	0.012 7	0.023 9	0.012 7	0.085	0.012 7	0.023 9	0.012 7
0.020	0.207 4	0.796 2	0.101 9	0.025 0	0.012 1	0.090	0.012 1	0.025 0	0.012 1	0.090	0.012 1	0.025 0	0.012 1
0.025	0.211 8	0.792 3	0.103 8	0.026 0	0.011 5	0.095	0.011 5	0.026 0	0.011 5	0.095	0.011 5	0.026 0	0.011 5
0.030	0.216 3	0.788 4	0.105 8	0.027 1	0.010 8	0.100	0.010 8	0.027 1	0.010 8	0.100	0.010 8	0.027 1	0.010 8
0.035	0.220 9	0.784 5	0.107 8	0.038 2	0.010 1	0.105	0.010 1	0.038 2	0.010 1	0.105	0.010 1	0.038 2	0.010 1
0.040	0.225 5	0.780 5	0.109 7	0.029 3	0.009 4	0.110	0.009 4	0.029 3	0.009 4	0.110	0.009 4	0.029 3	0.009 4
0.045	0.230 2	0.776 5	0.111 7	0.030 4	0.008 6	0.115	0.008 6	0.030 4	0.008 6	0.115	0.008 6	0.030 4	0.008 6

表4 模型主要参数对最优结果的影响

Table 4 The impacts of main parameters on optimal results

契约参数	基础契约				补贴契约				期权契约					
	$Q^*$	$E[w^*]$	$E[X^*]$	$E_{\delta,\theta}^{\Delta}[\pi_M(w^*, Q^*)]$	$E_{\delta,\theta}^{\Delta}[\pi_R(X^*)]$	$Q_b^*$	$E[w_a^*]$	$E[X_a^*]$	$E_{\delta,\theta}^{\Delta}[\Phi_M(w_a^*, Q_a^*)]$	$E_{\delta,\theta}^{\Delta}[\Phi_R(X_a^*)]$	$Q_b^*$	$E[X_b^*]$	$E_{\delta,\theta}^{\Delta}[\Gamma_M(Q_b^*)]$	$E_{\delta,\theta}^{\Delta}[\Gamma_R(X_b^*)]$
$c$	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
$\lambda$	/	/	/	/	/	+	-	+	+	-	/	/	/	/
$o$	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	+	+	+	±
$e$	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	±	±	±	±

注：“+”表示最优结果与参数正相关；“-”表示最优结果与参数负相关；“±”表示最优结果与参数关系不确定；“/”表示最优结果与参数不相关。

3) 从实践方面来看, 补贴契约引入到疫苗供应链中相对比较简单. 当疫苗零售商对疫苗制造商的投入量进行补贴时, 疫苗供应链成员的决策顺序没有变化, 特别是疫苗制造商仍然可以通过投入量和批发价决策对补贴因子做出反应. 因此, 补贴契约的引入对疫苗供应链总体竞争结构的影响比较小. 在实际操作过程中, 补贴契约仍然保留了疫苗制造商的批发价决策权, 只是引导疫苗零售商以更加积极的方式介入到疫苗的生产中, 从而协调疫苗供应链上下游关系, 改进供应链整体性能. 而期权契约的引入取消了疫苗制造商的批发价决策权, 改变了疫苗供应链成员之间的竞争关系, 特别是疫苗制造商只能通过投入量决策对契约参数做出反应, 这将加大契约实施的难度. 在期权契约的实际操作过程中, 由于取消了批发价决策, 疫苗制造商的投入决策对疫苗供应链整体性能的影响起着更为重要的作用, 但这种影响可以通过协商契约参数来进行调整. 事实上我国个别省份的疾控中心在二类疫苗的实际采购过程中, 对疫苗的采购价格具有一定的议价权利. 例如, 在山东省县级疾控中心可以通过省公共资源交易平台与疫苗制造商进行采购价格谈判, 与疫苗制造商共同协商确定疫苗的采购价格<sup>⑨</sup>. 这也进一步说明了本文设计的期权契约方案具有一定的可实施性.

### 3 结束语

本研究通过对疫苗供应链成员之间的合作机

制进行深入剖析, 在产出与需求不确定环境下构建了由单个疫苗制造商和单个疫苗零售商组成的三阶段博弈模型, 求得了模型的子博弈精炼纳什均衡解. 进一步通过设计补贴契约和期权契约建立疫苗供应链成员之间的合作关系. 研究表明, 两种契约均能在一定条件下提升疫苗供应链成员的期望利润, 增强供应链应对产出与需求不确定风险的能力. 为获得更深入的见解, 本研究进一步分析了契约参数的变动对最优结果的影响, 总结了最优结果随契约参数的变动规律. 在此基础上, 探讨了两种契约在提升疫苗供应链性能方面的共性与差异, 包括两种契约的灵活性等.

本研究在建模过程中, 假设疫苗供应链成员之间的信息是完全对称的. 事实上, 疫苗供应链成员间的信息有可能是不对称的. 例如, 在交易过程中, 由于疫苗零售商无法完全了解疫苗制造商的成本结构和生产技术等情况, 因此单位生产成本或者产出率可能为疫苗制造商的私有信息; 而疫苗零售商由于更接近市场, 大多数情况下会拥有更多的需求信息. 因此, 未来的研究可以关注信息不对称环境下的疫苗供应链管理问题. 此外, 未来的研究还可以从以下两方面展开: 1) 本研究考虑了单个疫苗制造商和单个疫苗零售商之间的博弈, 今后可考虑多个疫苗制造商协同供货的决策情形, 这类供应链运作结构更加贴近现实, 也将使得决策模型更加有趣; 2) 在实践中, 疫苗制造商在生产和运营期间资金短缺的情况十分常见. 今后可考虑扩展研究受资金约束疫苗制造商的融资策略问题.

#### 参考文献:

- [1] Jeyanathan M, Afkhami S, Smaill F, et al. Immunological considerations for COVID-19 vaccine strategies [J]. *Nature Reviews Immunology*, 2020, 20(10): 615–632.
- [2] Lee B Y, Haidari L A. The importance of vaccine supply chains to everyone in the vaccine world [J]. *Vaccine*, 2017, 35: 4475–4479.
- [3] Cho S H. The optimal composition of influenza vaccines subject to random production yields [J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2010, 12(2): 256–277.
- [4] World Health Organization. Recommended composition of influenza virus vaccines for use in the 2021–2022 northern hemisphere influenza season [J]. *Weekly Epidemiological Record*, 2021, 96(11): 77–88.

<sup>⑨</sup> 济南日报网: <http://jnsb.e23.cn/shtml/jinrb/20161126/1610395.shtml>.



- [5]Cai J , Zhong M , Shang J , et al. Coordinating VMI supply chain under yield uncertainty: Option contract , subsidy contract , and replenishment tactic[J]. *International Journal of Production Economics* ,2017 ,185( 3) : 196 – 210.
- [6] He Y , Zhang J. Random yield risk sharing in a two-level supplychain[J]. *International Journal of Production Economics* , 2008 ,112( 2) : 769 – 781.
- [7]于建红 , 马士华 , 周奇超. 供需不确定下基于 MOI 和 VMI 模式的供应链协同比较研究[J]. *中国管理科学* ,2012 , 20( 5) : 64 – 74.  
Yu Jianhong , Ma Shihua , Zhou Qichao. Comparative study of supply chain coordination based on MOI and VMI under random yield and uncertain demand[J]. *Chinese Journal of Management Science* ,2012 ,20( 5) : 64 – 74. ( in Chinese)
- [8]Güler M G. Coordinating decentralised assembly systems with random yield and random demand[J]. *International Journal of Production Research* ,2015 ,53( 3) : 886 – 896.
- [9]蔡建湖 , 蒋飞颖 , 薛婷婷. 产出不确定环境下考虑供货承诺的定价与投入决策模型[J]. *控制与决策* ,2017 ,32( 9) : 1664 – 1671.  
Cai Jianhu , Jiang Feiyong , Xue Tingting. Pricing and input decision models under yield uncertainty considering supply commitment[J]. *Control and Decision* ,2017 ,32( 9) : 1664 – 1671. ( in Chinese)
- [10]黄 河 , 曾能民 , 徐鸿雁. 独占、授权还是共享? ——存在随机产出风险的高技术企业专利运作战略研究[J]. *管理科学学报* ,2020 ,23( 6) : 1 – 17.  
Huang He Zeng Nengmin , Xu Hongyan. Monopoly licensing or sharing: Patent operation strategy for high-tech firms with random yield[J]. *Journal of Management Sciences in China* ,2020 ,23( 6) : 1 – 17. ( in Chinese)
- [11]蔡建湖 , 邓丽丽 , 黄卫来 , 等. 产出不确定环境下供应链竞争与协调研究综述[J]. *系统工程学报* ,2017 ,32( 4) : 547 – 556.  
Cai Jianhu , Deng Lili , Huang Weilai , et al. Review on supply chain competitions and mechanisms under yield uncertainty [J]. *Journal of Systems Engineering* ,2017 ,32( 4) : 547 – 556. ( in Chinese)
- [12]Deo S , Charles J. Cournot competition under yield uncertainty: The case of the U. S. influenza vaccine market[J]. *Manufacturing & Service Operations Management* ,2009 ,11( 4) : 563 – 576.
- [13]Cho S H , Tang C S. Advance selling in a supply chain under uncertain supply and demand[J]. *Manufacturing & Service Operations Management* ,2013 ,15( 2) : 305 – 319.
- [14]Shamsi G N , Torabi S A , Shakouri G H. An option contract for vaccine procurement using the SIR epidemic model[J]. *European Journal of Operational Research* ,2018 ,267( 3) : 1122 – 1140.
- [15]Dai T , Cho S , Zhang F. Contracting for on-time delivery in the U. S. influenza vaccine supply chain[J]. *Manufacturing & Service Operations Management* ,2016 ,18( 3) : 332 – 346.
- [16]Chick S E , Hasija S , Nasiry J. Information elicitation and influenza vaccine production[J]. *Operations Research* ,2017 , 65( 1) : 75 – 96.
- [17]黄远良 , 杨 超 , 姜生俊. 部分信息下有再订购机会的流感疫苗供应链协调模型[J]. *运筹与管理* ,2015 ,24( 1) : 40 – 56.  
Huang Yuanliang , Yang Chao , Jiang Shengjun. Influenza vaccine supply chain coordination with reordering opportunities under partial information[J]. *Operations Research and Management Science* ,2015 ,24( 1) : 40 – 56. ( in Chinese)
- [18]Chick S E , Mamani H , Simchi-Levi D. Supply chain coordination and influenza vaccination[J]. *Operations Research* , 2008 ,56( 6) : 1493 – 1506.
- [19]Adida E , Dey D , Mamani H. Operational issues and network effects in vaccine markets[J]. *European Journal of Operational Research* ,2013 ,231( 2) : 414 – 427.
- [20]Madadi A R , Kurz M E , Mason S J , et al. Supply chain design under quality disruptions and tainted materials delivery [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* ,2014 ,67: 105 – 123.
- [21]Chod J , Rudi N. Resource flexibility with responsive pricing[J]. *Operations Research* ,2005 ,53( 3) : 532 – 548.
- [22]Erhun F , Keskinocak P , Tayur S. Dynamic procurement in a capacitated supply chain facing uncertain demand[J]. *IIE Transactions* ,2008 ,40( 8) : 733 – 748.
- [23]Cai J , Tadikamalla P R , Shang J , et al. Optimal inventory decisions under vendor managed inventory: Substitution effects and replenishment tactics[J]. *Applied Mathematical Modelling* ,2016 ,43: 611 – 629.
- [24]Ji R , Kamrad B. Newsvendor model as an exchange option on demand and supply uncertainty[J]. *Production and Opera-*

- tions Management ,2019 ,28( 10) : 2456 – 2470.
- [25] 华胜亚, 翟 昕. 考虑初创企业的供应链融资与期权交易策略[J]. 中国管理科学, 2020 ,28( 2) : 80 – 90.  
Hua Shengya , Zhai Xin. Supply chain financing with option contract for start-up companies [J]. Chinese Journal of Management Science ,2020 ,28( 2) : 80 – 90. ( in Chinese)
- [26] 刘辛味. 脊 灰: 远去的糖丸, 和并未远去的病毒[N]. 北京科技报, 2019 – 07 – 01( 52) .  
Liu Xinwei. Polio: The sugar pill that' s gone , and the virus that' s not gone [N]. Beijing Science and Technology Report , 2019 – 07 – 01( 52) . ( in Chinese)
- [27] 杨智杰, 李明子. 一支疫苗的定价和它背后的产业[J]. 中国新闻周刊, 2018 , ( 28) : 20 – 23.  
Yang Zhijie , Li Mingzi. The pricing of a vaccine and the industry behind it [J]. China Newsweek ,2018 , ( 28) : 20 – 23. ( in Chinese)
- [28] 穆 昕, 王浣尘, 李雷鸣. 基于差异化策略的环境管理与企业竞争力研究[J]. 系统工程理论与实践, 2005 , ( 3) : 26 – 31.  
Mu Xin , Wang Huanchen , Li Leiming. Differentiation based analysis of environmental management and corporate competitiveness [J]. System Engineering: Theory & Practice ,2005 , ( 3) : 26 – 31. ( in Chinese)
- [29] Martin P , Gupta D , Natarajan K V. Vaccine procurement contracts for developing countries [J]. Production and Operations Management ,2020 ,29( 11) : 2601 – 2620.
- [30] Xie L , Hou P , Han H. Implications of government subsidy on the vaccine product R&D when the buyer is risk averse [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review ,2021 ,146: 102220.
- [31] 叶 飞, 林 强, 李怡娜. 基于 CVaR 的“公司 + 农户”型订单农业供应链协调契约机制[J]. 系统工程理论与实践, 2011 ,31( 3) : 450 – 460.  
Ye Fei , Lin Qiang , Li Yina. Supply chain coordination for “company + farmer” contract-farming with CVaR criterion [J]. System Engineering: Theory & Practice ,2011 ,31( 3) : 450 – 460. ( in Chinese)
- [32] Xu H. Managing production and procurement through option contracts in supply chains with random yield [J]. International Journal of Production Economics ,2010 ,126( 2) : 306 – 313.
- [33] Martínez-de-Albéniz V , Simchi-Levi D. A portfolio approach to procurement contracts [J]. Production and Operations Management ,2010 ,14( 1) : 90 – 114.

## Input decision model for vaccine manufacturer and supply chain optimization

CAI Jian-hu<sup>1,2</sup> , ZHANG Yu-jie<sup>2</sup> , ZHOU Qing<sup>1\*</sup> , XUAN Li-yuan<sup>2</sup> , HU Xiao-qing<sup>1</sup>

1. Experimental Center of Data Science and Intelligent Decision-Making , Hangzhou Dianzi University , Hangzhou 310018 , China;

2. School of Management , Zhejiang University of Technology , Hangzhou 310023 , China

**Abstract:** Nowadays , the vaccine supply chain faces great challenges from yield and demand uncertainty. This paper constructs a three-stage game model to describe the competition between a vaccine manufacturer and a vaccine retailer ( Center for Disease Control and Prevention , and community) . The optimal input quantity decision of vaccine manufacturer under yield and demand uncertainty , as well as the pricing and procurement strategies of supply chain members in deterministic environment are analyzed. The subsidy contract and the option contract are introduced to improve the performance of the vaccine supply chain , respectively. The result shows that the reasonable design of both contracts can improve the cooperation mechanism between the members of the vaccine supply chain , reduce the impact of yield and demand uncertainty , realize a Pareto improvement of the supply chain performance , and ensure the effective supply of the vaccine.

**Key words:** vaccine supply chain; yield uncertainty; multi-stage game; contract design