

# 控制与决策

Control and Decision

基于序贯博弈的装备制造业复杂产品研发补贴和关税决策

魏承莉, 陈洪转

引用本文:

魏承莉, 陈洪转. 基于序贯博弈的装备制造业复杂产品研发补贴和关税决策[J]. *控制与决策*, 2023, 38(11): 3219–3230.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0135>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 政府补贴和增值税退税政策的闭环供应链决策

Closed-loop supply chain decisions under government subsidies and VAT rebates  
*控制与决策*. 2021, 36(11): 2771–2782 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0356>

#### 考虑企业社会责任和公平偏好的绿色供应链决策

Green supply chain considering fairness preference and corporate social responsibility  
*控制与决策*. 2021, 36(7): 1743–1753 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1102>

#### 考虑绿色网络效应的再制造产品最优生产决策及产品之间的竞争

Optimal production for remanufacturing products and competition among consumers in the presence of green network effect  
*控制与决策*. 2021, 36(4): 993–1002 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0366>

#### 考虑绿色网络效应的再制造产品最优生产决策及产品之间的竞争

Optimal production for remanufacturing products and competition among consumers in the presence of green network effect  
*控制与决策*. 2021, 36(4): 993–1002 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0366>

#### 混合碳政策下制造商低碳转型的技术选择策略

Technology selection in low carbon transition of the manufacturer under mixed carbon policy  
*控制与决策*. 2021, 36(7): 1763–1770 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1536>

# 基于序贯博弈的装备制造业复杂产品研发补贴和关税决策

魏承莉<sup>†</sup>, 陈洪转

(南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106)

**摘要:** 增大国内装备制造业的研发投入和引入国外产品带来的研发溢出可提升国内装备制造业科技水平,但同时带来了企业的研发成本负担和国外产品抢占国内市场的问题,因此政府在其中的研发补贴和关税政策调控显得尤为迫切. 探究政府研发补贴和关税政策对存在研发溢出的国外装备制造和国内装备制造进行序贯博弈时的市场份额、利润和研发水平的影响问题. 进一步分析政府以社会福利最大为目标时,政府的最优决策并对关键因素进行敏感性分析. 最后通过数值扩展验证结论的稳健性. 研究发现: 研发补贴系数或关税增大都会提高(降低)国内制造商(国外制造商)的产量、利润和研发水平;政府以社会福利最大进行决策时,随着两种产品竞争强度的增大,总的研发补贴会减小,而单位研发补贴先减后增,关税先增后减. 研发成本系数越高,关税和单位研发补贴会越高,但总的研发补贴会减少.

**关键词:** 序贯博弈; 研发补贴; 关税; 社会福利; 研发溢出; 复杂产品

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0135

引用格式: 魏承莉,陈洪转. 基于序贯博弈的装备制造业复杂产品研发补贴和关税决策[J]. 控制与决策, 2023, 38(11): 3219-3230.

## R&D subsidies and tariff decisions of CoPS in equipment manufacture industry based on sequential games

WEI Cheng-li<sup>†</sup>, CHEN Hong-zhuan

(School of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Increasing R&D investment in domestic equipment manufacturing industry and introducing foreign products brings R&D spillover, which can improve the technology level of domestic equipment manufacturing industry, but at the same time brings the burden of R&D cost of enterprises and foreign products to seize the domestic market, so the government's R&D subsidies and tariff policy regulation is particularly urgent therein. This paper explores the impact of government R&D subsidies and tariff policies on the market share, profit and R&D level of foreign equipment manufacturers with R&D spillover and sequential game with domestic equipment manufacturers. It further analyzes the optimal decision of the government when the government aims at maximizing social welfare and conducts sensitivity analysis on the key factors. Finally, the robustness of the findings is verified by numerical extensions. It is found that: an increase in either the R&D subsidy coefficient or tariff increases (decreases) the output, profit and R&D level of domestic manufacturers (foreign manufacturers); the total R&D subsidy decreases as the intensity of competition between the two products increases, while the unit R&D subsidy decreases and then increases, and the tariff increases and then decreases, when the government makes the decision with social welfare maximization. The higher the R&D cost factor is, the higher the tariff and unit R&D subsidy will be, but the total R&D subsidy will decrease.

**Keywords:** sequential game; R&D subsidies; tariffs; social welfare; R&D spillovers; CoPS

## 0 引言

装备制造业中例如数控机床、工程机械、晶圆制造、电气工程等复杂产品市场大多被掌握了核心关键技术

的少数寡头控制. 而中国相关企业对核心关键技术

收稿日期: 2022-01-20; 录用日期: 2022-05-17.

基金项目: 国家社会科学基金项目(19BJY094); 教育人文社会科学基金项目(18YJA630008); 国家社会科学规划基金项目(19BJY094); 国家自然科学基金面上项目(71774072).

责任编辑: 霍宝锋.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: weichengli19951020@163.com.

创新失败会给企业带来巨大损失.为解决企业的后顾之忧,中国政府出台了研发费用加计扣除政策等一系列扶持方式激励企业加大研发投入,这一系列政策也取得了较好的成果,2020年,装备制造业增加值在规模以上工业增加值的比重由2016年的32.9%上升到2020年33.7%.然而过高的研发补贴会加重政府的财政负担,过低的研发补贴又会导致激励作用不足.二是引进国外先进装备制造商的复杂产品.跨国公司进入中国市场后往往会进行研发投入,例如西门子产品进入中国后于2016、2017年在苏州、青岛、无锡、成都等地设立多个创新中心、实验室.研究表明,研发成果存在研发溢出的正外部性<sup>[1]</sup>,且在当地的溢出性最强<sup>[2]</sup>.不过,引进在终端市场具有领导地位且拥有更高技术水平的复杂产品也会给国内装备制造商带来一定冲击.出于保护国内装备制造商的目的,政府对国外装备制造商往往会收取一定比例的关税.但过高的关税难以吸引国外先进产品进入中国市场,过低的关税又会使起步较晚的国内装备制造商难以生存.

基于上述种种矛盾,本文探究以下问题:政府对国内装备制造商的研发补贴和对国外装备制造商的关税决策如何影响基于序贯博弈的国内外装备制造商的市场份额、利润和研发水平?政府应如何决策以权衡国内外装备制造商、消费者等利益相关者利益、自身收支和研发水平对国家科技实力的正向效益?国外产品研发溢出水平、产品竞争强度、单位研发成本和研发水平的外部效益如何影响政府的关税和补贴决策?

与本文研究相关的文献主要包括如下几类:针对企业的创新研发问题,Claude等<sup>[3]</sup>建立了两阶段研发模型探究在技术溢出下,双寡头企业静态博弈的R&D合作与非合作问题;在此基础上,Amir等<sup>[4]</sup>针对差异化产品在不同的技术溢出水平和研发成本下对比分析了静态博弈和序贯博弈对各方最优决策的影响;Petrakis等<sup>[5]</sup>分析了潜在进入者对R&D网络和稳定性的影响,发现潜在进入者的存在通常会改变现有企业建立研发方式的激励措施;Yan等<sup>[6]</sup>在产品具有差异性的Bertrand双寡头市场中分析了研发具有不确定性但其活动可降低企业生产成本的情景,探究了创新成功者选择固定费用和特许权使用两种技术授权方式的区分;周晓晗等<sup>[7]</sup>在领导企业与追随企业相互存在技术溢出的情况下分析了其研发合作动机;Wu等<sup>[8]</sup>在一个供应商与两个竞争的制造商组成的供应链中探究了溢出率、研发效率和竞争水平的

影响;Wang等<sup>[9]</sup>构建了网络博弈模型,分析了在不同类型的空间模型中企业的R&D网络均衡.

针对政府的研发补贴问题,Koga<sup>[10]</sup>基于223家日本高科技初创企业的面板数据,探究了政府研发补贴对私人融资研发起到替代还是补充作用;Lee等<sup>[11]</sup>研究了国营企业和私营企业在产量和研发投入竞争时政府使用研发补贴和产量补贴的作用;Choi等<sup>[12]</sup>通过实证分析表明,政府的研发补贴可以成功解决私人研发投入中的市场失灵问题;陈红等<sup>[13]</sup>从内部控制的角度考察了研发补贴与创新的关系;Chen等<sup>[14]</sup>构建了三个阶段博弈模型分析政府的研发补贴和产量补贴对合资企业持续创新的影响;Guo等<sup>[15]</sup>在绿色闭环供应链系统中考虑线上线下销售且消费者绿色偏好的情况,分析了政府的双重补贴对企业R&D投入的影响;Xie等<sup>[16]</sup>在购买者风险规避的前提下考察了疫苗供应链补贴选择问题.

针对关税问题,Hafezalkotob<sup>[17]</sup>研究发现,政府设置的关税水平可导致市场垄断或稳定竞争;Xu等<sup>[18]</sup>在一个跨国公司垄断海外市场,但面临当地制造商竞争时,分析市场和关税对其选择采购策略的影响;Niu等<sup>[19]</sup>分析了关税和国外产品质量溢出对跨国公司采购策略的影响;Fan等<sup>[20]</sup>研究发现,国外电动汽车的技术溢出会改变政府的消费补贴和对进口电动汽车的关税决策;Kumar等<sup>[21]</sup>对转移价格文献进行综述后发现,转移价格的研究考虑因素应超越合规性和关税管理;Dong等<sup>[22]</sup>回顾了以往贸易政策特别是关税政策对全球供应链影响的研究,并指出了未来研究的方向;He等<sup>[23]</sup>使用了Stackelberg博弈的方法分析了资本受限的跨国供应链的融资策略选择和合同条款设置问题,发现资产结构、税收差异和持股比例至关重要.

以上文献中,与企业的创新研发问题相关的文献主要关注不同博弈方式或技术溢出对创新研发的影响问题,与政府的研发补贴问题相关的文献多是从实证的角度得出研究结论或考察政府的不同补贴对企业R&D研发的影响,与关税问题相关的文献更多的是分析关税对跨国公司或全球供应链的影响.其中,与本文研究最接近的是Fan等<sup>[20]</sup>的研究,区别主要在于:1)Fan等<sup>[20]</sup>考虑的是对购买国产电动汽车消费者的消费补贴,而本文考虑对国内装备制造商进行研发补贴,并进一步分析研发水平对国家的科技实力有正向效益;2)Fan等<sup>[20]</sup>的研究中设定国内制造商与国外制造商同时决策,本文则考虑国外装备制造商具有领导地位,二者进行序贯博弈.

企业序贯博弈下分析研发问题的文献中,周晓晗等<sup>[7]</sup>探究了二者的研发合作问题,然而目前还没有文献在国内外企业序贯博弈基础上探究政府的研发补贴和关税政策如何调节国外领导企业和国内跟随企业的市场份额、研发水平和利润分配等问题.针对寡头市场,文献研究通常将其简化为双寡头进行分析<sup>[3-4,6-7,24]</sup>.本文沿用这一设定,在政府不同R&D补贴力度和关税水平下,分析基于序贯博弈的国内外装备制造制造商的产量、利润和研发水平决策,并进一步分析政府以社会福利最大化进行决策时,国外装备制造制造商研发溢出水平、竞争强度等因素对政府决策的影响.

## 1 模型

### 1.1 模型基本描述

考虑某装备制造业存在两家寡头制造商  $i = d, f$ . 其中:  $d$  表示国内装备制造制造商(以下简称国内制造商),  $f$  表示国外装备制造制造商(以下简称国外制造商),二者进行产量竞争. 逆需求函数<sup>[25-26]</sup>为

$$p_i = a_i - q_i - \gamma q_j, \quad i, j = d, f, \quad i \neq j. \quad (1)$$

其中:  $a_i$  表示市场规模,  $i = d$  时,  $a_i = a$ , 国外产品由于技术更先进, 占有更大市场份额,  $i = f$  时,  $a_i = a + \theta$ <sup>[5,19]</sup>,  $\theta \geq 0$  衡量了国外产品和国内产品市场规模的差距;  $p_i, q_i$  分别表示制造商  $i$  的价格和产量;  $\gamma$  表示竞争强度, 即两种产品的可替代性,  $0 \leq \gamma \leq 1$ ,  $\gamma$  越大, 两种产品的竞争性越强, 产品的可替代性越大<sup>[5,17,25-26]</sup>.

不失一般性, 设制造商  $i$  的固定成本为 0, 初始边际成本为  $0 < \tilde{c}_i < a_i (i = d, f)$ , 令  $\tilde{c}_d = c_1, \tilde{c}_f = c_2$ , 研

发可降低企业自身边际生产成本<sup>[5,17]</sup>, 国外产品进入到国内市场, 研发水平高于国内产品, 考虑其研发溢出性<sup>[6,20]</sup>, 由此制造商成本<sup>[5]</sup>  $c_i$  为

$$c_i = \tilde{c}_i - e_i - \phi \beta_{ij} e_j, \quad i, j = d, f, \quad i \neq j. \quad (2)$$

其中:  $e_i$  表示研发水平;  $\phi \in (0, 1)$  表示研发溢出系数;  $\beta_{ij} \in \{0, 1\}$  表示制造商  $j$  是否对制造商  $i$  有研发溢出的指数, 参考文献 [20], 仅考虑国外产品对国内产品的研发溢出, 有  $\beta_{df} = 1, \beta_{fd} = 0$ ; 生产成本  $c_i \geq 0$  要求  $\tilde{c}_i \geq e_i + \phi \beta_{ij} e_j$ .

研发具有边际成本递增的特征<sup>[5,7,14]</sup>, 设为  $ke_i^2$ ,  $k$  是研发成本系数. 政府为鼓励国内制造商从事研发活动, 给与国内制造商研发补贴  $\Phi = \Delta ke_i^2 (i = d)$ ,  $\Delta k$  是研发补贴系数. 同时政府出于保护国内制造商的目的, 对国外制造商征收关税<sup>[19,20,27]</sup>  $T = tq_f$ , 其中  $t$  表示对单位进口产品征收的关税(从量税). 制造商  $i$  的利润为

$$\begin{cases} \pi_i = (a_i - q_i - \gamma q_j)q_i - (\tilde{c}_i - e_i - \phi \beta_{ij} e_j)q_i - (k - \Delta k)e_i^2, & i = d, j = f; \\ \pi_i = (a_i - q_i - \gamma q_j)q_i - (\tilde{c}_i - e_i - \phi \beta_{ij} e_j + t)q_i - ke_i^2, & i = f, j = d. \end{cases} \quad (3)$$

考虑在同一个研发生产周期内, 政府、国内制造商和国外制造商进行一个 3 阶段的完全信息动态博弈, 第 1 阶段政府决定研发补贴  $\Phi$  和关税  $t$ , 第 2 阶段国内外制造商各自独立决定研发水平  $e_i$ , 第 3 阶段国内外制造商进行 Stackelberg 产量竞争, 国外制造商先决定产量  $q_f$ , 国内制造商再决定产量  $q_d$ . 模型及博弈过程如图 1 所示.

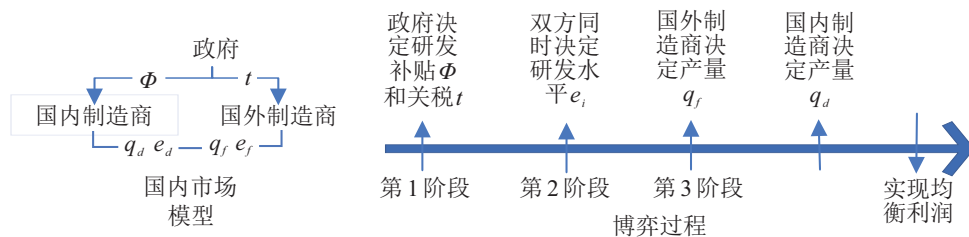


图 1 模型及博弈过程

### 1.2 模型求解(部分最优解见附录 A)

求解中假设  $c_1 = c_2 = c$ <sup>[7]</sup>, 采用逆向归纳法进行求解, 上标带 \* 表示最优解.

#### 1.2.1 第 3 阶段: 产量决策

在完全信息下, 国外制造商先决定产量  $q_f$ , 国内制造商再决定产量  $q_d$ . 采用逆向归纳法求解,  $\frac{\partial^2 \pi_d}{\partial q_d^2}$

$= -2 < 0$ , 对式 (3) 中  $i = d, j = f$  的利润函数关于  $q_d$  求一阶导数, 令  $\frac{\partial \pi_d}{\partial q_d} = 0$  得到

$$q_d^*(q_f) = \frac{a - \gamma q_f - c_d}{2}. \quad (4)$$

将式 (4) 代入 (3) 中  $i = f, j = d$  的利润函数,  $\frac{\partial^2 \pi_f}{\partial q_f^2} = -(2 - \gamma^2) < 0$ , 关于  $q_f$  求一阶导数, 令  $\frac{\partial \pi_f}{\partial q_f}$

= 0 得到

$$q_f^* = \frac{a(2-\gamma) + 2(\theta - c_f - t) + \gamma c_d}{2(2-\gamma^2)}. \quad (5)$$

将式(5)代入(4)中,有

$$q_d^* = \frac{(a - c_d)\gamma + 2(t + c_f - a - \theta)}{4(2-\gamma^2)} + \frac{a - c_d}{2}. \quad (6)$$

从均衡产量式(5)和(6)中可以看出,政府对国外制造商征收关税不仅会影响国外制造商的最优产量,还会影响国内制造商的最优产量.但二者受其影响不同,  $\frac{\partial q_d^*}{\partial t} = 1/[2(2-\gamma^2)] > 0$ ,  $\frac{\partial q_f^*}{\partial t} = -1/(2-\gamma^2) < 0$ ,国内制造商的最优产量随单位进口产品征收的关税值增大而增大,国外制造商的最优产量随单位进口产品征收的关税值增大而减小.

$\pi_d =$

$$\frac{(2A - (3c_d + a)\gamma^2 + 4(c_d + a))((c_d - a)(\gamma^2 - 4) + 2A)}{16(\gamma^2 - 2)^2} + \frac{c_d((c_d - a)(\gamma^2 - 4) + 2A)}{4(\gamma^2 - 2)} - (k - \Delta k)e_d^2, \quad (7)$$

$$\pi_f = \frac{B\left(\gamma^2 B + 2(c_d - a)\gamma - 2B - \frac{4A}{\gamma}\right)}{(8\gamma^2 - 16)} - ke_f^2. \quad (8)$$

其中

$$A = \gamma(t + c_f - \theta - a),$$

$$B = \frac{(a - c_d)\gamma + 2(t + c_f - \theta - a)}{\gamma^2 - 2}.$$

### 1.2.2 第2阶段:研发投入决策

这一阶段,国外制造商与国内制造商同时决策各自的研发水平.将式(2)分别代入(7)和(8),联立求解  $\begin{cases} \partial \pi_d / \partial e_d = 0 \\ \partial \pi_f / \partial e_f = 0 \end{cases}$ ,解得国外制造商和国内制造商的均衡研发水平

$$e_f^* = e_{fA1}, \quad (9)$$

$$e_d^* = e_{dA1}. \quad (10)$$

这里:  $C = a - c - t + \theta$ ,  $D = k - \Delta k - \frac{1}{4}$ ,  $E = k - \Delta k - \frac{1}{8}$ ,  $F = k - \Delta k - \frac{1}{16}$ .

为保证  $e_f^*$  和  $e_d^*$  为最优解,需满足  $\frac{\partial^2 \pi_d}{\partial e_d^2} < 0$ ,  $\frac{\partial^2 \pi_f}{\partial e_f^2} < 0$ ,得到  $k - \Delta k > \frac{(\gamma + 2)^2}{16}$ ,  $k > \frac{(\gamma\phi - 2)^2}{8(2-\gamma^2)}$ . 因为  $\gamma, \phi \in (0, 1)$ ,有  $k - \Delta k > 0.5625$  且  $k > 0.5$ .

式(9)和(10)表明政府对国内制造商进行研发补贴会同时影响国内制造商和国外制造商的研发水平.

根据式(9)和(10)解得国外制造商和国内制造商

独立研发时的产量

$$q_f^* = q_{fA1}, \quad (11)$$

$$q_d^* = q_{dA1}. \quad (12)$$

对应的均衡利润为

$$\pi_f^* = \pi_{fA1}, \quad (13)$$

$$\pi_d^* = \pi_{dA1}. \quad (14)$$

### 1.2.3 第1阶段:政府研发补贴和关税决策

根据文献[20,28],考虑政府的决策以社会福利最大为目标,社会福利包括国内制造商利润、消费者剩余(衡量消费者购买国内外制造商生产的产品所获得的总福利)、关税收入、补贴支出,并进一步考虑国内制造商的研发水平可提高国内科技实力<sup>[14,16]</sup>,社会福利函数表达为

$$SW = \pi_d + CS - \Phi + tq_f + \lambda e_d. \quad (15)$$

其中:  $\pi_d$  表示国内制造商的利润;  $CS$  表示消费者剩余;  $\Phi$  表示政府补贴给国内制造商的研发补贴费;  $tq_f$  表示政府的关税收入<sup>[19-20,27]</sup>;  $\lambda e_d$  表示研发水平的外部效益,  $\lambda > 0$  表示研发水平的恒定外部边际效益<sup>[14,16]</sup>,这里的恒定外部边际效益主要指对国家的科技实力有正向溢出效应.消费者剩余<sup>[7,16]</sup>  $CS =$

$$\frac{(q_d + q_f)^2}{2}, \text{ 求解 } \begin{cases} \frac{\partial SW}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial SW}{\partial \Delta k} = 0 \end{cases}, \text{ 得到}$$

$$\Delta k = \Delta kA1, \quad (16)$$

$$t = tA1. \quad (17)$$

令  $N = a - c$ ,  $R = 2 - \gamma\phi$ .将式(16)、(17)代入到(9)~(14)中,得到社会福利最大时各最优解  $q_f^{SW*}$ 、 $q_d^{SW*}$ 、 $p_f^{SW*}$ 、 $p_d^{SW*}$ 、 $e_f^{SW*}$ 、 $e_d^{SW*}$ 、 $\pi_f^{SW*}$ 、 $\pi_d^{SW*}$ .海塞矩阵检验在数值代入时进行.

## 2 政府研发补贴和关税影响及其决策分析

引入多个参数使模型更贴合实际,但造成了分析上的困难.本部分在不改变基本性质的前提下,代入数值进行分析,参考Niu等<sup>[19]</sup>的假设,取  $a = 20$ ,  $\theta = 20$ ,  $c = 5$ ,这有利于分析并得到有价值的结论.后文将进行数值扩展验证结论的稳健性.附录A给出相应的验证过程.

### 2.1 政府研发补贴和关税对国内外制造商利润、产量和研发水平的影响

文献[19]在分析政府的决策时分别以更多的高质量产品和社会福利最大为目标.本部分将研发补贴和关税作为自变量进行分析,探究政府的不同

决策对国内外制造商利润、产量和研发水平的影响. 进一步取  $k = 4, \phi = 0.5, \gamma = 0.6$ <sup>[7]</sup>.  $\Delta k$  和  $t$  的取值需保证最优解  $q_f^*, q_d^*, p_f^*, p_d^*, e_f^*, e_d^*, c_f^*, c_d^*$  均大于 0. 有  $\Delta k$  和  $t$  的关系  $\Delta k < \Delta k_1, \Delta k_1 = \frac{0.002567(14954t + 4.45565 \cdot 10^5)}{11t + 317}$ , 当  $\Delta k > 3.4903$  时, 有  $t < \frac{7129.04 - 1975.544\Delta k}{68.552\Delta k - 239.264}$ .

### 2.1.1 对产量的影响

代入  $k = 4, \phi = 0.5, \gamma = 0.6$  后可得

$$q_f^* = \frac{(6402.56 - 209.92t)\Delta k - 23571.84 + 781.44t}{325.3104\Delta k - 1201.4328},$$

$$q_d^* = \frac{13.12(4 - \Delta k)(52.525 + 4.375t)}{1201.4328 - 325.3104\Delta k},$$

具体见图 2(a).

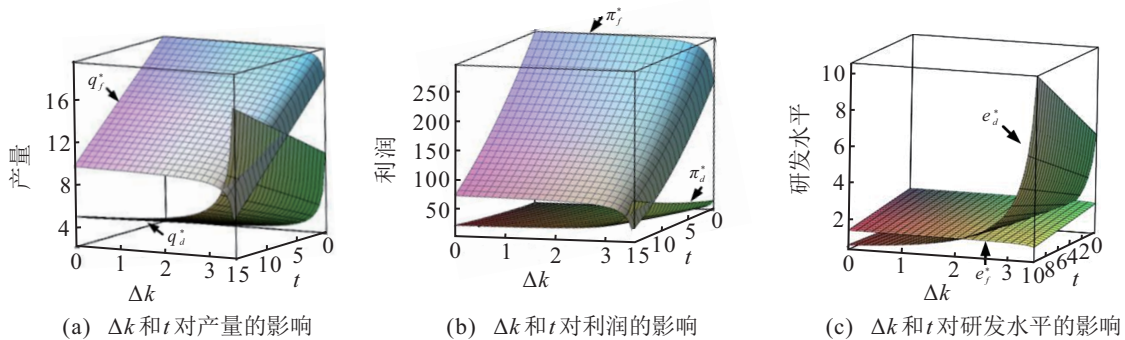


图 2  $\Delta k$  和  $t$  的影响分析

**性质 1** 1) 国外制造商的最优产量随研发补贴系数  $\Delta k$ 、对单位进口产品征收的关税  $t$  增大而减小, 国内制造商的最优产量随研发补贴系数  $\Delta k$ 、对单位进口产品征收的关税  $t$  增大而增大.

2) 对单位进口产品征收的关税  $t$  处于较低水平时 ( $t < 6.0781$ ), 国外制造商的最优产量将恒大于国内制造商的最优产量. 对单位进口产品征收的关税  $t$  处于较高水平时 ( $t > 6.0781$ ): 若  $\Delta k$  和  $t$  满足  $\Delta k_2 < \Delta k < \Delta k_1$ , 则国内制造商的最优产量将大于国外制造商的最优产量; 若  $0 < \Delta k < \Delta k_2$ , 则国外制造商的最优产量将大于国内制造商的最优产量.  $\Delta k_2 = \frac{0.097569(31595t - 6.5048 \cdot 10^5)}{815t - 17419}$ .

性质 1 的 1) 表明, 政府无论是加大对国内制造商的补贴力度还是增加对国外制造商征收的关税, 都会导致国外(内)制造商的产量减少(增加). 这是因为二者处于竞争关系, 政府增加补贴时会减少国内制造商的生产成本, 导致国内制造商增加产量, 抢占市场份额, 从而国外制造商会减少产量; 而增加对国外制造商征收的关税, 会减少国外制造商的利润空间, 变相增加了国外制造商成本, 导致国外制造商减少产量, 从而增加国内制造商市场份额.

性质 1 的 2) 表明, 国内制造商由于是市场领导者, 具有先发优势, 当政府对单位进口产品征收的关税较小时, 国外制造商始终占有更大的市场份额. 当且仅当政府对单位进口产品征收较多的关税且单位研发补贴较高时, 国内制造商才有可能占有更大的市场份额.

### 2.1.2 对利润的影响

代入  $k = 4, \phi = 0.5, \gamma = 0.6$  后可得  $\pi_d^* = \pi_{dA2}, \pi_f^* = \pi_{fA2}$ , 具体见图 2(b).

**性质 2** 1) 国外制造商的最优利润随研发补贴系数  $\Delta k$  和对单位进口产品征收的关税  $t$  增大而减小, 国内制造商的最优利润随研发补贴系数  $\Delta k$ 、对单位进口产品征收的关税  $t$  增大而增大.

2) 对单位进口产品征收的关税处于较低水平时 ( $t < 11.1269$ ), 国外制造商的最优利润将恒大于国内制造商的最优利润. 对单位进口产品征收的关税  $t$  处于较高水平时 ( $t > 11.1269$ ): 若  $\Delta k$  和  $t$  满足  $\Delta k_2 < \Delta k < \Delta k_1$ , 则国内制造商的最优利润将大于国外制造商的最优利润; 若  $0 < \Delta k < \Delta k_2$ , 则国外制造商的最优利润将大于国内制造商的最优利润. 其中  $\Delta k_3 = \Delta k_{3A1}$ .

性质 2 的 1) 表明, 无论是加大对国内制造商的补贴力度还是增加对国外制造商征收的关税, 都会导致国外(内)制造商的利润减少(增加).

性质 2 的 2) 表明, 国内制造商由于是市场领导者, 具有先发优势, 当政府对单位进口产品征收的关税较小时, 可在市场中获得更大利润. 当且仅当政府对单位进口产品征收较多的关税且单位研发补贴较高时, 国内制造商才有可能在市场上获得更大利润.

### 2.1.3 对研发水平的影响

代入  $k = 4, \phi = 0.5, \gamma = 0.6$  后可得

$$e_d^* = \frac{3.64(105.05 + 8.750t)}{1201.4328 - 325.3104\Delta k},$$

$$e_f^* = \frac{(22.304t - 680.272)\Delta k + 2504.508 - 83.028t}{1201.4328 - 325.3104\Delta k}$$

具体见图2(c).

**性质3** 1) 国外制造商的最优研发水平随研发补贴系数  $\Delta k$  和对单位进口产品征收的关税  $t$  增大而减小, 国内制造商的最优研发水平随研发补贴系数  $\Delta k$ 、对单位进口产品征收的关税  $t$  增大而增大.

2) 当研发补贴系数  $\Delta k$  和对单位进口产品征收的关税  $t$  满足  $\Delta k_4 < \Delta k < \Delta k_1$  时, 国内制造商的最优研发水平将大于国外制造商的最优研发水平; 当满足  $0 < \Delta k < \Delta k_4$  时, 国内制造商的最优研发水平将小于国外制造商的最优研发水平.  $\Delta k_4 = [1.793(5.7439t - 106.1063)]/[2t - 61]$ .

性质3的1) 表明, 无论是加大对国内制造商的补贴力度还是增加对国外制造商征收的关税, 都会导致国外(内)制造商的研发水平减少(增加).

性质3的2) 表明, 当且仅当政府对单位进口产品征收较多的关税且单位研发补贴较高时, 国内制造商的研发水平才有可能高于国外制造商. 与二者的产量、利润关系不同, 即使政府对单位进口产品征收较少的关税, 只要政府给与的单位研发补贴足够高, 也可使国内制造商的研发水平高于国外制造商.

## 2.2 社会福利最大时政府最优决策分析

### 2.2.1 国外制造商研发溢出水平和国内制造商研发水平的外部边际效益影响分析(见图3)

本部分分析过程中取  $\gamma = 0.6, k = 4$ , 为保证海塞矩阵负定,  $q_f^{SW*}, q_d^{SW*}, \pi_f^{SW*}, \pi_d^{SW*}, p_f^{SW*}, p_d^{SW*},$

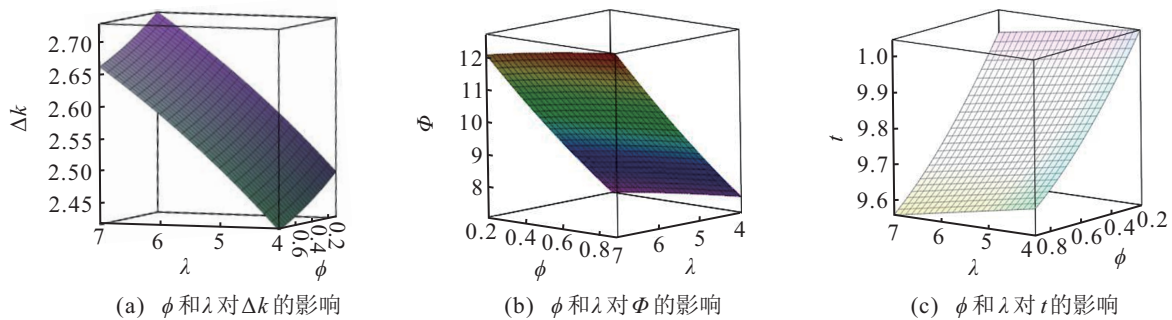


图3  $\phi$  和  $\lambda$  影响分析

### 2.2.2 竞争强度和研发成本系数对以社会福利最大的政府最优决策的影响(见图4)

分析过程中取  $\phi = 0.5, \lambda = 5$ , 为保证海塞矩阵负定,  $q_f^{SW*}, q_d^{SW*}, \pi_f^{SW*}, \pi_d^{SW*}, p_f^{SW*}, p_d^{SW*}, e_f^{SW*}, e_d^{SW*}, c_f, c_d$  均为正, 在满足  $k - \Delta k > \frac{(\gamma + 2)^2}{16}, k > \frac{(\gamma\phi - 2)^2}{8(2 - \gamma^2)}$  的条件下可实现.

**性质6** 1) 当竞争强度  $\gamma$  在较低水平范围内时

$e_f^{SW*}, e_d^{SW*}, c_f, c_d$  均为正, 有  $\lambda < 10(\phi(9\phi(\phi(3\phi - 20) - 120) + 4300 - 10640))/(15\phi^2 - 170\phi - 3776)$ .

**性质4** 研发补贴  $\Phi$  和研发补贴系数  $\Delta k$  随研发溢出系数  $\phi$  增大而减小; 研发补贴  $\Phi$  和研发补贴系数  $\Delta k$  随研发水平的恒定外部边际效益  $\lambda$  增大而增大.

性质4表明, 国外制造商的研发溢出水平越大, 当政府以社会福利最大进行决策时, 越会降低给予国内制造商的研发总补贴额和单位研发补贴额. Fan等<sup>[20]</sup> 研究发现, 国内外制造商同时决策时, 国外制造商的技术溢出水平越大, 政府给与购买国内电动汽车的制造商的消费补贴会越多, 本研究拓展了这一结论.

而国内制造商的研发水平的恒定外部边际效益越大, 即对国家的科技实力正向溢出效应越大, 政府给与国内制造商的研发总补贴额和单位研发补贴额会越大.

**性质5** 对单位进口产品征收的关税  $t$  随研发水平的恒定外部边际效益  $\lambda$  和研发溢出系数  $\phi$  增大而减小.

性质5表明, 国内制造商的研发水平对国家的科技实力正向溢出效应越大, 政府对国外制造商征收的单位进口产品关税会越少, 这主要是由于该复杂产品本身的科技含量越高, 国家越需要引进国外高技术产品以促进国内制造商掌握该项技术. 国外制造商的研发溢出水平越大, 对国内制造商越有利, 政府出于维护国内制造商的利益, 会鼓励国外制造商进入国内市场, 从而降低单位进口产品的关税.

(例如  $k = 4$  时,  $0 < \gamma < 0.5465$ ), 研发补贴系数  $\Delta k$  随竞争强度  $\gamma$  增大而减小; 当竞争强度  $\gamma$  在较高水平范围内时(例如  $k = 4$  时,  $0.5465 < \gamma < 1$ ), 研发补贴系数  $\Delta k$  随竞争强度  $\gamma$  增大而增大.

2) 研发补贴系数  $\Delta k$  随研发成本系数  $k$  增大而增大.

3) 研发补贴  $\Phi$  随竞争强度  $\gamma$  和研发成本系数  $k$  增大而减小.

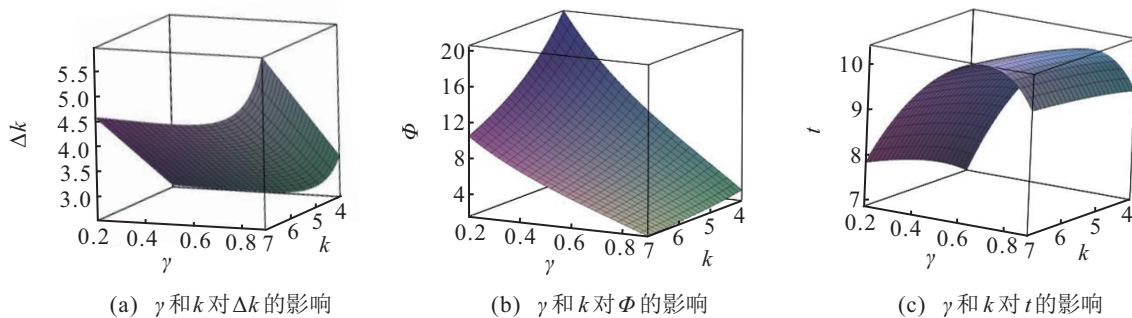


图 4  $\gamma$  和  $k$  的影响分析

性质 6 表明, 两种产品竞争强度较小时 (即国内产品对国外产品的替代性较小), 随着竞争强度的增大, 政府给与的单位研发补贴会略微减小, 而两种产品竞争强度较大时 (即国内产品对国外产品的替代性较大), 随着竞争强度的增大, 政府给与的单位研发补贴会增大. 但政府给与的总的研发补贴额随着竞争强度的增大而减小, 这说明, 竞争强度越大 (即国内产品对国外产品的替代性较大), 国内制造商确定的研发水平会越小.

其次, 研发成本系数  $k$  越大 (即研发成本本身较高时), 政府给与的单位研发补贴会越多, 但给与的总的研发补贴  $\Phi$  会减少, 这说明研发成本本身较高时, 国内制造商会降低自身的研发水平.

**性质 7** 1) 当竞争强度  $\gamma$  在较低水平范围内时 (例如  $k = 4$  时,  $0 < \gamma < 0.7142$ ), 关税  $t$  随竞争强度  $\gamma$  增大而增大, 当竞争强度  $\gamma$  在较高水平范围内时 (例如  $k = 4$  时,  $0.7142 < \gamma < 1$ ), 关税  $t$  随竞争强度  $\gamma$  增大而减小.

2) 对单位进口产品征收的关税  $t$  随研发成本系数  $k$  增大而增大.

性质 7 的 1) 表明, 政府以社会福利最大为目标时, 对单位进口产品征收的关税随两种产品竞争强度 (即国内产品对国外产品的替代性) 的增大呈现先增后减的趋势.

性质 7 的 2) 表明, 该产品的单位研发成本越高, 政府会征收越高的关税.

### 3 数值扩展

前面的分析中假设了国外制造商和国内制造商具有相同的初始边际成本, 而在现实生活中, 国外制造商作为领导者, 生产工艺更加成熟, 拥有更低的初始边际成本<sup>[5,7]</sup>, 令  $c_1 = 5, c_2 = 4$ . 此时的各部分最优解用上标  $d^*$  表示, 当政府以社会福利最大化进行决策时, 最优解用上标  $SW^{d^*}$  表示.

在分析政府研发补贴和关税对国内外制造商

利润、产量和研发水平的影响时, 为了保证各最优解为正和函数的凹性,  $\Delta k$  和  $t$  的关系为  $\Delta k < \frac{0.002567(14.954t + 4.30611 \cdot 10^5)}{11t + 306}$ , 并且在  $\Delta k >$

$3.490255572$  时, 有  $t < \frac{6(39729\Delta k - 1.43537 \cdot 10^5)}{29908 - 8569\Delta k}$ .

附录 B 中图 B1 印证了 2.1 节的结论, 并且  $q_d^{d^*} - q_d^* = q_{dA2} < 0, q_f^{d^*} - q_f^* = q_{fA2} > 0, \pi_d^{d^*} - \pi_d^* = \pi_{dA3} < 0, \pi_f^{d^*} - \pi_f^* = \pi_{fA3} > 0, e_d^{d^*} - e_d^* = -\frac{987.35 - 31.85t}{1201.43 - 325.31\Delta k} < 0, e_f^{d^*} - e_f^* = \frac{83.028 - 22.304\Delta k}{1201.43 - 325.31\Delta k} > 0. q_{dA2}、q_{fA2}、\pi_{dA2}、\pi_{fA2}$  见附录 A.

以上进一步说明了国外制造商更低的初始边际成本会降低国内制造商的产量、利润和研发水平, 提高国外制造商自身的产量、利润和研发水平.

附录 B 中图 B2 印证了 2.2 节的结论, 并进一步说明当国外制造商拥有更低的初始边际成本时, 会使以社会福利最大为目标的政府增加单位研发补贴和对单位进口产品征收的关税, 但对政府给与的国内制造商总的研发补贴额影响不大, 这是由于国外制造商更低的初始边际成本会降低国内制造商的研发水平.

### 4 结论

装备制造业的高质量发展对一个现代化大国至关重要. 我国装备制造业中的各类复杂产品的技术水平普遍低于发达国家, 另外, 复杂产品的研发通常具有一定的风险性且成本高昂. 鉴于此, 政府关税和研发补贴政策在此起到了很好的调节作用. 通过构建三阶段动态博弈模型, 分析了政府的研发补贴和关税决策对进行序贯博弈的国内外制造商的市场份额、研发水平和利润的影响; 并在政府以社会福利最大为目的时, 分析了竞争强度、国内制造商研发水平的恒定外部边际效益、研发成本系数和研发溢出系数对政府决策的影响. 研究发现: 1) 研发补贴系数或对单位进口产品征收的关税增大都会令国内 (外) 制造商的产量、利润和研发水平提高 (降低). 关税较

低时,国外制造商产量、利润恒高于国内制造商,只有研发水平存在国内制造商高于国外制造商的可能性. 2) 政府以社会福利最大进行决策时,政府给与的单位研发补贴随两种产品竞争强度的增大呈现先减后增的趋势,关税随两种产品竞争强度的增大呈现先增后减的趋势,总的研发补贴随两种产品竞争强度的增大而减小;装备制造的研发成本越高,政府征收的关税越高,给与的单位研发补贴越多,但总的研发补贴会减少. 3) 国外制造商拥有更低的初始边际成本时,自身的产量、利润和研发水平会更高,但会降低国内制造商的产量、利润和研发水平,并令以社会福利最大为目标的政府增加单位研发补贴和对单位进口产品征收的关税,但对政府总的研发补贴额影响较小.

本文详细分析了政府的研发补贴和关税决策如何影响基于序贯博弈的国内外装备制造商的市场份额、利润和研发水平,并进一步分析了政府的最优决策,从以下几方面可继续深入研究:首先,本文仅考虑了研发补贴,未来可以在国外装备制造商抢占市场的情况下进一步分析不同的政府补贴对国内装备制造商的影响;其次,本文仅考虑国内外装备制造商的独立研发,未来可进一步分析国内外装备制造商的研发合作问题.

## 附录A 定理证明过程及部分解

### 1.2.2 节部分解

$$e_{fA1} = ((\gamma\phi - 2)(\gamma((k - \Delta k)(a - c)(\gamma^2 - 2) - 2EC\gamma) + 4CD))/(\gamma^2((2 - \gamma^2)(k - \Delta k)\phi^2 - (8F\gamma^2 - 32E)k - 4E) + 4\gamma\phi(F\gamma^2 - 2E) + 8D(1 - 4k)),$$

$$e_{dA1} = (4(2k(a - c)\gamma^2 + (4Ck + (C\phi - a + c)\phi)\gamma - 2(4k - 1)(a - c) - 2C\phi)(\gamma^2 - 4))/ (2\gamma^2(64(\gamma^2 - 4)k^2 + (4(2\phi^2 - 16\Delta k - 1)\gamma^2 - 4\phi^2 + 64\Delta k + 16)k - 4 + 4(4\phi^2 - 2\gamma^2\phi^2 - 8)\Delta k) + 64\gamma\phi(2E - F\gamma^2) + 128D(4k - 1)),$$

$$q_{fA1} = (16\gamma(\gamma^2 - 2)(k - \Delta k)(a - c) - 2E(\gamma^2 + 4CD)k)/((32k^2 + (4\phi^2 - 32\Delta k - 2)k - 4\phi^2\Delta k)\gamma^4 + ((128\Delta k - 8\phi^2 + 32)k + 8\phi^2\Delta k - 16\Delta k - 2 - 128k^2)\gamma^2 + 16\gamma\phi(2E - F\gamma^2) + 32D(4k - 1)),$$

$$q_{dA1} = (16(k - \Delta k)(2k(a - c)\gamma^2 + (4Ck + \phi(c\phi -$$

$$a + c))\gamma - 8k(a - c) + 2(C\phi + a - c))(\gamma^2 - 2))/(4\gamma^2((2(2\phi^2 - 16\Delta k - 1)k - 4\phi^2\Delta k)\gamma^2 + 32k^2(\gamma^2 - 4) + 8(16\Delta k - \phi^2 + 4)k + 8\phi^2\Delta k - 16\Delta k - 2) + 64\gamma\phi(2E - F\gamma^2) + 128D(4k - 1)),$$

$$\pi_{fA1} = (32(\gamma(\gamma^2 - 2)(k - \Delta k)(a - c) - 2EC\gamma^2 + 4cD)^2(4\phi\gamma + 16k - 4 - (\phi^2 + 8k)\gamma^2)k)/ (8(\gamma^2(16k^2(\gamma^2 - 4) + ((2\phi^2 - 16\Delta k - 1)\gamma^2 - 4\phi^2 + 64\Delta k + 16 - 2\phi^2\gamma^2\Delta k + 4\phi^2\Delta k - 8\Delta k - 1)k + 8\gamma\phi(2E - F\gamma^2) + 16D(4k - 1)))^2),$$

$$\pi_{dA1} = (64(k - \Delta k)(F\gamma^4 - 4E\gamma^2 + 4D)(2k(a - c)\gamma^2 - 8(a - c)k + (4Ck + \phi(c\phi - a + c)\gamma - 2(C\phi - a + c))^2)/(16((16k^2 + (2\phi^2 - 16\Delta k - 1)k - 2\phi^2\Delta k)\gamma^4 - 8\phi F\gamma^3 + 16\phi E\gamma + (4(16\Delta k - \phi^2 + 4)k - 64k^2 + 4\phi^2\Delta k - 8\Delta k - 1)\gamma^2 + 16D(4k - 1)))^2).$$

### 1.2.3 节部分解

$$\Delta k A1 =$$

$$[(24((N + 22\lambda)\gamma^4 + (13N + 8\theta - 8\lambda)\gamma^3 - 2(7N + 2\theta + 34\lambda)\gamma^2 - 4(6N + 3\theta - 4\lambda)\gamma + 24N + 8\theta + 48\lambda)k^2 + (((120\lambda - 6N)\phi^2 - 36\lambda)\gamma^4 + ((30N + 24\theta - 48\lambda)\phi^2 - (36N + 336\lambda)\phi - 12N - 12\theta + 12\lambda)\gamma^3 + ((24N - 240\lambda)\phi^2 + (96\lambda - 60N - 48\theta)\phi + 108N + 12\theta + 204\lambda)\gamma^2 + 24((4\lambda - 2N - \theta)\phi^2 + 28\lambda\phi + 2(N + \theta - \lambda)\gamma + 12(2(2N + \theta - 4\lambda)\phi - 6N + 2\theta + 28\lambda)k - 3(3(\phi^3 - \phi)\gamma^3 + (4 - 6\phi^2 + \phi)\gamma^2 + (4\phi - 6\phi^3)\gamma + 12\phi^2 - 4\phi - 16)R\lambda)k]/[(((96N + 528\lambda)\gamma^2 + (336N + 240\theta - 192\lambda)\gamma - 96(6N + \theta + 6\lambda))k^2 + 36Rk - 9\phi^2\lambda R^2)(2 - \gamma^2)],$$

$$tA1 =$$

$$((224(N + \theta)\gamma^2 - 16N\gamma^3 - 128(2N + \theta)\gamma - 128\theta)k^3 + (4(N\phi^2 - 2\lambda)\gamma^3 + ((72N + 64\theta)\phi^2 - 8N(2\phi + 3) - 24\theta)\gamma^2 + ((-80N - 32\theta)\phi^2 - 160(N + \theta)\phi - 16(\theta + 4\lambda))\gamma + 32(5N + 2\theta)\phi + 96N + 128\theta + 64\lambda)k^2 - 2R((\phi\gamma^2\lambda + 3(N + \theta)\phi^3 - 3N\phi^2 + 2\lambda\phi - 2\lambda)\gamma -$$

$$6(N + \theta)\phi^2 + 6(N - \lambda)\phi + 6(N + \theta) + 4\lambda)k - 3\phi\lambda R^2)/(4k(-32(\gamma + 3)k^2 + (4(5\phi^2 - 2)\gamma^2 - 8(\phi^2 + 7\phi + 1)\gamma + 16\phi + 72)k + 3(2 - R\phi^2)R)).$$

2.1.2 节部分解

$$\begin{aligned} \pi_{dA2} &= 0.03113(3.6921 - \Delta k)(t + 12.0057)^2(4 - \Delta k)/(\Delta k - 3.6932)^2, \\ \pi_{fA2} &= 0.02999(368.31 - 100.04\Delta k - 12.21t + 3.28\Delta kt)^2/(\Delta k - 3.6932)^2, \\ \Delta k_{3A1} &= (3.6044 \cdot 10^{26}t^2 - 1.67 \cdot 10^{-10}(-2.4757 \cdot 10^{68}(t + 10.5132)(t - 53.01)(t^2 + 24.011t + 144.137))^{1/2} - 2.5246 \cdot 10^{28}t + 3.6258 \cdot 10^{29})/(9.7171 \cdot 10^{25}t^2 - 6.8096 \cdot 10^{27}t + 9.8551 \cdot 10^{28}). \end{aligned}$$

第 3 节部分解

$$\begin{aligned} q_{dA2} &= -(229.6 - 57.4\Delta k)/(1201.43 - 325.31\Delta k), \\ q_{fA2} &= (781.44 - 209.92\Delta k)/(1201.43 - 325.31\Delta k), \\ \pi_{dA3} &= -2 \cdot 10^{-8}(4 - \Delta k)(3.6921 - \Delta k)(5 \cdot 10^{-4}t^2 + 3.1133 \cdot 10^6t + 3.5821 \cdot 10^7)/(\Delta k - 3.6932)^2, \\ \pi_{fA3} &= [0.009676((-66.6886t + 10^{-8}t^2 + 2067.3476)\Delta k^4 + (989.0924t + 10^{-7}t^2 - 30578.6067)\Delta k^3 + (1.6961 \cdot 10^5 - 5501.1179t)\Delta k^2 + (13598.1627t - 4.1812 \cdot 10^5)\Delta k + 3.8652 \cdot 10^5 - 10^{-6}t^2 - 12604.8744 \cdot t)]/(\Delta k - 3.6932)^4. \end{aligned}$$

2.1 节中保证所有最优解为正, 只需保证  $p_d > 0$  即可, 将式(11)、(12)代入, 得到  $p_d^* = (G1 \cdot \Delta k - G3)/G2$ , 其中  $G1 = (-8(a + 3c)k - 4a\phi^2)\gamma^4 + (-16Ck + 4\phi(C\phi + 3a + c))\gamma^3 + ((48a + 80c)k + 8a\phi^2 - 8C\phi - 8a - 8c)\gamma^2 + (32Ck - 8\phi(C\phi + 3a + c))\gamma - 64Nk + 16C\phi + 16(a + c)$ ,  $G2 = (32k^2 + (4\phi^2 - 32\Delta k - 2)k - 4\phi^2\Delta k)\gamma^4 - 16\phi F\gamma^3 + (-128k^2 - 8(\phi^2 - 16\Delta k - 4)k + 8\phi^2\Delta k - 16\Delta k - 2)\gamma^2 + 32\phi E\gamma + 128(k - 0.25)D$ ,  $G3 = (-8(a + 3c)k^2 + 2a(1 - 2\phi^2)k)\gamma^4 + ((4C\phi^2 + (3a + c)\phi + 4C)k - 16Ck^2 - \phi a)\gamma^3 + (16(3a + 5c)k^2 - 8(C\phi - a\phi^2 + 3a + c)k + 2a)\gamma^2 + (32Ck^2 - (8C\phi^2 + 8(3a + c)\phi + 16C)k + 4\phi a)\gamma - 64(a + c)k^2 + 16(C\phi + 3a + c)k - 8a$ , 并令其大于 0, 解得  $\Delta k < \Delta k_1$ ,  $\Delta k_1 = (8k((a + 3c)k + a(\phi^2 -$

$1)/4)\gamma^4 + (16Ck^2 + (-4C\phi^2 + (-12a - 4c)\phi - 4C)k + \phi a)\gamma^3 + ((-48a - 80c)k^2 + (-8a\phi^2 + 8C\phi + 24a + 8c)k - 2a)\gamma^2 + (-32Ck^2 + (8C\phi^2 + 8(3a + c)\phi + 16C)k - 4\phi a)\gamma + (64a + 64c)k^2 - (16C\phi + 48a + 16c)k + 8a)/(8(\gamma^2 - 2)((a + 3c)k + a\phi^2/2)\gamma^2 + (2Ck - \phi(C\phi + 3a + c)/2)\gamma + C\phi + (a + c)(1 - 4k))$ ,  $\Delta k < \Delta k_1$  可保证  $p_d^*$  分母为正, 但当  $\Delta k > k((4\gamma^3 - 8\gamma)k + (2\gamma - \gamma^3)\phi^2 + (2\gamma^2 - 4)\phi - \gamma^3 + 4\gamma)/((\gamma^2 - 2)(4\gamma k - \gamma\phi^2 + 2\phi))$  时, 须同时保证  $t < (G4\Delta k + G5)/G6$ , 才能满足  $p_d^* > 0$  的条件, 其中  $G4 = 8((a\phi^2/2 + k(a + 3c))\gamma^2 + (c - a - \theta))/(2\phi^2 - \phi(3a + c)/2 + 2k(a - c + \theta)\gamma + (a - c + \theta)\phi - 4(a + c)(k - 0.25)(2 - \gamma^2))$ ,  $G5 = 8((a + 3c)\gamma^2 + 2(N + \theta)\gamma - 4N)(\gamma^2 - 2)k^2 + (2(2\phi^2 - 1)a\gamma^4 + (-4(\phi^2 + 3\phi + 1)a + 4(c - \theta)\phi^2 - 4(\phi c - c + \theta))\gamma^3 + (8(3 - \phi^2 + \phi)a - 8(c - \theta)\phi + 8c)\gamma^2 + (8(\phi^2 + 3\phi + 2)a + 8(\theta - c)\phi^2 + 8(\phi c - 2c + 2\theta))\gamma - 16(\phi + 3)a + 16(c - \theta)\phi - 16c)k + a(2 - \gamma)(\gamma + 2)R$ ,  $G6 = 16\gamma(\gamma^2 - 2)k^2 + (8(\gamma^2\phi + (\phi^2 + 4\Delta k + 2)\gamma - 2\phi) - 4(\phi^2 + 4\Delta k + 1)\gamma^3)k + 4\phi\Delta k(\gamma^2 - 2)(\gamma\phi - 2)$ .

2.1.1 节性质 1 分析

在性质 1 中:

1) 满足  $\Delta k < \Delta k_1$  的条件下, 有  $\partial q_f^*/\partial \Delta k = \gamma(kN\gamma^2 + (2Ck + 0.5\phi(C\phi - N))\gamma - 4Nk - C\phi + N)k(2 - \gamma^2)(4 - \gamma^2)/(32((k^2 + (\phi^2/8 - \Delta k - 1/16)k - \phi^2\Delta k/8)\gamma^4 - \phi F\gamma^3/2 + (-4k^2 + (4\Delta k - 0.25\phi^2 + 1)k + 0.25\Delta k(\phi^2 - 2) - 1/16)\gamma^2 + \phi E\gamma + 4D(k - 0.25))^2$  分子为负, 分母为正,  $\partial q_f^*/\partial \Delta k < 0$ ;  $\partial q_f^*/\partial t = 16(2E\gamma^2 - 4k + 4\Delta k + 1)k/((32k^2 + 2(2\phi^2 - 16\Delta k - 1)k - 4\phi^2\Delta k)\gamma^4 - 16\phi F\gamma^3 + (-128k^2 + 8(16\Delta k + 4 - \phi^2)k + 8\Delta k(\phi^2 - 2) - 2)\gamma^2 + 32(\phi E\gamma + 4D(k - 0.25)))$  分子为负, 分母为正,  $\partial q_f^*/\partial t < 0$ .  $\partial q_d^*/\partial \Delta k = 4((8N - 2N\gamma^2 - 4C\gamma)k + (C\phi - N)R)(2 - \gamma^2)/((32k^2 + (4\phi^2 - 32\Delta k - 2)k - 4\phi^2\Delta k)\gamma^4 - 16\phi D\gamma^3 + (-128k^2 + (-8\phi^2 + 128\Delta k + 32)k + 8\phi^2\Delta k - 16\Delta k - 2)\gamma^2 + 32\phi E\gamma + 128D(k - 0.25))$  分子分母均为正,  $\partial q_d^*/\partial \Delta k > 0$ ;  $\partial q_d^*/\partial t = 8(k - \Delta k)((2k + 0.5\phi^2)\gamma - \phi)(2 - \gamma^2)/((32k^2 + (4\phi^2 - 32\Delta k - 2)k - 4\phi^2\Delta k)\gamma^4 - 16\phi F\gamma^3 + (-128k^2 + (128\Delta k - 8\phi^2 + 32)k + 8\phi^2\Delta k - 16\Delta k - 2)\gamma^2 + 32\phi E\gamma + 128D(k - 0.25))$  分子分母均为正,  $\partial q_d^*/\partial t > 0$ .

2)  $q_f^* > q_d^*$  时, 此处临界值为  $\Delta k_2 = ((N\gamma^4 + 2(\theta - t)\gamma^3 + 2(2\theta - 2t - N)\gamma^2 + 4(t - \theta)\gamma + 8(t - \theta))k^2 + ((0.5\phi(C\phi - N))\gamma^3 + (0.5C - C\phi)\gamma^2 + (N\phi - C\phi^2)\gamma + 2C\phi - 2t + 2\theta)k)/((\gamma^2 - 2)(kN\gamma^2 + (0.5C\phi^2 -$

0.5Nφ - 2k(t - θ))γ - Cφ + 4(θ - t)k + a - c), 将 Δk<sub>1</sub> 代入, 此处 t 值精确解过长, 不再展示.

2.1.2 节性质 2 分析

性质 2 中:

1) 满足 Δk < Δk<sub>1</sub> 的条件下, 有 ∂π<sub>f</sub><sup>\*</sup>/∂Δk = ((k - Δk)Nγ<sup>3</sup> - 2ECγ<sup>2</sup> - 2(k - Δk)Nγ + 4CD)(kNγ<sup>2</sup> + (2Ck + 0.5φ(Cφ - N))γ - 4Nk - Cφ + N)(γ - 2)γ((φ<sup>2</sup>/8 + k)γ<sup>2</sup> - 0.5γφ - 2k + 0.5)(γ+2)k(γ<sup>2</sup>-2)/(-64((k<sup>2</sup>+(φ<sup>2</sup>/8-Δk-1/16)k-φ<sup>2</sup>Δk/8)γ<sup>4</sup>-φFγ<sup>3</sup>/2+((4Δk-0.25φ<sup>2</sup>+1)k-4k<sup>2</sup>+0.25Δk(φ<sup>2</sup>-2)-1/16)γ<sup>2</sup>+φEγ+4D(k-0.25))) 分子为负, 分母为正, ∂π<sub>f</sub><sup>\*</sup>/∂Δk < 0; ∂π<sub>f</sub><sup>\*</sup>/∂t = (-((k - Δk)Nγ<sup>3</sup> - 2ECγ<sup>2</sup> - 2(k - Δk)Nγ + 4CD)((φ<sup>2</sup>/8 + k)γ<sup>2</sup> - 0.5γφ - 2k + 0.5)k(2Eγ<sup>2</sup> - 4(k - Δk) + 1))/[4(k<sup>2</sup> + (φ<sup>2</sup>/8 - Δk - 1/16)k - φ<sup>2</sup>Δk/8)γ<sup>4</sup> - φFγ<sup>3</sup>/2 + ((4Δk - φ<sup>2</sup>/4 + 1)k - 4k<sup>2</sup> + 0.25Δk(φ<sup>2</sup> - 2) - 1/16)γ<sup>2</sup> + φEγ + 4D(k - 0.25)] 分子为负, 分母为正, ∂π<sub>f</sub><sup>\*</sup>/∂t < 0. ∂π<sub>d</sub><sup>\*</sup>/∂Δk = ((kNγ<sup>2</sup> + (2Ck + φ(Cφ - N)/2)γ - 4Nk - Cφ + N)<sup>2</sup>((k<sup>2</sup> - (φ<sup>2</sup>/8 + Δk + 1/16)k + φ<sup>2</sup>Δk/8)γ<sup>6</sup> - 0.5φFγ<sup>5</sup> + ((0.75φ<sup>2</sup> + 8Δk + 2.25)k - 8k<sup>2</sup> - 0.75Δk(φ<sup>2</sup> + 2) - 1/8)γ<sup>4</sup> + φDγ<sup>3</sup> + (20k<sup>2</sup> - (φ<sup>2</sup> + 20Δk + 8)k + Δk(φ<sup>2</sup> + 5) + 0.5)γ<sup>2</sup> + 0.5γφ - 16D(k - 0.25))(γ<sup>2</sup> - 4))/(256((k<sup>2</sup> + (φ<sup>2</sup>/8 - Δk - 1/16)k - φ<sup>2</sup>Δk/8)γ<sup>4</sup> - 0.5φFγ<sup>3</sup> + ((4Δk - 0.25φ<sup>2</sup> + 1)k - 4k<sup>2</sup> + 0.25Δk(φ<sup>2</sup> - 2) - 1/16)γ<sup>2</sup> + φEγ + 4D(k - 0.25))<sup>3</sup>) 分子为正, 分母为正, ∂π<sub>d</sub><sup>\*</sup>/∂Δk > 0; ∂π<sub>d</sub><sup>\*</sup>/∂t = ((Cγ<sup>4</sup> + 4(Δk - k) + 0.5)γ<sup>2</sup> + 4(k - Δk) - 1)(kNγ<sup>2</sup> + (2Ck + 0.5φ(Cφ - N))γ - 4Nk - Cφ + N)(k - Δk)(φ - 0.5(4k + φ<sup>2</sup>γ))/(8((k<sup>2</sup> + ((2φ<sup>2</sup> - 1)/16 - Δk)k - φ<sup>2</sup>Δk/8)γ<sup>4</sup> - 0.5φFγ<sup>3</sup> + ((4Δk - 0.25φ<sup>2</sup> + 1)k - 4k<sup>2</sup> + 0.25Δk(φ<sup>2</sup> - 2) - 1/16)γ<sup>2</sup> + φEγ + 4D(k - 0.25))<sup>2</sup>) 分子为正, 分母为正, ∂π<sub>d</sub><sup>\*</sup>/∂t > 0.

2) 求解令 π<sub>d</sub><sup>\*</sup> = π<sub>f</sub><sup>\*</sup> 时 Δk 值, 并代入 Δk 的临界值 Δk<sub>1</sub> 进行分析, 但此处精确解无法得出, maple2021 显示 [输出长度超过限制 1 000 000].

2.1.3 节性质 3 分析

性质 3 中 2) 对应的 Δk<sub>4</sub> 可根据 e<sub>f</sub><sup>\*</sup> > e<sub>d</sub><sup>\*</sup> 解得, 即 Δk<sub>4</sub> = ((γ + 2)R(2 - γ)(Cφ - t + θ) + 4(a - c)(φ + 0.5)γ<sup>4</sup> - 4C(2φ + 1)γ<sup>3</sup> + 16(Cφ + t - θ)γ - (8Nφ + 16(t - θ))γ<sup>2</sup> + 32(t - θ)k)/(4(2 - γ<sup>2</sup>)R(aγ - cγ - 2C)).

2.2.1 节性质 4 及性质 5 证明

下面给出性质 4 的 ∂Δk/∂Δλ 的严格证明.

证明 在 Δk < Δk<sub>1</sub> 的条件下, 有 ∂Δk/∂Δλ =

(2k<sup>2</sup>(γ<sup>2</sup> - 4)((176k<sup>2</sup> + 3φ<sup>4</sup> + 40kφ<sup>2</sup> - 16k)γ<sup>2</sup> - (64k<sup>2</sup> - 16(φ<sup>2</sup> + 7φ + 1)k + 12(φ<sup>2</sup> + 1))γ - 192k<sup>2</sup> + (32φ + 144)k + 12φ<sup>2</sup> - 24)((12Nγ<sup>2</sup> + 4(N + 2θ)γ - 24N)k - R((γN + N + 2θ)φ - 4N)))/(((32N + 176λ)γ<sup>2</sup> + (112N + 80θ - 64λ)γ - 192N - 32θ - 192λ)k<sup>2</sup> - (12((10/3γλ + N + θ - 4/3λ)φ - 2N - 8λ/3)R)k + 3φ<sup>2</sup>λR<sup>2</sup>)<sup>2</sup>(γ<sup>2</sup> - 2)) 分母、分子均为负, 由此 ∂Δk/∂Δλ > 0. □

下面给出性质 5 中 ∂t/∂λ 的严格证明.

证明 在 Δk < Δk<sub>1</sub> 的条件下, 分子大于 0, 分母小于 0, 由此得到 ∂t/∂λ = (8(8 - γ<sup>3</sup> - 8γ)k<sup>2</sup> + 2(γφ - 2)(γ<sup>2</sup>φ + 2(φ - 1)γ - 12φ + 4)k - 3φ(γφ - 2)<sup>2</sup>)/(352((γ<sup>2</sup> - (4γ + 12)/11)k<sup>2</sup> + ((5φ<sup>2</sup> - 2)/22)γ<sup>2</sup> - (φ<sup>2</sup> + 7φ + 1)/11γ + (2φ + 9)/11)k + 3(γφ<sup>3</sup> - 2φ<sup>2</sup> + 4)(γφ - 2)/176)k 分子大于 0, 分母小于 0, 由此得到 ∂t/∂λ < 0. □

2.2.2 节性质 6 和性质 7 分析

性质 6 的 1)~3) 及性质 7 的 1) 和 2) 精确解过大不宜展示.

第 3 节数值扩展分析

q<sub>dA2</sub> = -(229.6 - 57.4Δk)/(1 201.43 - 325.31Δk),
q<sub>fA2</sub> = (781.44 - 209.92Δk)/(1 201.43 - 325.31Δk),
π<sub>dA2</sub> = -2 · 10<sup>-8</sup>(4 - Δk)(3.692 1 - Δk)(5 · 10<sup>-4</sup>t<sup>2</sup> + 3.113 3 · 10<sup>6</sup>t + 3.582 1 · 10<sup>7</sup>)/(Δk - 3.693 2)<sup>2</sup>,
π<sub>fA2</sub> = [0.009 676((-66.688 6t + 10<sup>-8</sup>t<sup>2</sup> + 2 067.347 6)Δk<sup>4</sup> + (989.092 4t + 10<sup>-7</sup>t<sup>2</sup> - 30 578.606 7)Δk<sup>3</sup> + (1.696 1 · 10<sup>5</sup> - 5 501.117 9t)Δk<sup>2</sup> + (13 598.162 7t - 4.181 2 · 10<sup>5</sup>)Δk + 3.865 2 · 10<sup>5</sup> - 10<sup>-6</sup>t<sup>2</sup> - 12 604.874 4 · t)]/(Δk - 3.693 2)<sup>4</sup>.

为保证各最优解为正和函数的凹性, 只需保证 p<sub>d</sub><sup>d\*</sup> > 0 即可, 令 C<sub>1</sub> = a - c<sub>1</sub> - t + θ, C<sub>2</sub> = a - c<sub>2</sub> - t + θ, 此时 Δk < Δk<sub>5</sub>, 有 Δk<sub>5</sub> = (8((a + 3c<sub>1</sub>)k + 0.25a(2φ<sup>2</sup> - 1))kγ<sup>4</sup> + (16C<sub>2</sub>k<sup>2</sup> - 4(C<sub>2</sub>φ<sup>2</sup> + (3a + c<sub>1</sub>)φ + C<sub>2</sub>)k + φa)γ<sup>3</sup> + (8(C<sub>2</sub>φ - aφ<sup>2</sup> + 3a + c<sub>1</sub>)k - 16(3a + 5c<sub>1</sub>)k<sup>2</sup> - 2a)γ<sup>2</sup> + ((8C<sub>2</sub>φ<sup>2</sup> + 8(3a + c<sub>1</sub>)φ + 16C<sub>2</sub>)k - 32C<sub>2</sub>k<sup>2</sup> - 4φa)γ + 64(a + c<sub>1</sub>)k<sup>2</sup> - 16(C<sub>2</sub>φ + 3a + c<sub>1</sub>)k + 8a)/(8(γ<sup>2</sup> - 2)((a + 3c<sub>1</sub>)k + 0.5aφ<sup>2</sup>)γ<sup>2</sup> + (2C<sub>2</sub>k - 0.5(C<sub>2</sub>φ + 3a + c<sub>1</sub>)φ)γ - 4(a + c<sub>1</sub>)(k - 1) + C<sub>2</sub>φ), 且 Δk > (k((4γ<sup>3</sup> - 8γ)k + (2γ - γ<sup>3</sup>)φ<sup>2</sup> + (2γ<sup>2</sup> - 4)φ - γ<sup>3</sup> + 4γ)/((γ<sup>2</sup> - 2)(4γk - γφ<sup>2</sup> + 2φ)) 时, 有 t < (G7Δk + G8)/G9, 其中

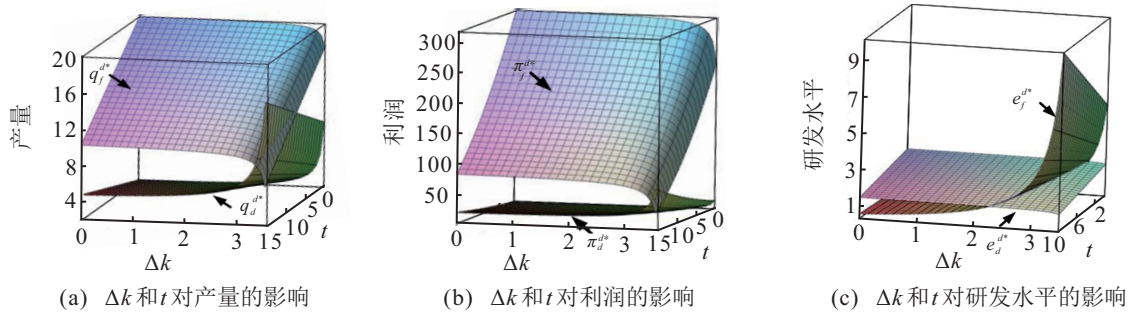
$$G7 = 8((a+3c_1)k+0.5a\phi^2)\gamma^2 + (0.5(c_2-a-\theta)\phi^2 - 0.5(3a+c_1)\phi+2k(a-c_2+\theta))\gamma + (a-c_2+\theta)\phi - 4(a+c_1)(k-0.25)(2-\gamma^2),$$

$$G8 = 8(\gamma^2-2)((a+3c_1)\gamma^2 + 2(a-c_2+\theta)\gamma - 4(a+c_1)k^2 + (2(2\phi^2-1)a\gamma^4 - (4(\phi^2+3\phi+1)a+4(\theta-c_2)\phi^2+4(\phi c_1-c_2+\theta))\gamma^3 + (8(\phi-\phi^2+3)a+8(\theta-c_2)\phi+8c_1)\gamma^2 + (8(\phi^2+3\phi+2)a-8(c_2-\theta)\phi^2+8(\phi c_1-2c_2+2\theta))\gamma - 16(\phi+3)a + 16(c_2-\theta)\phi - 16c_1)k + a(\gamma-2)(\gamma+2)(\gamma\phi-2),$$

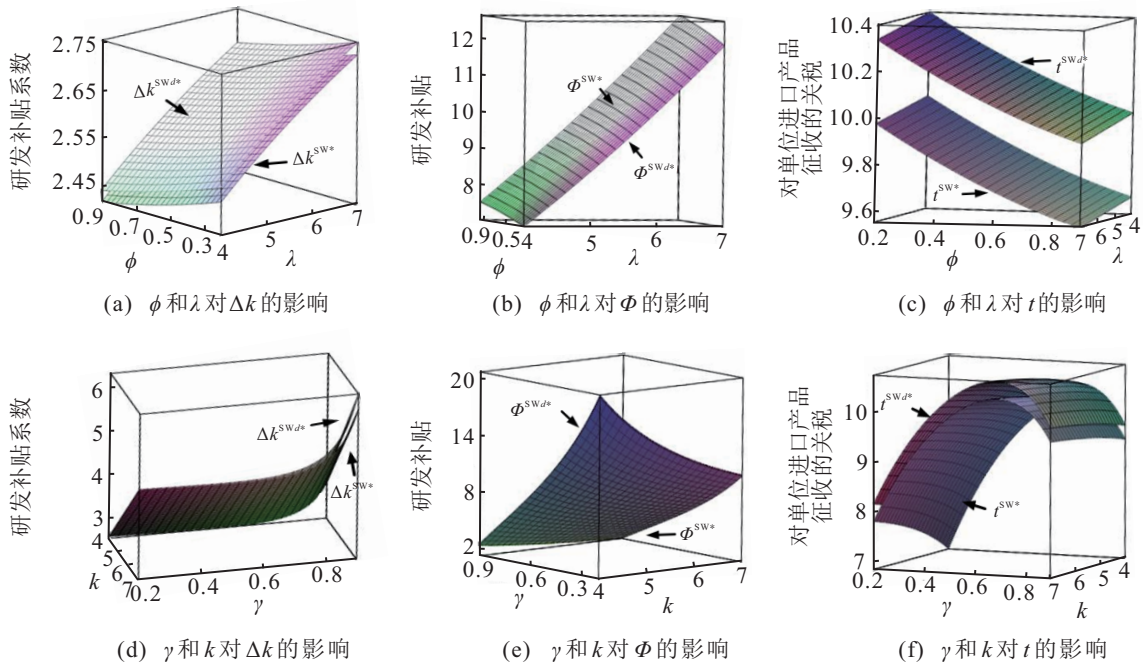
$$G9 = (16k^2-4(\phi^2+4\Delta k+1)k+4\phi^2\Delta k)\gamma^3 + 8\phi(k-\Delta k)\gamma^2 + 8((\phi^2+4\Delta k+2)k-4k^2-\phi^2\Delta k)\gamma - 16\phi(k-\Delta k).$$

因为数值扩展的  $c_1$  与第2节的  $c$  相同, 分析中, 令第2节的  $c = c_1, q_d^{d*} - q_d^* = (16(c_1 - c_2)(k - \Delta k)(\gamma^2 - 2)((0.25\phi^2 + k)\gamma - 0.5\phi)) / ((32k^2 + 2(2\phi^2 - 16\Delta k - 1)k - 4\phi^2\Delta k)\gamma^4 - 16\phi F\gamma^3 - (128k^2 + (8\phi^2 - 128\Delta k - 32)k - 8\phi^2\Delta k + 16\Delta k + 2)\gamma^2 + 32E\phi\gamma + 32(4k - 1)D)$ , 在满足上述条件且  $c_1 > c_2$  时, 分子为负, 分母为正, 因此  $q_d^{d*} - q_d^* > 0$ . 其余精确解过长, 不宜展示, 略.

附录B 相关图



图B1 初始边际成本不同时  $\Delta k$  和  $t$  的影响



图B2 初始边际成本不同与初始边际成本相同时政府决策的灵敏度分析

参考文献 (References)

[1] Arora A, Belenzon S, Lia S E. Knowledge spillovers and corporate investment in scientific research[J]. American Economic Review, 2021, 111(3): 871-898.

[2] Eapen A, Yeo J, Sasidharan S. Finance constraints and technology spillovers from foreign to domestic firms[J]. Economic Modelling, 2019, 76(1): 50-62.

[3] Claude D' Aspremont, Jacquemin A. Cooperative and noncooperative R&D in duopoly spillovers[J]. The American Economic Review, 1988, 78(5): 1133-1137.

[4] Amir M, Amir R, Jin J. Sequencing R&D decisions in a two-period duopoly with spillovers[J]. Economic Theory, 2000, 15(2): 297-317.

[5] Petrakis E, Tsakas N. The effect of entry on R&D networks[J]. The RAND Journal of Economics, 2018, 49(3): 706-750.

- [6] Yan Q Y, Yang L. Optimal licensing in a differentiated Bertrand market under uncertain R&D outcomes and technology spillover[J]. *Economic Modelling*, 2018, 68(1): 117-126.
- [7] 周晓晗, 张江华, 徐进. 基于序贯博弈的企业研发合作动机研究[J]. *管理科学学报*, 2021, 24(2): 111-126. (Zhou X H, Zhang J H, Xu J. Research on the motivation for R&D cooperation between firms based on sequential game[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2021, 24(2): 111-126.)
- [8] Wu Y F, Zhang X J, Chen J. Cooperation of green R&D in supply chain with downstream competition[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 160: 107571.
- [9] Wang S X, Yang L H. Spatial competition, strategic R&D and the structure of innovation networks[J]. *Journal of Business Research*, 2022, 139: 13-31.
- [10] Koga T. R&D subsidy and self-financed R&D: The case of Japanese high-technology start-ups[J]. *Small Business Economics*, 2005, 24(1): 53-62.
- [11] Lee S H, Tomaru Y. Output and R&D subsidies in a mixed oligopoly[J]. *Operations Research Letters*, 2017, 45(3): 238-241.
- [12] Choi J, Lee J. Repairing the R&D market failure: Public R&D subsidy and the composition of private R&D[J]. *Research Policy*, 2017, 46(8): 1465-1478.
- [13] 陈红, 纳超洪, 雨田木子, 等. 内部控制与研发补贴绩效研究[J]. *管理世界*, 2018, 34(12): 149-164. (Chen H, Na C H, Yutian M Z, et al. Internal control and R&D subsidy performance[J]. *Management World*, 2018, 34(12): 149-164.)
- [14] Chen J Y, Dimitrov S, Pun H. The impact of government subsidy on supply Chains' sustainability innovation[J]. *Omega*, 2019, 86: 42-58.
- [15] Guo J Q, Yu H L, Gen M. Research on green closed-loop supply chain with the consideration of double subsidy in e-commerce environment[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 149(11): 1-11.
- [16] Xie L, Hou P W, Han H S. 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(2): 1-34.
- [17] Hafezalkotob A. Competition of domestic manufacturer and foreign supplier under sustainable development objectives of government[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2017, 292(1): 294-308.
- [18] Xu J Y, Hsu V N, Niu B Z. The impacts of markets and tax on a multinational firm's procurement strategy in China[J]. *Production and Operations Management*, 2018, 27(2): 251-264.
- [19] Niu B Z, Mu Z H, Chen K L. Quality spillover, tariff, and multinational firms' local sourcing strategies[J]. *International Transactions in Operational Research*, 2019, 26(6): 2508-2530.
- [20] Fan Z P, Cao Y, Huang C Y, et al. Pricing strategies of domestic and imported electric vehicle manufacturers and the design of government subsidy and tariff policies[J]. *Transportation Research—Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 143(11): 1-21.
- [21] Kumar S, Pandey N, Lim W M, et al. What do we know about transfer pricing? Insights from bibliometric analysis[J]. *Journal of Business Research*, 2021, 134(9): 275-287.
- [22] Dong L X, Kouvelis P. Impact of tariffs on global supply chain network configuration: Models, predictions, and future research[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2020, 22(1): 25-35.
- [23] He M, Kang K, Mu X. Impact of tax difference and asset structure on a capital-constrained vertical equity holding transnational supply chain[J]. *International Journal of Production Research*, 2022, 60(11): 3606-3629.
- [24] Cellini R, Lambertini L. Dynamic R&D with spillovers: Competition vs cooperation[J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2009, 33(3): 568-582.
- [25] Yang R, Tang W S, Zhang J X. Technology improvement strategy for green products under competition: The role of government subsidy[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 289(2): 553-568.
- [26] Ni D B, Li K W, Tang X W. Production costs, scope economies, and multi-client outsourcing under quantity competition[J]. *International Journal of Production Economics*, 2009, 121(1): 130-140.
- [27] Chang Y M, Raza M F. Import competition, product quality reversal, and welfare[J]. *Economics Letters*, 2018, 163(2): 162-166.
- [28] Yu Z, Wu X L, Li M, et al. Import competition and the gender gap in labor force participation: Evidence from China[J]. *China Economic Review*, 2021, 69(10): 1-31.

### 作者简介

魏承莉(1995—), 女, 博士生, 从事复杂产品及供应链管理的研究, E-mail: weichengli19951020@163.com;

陈洪转(1977—), 女, 教授, 博士生导师, 从事复杂装备研制管理、物流与供应链管理、质量管理等研究, E-mail: chz-hhu@163.com.