

基础设施视角下供应安全对天然气博弈的影响

张 华^{1,2}, 周 兵^{1,2}, 曾小晏¹

(1. 重庆工商大学长江上游经济研究中心, 重庆 400067;

2. 重庆工商大学会计学院, 重庆 400067)

摘要: 近年来以我国为代表的进口国因基础设施滞后频频出现天然气供应安全问题, 对此将“供应安全”这一非利润目标纳入传统效用函数, 构建了进出口两国共建基础设施的动态博弈模型, 运用微分对策理论, 求得双方的最优策略及效用. 结果表明, 供应安全意识、成本分担契约均能推动基础设施的建设, 但在短期内的效果有限; 通常情况下, 供应安全意识、成本分担契约均能使双方效用实现帕累托改善, 只不过需要在长期下才能突显, 但如果基础设施基准量过高, 供应安全意识可能反而起到负效应, 使进口国效用下降.

关键词: 天然气供应安全; 基础设施; 成本分担契约; 微分对策

中图分类号: F224 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2021)03-0314-16

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2021.03.003

Effect of supply security on natural gas game from the perspective of infrastructure

Zhang Hua^{1,2}, Zhou Bing^{1,2}, Zeng Xiaoyan¹

(1. Research Center for Economy of Upper Reaches of the Yangtze River, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;

2. Accounting School, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: In recent years, natural gas supply security problems frequently occur in the importing countries represented by China due to the lag of infrastructure. Hence, a dynamic game model for the natural gas trade market is developed. The theory of differential game is used to find and analyze the optimal solutions for both sides: the importing country and exporting country. Results show that the supply security awareness and the cost-sharing contract can both play a positive role in the natural gas infrastructure, though the effect may be limited in the short term. Generally, the supply security awareness and the cost-sharing contract can both benefit both sides, which may show up in the long run. However, if the benchmark infrastructure stock is too high, supply security awareness may play a negative effect on the utility of the importing country.

Key words: natural gas supply security; infrastructure; cost sharing contract; differential game

1 引言

天然气的开发利用是我国推进能源生产和消费革命的重要途径之一. 近年来, 我国的天然气消费量不断增加, 2018 年我国天然气消费总量突破 $2\,800 \times 10^8 \text{ m}^3$, 同比增长 17%. 同时, 我国天然气进口量逐年上升,

收稿日期: 2019-07-03; 修订日期: 2020-11-23.

基金项目: 重庆市社会科学规划资助项目(2019BS067); 重庆市自然科学基金资助项目(cstc2020jcyj-msxmX0725); 重庆工商大学引进高层次人才科研启动经费资助项目(1955061).

对外进口依赖程度越来越大,已超过40%。2018年我国天然气进口量累计 $1\,254 \times 10^8 \text{ m}^3$,同比增长31.9%,超过日本已成为世界天然气进口第一大国。可见,我国作为天然气消费与进口大国,其供应安全问题已不容小觑。

进口国出现天然气供应安全问题可能存在诸多原因。例如,因出口国的经济、政治、军事以及自然灾害等因素导致天然气供应中断;又或者因进口国的天然气储备不足,进口多元化程度不高,以及天然气与其他替代能源比价关系不合理等因素。而另外一个重要原因在于,进口国的天然气管网、LNG(液态天然气)接收站以及储气库等基础设施建设滞后,输送接收能力不能满足保供需求。又例如,2017年冬季,我国天然气供应紧张,华北、华中地区出现大面积“气荒”。国家统计局数据显示,2017年8月我国LNG的价格为3 129.1元/t,9月为3 519元/t,10月为4 337.4元/t,11月为5 636.7元/t。由此可计算得出,2017年11月的LNG价格较8月、9月和10月,分别上涨80%、60%和30%左右。然而,2017年12月的LNG价格为4 780.8元/t,较10月仅上涨3.5%。换言之,2017年冬与2018年春全国较大范围内出现的天然气供应紧张局面并非因全球天然气供应紧缺、价格上涨,而是由于LNG接收站等基础设施建设滞后或接收能力不足所导致。这不仅反映了“十三五”能源规划中的天然气供应安全问题,同时也反映了基础设施对保障天然气供应安全的重要性。那么,鉴于进口国可能存在因基础设施建设滞后而导致天然气供应安全问题,进口国在与出口国共建天然气基础设施以及贸易博弈过程中,如何制定最优策略使得经济利益与供应安全总效用最大化?为此,本文以进出口国双方共建天然气基础设施为背景,构建一个天然气进出口动态博弈模型,基于基础设施的视角研究供应安全意识、成本分担契约对天然气进出口国最优均衡策略的影响,从理论上系统分析均衡解的经济含义与决策启示,对决策者做出合理决策具有重要意义。

目前,天然气贸易博弈主要围绕以下重要参与者展开。1) 欧亚天然气贸易中的博弈倍受关注。天然气出口至欧洲的上游市场以及欧洲内部批发交易的下游市场,按不同的信息结构存在着不同的博弈类型。比如俄罗斯、挪威以及阿尔及利亚之间的出口竞争,而供应商在此过程中可能会形成双重边际化(double marginalization)来获取消费者剩余^[1,2]。同时,中国、日本、韩国和印度等进口国的强劲需求也正在对欧亚市场甚至全球天然气市场产生影响。2) 从全球视角研究天然气竞争博弈。部分文献将欧洲、北美以及亚洲天然气市场纳入统一的博弈模型进行考虑,从全球视角研究天然气竞争博弈。比如, Cigerli^[3]将全球的天然气参与者划分为欧洲、北美、亚太、南美、西非、北非、俄罗斯、中东和澳大利亚西北等九个地区,运输方式包括管道天然气与液化天然气,建立了天然气贸易的博弈模型。北美页岩气的开发将使得全球天然气出口国的市场力降低,美国拟建的LNG出口项目也将改变世界液化天然气供应的长期预期^[4]。3) 中国天然气进口博弈。中国西气东输二线于2009年将中亚土库曼斯坦的天然气经过数千公里输送至中国东部,同时中国也开始从天然气资源第三大国卡塔尔进口液化天然气,另外中国也与天然气资源第二大国伊朗有紧密合作,以求获得稳定的天然气供给,中国以独特的外交手段在中亚、中东、非洲以及南美获得海外稳定的天然气资源,这对美国、俄罗斯和欧洲等能源市场产生深远影响。中俄在经历了20年的博弈后,终于在2014年签署了天然气供应协议^[5,6]。

天然气供应安全方面。Biresselioglu等^[7]利用PCA(主成分分析法)构建了供应安全指数,认为衡量天然气供应安全最有效的指标为出口国的数量,出口国的脆弱性以及天然气进口总量。Pavlović等^[8]提出了一个稳健的评价天然气供应安全的综合指数,该指数主要包括能源进口的依赖指数,能源密集度,国内消费总量,以及国民经济对天然气的依赖指数等。Shaikh等^[9]、Lu等^[10]及Su等^[11]均利用了ENA(生态网络分析)对中国天然气供应安全性进行评估。Ruble^[12]认为欧盟应优先考虑东地中海输气管道工程,因为它在供应安全方面的好处超出了竞争市场所能获得的好处,而且它的正外部性证明了“安全溢价”的合理性。Madžarević等^[13]提出了一种确定家庭和区域供热最大日消耗量的方法,结合基础设施与消费的六种情景,讨论了塞尔维亚天然气供应安全系统缓解因过境国乌克兰可能切断供应后果的可能性。此外,一些学者还对保障天然气、石油等资源进口供应安全的具体措施展开研究,比如“进口多元化”和“战略储备”等策略问题^[14-17]。

天然气基础设施方面。Skea等^[18]等认为英国在遭遇到天然气进口中断时,基础设施发挥了主要作用。Dieckhöner等^[19]等分析了欧洲天然气市场基础设施的运输能力,以及对基础设施运输能力遇到瓶颈状况的

识别,认为欧洲国家整体的天然气市场进口一体化水平较高,德国与丹麦以及一些东欧国家在某些情形下可能会遭遇到天然气基础设施运输的瓶颈. Zhang 等^[20]研究了天然气相关成本对我国区域间天然气流动以及天然气基础设施调度的影响,认为非常规天然气生产成本和天然气进口成本是影响我国区域间天然气流动与天然气基础设施调度的两个关键因素.

总的来说,俄罗斯与中国目前正积极共建天然气管道等基础设施,与以上文献类似,本文同样采用以俄罗斯与中国为例的天然气博弈对象;有关天然气供应安全、贸易博弈及基础设施等问题,大多数文献在方法上仍集中于定性分析,在定量分析上还存在不足. 本文在建立模型的方法上与邹莉娜等^[14]类似,都是利用微分对策与最优控制理论^[21,22]来研究天然气贸易博弈问题. 这些文献是基于“天然气储备”视角研究供应安全问题,采用的是传统需求函数,以及将天然气储备作为非利润目标,主要研究储备对天然气进口及国内价格的动态影响,而并未考虑到天然气基础设施建设滞后才是导致我国近年来出现“气荒”的主要原因,以及未考虑某些供应安全影响因素同时也会对天然气需求带来影响. 鉴于此,基于“天然气基础设施建设”视角研究供应安全问题,以目前中俄两国双方共建天然气基础设施为背景,构建一个关于天然气贸易的动态博弈模型,将基础设施存量纳入传统需求函数,采用基础设施存量对天然气供应安全进行量化并作为非利润目标,考虑基础设施存量对天然气需求以及供应安全产生的影响,不仅研究了天然气供应安全意识对双方最优均衡策略的影响,还探究了成本分担契约对双方最优效用的帕累托改善.

2 有无成本分担契约两种情形下的动态博弈模型

2.1 模型描述及假设

考虑由一个出口国 A 与一个进口国 B 共建基础设施而组成的天然气贸易供应链. 一方面,出口国 A 通过对天然气基础设施建设的投入可增加天然气出口量,获得更多经济利益;另一方面,进口国 B 同样通过对天然气基础设施建设的投入,以一定的销售价格卖给消费者,其目标可能并非经济利益最大化,而是经济利益与供应安全这一整体效用最大化.

假设 1 出口国 A 与进口国 B 在各自各境内建设基础设施的成本与它们的投入水平相关,考虑建设成本的凹性特征,假设两国共建天然气基础设施的成本分别为

$$C_A(t) = c_A I_A^2(t)/2, \quad C_B(t) = c_B I_B^2(t)/2. \quad (1)$$

其中 $I_A(t)$, $I_B(t)$ 分别表示 t 时刻出口国 A 与进口国 B 对天然气基础设施的投入,出口国 A 与进口国 B 在 t 时刻的基础设施建设成本 $C_A(t)$ 和 $C_B(t)$ 随各自的投入水平的增加而增加,且增加的幅度呈上升趋势,以二次函数来描述成本与投入之间的关系是文献中常用的形式^[23,24], c_A, c_B 分别表示两国基础设施投入的成本系数, $c_A > 0, c_B > 0$.

假设 2 正如引言所述,出口国 A 建设基础设施会增加天然气出口量,而进口国 B 的基础设施不仅增加天然气进口量,还能提升其供应安全. 共建的天然气基础设施显然与两国对基础实施的投入水平相关,且是个动态的变化过程,参照文献[25–27]的思想,天然气基础设施存量的变化过程可用如下微分方程描述

$$\dot{K}(t) = I_A(t) + I_B(t) - \delta K(t), \quad K(0) = K_0 \geq 0, \quad (2)$$

其中 $K(t)$ 表示 t 时刻的共建基础设施存量, δ 表示基础设施的折旧率, K_0 表示基础设施存量的初始值.

假设 3 进口国的天然气进口需求量不仅受天然气销售价格的影响,同时还与共建的天然气基础设施存量有关. 例如,2014 年 Gazprom(俄罗斯天然气工业股份公司)与中石油在《俄中东线供气购销合同》中商定,2019 年起俄罗斯将通过共建的“西伯利亚力量”管道向中国供气,输气量逐年增加,最终达 $380 \times 10^8 \text{m}^3$. 假设进口国 B 的天然气需求函数形式如下^[28–30]

$$Q(t) = \alpha - \beta p(t) + \gamma K(t), \quad (3)$$

其中 $Q(t)$ 表示进口国在 t 时刻的天然气需求量, $\alpha > 0$ 表示其理想的天然气需求量; $\beta > 0$ 可反映进口国

的天然气需求价格弹性, $p(t)$ 表示 t 时刻的天然气销售价格. 与 $\beta > 0$ 类似, $\gamma > 0$ 可反映需求基础设施弹性, 即天然气需求量对基础设施存量的敏感系数.

假设 4 对进口国来说, 如果拥有足够的天然气管网、LNG 接收站及储气库等基础设施, 那么进口国便能进口足够的天然气, 从而保障其供应安全. 本文假设进口国 B 的天然气供应安全效用函数形式如下^[31]

$$U(t) = \lambda(K(t) - K_L), \quad (4)$$

其中 $U(t)$ 表示进口国在 t 时刻的供应安全效用, $K_L \geq 0$ 表示进口国在满足基本天然气进口需求时的基础设施存量, 下文简称“基础设施基准量”, $\lambda \geq 0$ 表示供应安全意识. 由式(4) 易见, 当 $K(t) < K_L$ 时, 供应安全效用为负, 并随供应安全意识递减, 当 $K(t) > K_L$ 时, 供应安全效用为正, 并随供应安全意识递增, 当 $K(t) = K_L$ 时, 表明基础设施存量恰好能满足其基本进口需求量, 此时的供应效用始终为零.

假设 5 假设双方拥有相同的正贴现率 ρ , 他们均在无限时域内追求自身效用最大化, 进口国由于其在天然气贸易中通常具有较强的进口依赖性, 其追求的效用包括利润目标与“供应安全”这一非利润目标两方面^[14,32]. 此外, 本文还假设出口国为了激励进口国实施基础设施建设以增加天然气出口量获得更多利益, 将考虑分担部分进口国的基础设施建设成本. 此时双方的问题分别表示为

$$V_A = \text{Max}_{I_A(t), \phi(t)} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left((w - \tilde{c}) (\alpha - \beta p(t) + \gamma K(t)) - \frac{c_A}{2} I_A^2(t) - \phi(t) \frac{c_B}{2} I_B^2(t) \right) dt, \quad (5)$$

$$V_B = \text{Max}_{I_B(t), p(t)} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left((p(t) - w) (\alpha - \beta p(t) + \gamma K(t)) - (1 - \phi(t)) \frac{c_B}{2} I_B^2(t) + U(t) \right) dt, \quad (6)$$

其中 $\tilde{c} \geq 0$ 表示出口国 A 的天然气开采、运输的单位成本, $w \geq 0$ 表示其天然气出口价格, $0 \leq \phi(t) \leq 1$ 为出口国在 t 时刻分担的成本比例. 出口国与进口国签订的天然气贸易合约主要以长约为主, 天然气出口价格不易随时间而变化, 且其时滞性较强, 因而假设 w 是一个与时间无关的变量. 为了使模型简化而又不失一般性, 假设 $\tilde{c} = 0$.

建立一个包括进出口国两个参与者的微分博弈模型, 共有 $I_A, \phi(t), I_B(t), p(t)$ 四个控制变量和一个状态变量 $K(t)$; $I_A(t) \geq 0, 0 \leq \phi(t) \leq 1, I_B(t) \geq 0, p(t) \geq 0, K(t) \geq 0$. 而在无成本分担契约情形下, 只有三个控制变量 $I_A(t) \geq 0, I_B(t) \geq 0$ 和 $p(t) \geq 0$, 且 $\phi(t) = 0$.

2.2 模型求解与分析

本节将分析无成本分担契约与成本分担契约两种情形下的进出口国双方最优均衡策略.

2.2.1 无成本分担契约情形

由于天然气资源储量在全球的分布极不均匀, 绝大部分天然气资源集中在少数国家和地区, 因此出口国在天然气贸易中通常占据一定的主导地位^[32]. 在无成本分担契约情形下, 出口国首先制定自身的最优策略, 进口国在出口国的决策基础上制定其最优策略. 研究发现, 此情形下的 Nash 非合作博弈和 Stackelberg 非合作博弈的均衡策略是一致的. 此时出口国 A 不考虑分担进口国 B 的基础设施建设成本, 即 $\phi(t) = 0$, 在此情形下, 双方的动态博弈问题可表示为

$$\begin{cases} \text{Max}_{I_A(t)} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left(w (\alpha - \beta p(t) + \gamma K(t)) - \frac{c_A}{2} I_A^2(t) \right) dt \\ \text{Max}_{I_B(t), p(t)} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left((p(t) - w) (\alpha - \beta p(t) + \gamma K(t)) - \frac{c_B}{2} I_B^2(t) + \lambda (K(t) - K_L) \right) dt \\ \text{s.t.} \quad \dot{K}(t) = I_A(t) + I_B(t) - \delta K(t), K(0) = K_0 \geq 0. \end{cases} \quad (7)$$

有下列结论.

定理 1 无成本分担契约情形下, 出口国 A 和进口国 B 的最优天然气基础设施投入、销售价格与共建

基础设施存量之间的动态关系分别为

$$(I_A^N)^* = \frac{\gamma\beta c_B w}{c_A(\rho\beta c_B + \sqrt{\Delta})}, \quad (8)$$

$$I_B^N(t) = \frac{\beta c_B(2\delta + \rho) - \sqrt{\Delta}}{2\beta c_B} K^N(t) + \frac{b_B}{c_B}, \quad (9)$$

$$p^N(t) = \frac{\alpha + \beta w + \gamma K^N(t)}{2\beta}, \quad (10)$$

其中上标 N 表示无成本分担契约的情形, $b_B = \frac{\gamma\beta c_B w(c_B(\beta c_B(2\delta + \rho) - \sqrt{\Delta}) - c_A(\beta c_B \rho + \sqrt{\Delta})) + c_A c_B(\rho\beta c_B + \sqrt{\Delta})(\gamma\alpha + 2\lambda\beta)}{c_A(\rho\beta c_B + \sqrt{\Delta})^2}$, $\Delta = \beta^2 c_B^2(\rho + 2\delta)^2 - 2\beta c_B \gamma^2$.

证明 满足式(7)的 HJB 方程分别为

$$\rho J_A^N = \max_{I_A(t)} \left(w(\alpha - \beta p(t) + \gamma K(t)) - \frac{c_A}{2} I_A^2(t) + (J_A^N)'(I_A(t) + I_B(t) - \delta K(t)) \right), \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \rho J_B^N = \max_{I_B(t), p(t)} & \left((p(t) - w)(\alpha - \beta p(t) + \gamma K(t)) - \frac{c_B}{2} I_B^2(t) + \lambda(K(t) - K_L) + \right. \\ & \left. (J_B^N)'(I_A(t) + I_B(t) - \delta K(t)) \right). \end{aligned} \quad (12)$$

求解式(11)可得

$$I_A(t) = (J_A^N)' / c_A. \quad (13)$$

求解式(12)可得

$$I_B(t) = (J_B^N)' / c_B, \quad (14)$$

$$p(t) = (\alpha + \beta w + \gamma K(t)) / (2\beta). \quad (15)$$

将式(13)~式(15)代入式(11)、式(12)化简后可得

$$\rho J_A^N = \left(\frac{w\gamma}{2} - \delta (J_B^N)' \right) K(t) + \frac{w(\alpha - \beta w)}{2} + \frac{((J_B^N)')^2}{2c_A} + \frac{(J_A^N)'(J_B^N)'}{c_B}, \quad (16)$$

$$\rho J_B^N = \frac{(\alpha - \beta w + \gamma K(t))^2}{4\beta} + (\lambda - \delta (J_B^N)') K(t) + \frac{(J_A^N)'(J_B^N)'}{c_A} + \frac{((J_B^N)')^2}{2c_B} - \lambda K_L. \quad (17)$$

可猜测满足 J_A^N, J_B^N 的函数形式分别为

$$\begin{cases} J_A^N = b_A K(t) + e_A, \\ J_B^N = a_B K^2(t) + b_B K(t) + e_B. \end{cases} \quad (18)$$

式(18)分别对 $K(t)$ 求一阶偏导数可得

$$\begin{cases} (J_A^N)' = b_A \\ (J_B^N)' = 2a_B K(t) + b_B. \end{cases} \quad (19)$$

将 $(J_A^N)', (J_B^N)'$ 代入式(16)、式(17), 再结合式(18)可得

$$\begin{cases} \rho(b_A K(t) + c_A) = \left(\frac{w\gamma}{2} - \delta b_A \right) K(t) + \frac{w(\alpha - \beta w)}{2} + \frac{b_A^2}{2c_A} + \frac{b_A(2a_B K(t) + b_B)}{c_B}, \\ \rho(a_B K^2(t) + b_B K(t) + c_B) = \frac{(\alpha - \beta w + \gamma K(t))^2}{4\beta} + (\lambda - \delta(2a_B K(t) + b_B)) K(t) + \\ \frac{b_A(2a_B K(t) + b_B)}{c_A} + \frac{(2a_B K(t) + b_B)^2}{2c_B} - \lambda K_L. \end{cases} \quad (20)$$

由式(20)可得关于 a_B , b_B 和 b_A 的方程组为

$$\begin{cases} a_B = \frac{2a_B^2}{\rho c_B} - \frac{2\delta a_B}{\rho} + \frac{\gamma^2}{4\beta\rho} \\ b_B = \frac{2a_B(b_B c_A + b_A c_B)}{\rho c_A c_B} + \frac{\gamma(\alpha - \beta w)}{2\beta\rho} + \frac{\lambda - \delta b_B}{\rho} \\ b_A = \frac{\gamma w - 2\delta b_A}{2\rho} + \frac{2a_B b_A}{\rho c_B} \end{cases} \quad (21)$$

由式(21)可得 $a_B = \frac{\beta c_B(2\delta + \rho) \pm \sqrt{\beta^2 c_B^2(2\delta + \rho)^2 - 2\beta c_B \gamma^2}}{4\beta}$, 虽然 a_B 可取两个正实数, 但由于需满足, 即 $g^N = (\sqrt{\Delta} - \rho\beta c_B) / (2\beta c_B) > 0$ 的收敛性条件, 因此

$$\begin{aligned} a_B &= \frac{\beta c_B(2\delta + \rho) - \sqrt{\beta^2 c_B^2(2\delta + \rho)^2 - 2\beta c_B \gamma^2}}{4\beta}, \quad b_A = \frac{\beta c_B \gamma w}{\beta c_B \rho + \sqrt{\beta^2 c_B^2(2\delta + \rho)^2 - 2\beta c_B \gamma^2}} > 0, \\ b_B &= \frac{\gamma\beta c_B \left(c_B(\beta c_B(2\delta + \rho) - \sqrt{\Delta}) - c_A(\beta c_B \rho + \sqrt{\Delta}) \right) w + c_A c_B(\rho\beta c_B + \sqrt{\Delta})(\gamma + 2\lambda\beta)}{c_A(\rho\beta c_B + \sqrt{\Delta})^2}, \end{aligned}$$

其中 $\Delta = \beta^2 c_B^2(\rho + 2\delta)^2 - 2\beta c_B \gamma^2$.

证毕.

由定理 1 可知, 天然气出口价格上升或需求基础设施弹性增加, 均使得出口国 A 增加对基础设施的投入, 同时还会提高其销售价格. 这是因为双方各自增加对基础设施投入使共建基础设施存量增加, 尽管基础设施存量的增加使进口国 B 的需求量增加, 但同时也增加了其基础设施建设成本, 为使效用最大化, 进口国 B 会考虑上涨其销售价格. 利用定理 1 的结果对模型继续求解, 得到各最优策略关于时间的路径, 具体结论如下.

定理 2 无成本分担契约情形下, 共建基础设施存量的最优路径为

$$K^N(t) = \bar{K}^N + (K_0 - \bar{K}^N)e^{-g^N t}, \quad (22)$$

进口国 B 的天然气基础设施投入、销售价格的最优路径分别为

$$I_B^N(t) = \bar{I}_B^N + (I_{B0}^N - \bar{I}_B^N)e^{-g^N t}, \quad (23)$$

$$p^N(t) = \bar{p}^N + (p_0^N - \bar{p}^N)e^{-g^N t}, \quad (24)$$

其中 $g^N = \frac{\sqrt{\Delta} - \rho\beta c_B}{2\beta c_B}$ 反映了收敛速度, $\bar{K}^N = \frac{2\beta(c_B(I_A^N)^* + b_B)}{\sqrt{\Delta} - \rho\beta c_B}$, $\bar{I}_B^N = \frac{2\beta b_B + (\beta c_B(2\delta + \rho) - \sqrt{\Delta})\bar{K}^N}{2\beta c_B}$, $\bar{p}^N = \frac{\alpha + \beta w + \bar{K}^N}{2\beta}$ 分别表示共建基础设施存量、进口国 B 的基础设施投入、销售价格的最优初始值; $I_{B0}^N = \frac{2\beta b_B + (\beta c_B(2\delta + \rho) - \sqrt{\Delta})K_0}{2\beta c_B}$, $p_0^N = \frac{\alpha + \beta w + \gamma K_0}{2\beta}$ 则分别表示进口国 B 的基础设施投入、销售价格的最优初始值.

证明 将式(8), 式(9)代入式(2), 可得关于 $K(t)$ 的一阶线性微分方程为

$$\dot{K}(t) - \left(\frac{\rho\beta c_B - \sqrt{\Delta}}{2\beta c_B} \right) K(t) = (I_A^N)^* + \frac{b_B}{c_B}. \quad (25)$$

求解可得

$$K(t) = \frac{2\beta(c_B(I_A^N)^* + b_B)}{\sqrt{\Delta} - \rho\beta c_B} + \left(K_0 - \frac{2\beta(c_B(I_A^N)^* + b_B)}{\sqrt{\Delta} - \rho\beta c_B} \right) e^{-\left(\frac{\sqrt{\Delta} - \rho\beta c_B}{2\beta c_B} \right)t}. \quad (26)$$

将式(22)代入式(9), 式(10)分别可得

$$I_B^N(t) = \frac{2\beta b_B + (\beta c_B(2\delta + \rho) - \sqrt{\Delta})\bar{K}^N}{2\beta c_B} + \frac{(\beta c_B(2\delta + \rho) - \sqrt{\Delta})}{2\beta c_B} (K_0 - \bar{K}^N)e^{-g^N t}, \quad (27)$$

$$p^N(t) = \frac{\alpha + \beta w + \gamma \bar{K}^N}{2\beta} + \frac{\gamma}{2\beta}(K_0 - \bar{K}^N)e^{-g^N t}. \quad (28)$$

$$\text{当 } t = 0 \text{ 时, } I_{B0}^N = \frac{2\beta b_B + (\beta c_B(2\delta + \rho) - \sqrt{\Delta}) K_0}{2\beta c_B}, \quad p_0^N = \frac{\alpha + \beta w + \gamma K_0}{2\beta};$$

$$\text{当 } t \rightarrow \infty \text{ 时, } \bar{I}_B^N = \frac{2\beta b_B + (\beta c_B(2\delta + \rho) - \sqrt{\Delta}) \bar{K}^N}{2\beta c_B}, \quad \bar{p}^N = \frac{\alpha + \beta w + \gamma \bar{K}^N}{2\beta}. \quad \text{证毕.}$$

由定理 2 可知, 共建基础设施存量、进口国 B 的基础设施投入及其销售价格各自最优路径上具有相同的收敛速度; 它们的路径变化趋势主要取决于初始共建基础设施存量与最优稳态的差距, 可得以下结论: 当前者小于后者时, 它们均单调递增至最优稳态, 反之, 它们则单调递减至最优稳态.

定理 3 无成本分担契约情形下, 出口国 A 与进口国 B 的最优效用分别为

$$V_A^N = \frac{w(\alpha - \beta w + \gamma \bar{K}^N) - c_A((I_A^N)^*)^2}{2\rho} + \frac{\gamma w(K_0 - \bar{K}^N)}{2(\rho + g^N)}, \quad (29)$$

$$\begin{aligned} V_B^N = & \frac{(\alpha + \beta w - 2\beta \bar{p}^N + \gamma \bar{K}^N)(p_0^N - \bar{p}^N) + (\lambda - \gamma w + \gamma \bar{p}^N)(K_0 - \bar{K}^N) - c_B \bar{I}_B^N(I_{B0}^N - \bar{I}_B^N)}{\rho + g^N} + \\ & \frac{2(\alpha + \beta w + \gamma \bar{K}^N)\bar{p}^N - 2\beta(\bar{p}^N)^2 - c_B(\bar{I}_B^N)^2 + 2\lambda(\bar{K}^N - K_L) - 2w(\alpha + \gamma \bar{K}^N)}{2\rho} + \\ & \frac{2(\gamma(K_0 - \bar{K}^N) - \beta)(p_0^N - \bar{p}^N) - c_B(I_{B0}^N - \bar{I}_B^N)}{2\rho + 4g^N}. \end{aligned} \quad (30)$$

证明 将式(8), 式(22)和式(24)代入式(3)可得

$$\begin{aligned} V_A^N = & \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[w \left(\alpha - \beta \left(\frac{\alpha + \beta w + \gamma \bar{K}^N}{2\beta} + \frac{\gamma}{2\beta}(K_0 - \bar{K}^N)e^{-g^N t} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. \gamma \left((K_0 - \bar{K}^N)e^{-g^N t} + \bar{K}^N \right) \right) - \frac{c_A}{2} \left((I_A^N)^* \right)^2 \right] dt \\ = & \int_0^\infty \left(\frac{w(\alpha - \beta w + \gamma \bar{K}^N)}{2} e^{-\rho t} - \frac{c_A((I_A^N)^*)^2}{2} e^{-\rho t} + \frac{\gamma w}{2}(K_0 - \bar{K}^N)e^{-(\rho + g^N)t} \right) dt \\ = & \frac{w(\alpha - \beta w + \gamma \bar{K}^N) - c_A((I_A^N)^*)^2}{2\rho} + \frac{\gamma w(K_0 - \bar{K}^N)}{2(\rho + g^N)}. \end{aligned} \quad (31)$$

再将式(22)~式(24)代入式(5)可得

$$\begin{aligned} V_B^N = & \int_0^\infty e^{-\rho t} \left((p^N(t) - w)(\alpha - \beta p^N(t) + \gamma K^N(t)) - \frac{c_B}{2}(I_B^N(t))^2 + \lambda(K^N(t) - K_L) \right) dt \\ = & \frac{(\alpha + \beta w - 2\beta \bar{p}^N + \gamma \bar{K}^N)(p_0^N - \bar{p}^N) + (\lambda - \gamma w + \gamma \bar{p}^N)(K_0 - \bar{K}^N)}{\rho + g^N} + \\ & \frac{2(\gamma(K_0 - \bar{K}^N) - \beta)(p_0^N - \bar{p}^N) - c_B(I_{B0}^N - \bar{I}_B^N)}{2\rho + 4g^N} - \frac{c_B \bar{I}_B^N(I_{B0}^N - \bar{I}_B^N)}{\rho + g^N} + \\ & \frac{2(\alpha + \beta w + \gamma \bar{K}^N)\bar{p}^N - 2\beta(\bar{p}^N)^2 - c_B(\bar{I}_B^N)^2 + 2\lambda(\bar{K}^N - K_L) - 2w(\alpha + \gamma \bar{K}^N)}{2\rho}. \end{aligned} \quad (32)$$

证毕.

由定理 3 可知, 供应安全意识不仅影响进口国 B 的效用, 同时还影响出口国 A 的效用. 而基础设施基准量却仅对进口国 B 的效用带来影响. 显然, 基础设施基准量越高, 进口国 B 的效用越小.

2.2.2 成本分担契约情形

考虑成本分担问题时,从长期、动态的角度看,出口国 A 与进口国 B 对共建基础设施的投入决策构成了以出口国主导的 Stackelberg 微分对策模型. 决策过程分为两个阶段: 第一阶段,出口国 A 决定自身的基础设施投入水平和分担进口国 B 的成本比例; 第二阶段,根据出口国 A 决定的投入水平和成本分担比例,进口国 B 决定自身的基础设施投入水平^[33]. 此时双方的动态博弈问题可归纳为

$$\begin{cases} \text{Max}_{I_A(t), \phi(t)} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left[w(\alpha - \beta p(t) + \gamma K(t)) - \frac{c_A}{2} I_A^2(t) - \phi(t) \frac{c_B}{2} I_B^2(t) \right] dt \\ \text{Max}_{I_B(t), p(t)} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left[(p(t) - w)(\alpha - \beta p(t) + \gamma K(t)) - (1 - \phi(t)) \frac{c_B}{2} I_B^2(t) + U(t) \right] dt \\ \text{s.t.} \quad \dot{K}(t) = I_A(t) + I_B(t) - \delta K(t), K(0) = K_0 \geq 0. \end{cases} \quad (33)$$

定理 4 成本分担契约情形下,出口国 A 与进口国 B 的最优基础设施投入、进口国 B 的最优销售价格与共建基础设施存量之间的动态关系分别为

$$(I_A^D)^* = \tilde{b}_A / c_A, \quad (34)$$

$$I_B^D(t) = (2\tilde{b}_A + \tilde{b}_B + 2\tilde{a}_B K^D(t)) / (2c_B), \quad (35)$$

$$p^D(t) = (\alpha + \beta w + \gamma K^D(t)) / (2\beta), \quad (36)$$

$$\phi(t) = \begin{cases} \frac{2\tilde{b}_A - \tilde{b}_B - 2\tilde{a}_B K^D(t)}{2\tilde{b}_A + \tilde{b}_B + 2\tilde{a}_B K^D(t)}, & 2\tilde{b}_A - \tilde{b}_B - 2\tilde{a}_B K^D(t) > 0 \\ 0, & 2\tilde{b}_A - \tilde{b}_B - 2\tilde{a}_B K^D(t) \leq 0, \end{cases} \quad (37)$$

其中上标 D 表示考虑成本分担契约的情形, $\tilde{a}_B$, $\tilde{b}_A$ 和 $\tilde{b}_B$ 分别为各参数的表达式.

证明 为得到 Stackelberg 博弈的均衡解,运用逆向求解法,首先对进口国 B 的最优控制问题进行求解,其效用函数的 HJB 方程为

$$\begin{aligned} \rho J_B^D = \text{Max}_{I_B(t), p(t)} & \left[(p(t) - w)(\alpha - \beta p(t) + \gamma K(t)) - (1 - \phi(t)) \frac{c_B}{2} I_B^2(t) + \lambda(K(t) - K_L) + \right. \\ & \left. (J_B^D)'(I_A(t) + I_B(t) - \delta K(t)) \right]. \end{aligned} \quad (38)$$

式(38)对 $I_B(t)$, $p(t)$ 求解可得

$$I_B(t) = (J_B^D)' / [(1 - \phi(t)) c_B], \quad (39)$$

$$p(t) = (\alpha + \beta w + \gamma K(t)) / (2\beta). \quad (40)$$

为追求效用最大化,理性的出口国 A 会预测到进口国 B 的策略,此时出口国 A 的 HJB 方程为

$$\rho J_A^D = \text{Max}_{I_A(t), \phi(t)} \left[w(\alpha - \beta p(t) + \gamma K(t)) - \frac{c_A}{2} I_A^2(t) - \phi(t) \frac{c_B}{2} I_B^2(t) + (J_A^D)'(I_A(t) + I_B(t) - \delta K(t)) \right]. \quad (41)$$

将式(39)代入式(41),并分别对 $I_A(t)$, $\phi(t)$ 求解可得

$$I_A(t) = (J_A^D)' / c_A, \quad (42)$$

$$\phi(t) = (2(J_A^D)' - (J_B^D)') / (2(J_A^D)' + (J_B^D)'). \quad (43)$$

将式(39), 式(40)和式(42), 式(43)分别代入式(38), 式(41) 化简后可得

$$\rho J_A^D = \left(\frac{w\gamma}{2} - \delta (J_A^D)' \right) K(t) + \frac{w(\alpha - \beta w)}{2} + \frac{((J_A^D)')^2}{2c_A} + \frac{(2(J_A^D)' + (J_B^D)')^2}{8c_B}, \quad (44)$$

$$\rho J_B^D = \frac{(\alpha - \beta w + \gamma K(t))^2}{4\beta} + (\lambda - \delta (J_B^D)') K(t) + \frac{(J_A^D)' (J_B^D)'}{c_A} + \frac{(J_B^D)' (2(J_A^D)' + (J_B^D)')}{4c_B} - \lambda K_L. \quad (45)$$

同理, 猜测满足 J_A^D, J_B^D 的函数形式分别为

$$\begin{cases} J_A^D = \tilde{b}_A K(t) + \tilde{e}_A \\ J_B^D = \tilde{a}_B K^2(t) + \tilde{b}_B K(t) + \tilde{e}_B. \end{cases} \quad (46)$$

式(46)对 $K(t)$ 求偏导数可得

$$\begin{cases} (J_A^D)' = \tilde{b}_A, \\ (J_B^D)' = 2\tilde{a}_B K(t) + \tilde{b}_B. \end{cases} \quad (47)$$

将 $(J_A^D)', (J_B^D)'$ 代入式(44), 式(45), 再结合式(46)可得

$$\begin{cases} \rho(\tilde{b}_A K(t) + \tilde{e}_A) = \left(\frac{w\gamma}{2} - \delta \tilde{b}_A\right) K(t) + \frac{w(\alpha - \beta w)}{2} + \frac{\tilde{b}_A^2}{2c_A} + \frac{(2\tilde{b}_A + 2\tilde{a}_B K(t) + \tilde{b}_B)^2}{8c_B} \\ \rho(\tilde{a}_B K^2(t) + \tilde{b}_B K(t) + \tilde{e}_B) = \frac{(\alpha - \beta w + \gamma K(t))^2}{4\beta} + \left(\lambda - \delta(2\tilde{a}_B K(t) + \tilde{b}_B)\right) K(t) + \\ \frac{\tilde{b}_A(2\tilde{a}_B K(t) + \tilde{b}_B)}{c_A} + \frac{(2\tilde{a}_B K(t) + \tilde{b}_B)(2\tilde{b}_A + 2\tilde{a}_B K(t) + \tilde{b}_B)}{4c_B} - \lambda K_L. \end{cases} \quad (48)$$

由式(49)可得关于 $\tilde{a}_B, \tilde{b}_A$ 和 $\tilde{b}_B$ 的方程组为

$$\begin{cases} \tilde{a}_B = \frac{\gamma^2}{4\beta\rho} - \frac{2\delta\tilde{a}_B}{\rho} + \frac{\tilde{a}_B^2}{\rho c_B}, \\ \tilde{b}_B = \frac{\gamma(\alpha - \beta w)}{2\beta\rho} + \frac{\lambda - \delta\tilde{b}_B}{\rho} + \frac{2\tilde{a}_B\tilde{b}_A}{\rho c_A} + \frac{\tilde{a}_B(\tilde{b}_A + \tilde{b}_B)}{\rho c_B}, \\ \tilde{b}_A = \frac{w\gamma - 2\delta\tilde{b}_A}{2\rho} + \frac{2\tilde{a}_B\tilde{b}_A + \tilde{a}_B\tilde{b}_B}{2\rho c_B}. \end{cases} \quad (49)$$

与定理2类似, 可得 $\tilde{a}_B = \frac{\beta c_B(2\delta + \rho) - \sqrt{\tilde{\Delta}}}{2\beta}$, 其中 $\tilde{\Delta} = \beta^2 c_B^2 (2\delta + \rho)^2 - \beta c_B \gamma^2 > 0$. $\tilde{b}_A$ 和 $\tilde{b}_B$ 均可用 $\tilde{a}_B$ 表示. 证毕.

定理5 成本分担契约情形下, 共建基础设施存量的最优动态路径为

$$K^D(t) = (K_0 - \bar{K}^D)e^{-g^D t} + \bar{K}^D, \quad (50)$$

进口国B的天然气基础设施投入和销售价格的最优动态路径分别为

$$I_B^D(t) = \bar{I}_B^D + (I_{B0}^D - \bar{I}_B^D)e^{-g^D t}, \quad (51)$$

$$p^D(t) = \bar{p}^D + (p_0^D - \bar{p}^D)e^{-g^D t}, \quad (52)$$

其中 $g^D = \frac{\sqrt{\tilde{\Delta}} - \rho\beta c_B}{2\beta c_B}$, $\bar{K}^D = \frac{\beta(2c_B(I_A^D)^* + 2\tilde{b}_A + \tilde{b}_B)}{\sqrt{\tilde{\Delta}} - \rho\beta c_B}$, $\bar{I}_B^D = \frac{2\tilde{b}_A + \tilde{b}_B + 2\tilde{a}_B \bar{K}^D}{2c_B}$,

$$\bar{I}_{B0}^D = \frac{2\tilde{b}_A + \tilde{b}_B + 2\tilde{a}_B K_0}{2c_B}, \quad \bar{p}^D = \frac{\alpha + \beta w + \bar{K}^D}{2\beta}, \quad p_0^D = p_0^N = \frac{\alpha + \beta w + \gamma K_0}{2\beta}.$$

证明 将式(34)和式(35)代入式(6), 可得关于 $K(t)$ 的一阶线性微分方程为

$$\dot{K}(t) - \frac{\rho\beta c_B - \sqrt{\tilde{\Delta}}}{2\beta c_B} K(t) = \frac{2c_B(I_A^D)^* + 2\tilde{b}_A + \tilde{b}_B}{2c_B}. \quad (53)$$

对式(53)微分方程进行求解得

$$K(t) = \frac{\beta(2c_B(I_A^D)^* + 2\tilde{b}_A + \tilde{b}_B)}{\sqrt{\tilde{\Delta}} - \rho\beta c_B} + \left(K_0 - \frac{\beta(2c_B(I_A^D)^* + 2\tilde{b}_A + \tilde{b}_B)}{\sqrt{\tilde{\Delta}} - \rho\beta c_B}\right) e^{-\left(\frac{\sqrt{\tilde{\Delta}} - \rho\beta c_B}{2\beta c_B}\right)t}. \quad (54)$$

将式(50)代入式(35)和式(36)分别可得

$$I_B^D(t) = \frac{2\tilde{b}_A + \tilde{b}_B + 2\tilde{a}_B \bar{K}^D}{2c_B} + \frac{\tilde{a}_B}{c_B} (K_0 - \bar{K}^D) e^{-g^D t}, \quad (55)$$

$$p^D(t) = \frac{\alpha + \beta w + \gamma \bar{K}^D}{2\beta} + \frac{\gamma}{2\beta} (K_0 - \bar{K}^D) e^{-g^D t}. \quad (56)$$

当 $t = 0$ 时, $I_{B0} = (2\tilde{b}_A + \tilde{b}_B + 2\tilde{a}_B K_0) / (2c_B)$, $p_0^D = p_0 = (\alpha + \beta w + \gamma K_0) / (2\beta)$;

当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\bar{I}_B^D = (2\tilde{b}_A + \tilde{b}_B + 2\tilde{a}_B \bar{K}^D) / (2c_B)$, $\bar{p}^D = (\alpha + \beta w + \gamma \bar{K}^D) / (2\beta)$. 证毕.

定理 6 成本分担契约情形下, 出口国 A 与进口国 B 的最优效用分别为

$$V_A^D = \frac{w(\alpha - \beta w + \gamma \bar{K}^D) - c_A((I_A^D)^*)^2}{2\rho} + \frac{\gamma w(K_0 - \bar{K}^D)}{2(\rho + g^D)} - \eta, \quad (57)$$

$$\begin{aligned} V_B^D = & \frac{(\alpha + \beta w - 2\beta \bar{p}^D + \gamma \bar{K}^D)(p_0^D - \bar{p}^D) + (\lambda - \gamma w + \gamma \bar{p}^D)(K_0 - \bar{K}^D) - c_B \bar{I}_B^D(I_{B0}^D - \bar{I}_B^D)}{\rho + g^D} + \\ & \frac{2(\gamma(K_0 - \bar{K}^D) - \beta)(p_0^D - \bar{p}^D) - c_B(I_{B0}^D - \bar{I}_B^D)}{2\rho + 4g^D} + \\ & \frac{2(\alpha + \beta w + \gamma \bar{K}^D)\bar{p}^D - 2\beta(\bar{p}^D)^2 - c_B(\bar{I}_B^D)^2 + 2\lambda(\bar{K}^D - K_L) - 2w(\alpha + \gamma \bar{K}^D)}{2\rho} + \eta, \end{aligned} \quad (58)$$

$$\text{其中 } \eta = \frac{1}{8c_B} \left(\frac{4\tilde{b}_A^2 - \tilde{b}_B^2 - 4\tilde{a}_B \tilde{b}_B \bar{K}^D - 4\tilde{a}_B^2 (\bar{K}^D)^2}{\rho} - \frac{(4\tilde{a}_B \tilde{b}_B + 8\tilde{a}_B^2 \bar{K}^D)(K_0 - \bar{K}^D)}{\rho + g^D} - \frac{4\tilde{a}_B^2 (K_0 - \bar{K}^D)}{\rho + 2g^D} \right).$$

证明 对比两种情形的目标函数式(7)和式(33)可知, 式(33)不同于式(7)之处在分担的成本表达式 $\int_0^\infty e^{-\rho t} (\phi(t)c_B I_B^2(t)/2)dt$, 因此, 只需在定理 3 的基础上计算 $\int_0^\infty e^{-\rho t} (\phi(t)c_B (I_B^D)^2(t)/2)dt$. 证毕.

由定理 4~定理 6 可知, 只有当 $2\tilde{b}_A - \tilde{b}_B - 2\tilde{a}_B K^D(t) > 0$ 时, 出口国才考虑对进口国的基础设施建设成本进行分担. 因为 $\tilde{\Delta} > \Delta$, 所以 $g^D > g^N$. 表明成本分担契约情形下各最优策略的收敛速度大于无成本分担契约情形. 由于定理 4~定理 6 中各表达式较复杂, 无法直观地得到供应安全意识和成本分担契约对两国各最优策略及效用带来的影响, 因此本文将在下一节通过数值算例分析其相关性质.

3 数值分析

本节运用 MATLAB 计算工具针对供应安全意识、成本分担契约及基础设施基准量等因素对双方最优均衡策略带来的影响进行比较分析. 由于“天然气贸易”各参数的具体取值难以获取, 因此本文将天然气视为一般商品进行处理. 借鉴 Erickson^[34]和 De Giovanni^[35]的研究, 且满足相关参数的限定条件, 各基准参数取值为 $\alpha = 10$, $\beta = 1$, $c_A = c_B = 1$, $\delta = 0.1$, $\rho = 1$, $K_L = 2$, $\lambda = 0.2$, $\gamma = 0.1$. 此外, 鉴于我国作为天然气进口大国, 至今仍存在基础设施建设滞后等现状, 因此本文仅考虑初始基础设施存量低于最优稳态的情形, 即 $K_0 = 10$.

3.1 最优出口价格的对比分析

由于全球天然气储量和需求量分布极不均匀, 使得天然气贸易趋于寡头垄断市场. 在一些天然气资源贫乏且需求量大、需求弹性很小的地区, 天然气贸易往往以签订长约的方式为主, 出口国在价格谈判中通常

具有较强的决定权,而进口国只是价格的接受者^[32]. 出口国将制定最优出口价格,使得其效用达到最大. 那么在供应安全意识、成本分担契约影响下,最优出口价格又会如何变化呢? 假设 $\lambda = 0$ 和 $\lambda = 0.2$ 分别代表无和有供应安全意识.

图1分别展现了 $\lambda = 0$ 和 $\lambda = 0.2$ 时,两种情形下效用 V_A 随出口价格 w 的变化情况. 由图1易见,两种情形下的效用 V_A 与出口价格 w 均呈倒“U”型关系. 其原因可能是随着出口价格上升,虽然能够使其效用增加,但同时也增加了基础设施建设成本,当出口价格较低时,其效用的增量大于成本的增量,反之,其效用的增量小于成本的增量. 为了检验 λ, γ 变化对两国最优策略及其稳态值的稳健性,下面分别列出两种情形下 λ, γ 变化对它们的影响. 具体如表1和表2所示.

表1 无分担契约情形下 λ 和 γ 对两国最优策略及其稳态值的影响

Table 1 The influence of λ and γ on the optimal strategy and its steady-state value in the case of no sharing contract

主要参数/变量	$(w^N)^*$	$(I_A^N)^*$	$\bar{I}_B^N$	$\bar{p}^N$	$\bar{K}^N$	$\bar{\phi}$	V_A^N	
基准值	5.97	1.64	3.22	10.42	48.60	0	188.75	
λ	0.00	5.68	1.56	1.96	9.60	35.17	0	171.22
	0.10	5.82	1.60	2.59	10.00	41.89	0	179.88
	0.15	5.90	1.62	2.91	10.21	45.24	0	184.29
	0.25	6.04	1.66	3.54	10.62	51.96	0	193.27
	0.30	6.11	1.68	3.86	10.82	55.31	0	197.84
	0.40	6.25	1.71	4.49	11.23	62.02	0	207.13
γ	0.04	5.25	0.53	1.56	8.04	20.91	0	139.42
	0.06	5.43	0.84	1.94	8.55	27.76	0	150.84
	0.08	5.66	1.20	2.45	9.29	36.50	0	166.53
	0.12	6.40	2.21	4.49	12.22	67.04	0	222.10
	0.14	7.10	3.05	6.89	15.51	99.41	0	277.22
	0.16	8.42	4.54	12.60	22.92	171.34	0	385.88

表2 分担契约情形下 λ 和 γ 对两国最优策略及其稳态值的影响

Table 2 The influence of λ and γ on the optimal strategy and its steady-state value in the case of sharing contract

主要参数/变量	$(w^D)^*$	$(I_A^D)^*$	$\bar{I}_B^D$	$\bar{p}^D$	$\bar{K}^D$	$\bar{\phi}$	V_A^D	
基准值	6.41	1.72	3.35	11.24	60.61	2.9 %	204.40	
λ	0	5.69	1.52	2.51	9.78	38.63	21.0 %	170.67
	0.10	6.03	1.61	2.92	10.45	49.04	10.5 %	186.26
	0.15	6.22	1.67	3.14	10.84	54.70	6.5 %	194.99
	0.25	6.62	1.78	3.57	11.65	66.89	0	214.53
	0.30	6.83	1.84	3.79	12.09	73.45	0	225.40
	0.40	7.29	1.97	4.26	12.03	87.67	0	249.63
γ	0.04	5.19	0.54	1.30	7.86	13.38	0	137.09
	0.06	5.43	0.86	1.79	8.43	23.84	0	148.68
	0.08	5.82	1.22	2.43	9.46	30.71	0.8 %	168.70
	0.12	7.29	2.41	4.80	14.30	94.31	0.5 %	271.40
	0.14	8.52	3.39	7.28	19.67	148.73	0	406.64
	0.16	10.49	4.93	12.04	29.95	246.33	0	710.37

由表1和表2可知,随着 λ 的变化, $(w^N)^*$ 和 $(w^D)^*$ 均呈单调性变化. 当 λ 相等时恒有 $(w^N)^* < (w^D)^*$, 且随着 λ 增大, $(w^N)^*$ 和 w^D 的差值呈显著增大,说明 λ 对 w^* 的单调性,以及 λ 相等时 $(w^N)^* < (w^D)^*$ 具有稳健性. 然而,随着 γ 的变化,虽然 $(w^N)^*$ 和 $(w^D)^*$ 同样呈单调性变化,但当 γ 相等时未必恒有 $(w^N)^* < (w^D)^*$ ($\gamma = 0.04$),因此 γ 相等时 $(w^N)^* < (w^D)^*$ 不具有稳健性.

同理,其它变量也可依此验证其稳健性,限于篇幅此处不再逐一赘述. 那么 λ 对两国最优策略稳态值及其效用又将产生怎样的影响呢? 下面将利用表1和表2的结果,对其进行研究分析.

3.2 两国最优稳态策略与效用的对比分析

将表1和表2中的 $(w^N)^*$ 和 $(w^D)^*$ 代入定理1~定理6中的各式,得到两国最优策略稳态值及效用. 从表1和表2易见,供应安全意识与最优稳态基础设施存量、出口国的最优基础设施投入及效用、进口国的最

优稳态基础设施投入及其销售价格均呈正相关, 且成本分担契约情形下的值高于无成本分担契约情形: 在成本分担契约情形下, 供应安全意识与最优稳态成本分担比例却呈负向关系。

以上结果表明, 供应安全意识与成本分担契约不仅有助于提高双方对基础设施投入的积极性, 使得基础设施存量增加, 还能提高出口国的效用。

表1和表2中并未列出进口国效用的变化情况, 其原因是由式(30)和式(58)可知, 进口国的效用不仅与自身供应安全意识有关, 还与基础设施基准量有关。图2展现了供应安全意识、成本分担契约以及基础设施基准量对效用 V_B 的影响。

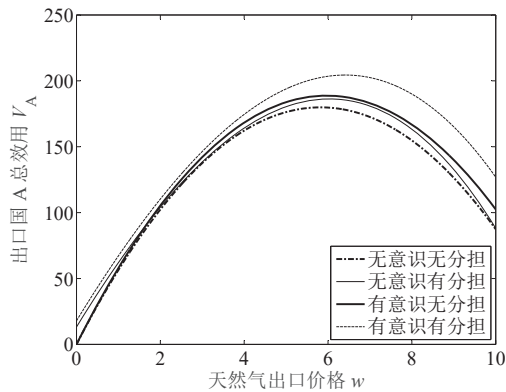


图1 两种情形下 λ 和 w 对效用 V_A 的影响

Fig. 1 The influence of λ and w on utility V_A in two cases

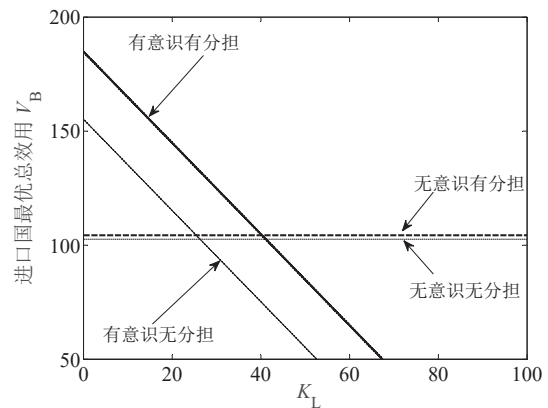


图2 两种情形下 λ 和 K_L 对效用 V_B 的影响

Fig. 2 The influence of λ and K_L on utility V_B in two cases

由图2易见, 在无供应安全意识情形下, V_B 是一条与基础设施基准量无关的水平线; 成本分担契约下 V_B 高于无成本分担契约情形; 当基础设施基准量较小时, 进口国效用与供应安全意识正相关, 但随着基础设施基准量增加, 这种正相关却逐渐变成负相关。这表明, 如果基础设施基准量非常高, 意味着此时的供应安全意识可能产生负效应, 使得进口国的效用开始下降。

表1、表2及图2的结果表明, 成本分担契约可以实现进出口国双方的帕累托改善。这是因为出口国分担了进口国的部分建设成本, 进口国会付出更多的投入进行基础设施建设, 而由此带来的天然气进口需求量增加最终可以影响两国的效用, 从而达到帕累托改善。

3.3 两国最优策略与瞬时效用的动态路径对比分析

前面研究了供应安全意识、成本分担契约对两国最优稳态值及效用的影响。而在随时间变化的动态路径上, 供应安全意识、成本分担契约又会对两国最优策略及瞬时效用产生何种影响呢? 为此, 图3~图6展现了供应安全意识与成本分担契约对共建基础设施存量及双方最优策略的影响。

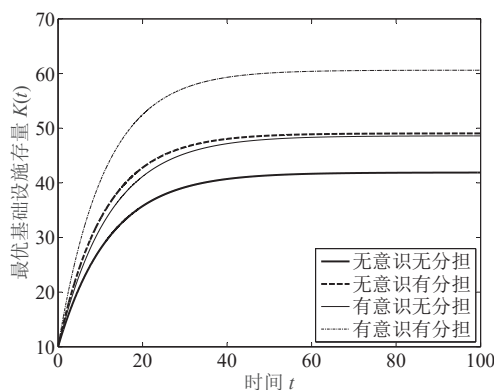


图3 两种情形下 λ 对效用 $K(t)$ 的影响

Fig. 3 The influence of λ on $K(t)$ in two cases

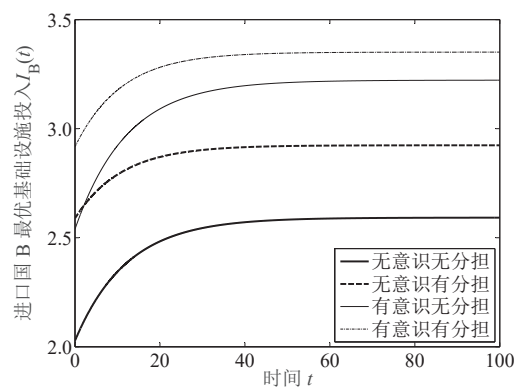


图4 两种情形下 λ 对 $I_B(t)$ 的影响

Fig. 4 The influence of λ on $I_B(t)$ in two cases

由图3~图6易见, 供应安全意识、成本分担契约对任意时刻的共建基础设施存量、进口国的基础设施投入及销售价格均具有正效应. 由图3易见, 因供应安全意识或成本分担契约影响的基础设施增量在短期内较小, 并随时间递增至最优稳态. 这表明, 供应安全意识或成本分担契约尽管对基础设施建设具有推动作用, 但它们在短期内的效果有限. 由图6易见, 成本分担比例随时间单调递减, 并且成本分担比例随供应安全意识增强而下降. 这是因为供应安全意识能使自身对基础设施投入更多, 从而出口国便可降低成本分担比例.

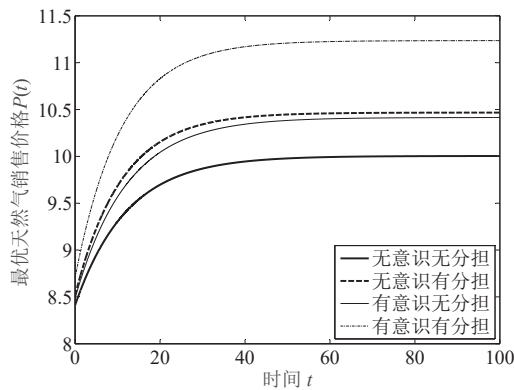


图5 两种情形下 λ 对 $p(t)$ 的影响

Fig. 5 The influence of λ on $p(t)$ in two cases

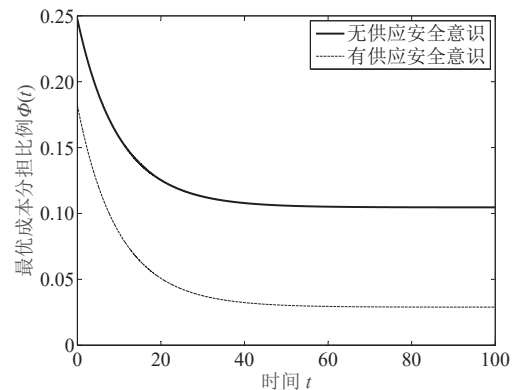
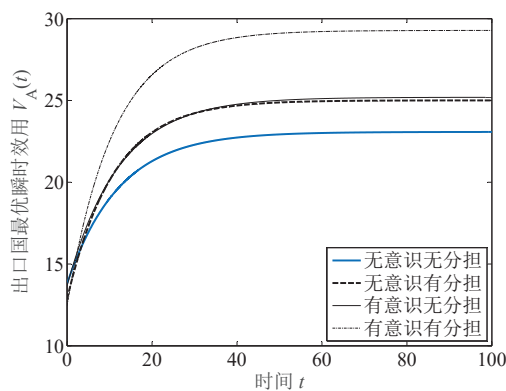


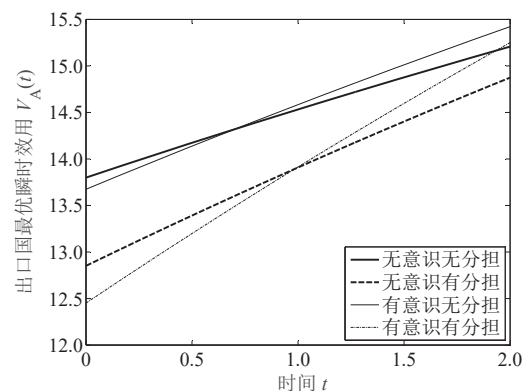
图6 λ 对 $\phi(t)$ 的影响

Fig. 6 The influence of λ on $\phi(t)$

图7(a)和图7(b)展现了供应安全意识、成本分担契约对瞬时效用 $V_A(t)$ 产生的影响. 其中图7(b)为图7(a)在 $t \in [0, 2]$ 上的变化轨迹.



(a)



(b)

图7 两种情形下 λ 对瞬时效用 $V_A(t)$ 的影响

Fig. 7 The influence of λ on instantaneous utility $V_A(t)$ in two cases

由图7(a)易见, 瞬时效用 $V_A(t)$ 将递增至最优稳态; 供应安全意识、成本分担契约对出口国的最优稳态效用均产生正效应. 但从图7(b)易见, 供应安全意识、成本分担契约并非对任意时刻的效用 $V_A(t)$ 产生正效应, 在短期它们可能产生负效应. 其原因在于, 供应安全意识虽然在短期能使基础设施存量及出口价格上升, 收益增加, 但此时基础设施投入成本的增速快于收益, 因此效用 $V_A(t)$ 递减. 结合表2和图7的结果表明, 供应安全意识、成本分担契约虽然会使得出口国总效用增加, 但其瞬时效用却并非如此, 供应安全意识、成本分担契约带给出口国的好处可能在长期才能突显.

图8(a)~图8(d)分别展现了基础设施基准量的低、中、高三种水平, 即 $0 \leq G_L \leq G_0$, $G_0 \leq G_L < \bar{G}$, $\bar{G} \leq G_L$, 及供应安全意识、成本分担契约对瞬时效用 $V_B(t)$ 的影响. 图8(b)为图8(a)在 $t \in [0, 4]$ 的变化轨迹.

由图 8(a)~图 8(d)易见, 不管基础设施基准量处于何种水平, 瞬时效用 $V_B(t)$ 同样递增且收敛至最优稳态, 并且成本分担契约对进口国的最优稳态效用具有正效应; 当基础设施基准量较低或中等水平时, 随着供应安全意识增强, 进口国的最优稳态效用将随之增加, 瞬时效用 $V_B(t)$ 可能在短期随之递减, 长期则随之递增. 其原因可能是, 与供应安全意识变化导致的基础设施增加量相比, 进口国的基础设施投入的增加量在短期内更大(图 3 和图 4 所示). 当基础设施基准量较高时, 瞬时效用 $V_B(t)$ 却始终呈递减趋势.

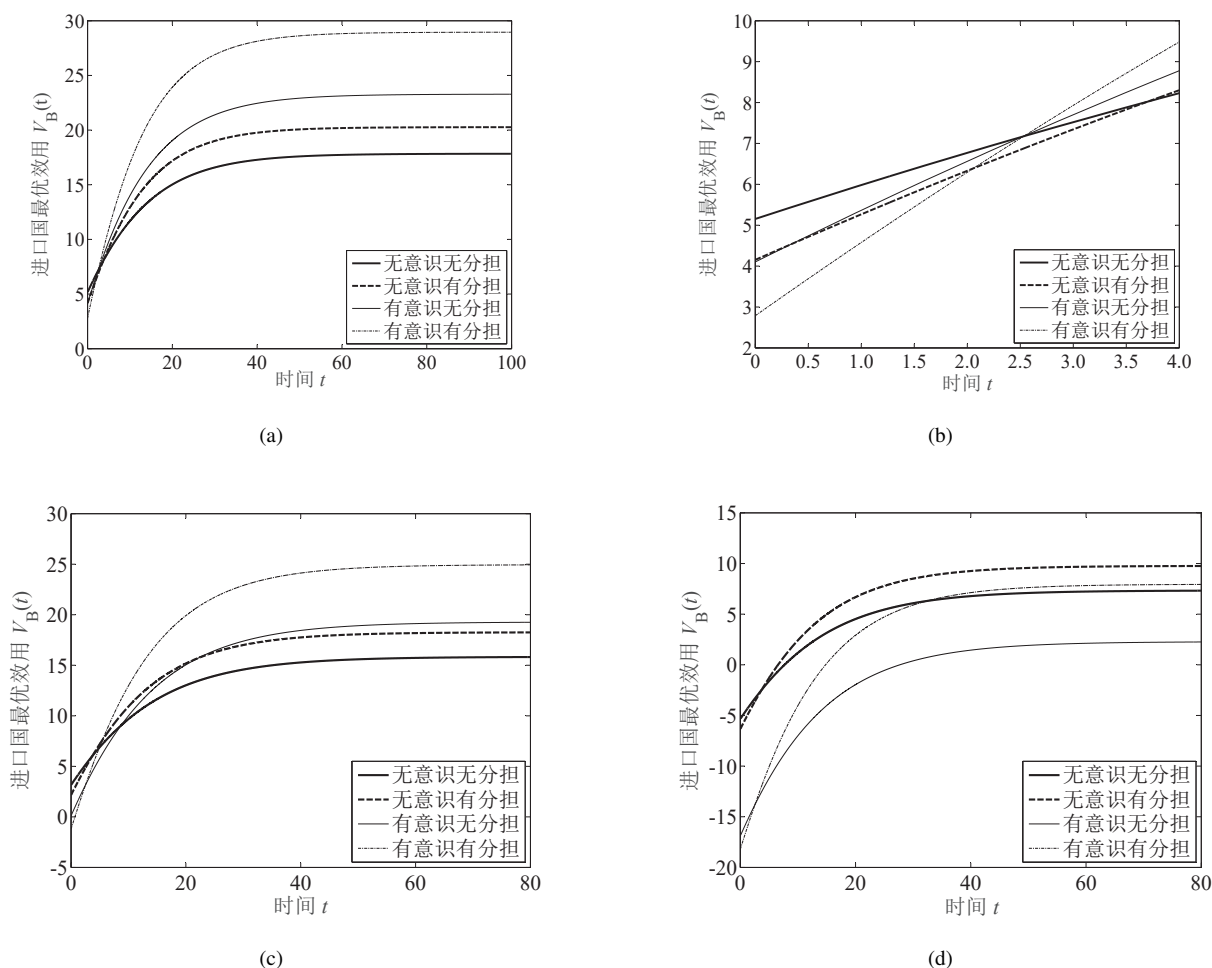


图 8 两种情形下 λ 对瞬时效用 $V_B(t)$ 的影响

Fig. 8 The influence of λ on utility $V_B(t)$ in two cases

以上结果表明, 如果基础设施基准量较低或中等水平, 那么供应安全意识、成本分担契约能够给进口国带来好处, 但同样这种好处可能在长期才能突显, 但如果基础设施基准量较高, 供应安全意识反而产生负效应, 使得进口国的效用下降.

4 结束语

近年来以我国为代表的进口国因基础设施滞后而频频出现天然气供应安全问题, 本文对此将“供应安全”非利润目标纳入传统效用函数, 构建了进出口两国共建基础设施的动态博弈模型, 研究了天然气供应安全意识、成本分担契约对双方最优均衡策略的影响. 本文研究得到的结论为天然气相关部门提供了决策参考. 我国作为天然气进口大国, 一方面在进口大量天然气过程中, 需着眼于长期的基础设施建设带来的利益, 努力增强供应安全意识, 同时也不应将国内天然气基础设施存量标准定于过高, 需循序渐进; 另一方面在与

出口国进行贸易谈判中,可向出口国提出适当下调天然气出口价格,以及考虑对我国天然气基础设施建设成本进行分担等建议。

参考文献:

- [1] Holz F, et al. A strategic model of European gas supply. *Energy Economics*, 2008, 30(3): 766–788.
- [2] Jansen T, et al. A modified Cournot model of the natural gas market in the European Union Mixed-motives delegation in a politicized environment. *Energy Policy*, 2012, 41: 280–285.
- [3] Cigerli B. An imperfectly competitive model of the world natural gas. <https://www.researchgate.net/publication/264857453>, 2012.
- [4] 罗伟中, 郑洪弢, 孟 劼. 美国出口 LNG 及对世界 LNG 市场的影响分析. *天然气工业*, 2012(6): 93–98.
Luo W Z, Zheng H T, Meng M. LNG exports from the United States and their impact on the global LNG market. *Natural Gas Industry*, 2012(6): 93–98. (in Chinese)
- [5] 庞昌伟, 张 萌. 上合组织能源俱乐部建设及中俄天然气定价机制博弈. *俄罗斯学刊*, 2011(1): 41–51.
Pang C W, Zhang M. China-Russian natural gas price setting mechanism competition in SOC energy club construction. *Academic Journal of Russian Studies*, 2011(1): 41–51. (in Chinese)
- [6] 刘 乾, 徐 斌. 中俄天然气合作的历史经验与未来发展. *国际石油经济*, 2014, 22(9): 4–10.
Liu Q, Xu B. Historical experience and future development of Sino-Russian gas cooperation. *International Petroleum Economics*, 2014, 22(9): 4–10. (in Chinese)
- [7] Biresselioglu M E, Yelkenci T, Oz I O. Investigating the natural gas supply security: A new perspective. *Energy*, 2015, 80: 168–176.
- [8] Pavlović D, Banovac E, Vištica N. Defining a composite index for measuring natural gas supply security: The Croatian gas market case. *Energy Policy*, 2018, 114: 30–38.
- [9] Shaikh F, Ji Q, Fan Y. Evaluating China's natural gas supply security based on ecological network analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 139: 1196–1206.
- [10] Lu W W, Su M R, Fath B D, et al. A systematic method of evaluation of the Chinese natural gas supply security. *Applied Energy*, 2016, 165: 858–867.
- [11] Su M R, Yue W C, Liu Y F, et al. Integrated evaluation of urban energy supply security: A network perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209: 461–471.
- [12] Ruble I. European Union energy supply security: The benefits of natural gas imports from the Eastern Mediterranean. *Energy Policy*, 2017, 105: 341–353.
- [13] Madžarević A, Ivezić D, Živković M, et al. Assessment of vulnerability of natural gas supply in Serbia: State and perspective. *Energy Policy*, 2018, 121: 415–425.
- [14] 邹莉娜, 张 荣, 任庆忠. 天然气储备对天然气进口及国内价格的动态影响. *中国管理科学*, 2017, 25(6): 132–142.
Zou L N, Zhang R, Ren Q Z. The effect of natural gas reserve on the import and price of a gas-importing country. *Chinese Journal of Management Science*, 2017, 25(6): 132–142. (in Chinese)
- [15] 邹莉娜, 任庆忠. 出口国偏好和进口多元化下的天然气进口国博弈. *系统管理学报*, 2017, 26(3): 409–417.
Zou L N, Ren Q Z. Natural gas imports strategy based on exporter preferences and diversification of imports. *Journal of Systems & Management*, 2017, 26(3): 409–417. (in Chinese)
- [16] 焦建玲, 张峻岭, 魏一鸣. 石油储备价值研究: 基于供应链视角. *管理科学学报*, 2011, 14(2): 53–60.
Jiao J L, Zhang J L, Wei Y M. Research on the value of petroleum reserve based on supply chain. *Journal of Management Sciences in China*, 2011, 14(2): 53–60. (in Chinese)
- [17] 吴 刚, 魏一鸣. 突发事件情景下的中国战略石油储备应对策略研究. *中国管理科学*, 2011, 19(2): 140–146.
Wu G, Wei Y M. The optimal strategies of China's strategic petroleum reserves in emergency. *Chinese Journal of Management Science*, 2011, 19(2): 140–146. (in Chinese)
- [18] Skea J, Chaudry M. The role of gas infrastructure in promoting UK energy security. *Energy Policy*, 2012, 43(4): 202–213.
- [19] Dieckhöner C, Lochner S, Lindenberger D. European natural gas infrastructure: The impact of market developments on gas flows and physical market integration. *Applied Energy*, 2013, 102(2): 994–1003.
- [20] Zhang Q, Li Z, Wang G, et al. Study on the impacts of natural gas supply cost on gas flow and infrastructure deployment in China. *Applied Energy*, 2016, 162: 1385–1398.
- [21] Dockner E J, Jorgensen S, Long N V, et al. *Differential Games in Economics and Management Science*. New York: Cambridge University Press, 2000.

- [22] Sethi S P, Thompson G L. *Optimal Control Theory: Applications to Management Science and Economics*. 2nd Edition. Switzerland: Springer, 2000.
- [23] Liu G, Zhang J, Tang W. Strategic transfer pricing in a marketing-operations interface with quality level and advertising dependent goodwill. *Omega: International Journal of Management Science*, 2015, 56: 1–15.
- [24] Zhou Y, Bao M, Chen X, et al. Co-op advertising and emission reduction cost sharing contracts and coordination in low-carbon supply chain based on fairness concerns. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 133: 402–413.
- [25] Bencheikroun H, Martín-Herrán G. The impact of foresight in a transboundary pollution game. *European Journal of Operational Research*, 2016, 251(1): 300–309.
- [26] Bertinelli L, Camacho C, Zou B. Carbon capture and storage and transboundary pollution: A differential game approach. *European Journal of Operational Research*, 2014, 237(2): 721–728.
- [27] 徐 静, 郭松睿, 任庆忠. 基于混合能源的企业碳减排决策研究. *系统工程学报*, 2017, 32(6): 732–737.
Xu J, Guo S R, Ren Q Z. Enterprises carbon emission reduction strategy based on mixed energy. *Journal of Systems Engineering*, 2017, 32(6): 732–737. (in Chinese)
- [28] Ghosh D, Shah J. Supply chain analysis under green sensitive consumer demand and cost sharing contract. *International Journal of Production Economics*, 2015, 164: 319–329.
- [29] Basiri Z, Heydari J. A mathematical model for green supply chain coordination with substitutable products. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 145: 232–249.
- [30] Zhang J, Gou Q, Liang L, et al. Supply chain coordination through cooperative advertising with reference price effect. *Omega*, 2013, 41(2): 345–353.
- [31] Heydari J, Govindan K, Jafari A. Reverse and closed loop supply chain coordination by considering government role. *Transportation Research Part D: Transport & Environment*, 2017, 52: 379–398.
- [32] Yang Z, Zhang R, Zhang Z. An exploration of a strategic competition model for the European Union natural gas market. *Energy Economics*, 2016, 57: 236–242.
- [33] 黄宗盛, 聂佳佳, 胡 培. 具竞争性零售商的闭环供应链微分对策模型. *系统工程学报*, 2015, 30(6): 779–789.
Huang Z S, Nie J J, Hu P. Differential game model in closed-loop supply chain with competing retailers. *Journal of Systems Engineering*, 2015, 30(6): 779–789. (in Chinese)
- [34] Erickson G M. A differential game model of the marketing-operations interface. *European Journal of Operational Research*, 2011, 211(2): 394–402.
- [35] De Giovanni P. Quality improvement vs. advertising support: which strategy works better for a manufacturer. *European Journal of Operations Research*, 2011, 208(2): 119–130.

作者简介:

张 华(1986—), 男, 湖南株洲人, 博士, 讲师, 研究方向: 能源经济, 最优控制与动态博弈, Email: zhanghua2019@ctbu.edu.cn;

周 兵(1967—), 男, 湖北恩施人, 博士, 教授, 研究方向: 公司金融, Email: bingzhou@ctbu.edu.cn;

曾小晏(1985—), 女, 重庆人, 博士生, 研究方向: 生态金融, Email: cqzengxiaoyan@163.com.