

# 主要国家间石油贸易演化博弈分析

——以中国、俄罗斯、印度、沙特阿拉伯为例

姜志豪<sup>1,2)</sup>, 钟维琼<sup>1)\*</sup>, 韩梅<sup>1)</sup>

1)中国地质科学院矿产资源研究所全球矿产资源战略研究中心, 北京 100037;

2)中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 为应对后疫情时代及地缘政治影响下石油贸易新格局, 保障新时代、新格局下中国石油安全, 本文以全球石油贸易新格局为背景, 对中国、俄罗斯、印度、沙特阿拉伯四国石油贸易进行建模。由于沙特阿拉伯与中国、印度石油贸易长期处于安全、稳定状态, 本次实验运用演化博弈理论对中国与印度的能源竞争以及中国与俄罗斯的能源合作进行定量分析。研究结果表明: 1)印度持续增加俄罗斯石油进口将对我国石油安全造成威胁, 在印度对俄罗斯的石油进口占比达到16.5%时, 将改变四国石油贸易结构, 成为我国的重要威胁。2)俄罗斯出口意愿对结果产生直接影响, 在俄罗斯出口意愿持续降低时, 仿真结果产生变化, 对我国石油安全造成威胁。在世界石油贸易格局变化后的新时代, 本研究对保障中国石油安全有重要意义。

**关键词:** 石油安全; 演化博弈; 能源合作; 能源竞争

中图分类号: F416.22; F746 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2023.011901

## Game Analysis of Oil Trade among Major Countries: Taking China, Russia, India and Saudi Arabia as Examples

JIANG Zhi-hao<sup>1,2)</sup>, ZHONG Wei-qiong<sup>1)\*</sup>, HAN Mei<sup>1)</sup>

1) *Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;*

2) *School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074*

**Abstract:** A new pattern of oil trade has emerged under the influence of geopolitics and the COVID-19 pandemic. To explore China's oil security in these changed times, this study takes the new pattern of global oil trade as the background and adopts the oil trade models of Russia, India, Saudi Arabia, and China itself. Since Saudi Arabia's oil trade with China and India has been safe and stable for long, this study uses evolutionary game theory to make a quantitative analysis of the energy competition between China and India and the energy cooperation between China and Russia. The research results reveal the following: 1) The continued increase in India's Russian oil imports will pose a threat to China's oil security. When India's oil imports from Russia reach 16.5%, it will change the oil trade structure of the four countries and become a crucial threat to China and 2) Russia's willingness to export has a direct impact on the results. As Russia's willingness to export declines, it will affect the results and pose a threat to China's oil security. This study is of great significance as it provides meaningful insights to ensure China's oil security in the post pandemic era with key changes in the world's oil trade pattern.

**Key words:** petroleum security; evolutionary game; energy cooperation; energy competition

博弈论为在博弈过程中, 博弈参与者以自身利益最大化为目的, 并以此为指导原则进行策略选

本文由国家自然科学基金基础科学中心项目“数字经济时代的资源环境管理理论与应用”(编号: 72088101)、国家自然科学基金重大项目“新时代战略性关键矿产资源安全与管理”(编号: 71991480)及其课题5“新时代中国战略性关键矿产资源全球治理体系研究”(编号: 71991485)联合资助。

收稿日期: 2022-09-14; 改回日期: 2023-01-19; 网络首发日期: 2023-01-20。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 姜志豪, 男, 1998年生。硕士研究生。资源与环境专业。E-mail: zhihaojiang35@163.com。

\*通讯作者: 钟维琼, 女, 1988年生。博士, 副研究员。主要从事矿产资源战略研究。E-mail: zhongweiqiong2016@126.com。

择。当前,博弈论已经广泛应用于经济学、演化生物学、计算科学等诸多学科。传统的博弈理论要求完全理性,但对于现实生活中的决策者来说难以实现,这就引入了演化博弈理论,这种理论不要求决策者是完全理性的,同样也不要求完全信息条件。博弈论的应用最早可以追溯到 1838 年法国经济学家 Augustin Cournot 使用具有限制条件的纳什均衡概念求解垄断市场的定量选择问题。1944 年普林斯顿大学出版了《Theory of Games and Economic Behaviour》标志着博弈理论正式形成。李鹏(2017)将演化博弈理论应用于能源博弈之中,基于合作意愿差异化视角对中国和东亚国家能源合作进行分析。李宝驹(2019)应用演化博弈模型对一带一路沿线国家能源进行了演化博弈分析。

在能源贸易领域,竞争博弈指两个或多个进口国在面临同样出口国时所采取不同策略,使自身在竞争中占据优势地位;合作博弈指进口国与出口国之间采取不同策略使自身在能源合作中获得更大利益。

本文应用演化博弈理论,以中国、印度、俄罗斯、沙特阿拉伯为研究主体,在新的时代背景以及新的石油贸易格局下,以中国石油安全为核心,首次将俄乌战争对四国贸易的影响进行定量分析,重点分析俄罗斯、沙特阿拉伯在石油出口领域的竞争格局,以及中国与印度在石油进口领域的竞争格局。

本文模型主体选择中国、印度、俄罗斯、沙特阿拉伯四国。其中中国石油安全为本次研究重点。我国是目前世界上最大的原油净进口国、排名第二的石油消费国,但我国原油对外依存度始终居高不下,原油进口风险已成为影响我国石油安全的重要因素。在全球石油贸易格局剧烈变化的今天,如何保障我国石油安全,降低原油进口风险已成为新的问题(Gong et al., 2022)。

沙特阿拉伯是世界上仅次于委内瑞拉的石油王国。沙特阿拉伯的石油具有品质高、开采成本低等特点,是目前全球最大的石油出口国和排名第三的石油生产国。我国和沙特阿拉伯在能源领域长期保持良好的合作关系,过去 20 年,沙特阿拉伯始终稳居我国石油进口来源前两位(陈沫, 2021; Alkhamash et al., 2022)。

俄罗斯是全球最大的原油生产国和出口国之一,据俄罗斯联邦海关总署(FCS)统计数据显示,2021 年全年俄罗斯石油出口 2.29 亿 t,全球范围内仅次于沙特阿拉伯。俄罗斯与中国石油贸易合作在过去 20 年飞速发展,2004 年解决国界纠纷问题以来,两国石油贸易合作愈发密切,加之乌克兰危机爆发,

俄罗斯石油贸易中心逐渐向东亚转移,2017 年俄罗斯首次超越沙特阿拉伯成为中国原油进口的最大来源国。随着俄乌战争的爆发,西方势力大举对俄进行制裁,尤其在能源领域(曹志宏, 2022)。俄罗斯与中国在能源领域的合作愈加密切,预计在不久的将来,俄罗斯将持续保持中国原油的最大进口国地位(Gao and Liang, 2018; 陈卫东, 2022)。

印度近些年来经济高速增长,在 2019 年成为世界第五大经济体。印度经济产业多元化,涵盖农业、手工艺、纺织以至服务业。近年来服务业增长迅速,已成为全球软件、金融等服务业最重要出口国。随着经济的飞速增长,印度对于石油的需求持续增长,已成为全球仅次于美国和中国的第三大石油消费国。但与中国类似,印度石油高度依赖进口(张抗等, 2022)。据印度《经济时报》等媒体报道,印度约有 85% 的原油依赖进口。2021 年印度共进口约 2.14 亿 t 原油,主要进口国为伊拉克(24%)、沙特阿拉伯(16%)、阿联酋(11%)和美国(10%)。印度在过去对于石油的需求并不强,近年来随着经济的高速增长,对于石油的进口需求也随之增长。过去,印度和俄罗斯并未在石油贸易领域过多合作,但在 2022 年 2 月俄乌战争爆发以来,印度对俄罗斯石油贸易的进口策略发生巨大转变,印度开始大量进口俄罗斯的石油。Refinitiv Eikon 数据显示,2021 年全年印度从俄罗斯进口的石油占比仅为 2%;在俄乌冲突发生之前,2021 年 12 月以及 2022 年 1 月,印度没有进口来自俄罗斯的石油;但 2022 年 3 月至 5 月期间,短短三个月的时间,俄罗斯向印度出口的石油足足增长了 8 倍,从原来的 300 万桶急速增长至 2400 万桶,俄罗斯一跃成为印度的第二大石油进口国(陈九霖, 2022; Wei et al., 2022)。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据

本文贸易数据来自联合国统计署(UN Comtrade)公开数据(Trade Statistics Branch and United Nations Statistics Division, 2022),贸易数据为 2017—2022 年 5 月期间四国石油贸易数据(本次实验仅限 HS 代码 270900 的原油,其他石油衍生品不含其中)。2017 年开始,俄罗斯首次成为中国石油最大的进口国,故选择从 2017 年开始。2022 年 4 月和 5 月则为俄乌战争开始以来,对全球石油贸易市场影响最为关键的两个月。

本次实验贸易数据分为进口国数据和出口国数据,对进口国从 UN Comtrade 数据库获取对应进口重量,计算对应的两个出口国在自身贸易中进口占比;对出口国从 UN Comtrade 数据库获取对应出

口重量, 计算对应的两个进口国在自身贸易中出口占比。

### 1.2 模型结构

本次实验模型设置参考李鹏(2017)、李宝驹(2019)等学者。以中国、印度为进口国 1、进口国 2, 以沙特阿拉伯、俄罗斯为出口国 1、出口国 2 构建四方演化博弈模型。模型适用性条件如下:

(1)有限理性, 四国的石油贸易政策受地缘政治等诸多因素影响, 需要逐渐调整贸易策略, 四国之间的石油贸易是一个典型的动态过程。

(2)不完全信息, 四国作为现实世界的四个国家, 在政治、文化、经济方面有诸多不同, 在四国贸易系统里不能完全获得其他国家的贸易策略、成本、收益。

模型基本假设如下:

(1)假设石油进口国的策略集为(增加石油进口, 不增加石油进口)。中国向沙特阿拉伯增加石油进口概率为  $x_{11}$ , 则中国向沙特阿拉伯不增加石油进口概率为  $1-x_{11}$ ; 中国向俄罗斯增加石油进口概率为  $x_{12}$ , 则中国向俄罗斯不增加石油进口概率为  $1-x_{12}$ ; 同理可得印度对沙特阿拉伯、俄罗斯增加石油进口的概率为  $x_{21}$ 、 $x_{22}$ , 不增加石油进口的概率为  $1-x_{21}$ 、 $1-x_{22}$ 。对应出口国的策略集为(增加石油出口, 不增加石油出口)。沙特阿拉伯向中国增加石油出口的概率是  $y_{11}$ , 则沙特阿拉伯向中国不增加石油出口的概率是  $1-y_{11}$ ; 沙特阿拉伯向印度增加石油出口的概率是  $y_{12}$ , 则沙特阿拉伯向印度不增加石油出口的概率是  $1-y_{12}$ ; 同理可得俄罗斯对中国、印度增加石油出口的概率为  $y_{21}$ 、 $y_{22}$ , 则俄罗斯对中国、印度不增加石油出口的概率为  $1-y_{21}$ 、 $1-y_{22}$ 。

(2)假设在四国贸易模型中, 单个进口国与单个出口国常规合作所取得的收益为  $R$ , 当单个国家想要与其他国家扩大贸易时需要多付出成本为  $c$ , 并且当且仅当两国均选择积极合作时对应贸易量扩大。

(3)两个进口国之间存在竞争关系, 同样两个出口国之间也存在竞争关系。

对应参数解释见表 1, 2:

举例说明参数设置过程, 对于进口国, 2017 年我国从沙特阿拉伯和俄罗斯进口占比分别为 12.5% 和 14.3%, 则对应参数  $x_{11}=0.125$ ,  $x_{12}=0.143$ , 印度从沙特阿拉伯和俄罗斯进口占比分别为 16.7% 和 1.4%, 则对应参数  $x_{21}=0.167$ ,  $x_{22}=0.014$ ; 对出口国, 2017 年沙特阿拉伯向中国和印度的出口占比分别为 16.4% 和 11.2%, 则对应参数  $y_{11}=0.164$ ,  $y_{12}=0.112$ , 2017 年俄罗斯向中国和印度的出口占比分别为 22.6% 和 1.1%, 则对应参数  $y_{21}=0.226$ ,  $y_{22}=0.011$ 。其他参数处理过程同上, 并在不同实验中对其中不同参数设置特殊值便于观察实验结果。

根据基本假设, 中国的贸易支付矩阵, 进口国 2 只与出口国 1 增加贸易见表 3, 进口国 2 只与出口国 2 增加贸易见表 4, 进口国 2 与出口国 1, 2 均增加贸易( $x_{21}$ ,  $x_{22}$ )见表 5, 进口国 2 与出口国 1, 2 均增加贸易( $1-x_{21}$ ,  $1-x_{22}$ )见表 6。

计算中国向沙特阿拉伯增加石油进口的均值:

$$E_{11}=R_{11}-c_{11}+a_{11}y_{11}-x_{21}d_{11}+(1-x_{21})x_{22}y_{11}(c_{11}-c_{111}) \quad (1)$$

中国向沙特阿拉伯不增加石油进口的均值:

$$E_{12}=R_{12} \quad (2)$$

$$\text{平均收益: } E_{(中 \rightarrow 沙)} = x_{11}E_{11}+(1-x_{11})E_{12} \quad (3)$$

表 1 参数解释

Table 1 Parameter interpretation

参数	解释	参数	解释
$x_{11}$	中国向沙特阿拉伯增加石油进口概率	$x_{12}$	中国向俄罗斯增加石油进口概率
$x_{21}$	印度向沙特阿拉伯增加石油进口概率	$x_{22}$	印度向俄罗斯增加石油进口概率
$y_{11}$	沙特阿拉伯向中国增加石油出口概率	$y_{12}$	沙特阿拉伯向印度增加石油出口概率
$y_{21}$	俄罗斯向中国增加石油出口概率	$y_{22}$	俄罗斯向印度增加石油出口概率
$R_{11}$	中国与沙特阿拉伯正常合作收益	$R_{12}$	中国与俄罗斯正常合作收益
$R_{21}$	印度与沙特阿拉伯正常合作收益	$R_{22}$	印度与俄罗斯正常合作收益
$R_{31}$	沙特阿拉伯与中国正常合作收益	$R_{32}$	沙特阿拉伯与印度正常合作收益
$R_{41}$	俄罗斯与中国正常合作收益	$R_{42}$	俄罗斯与印度正常合作收益
$a_{11}$	中国与沙特阿拉伯增加进口的收益	$a_{12}$	中国与俄罗斯增加进口的收益
$a_{21}$	印度与沙特阿拉伯增加进口的收益	$a_{22}$	印度与俄罗斯增加进口的收益
$a_{31}$	沙特阿拉伯与中国增加出口的收益	$a_{32}$	沙特阿拉伯与印度增加出口的收益
$a_{41}$	俄罗斯与中国增加出口的收益	$a_{42}$	俄罗斯与印度增加出口的收益
$c_{11}$	中国与沙特阿拉伯扩大贸易所付出的成本	$c_{12}$	中国与俄罗斯扩大贸易所付出的成本
$c_{21}$	印度与沙特阿拉伯扩大贸易所付出的成本	$c_{22}$	印度与俄罗斯扩大贸易所付出的成本
$c_{31}$	沙特阿拉伯与中国扩大贸易所付出的成本	$c_{32}$	沙特阿拉伯与印度扩大贸易所付出的成本
$c_{41}$	俄罗斯与中国扩大贸易所付出的成本	$c_{42}$	俄罗斯与印度扩大贸易所付出的成本
$d_{11}$	中国、印度均选择和沙特阿拉伯增加进口所多付出的成本	$d_{12}$	中国、印度均选择和俄罗斯增加进口所多付出的成本

表 2 补充参数解释  
Table 2 Explanation of supplementary parameters

参数	解释
$C_{221}$	当进口国只有进口国 1 与出口国 2 增加石油进口时, 出口国 1 为吸引; 进口国 2 扩大石油贸易量, 进口国 2 与出口国 1 贸易成本降低后的成本
$C_{421}$	当进口国只有进口国 1 与出口国 2 增加石油进口时, 出口国 1 为吸引; 进口国 2 扩大石油贸易量, 出口国 1 对应增加后的成本
$C_{121}$	当进口国只有进口国 2 与出口国 2 增加石油进口时, 出口国 1 为吸引; 进口国 1 扩大石油贸易量, 进口国 1 与出口国 1 贸易成本降低后的成本
$C_{411}$	当进口国只有进口国 2 与出口国 2 增加石油进口时, 出口国 1 为吸引; 进口国 1 扩大石油贸易量, 出口国 1 对应增加后的成本
$C_{211}$	当进口国只有进口国 1 与出口国 1 增加石油进口时, 出口国 2 为吸引; 进口国 2 扩大石油贸易量, 进口国 2 与出口国 2 贸易成本降低后的成本
$C_{321}$	当进口国只有进口国 1 与出口国 1 增加石油进口时, 出口国 2 为吸引; 进口国 2 扩大石油贸易量, 出口国 2 对应增加后的成本
$C_{111}$	当进口国只有进口国 2 与出口国 1 增加石油进口时, 出口国 2 为吸引; 进口国 1 扩大石油贸易量, 进口国 1 与出口国 2 贸易成本降低后的成本
$C_{322}$	当进口国只有进口国 2 与出口国 1 增加石油进口时, 出口国 2 为吸引; 进口国 1 扩大石油贸易量, 出口国 2 对应增加后的成本

表 3 进口国 2 只与出口国 1 增加贸易  
Table 3 Import country 2 only increases trade with export country 1

1. 进口国 2 只与出口国 1 增加贸易 $x_{21}(1-x_{22})$						
		出口国 1		出口国 2		
		增加出口 $y_{11}$	不增加出口 $1-y_{11}$			
进口国 1	增加进口 $x_{11}$	$R_{11}+a_{11}-c_{11}-d_{11}$	$R_{11}-c_{11}-d_{11}$	增加进口 $x_{12}$	$R_{12}+a_{12}-c_{12}$	$R_{12}-c_{12}$
	不增加进口 $1-x_{11}$	$R_{11}$	$R_{11}$	不增加进口 $1-x_{12}$	$R_{12}$	$R_{12}$

表 4 进口国 2 只与出口国 2 增加贸易  
Table 4 Import country 2 only increases trade with export country 2

2. 进口国 2 只与出口国 2 增加贸易 $x_{22}(1-x_{21})$						
		出口国 1		出口国 2		
		增加出口 $y_{11}$	不增加出口 $1-y_{11}$			
进口国 1	增加进口 $x_{11}$	$R_{11}+a_{11}-c_{11}$	$R_{11}-c_{11}$	增加进口 $x_{12}$	$R_{12}+a_{12}-c_{12}-d_{12}$	$R_{12}-c_{12}-d_{12}$
	不增加进口 $1-x_{11}$	$R_{11}$	$R_{11}$	不增加进口 $1-x_{12}$	$R_{12}$	$R_{12}$

表 5 进口国 2 与出口国 1, 2 均增加贸易( $x_{21}, x_{22}$ )  
Table 5 Both importing country 2 and exporting country 1, 2 increase trade( $x_{21}, x_{22}$ )

3. 进口国 2 与出口国 1, 2 均增加贸易 $x_{21}, x_{22}$						
		出口国 1		出口国 2		
		增加出口 $y_{11}$	不增加出口 $1-y_{11}$			
进口国 1	增加进口 $x_{11}$	$R_{11}+a_{11}-c_{11}-d_{11}$	$R_{11}-c_{11}-d_{11}$	增加进口 $x_{12}$	$R_{12}+a_{12}-c_{12}-d_{12}$	$R_{12}-c_{12}-d_{12}$
	不增加进口 $1-x_{11}$	$R_{11}$	$R_{11}$	不增加进口 $1-x_{12}$	$R_{12}$	$R_{12}$

表 6 进口国 2 与出口国 1, 2 均增加贸易( $1-x_{21}, 1-x_{22}$ )  
Table 6 Both importing country 2 and exporting country 1, 2 increase trade( $1-x_{21}, 1-x_{22}$ )

4. 进口国 2 与出口国 1, 2 均增加贸易 $1-x_{21}, 1-x_{22}$						
		出口国 1		出口国 2		
		增加出口 $y_{11}$	不增加出口 $1-y_{11}$			
进口国 1	增加进口 $x_{11}$	$R_{11}+a_{11}-c_{11}$	$R_{11}-c_{11}$	增加进口 $x_{12}$	$R_{12}+a_{12}-c_{12}$	$R_{12}-c_{12}$
	不增加进口 $1-x_{11}$	$R_{11}$	$R_{11}$	不增加进口 $1-x_{12}$	$R_{12}$	$R_{12}$

则中国从沙特阿拉伯增加石油进口的复制动态方程:

$$F(x_{11}) = \frac{dx_{11}}{dt} = x_{11}(1-x_{11})[a_{11}y_{11} - c_{11} - x_{21}d_{11} + (1-x_{21})x_{22}y_{11}(c_{11}-c_{111})] \quad (4)$$

同理可得其他复制动态方程。

中国从俄罗斯增加石油进口的复制动态方程:

$$F(x_{12}) = \frac{dx_{12}}{dt} = x_{12}(1-x_{12})[a_{12}y_{21} - c_{12} - x_{22}d_{12} + (1-x_{22})x_{21}y_{21}(c_{12}-c_{121})] \quad (5)$$

印度从沙特阿拉伯增加石油进口的复制动态方程:

$$F(x_{21}) = \frac{dx_{21}}{dt} = x_{21}(1-x_{21})[a_{21}y_{12} - c_{21} - x_{11}d_{11} + (1-x_{11})x_{12}y_{12}(c_{21}-c_{211})] \quad (6)$$

印度从俄罗斯增加石油进口的复制动态方程:

$$F(x_{22}) = \frac{dx_{22}}{dt} = x_{22}(1-x_{21})[a_{22}y_{22}-c_{22}-x_{12}d_{12}+(1-x_{12})x_{11}y_{22}(c_{22}-c_{21})] \quad (7)$$

沙特阿拉伯向中国增加石油出口的复制动态方程:

$$F(y_{11}) = \frac{dy_{11}}{dt} = y_{11}(1-y_{11})[a_{31}x_{11}-c_{31}-(1-x_{12})x_{22}(c_{311}-c_{31})] \quad (8)$$

沙特阿拉伯向印度增加石油出口的复制动态方程:

$$F(y_{12}) = \frac{dy_{12}}{dt} = y_{12}(1-y_{12})[a_{32}x_{21}-c_{32}-(1-x_{22})x_{12}(c_{321}-c_{32})] \quad (9)$$

俄罗斯向中国增加石油出口的复制动态方程:

$$F(y_{21}) = \frac{dy_{21}}{dt} = y_{21}(1-y_{21})[a_{41}x_{12}-c_{41}-(1-x_{11})x_{21}(c_{411}-c_{41})] \quad (10)$$

俄罗斯向印度增加石油出口的复制动态方程:

$$F(y_{22}) = \frac{dy_{22}}{dt} = y_{22}(1-y_{22})[a_{42}x_{22}-c_{42}-(1-x_{21})x_{11}(c_{421}-c_{42})] \quad (11)$$

### 1.3 模拟仿真

本次实验使用 matlab 进行模拟仿真, 对以上内容进行建模。首先进行假设性检验, 对初始意愿设置偏好。假设在进出口国之间设置贸易偏好, 对结果进行分析。初始点 ( $x_{11}=0.4, x_{12}=0.6, x_{21}=0.6, x_{22}=0.4; y_{11}=0.5, y_{12}=0.5, y_{21}=0.5, y_{22}=0.5$ )。

如图 1 假设性检验所示,  $F(x_{12})$ 、 $F(x_{21})$  从 0.6 开始演化,  $F(x_{12})$  经过初期快速增长, 后期缓慢增长后率先到达 1, 达到合作状态,  $F(x_{21})$  经过初期缓慢减小后逐渐增大至 1, 达到合作状态;  $F(y_{11})$ 、 $F(y_{12})$ 、 $F(y_{21})$ 、 $F(y_{22})$  从 0.5 开始演化,  $F(y_{21})$  快速到达合作状态,  $F(y_{12})$  在其之后到达合作状态,  $F(y_{11})$  虽在初期有较大增长, 但最终到达 0, 达到不合作状态,  $F(y_{22})$  达到不合作状态;  $F(x_{11})$ 、 $F(x_{22})$  从 0.4 开始演化, 在演化过程中持续减小, 最终达到不合作状态。通常我们认为, 在双方增加合作的意愿较高时候, 双方

大概率进行合作。这里我们在假设中国与俄罗斯之间存在明显的合作偏好条件下, 结果和我们预期一致, 说明该模型可以用于后续实验。

假设石油出口国向石油进口国增加出口的概率

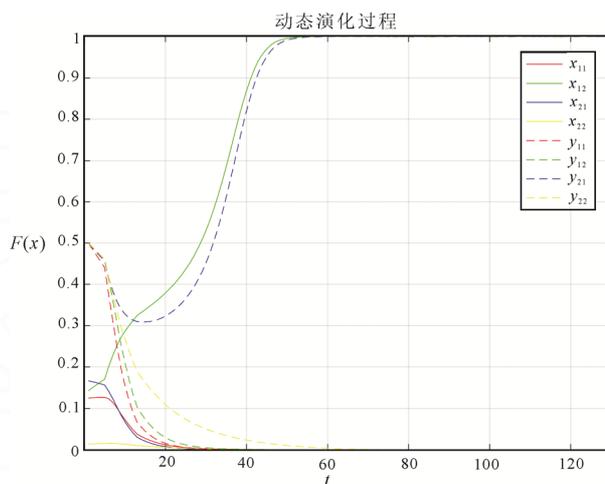


图 2 2017 年贸易数据仿真  
Fig. 2 Trade data simulation in 2017

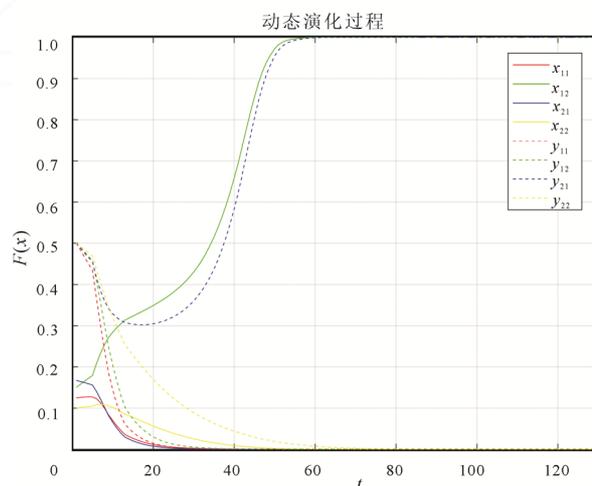


图 3 2022 年 4 月贸易数据仿真  
Fig. 3 Trade data simulation in April, 2022

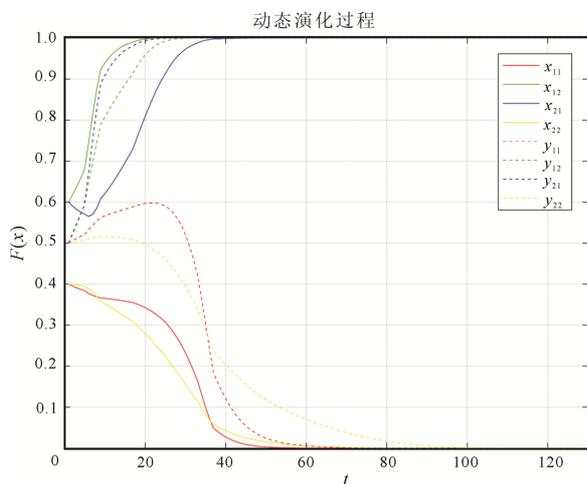


图 1 假设性检验  
Fig. 1 Hypothesis test

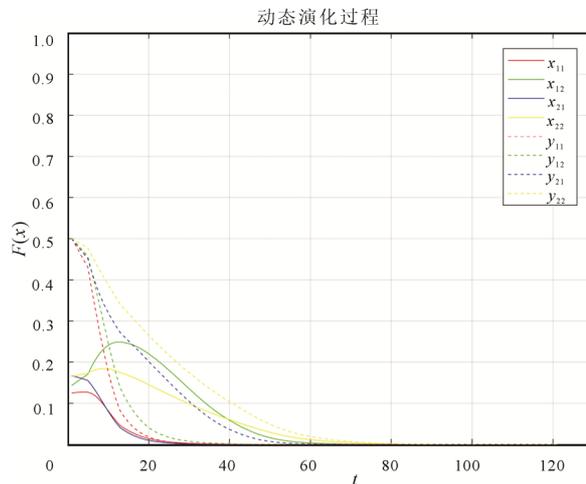


图 4 2022 年 5 月贸易数据仿真  
Fig. 4 Trade data simulation in May, 2022

均为 0.5(对结果影响最小时), 利用 2017 年的数据设置初始点(将进口国增加进口的初值设置为当前对应国家进口占比)。结果如 2017 年贸易数据仿真所示(图 2),  $F(y_{11})$ 、 $F(y_{12})$ 、 $F(y_{21})$ 、 $F(y_{22})$ 从 0.5 开始演化,  $F(y_{21})$ 在经过初期减小后逆势增大, 最终达到 1, 演化达到合作状态,  $F(y_{11})$ 、 $F(y_{12})$ 、 $F(y_{22})$ 均在演化开始后逐渐减小, 最终达到不合作状态;  $F(x_{21})$ 从 0.167 开始演化, 经前期缓慢减小后快速减小, 最终达到不合作状态;  $F(x_{12})$ 从 0.143 开始演化, 经前期短暂缓慢增大后快速增大至 1, 演化达到合作状态;  $F(x_{11})$ 从 0.125 开始演化, 经初期保持稳定状态后逐渐减小至 0, 演化达到不合作状态;  $F(x_{22})$ 从 0.014 开始演化逐渐减小至 0, 达到不合作状态。实验结果说明中国和俄罗斯实现石油贸易的增加; 在其他条件不变的情况下增加印度从俄罗斯增加进口的概率, 利用 2022 年 4 月的数据设置初始点, 演化结果如 2022 年 4 月贸易数据仿真所示(图 3), 与 2017 年数据演化结果基本一致, 只在演化速度上有细微区别, 只有中国和俄罗斯实现石油贸易的增加; 继续按照

2022 年 5 月的数据设置初始点, 如 2022 年 5 月贸易数据仿真所示(图 4), 当  $x_{22}=0.165$  时, 所有曲线均达到不合作状态, 原贸易系统平衡被打破, 对我国的石油贸易产生影响。

假设将沙特阿拉伯和俄罗斯的出口占比作为增加出口概率(0.164, 0.226), 系统演化结果如俄印石油贸易初态所示(图 5),  $F(x_{11})$ 、 $F(x_{12})$ 、 $F(x_{21})$ 、 $F(x_{22})$ 从 0.5 开始演化, 只有  $F(x_{12})$ 缓慢减小后反弹, 增大至 1, 达到合作状态, 其余均降低至 0, 达到不合作状态;  $F(y_{21})$ 从 0.226 开始演化, 快速增大至 1, 达到合作状态;  $F(y_{11})$ 从 0.164 开始演化, 经初期缓慢增大后逐渐降低至 0, 达到不合作状态;  $F(y_{12})$ 从 0.122 开始演化, 同样经初期缓慢增大后逐渐减小至 0, 达到不合作状态;  $F(y_{22})$ 从 0.011 开始演化, 减小至 0, 演化达到不合作状态。但当俄罗斯对印度增加石油出口的概率显著增强时, 原系统平衡被打破, 当  $y_{22}=0.39$  时结果如俄印石油贸易概率增大所示(图 6),  $F(x_{22})$ 前期缓慢减小, 中期平稳后逐渐增大至 1, 达到合作状态;  $F(y_{22})$ 从 0.39 开始演化, 逐渐增大到 1, 达到合作状态。结果说明此时俄罗斯和印度将实现贸易规模的增加。

在其他条件不变的情况下将俄罗斯对中国出口意愿进行降低, 结果如图 7 所示, 中俄石油贸易合作概率降低,  $F(x_{12})$ 、 $F(y_{21})$ 均在演化开始后快速减小至 0, 达到不合作状态。结果说明出口意愿降低到 0.16(初始意愿的 70%)时, 对双方合作产生影响, 系统平衡被打破, 结果趋向于不合作状态。

## 2 结果与讨论

本文对新时代全球石油贸易格局进行分析, 重点对我国石油安全存在威胁的因素进行分析, 与对我国石油安全影响比重较大的俄罗斯、沙特阿拉伯、

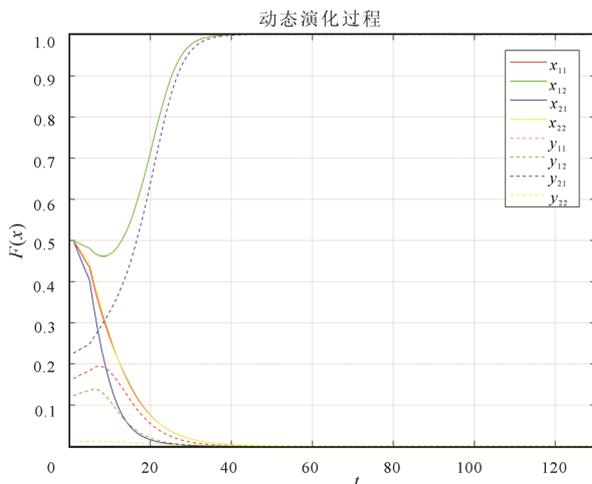


图 5 俄印石油贸易初态  
Fig. 5 Initial state of Russia-India oil trade

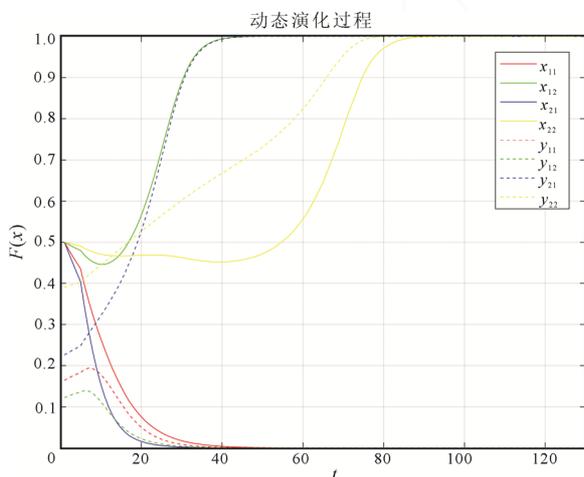


图 6 俄印石油贸易概率增大  
Fig. 6 Increased probability of Russia-India oil trade

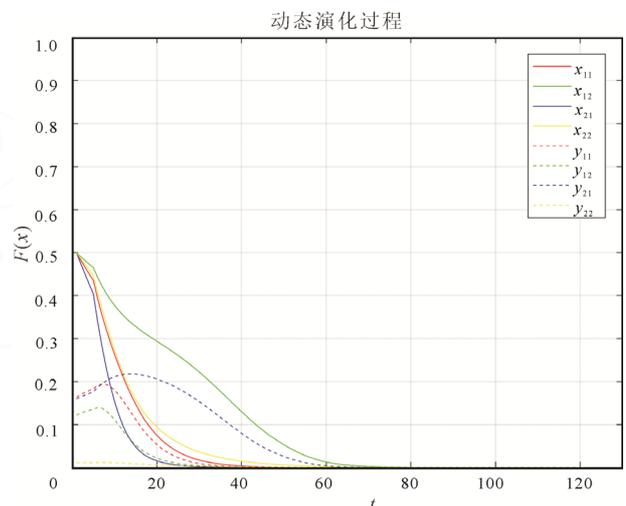


图 7 中俄石油贸易合作概率降低  
Fig. 7 Decreased probability of China-Russia oil trade

印度三国进行演化博弈分析, 结果表明:

(1) 印度持续增加俄罗斯石油进口将对我国石油安全造成威胁。在印度对俄罗斯的石油进口占比达到 16.5% 时, 将影响四国石油贸易结构, 对中国石油进口造成威胁, 随着印度对俄罗斯的石油进口占比逐渐增大, 将抑制中国与俄罗斯的石油贸易合作。

从原油需求的角度考虑, 随着经济与人口的飞速增长, 根据国际能源署《世界能源展望》的预测, 到 2040 年印度的石油需求会从 470 万桶/日增加到 900 万桶/日; 从原油消费的角度考虑, 印度是目前全球第三大石油消费国且消费量日益增长。目前中国和印度贡献全球大约一半的石油需求增长, 印度的石油需求增速已经超越中国成为目前石油需求增速最快的国家, 并且将成为石油需求最大的国家。由于进口来源的高度重复以及地理位置的相似性, 中印两国在石油进口上的竞争不可避免, 并且随着印度石油进口需求的不断增大, 这种竞争将愈演愈烈(安琪, 2020)。

(2) 俄罗斯出口意愿对结果产生直接影响, 当俄罗斯出口意愿为 2017 年的 70% 时, 对中俄石油贸易合作产生影响, 演化开始趋向不合作状态。在国际石油进口竞争中自身的进口意愿往往占据主导因素, 在自身进口意愿较强时, 竞争者意愿的增加对最终状态无影响, 仅对实现合作的时间产生影响; 而在自身进口意愿较弱时, 随着竞争者意愿的增加, 结果逐渐趋向于不合作状态。

俄罗斯在中国的石油进口占比中长期处于第一、第二名, 对我国石油安全至关重要。从贸易的角度考虑, 2004 年, 中俄长期以来的国界纠纷问题的解决使得双方的国际关系更加友好, 中俄原油贸易数量首次突破 1000 万 t。此后, 中俄关系更加密切, 在能源领域的合作也愈加密切。加之欧洲国家逐年下降的原油需求, 早在乌克兰危机爆发以来, 俄罗斯能源战略重心已经东移。随着俄乌战争的爆发, 西方势力大举对俄进行制裁, 俄罗斯石油出口重心完全转向东亚, 其中中国和印度作为主要的出口国家占比在今年的 5 至 6 月达到 60%, 预计在西方对俄持续制裁的大背景下, 这一数据将长期保持在 50% 附近。从地缘角度来考虑, 俄罗斯在与欧洲市场转向不合作的状态下, 与东亚市场加强合作成为俄罗斯的必要选择, 主动加强与中印两国在石油贸易领域的合作是俄罗斯目前的最佳选择(Saiymova et al., 2021; 李富兵等, 2022)。

### 3 政策建议

(1) 警惕来自印度的石油进口竞争。印度在过去

对于石油的需求并不强, 近年来随着经济的高速增长, 对于石油的进口需求也随之增长。过去印度和俄罗斯并未在石油贸易领域过多合作, 但在 2022 年 2 月俄乌战争爆发以来, 印度对俄罗斯石油贸易的进口策略发生巨大转变, 印度开始大量进口来自俄罗斯的石油。俄罗斯一跃成为印度的第二大石油进口国。由于进口来源的高度重复以及地理位置的相似性, 中印两国在石油进口上的竞争不可避免, 并且随着印度石油进口需求的不断增大, 这种竞争将愈演愈烈。印度与俄罗斯在石油贸易领域的飞速发展以及印度未来原油需求的高速增长使得印度在未来石油贸易格局中将占据更加主动的位置, 我国需高度警惕来自印度的石油进口竞争, 避免对我国石油安全产生影响。

(2) 加强与俄罗斯石油贸易合作, 同时保持与沙特阿拉伯石油贸易合作。随着地缘政治风险加剧, 中俄在能源贸易领域合作愈加密切, 俄乌战争爆发以来, 中俄在石油贸易领域贸易额不断扩大, 并且在未来仍存在可预期的增长空间。根据中国海关总局公布的数据, 中国今年 5 月份的石油进口量达到 4582 万 t, 比去年同期增加了 11.8%, 其中来自俄罗斯的石油为 842 万 t, 同比增长 55%。在中俄石油贸易合作之外, 我国仍需与沙特阿拉伯保持健康的能源合作关系, 保持来源国丰富、稳定现状, 保障我国石油安全。

### Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 72088101, 71991480, and 71991485).

### 参考文献:

- 安琪. 2020. 后疫情时期全球能源发展趋势展望——国际能源署《世界能源展望 2020》评述及对我国启示[J]. 中国经贸导刊, (21): 57-60.
- 陈九霖. 2022. 左右逢源的印度[J]. 中国经济周刊, (13): 106-109.
- 陈沫. 2021. 国际石油市场变化与中沙能源合作[J]. 国际石油经济, 29(2): 92-98.
- 陈卫东. 2022. 欧盟石油禁令冲击能源市场[J]. 中国石油和化工产业观察, (6): 70-71.
- 曹志宏. 2022. 俄乌冲突对国际能源格局的影响及中国的应对[J]. 商业经济, (9): 93-95, 126.
- 李宝驹. 2019. 我国和“一带一路”国家石油贸易网络特征及博弈机制研究[D]. 青岛: 青岛理工大学.
- 李富兵, 申雪, 李龙飞, 李耕宇. 2022. 俄乌冲突对中俄油气合作的影响[J]. 中国矿业, 31(8): 8-15.
- 李鹏. 2017. 中国与中亚国家能源合作问题研究——基于合作意愿差异化视角的分析[J]. 经济问题探索, (2): 128-135.

张抗, 王锋, 张立勤. 2022. 21 世纪初期世界石油格局变化及启示[J]. 世界石油工业, 29(3): 14-26.

## References:

- ALKHAMMASH E H, KAMEL A F, AL-FATTAH S, ELSHEWEY A M. 2022. Optimized multivariate adaptive regression splines for predicting crude oil demand in Saudi Arabia[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2022: 8412895.
- AN Qi. 2020. Prospects for global energy development trends in the post epidemic period--Comments on the world energy outlook 2020 of the International Energy Agency and its enlightenment to China[J]. *China Economic and Trade Herald*, (21): 57-60(in Chinese).
- CHEN Jiu-lin. 2022. India with both sides of the coin[J]. *China Economic Weekly*, (13): 106-109(in Chinese).
- CHEN Mo. 2021. Changes of international oil market and Sino-Saudi Arabia energy cooperation[J]. *International Petroleum Economics*, 29(2): 92-98(in Chinese with English abstract).
- CHEN Wei-dong. 2022. EU oil ban impacts energy market[J]. *China Petrochemical Industry Observer*, (6): 70-71(in Chinese).
- CAO Zhi-hong. 2022. The impact of Russia Ukraine conflict on the international energy pattern and China's response[J]. *Business and Economy*, (9): 93-95, 126(in Chinese).
- GAO Jie, LIANG Wei. 2018. The influencing factors of oil trade between China and Russia[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 382(5): 052054.
- GONG Xu, SUN Yi, DU Zhi-li. 2022. Geopolitical risk and China's oil security[J]. *Energy Policy*, 163: 112856.
- LI Bao-ju. 2019. Study on characteristics and game mechanism of petroleum trade network between China and "Belt and Road" countries[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology(in Chinese with English abstract).
- LI Fu-bing, SHEN Xue, LI Long-fei, LI Geng-yu. 2022. The influence of Russia-Ukraine conflict on China-Russian oil&gas cooperation[J]. *China Mining Magazine*, 31(8): 8-15(in Chinese with English abstract).
- LI Peng. 2017. Research on energy cooperation between China and Central Asian countries--Analysis based on the perspective of cooperation willingness differentiation[J]. *Inquiry into Economic Issues*, (2): 128-135(in Chinese).
- SAIYMOVA M, BAIKADAMOV N, TYURINA Y, KUTSURI G, SANGINOVA L, TROYANSKAYA M. 2021. Russia's petroleum industry in the period of sanctions and COVID-19 pandemic: A review and analysis[J]. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 11(5): 483-489.
- Trade Statistics Branch, United Nations Statistics Division. 2022. UN Comtrade Database[EB/OL]. [2022-10-12]. <https://comtrade.un.org/data/>.
- WEI Na, XIE Wen-jie, ZHOU Wei-xing. 2022. Robustness of the international oil trade network under targeted attacks to economics[J]. *Energy*, 251: 123939.
- ZHANG Kang, WANG Feng, ZHANG Li-qin. 2022. Changes and enlightenment of the world petroleum in the early 21st century[J]. *World Petroleum Industry*, 29(3): 14-26(in Chinese with English abstract).