

# 国际原油期货市场与中国原油市场的波动溢出研究

卞晓雯

南京理工大学经济管理学院, 江苏 南京

收稿日期: 2024年9月26日; 录用日期: 2024年10月15日; 发布日期: 2024年11月28日

## 摘要

研究国际原油期货与中国原油市场之间的关联具有重要意义, 本文聚焦于其间的波动溢出效应。本文采用时间序列数据建模的方法, 选取WTI和BRENT表征国际原油期货市场, INE原油期货表征中国原油市场, 对数据进行预处理后采用VAR-BEKK/DCC-GARCH模型验证波动溢出效应, 并采用DY、BK溢出指数分别进行时域和频域的研究, 最后采用大庆原油现货和胜利原油现货替代INE的SC作稳健性检验。本文的研究结果表明, 国际原油期货市场与中国原油市场之间存在波动溢出效应, 且中国原油市场为风险净接收方。

## 关键词

波动溢出, VAR-BEKK/DCC-GARCH, DY溢出指数, BK溢出指数

# Volatility Spillovers between the International Crude Oil Futures Market and the Chinese Crude Oil Market

Xiaowen Bian

School of Economics and Management, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu

Received: Sep. 26<sup>th</sup>, 2024; accepted: Oct. 15<sup>th</sup>, 2024; published: Nov. 28<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

It is of great significance to study the association between international crude oil futures and China's crude oil market, and this paper focuses on the volatility spillover effect between them. This paper adopts the method of time series data modeling, selecting WTI and BRENT to characterize the

international crude oil futures market and INE crude oil futures to characterize the Chinese crude oil market, and adopting the VAR-BEKK/DCC-GARCH model to validate the volatility spillover effect after preprocessing the data. In this paper, DY and BK spillover indices are used to study in time and frequency domains respectively, and finally, Daqing crude oil spot and Shengli crude oil spot are used to replace the SC of INE for robustness test. The results of this paper show that there is a volatility spillover effect between the international crude oil futures market and the Chinese crude oil market, and the Chinese crude oil market is a net risk receiver.

## Keywords

Volatility Spillover, VAR-BEKK/DCC-GARCH, DY Spillover Index, BK Spillover Index

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

能源作为一种基础性资源，不仅与人们生活密切相关，而且直接关系到整个国民经济能否健康平稳发展。随着社会的不断发展，能源问题日益严峻，能源安全问题受到了全世界人民的广泛关注。煤炭、原油和天然气是中国进口的三种主要能源，其中原油和天然气进口量逐年增加。原油，被誉为“黑色黄金”，是当今世界公认的经济支柱之一，它具有不可替代的地位。由于中国原油市场开放时间较短，相关的法律体系还不健全，所以中国一直面临着巨大的能源压力。因此，如何通过有效的方式规避风险并合理利用有限的能源供应促进经济健康可持续发展，显得尤为重要。能源期货的出现为解决这一矛盾提供了新思路。

长期以来，国际原油定价权由纽约西得克萨斯中质原油期货(WTI)和伦敦布伦特原油期货(BRENT)主导。而 2018 年 3 月 26 日上海原油期货正式挂牌上市，这是中国在全球能源领域争取话语权的重要举措。我国上海原油期货市场发展进步，现已成为全球第三大原油期货市场。

国际原油期货市场作为一种特殊商品的交易平台，其波动不仅具有一般商品价格变化的共性，而且具有自身独有的特点。分析国际能源市场和中国原油之间的波动溢出情况，可以更深入了解其风险传导的趋势和幅度，以期更好地为我国期货市场、金融市场提供服务。

## 2. 文献综述

能源期货市场因其交易成本低的优势，成为能源市场的重要组成部分，与现货市场相比，能更真实地反映相关信息，兼具有市场效率。能源期货主要包括原油、燃料油和天然气等期货品种，其中又以原油期货最为典型。原油期货素有大宗商品之王的美称，其为针对远期原油价格推出的期货品种，参与者颇多。随着我国石油资源勘探开发的不断发展，以及国内石油需求结构的改变，原油期货作为一种新型的期货交易将得到进一步推广。目前，国际上已先后有 10 多个国家或地区建立起各自的原油期货制度。在中国原油期货合约上市之前，世界上已有 12 个交易所推出原油期货合约，其中美国西德克萨斯中间基原油(WTI)和布伦特原油期货(BRENT)是两大主要品种。

较早研究原油期货市场之间溢出关系的学者有 Lin 和 Tamvakis (2001) [1]，他们研究发现伦敦原油期货市场和纽约原油期货市场之间存在显著的价格双向溢出效应。Thömmes (2013) [2]发现 Brent 原油期货与欧洲石化现货之间存在双向收益率溢出效应。Yang and Zhou (2020) [3]采用多元 VECM-MGARCH 模

型对 INE、Brent、WTI、Oman 收益与波动率之间的关系进行探索,发现上海原油期货市场价格已经取代 Oman 原油期货市场价格,与 Brent 及 WTI 原油期货市场价格之间存在更为紧密的关系,表现出更为显著的双向溢出影响。Liu 等(2021) [4]也通过 Markov 转换机制研究了中国原油期货的动态特征。

此外,学者们还关注了原油期货与现货市场之间的联系。Silvappulle 和 Moosa (1999) [5]通过 DS 模型发现 WTI 原油的期、现货价格间存在相互影响,但期货对现货的影响更为显著。Miroslava (2020) [6]则研究了布伦特原油现货与期货价格在四个重大经济危机期间的波动模式,结果表明在金融危机期间其波动率更高。

在国内,越来越多的文献开始探讨国际原油期货和中国能源市场的关系。李英良(2021) [7]指出我国 PTA 期货市场处于风险净接受方,被动接受国际原油价格波动的风险溢出。田洪志等(2020) [8]则使用多变量单方向因果测度统计分析方法,发现 INE 价格在短期内未受到 Brent 与 WTI 原油期货价格的因果影响,但在中短期内 INE 对 WTI 与 Brent 产生了显著的影响。王良等(2021) [9]构建了关于 WTI、Brent 和 INE 的三元 BEKK-MGARCH 模型,研究发现三者之间存在显著的双向波动溢出效应,其中 INE 对 WTI 和 Brent 的溢出效应更为显著且持续时间较长。

然而,尽管这些研究在揭示原油期货市场价格间的溢出关系方面取得了重要进展,但仍存在一些不足。首先,目前的研究主要聚焦于 WTI、BRENT 和中国的 INE 等主流原油期货品种,对其他品种和地区市场的关注较少[10]。其次,在研究方法上,虽然 GARCH 模型[11]和波动溢出指数[12]等方法被广泛应用,但多元 GARCH 模型在刻画金融市场间的尾部相依结构特征方面存在局限[13]。此外,现有研究多采用日次或周次数据,对高频数据的利用不足[14]。

为了进一步完善该领域的研究,未来可以从以下几个方面进行拓展:一是加强对其他原油期货品种和地区市场的关注,以更全面地揭示全球原油期货市场的溢出关系[15];二是探索新的研究方法和技术手段,以更准确地刻画金融市场间的尾部相依结构特征和溢出效应[16];三是充分利用高频数据进行研究,更深入地揭示市场间的动态关系和短期波动特征。同时,也可以借鉴 DY (2012) [17]和 BK (2018) [18]溢出指数等先进方法,从波动溢出强度和方向上更全面地分析碳市场和各金融市场的关系,为能源市场的稳定和可持续发展提供有力支持。

### 3. 理论分析与模型构建

根据价格发现理论,区域原油期货市场价格之间的关联及彼此的信息溢出效应通过各个市场对于消息反应的套利与投机行为而实现,因此我国原油期货市场价格融入国际原油期货市场的程度越高,上海原油期货与其他国际原油期货品种之间的价格走势会逐渐趋同。根据信息溢出理论,由于全球经济一体化的影响,各个区域市场的投资主体在获取与分析信息的时候,会参考其他市场的价格信息。我国原油期货市场价格会受到其他成熟原油期货价格的显著影响,其价格风险会传导至我国原油期货市场价格。此外,虽然我国原油期货市场价格的有效性与其他成熟的原油期货市场价格相比水平较低,但我国原油期货市场价格对于成熟的原油期货市场价格的风险溢出影响会逐渐增加。

针对国际原油期货和中国原油市场的波动性溢出效应研究,本文引入了多元广义自回归条件异方差(GARCH)模型。在多元 GARCH 模型所示方程设定中,通过对多个金融市场之间的波动溢出效应进行分析,可以得到残差向量、方差以及协方差矩阵等关键内容,从而能够更准确地描述金融市场间的关系,并根据预测参数结果来判断市场是否存在波动溢出效应,并依此为投资者提供参考。

#### 3.1. VAR-BEKK-GARCH 模型

BEKK-GARCH 模型是多元广义自回归条件异方差模型之一,它能保证协方差矩阵在弱条件下的恒定性并显著降低了模型中所需估计参数的数量。BEKK 模型的均值方程设定如下:

$$R_t = C_t + A_1 Y_{t-1} + A_2 Y_{t-2} + \varepsilon_t \quad (1)$$

(1) 中的  $R_t$  为一个 3x1 维向量序列，其代表国际能源期货市场与中国股市在  $t$  时刻的收益率， $\varepsilon_t$  代表以上两金融市场在  $t$  时刻受到的市场冲击。三元 BEKK-GARCH (1, 1)模型的方差方程设定如下：

$$\begin{aligned}
 H_t &= CC' + A' \varepsilon_{t-1} \varepsilon_{t-1}' A + B' H_{t-1} B \\
 &= \begin{pmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix}' + \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{pmatrix}' \begin{pmatrix} \varepsilon_{1,t-1} \\ \varepsilon_{2,t-1} \\ \varepsilon_{3,t-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{1,t-1} \\ \varepsilon_{2,t-1} \\ \varepsilon_{3,t-1} \end{pmatrix}' \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{pmatrix} \\
 &+ \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \beta_{23} \\ \beta_{31} & \beta_{32} & \beta_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_{11,t-1} & h_{12,t-1} & h_{13,t-1} \\ h_{21,t-1} & h_{22,t-1} & h_{23,t-1} \\ h_{31,t-1} & h_{32,t-1} & h_{33,t-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \beta_{23} \\ \beta_{31} & \beta_{32} & \beta_{33} \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} h_{11,t} & h_{12,t} & h_{13,t} \\ h_{21,t} & h_{22,t} & h_{23,t} \\ h_{31,t} & h_{32,t} & h_{33,t} \end{pmatrix}
 \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $H_t$  为正则三维对称矩阵，其表示一阶协方差矩阵和条件残差随时间  $t$  的变化。矩阵  $C$  是常量上三角形矩阵。 $A$ 、 $B$  矩阵中的元素信息是探究两市场间是否存在波动溢出的关键。 $A$  中的  $\alpha_{11}$ 、 $\alpha_{22}$ 、 $\alpha_{33}$  分别表征国际能源期货市场和中國原油市场自身波动的 ARCH 效应， $B$  中的  $\beta_{11}$ 、 $\beta_{22}$ 、 $\beta_{33}$  分别表征国际能源市场和中國股市自身波动的 GARCH 效应。矩阵  $A$  和矩阵  $B$  的元素刻画了市场间波动溢出效应。矩阵  $A$  中的元素分别表示国际能源期货市场与中國股市冲击传导作用的强弱，即其中一个市场受到另一个市场的波动影响程度。矩阵  $B$  中的元素分别表示了这两个市场间波动传导效应的强弱，也体现了—个市场对另一个市场波动溢出效应的持续性。

对任何两个金融市场而言，在其它参与主体不存在显著规约的情况下，当期市场的波动只受到其自身前—期 ARCH 项及 GARCH 项所制约，具体的假设表达如下：

假设 1:  $H_0: \alpha_{ij} = \beta_{ij} = 0$ ，即不存在  $i$  市场对  $j$  市场的波动溢出效应；

假设 2:  $H_0: \alpha_{ij} = \beta_{ij} = 0; \alpha_{ji} = \beta_{ji} = 0$ ，即两个市场之间不具有双向波动溢出效应。

### 3.2. DCC-GJR-GARCH 模型

对于序列间动态关联性的研究，针对序列残差项建立 DCC-GARCH 模型，DCC-GJR-GARCH 模型的协方差矩阵表示为：

$$H_t = D_t R_t D_t = (\rho_{ij} \sqrt{h_{ii,t} h_{jj,t}}) \quad (3)$$

$$D_t = \text{diag}(\sqrt{h_{11,t}}, \dots, \sqrt{h_{NN,t}}) \quad (4)$$

$R_t$  是动态条件相关矩阵， $\rho_{ij}$  是两个变量的动态相关系数。

$$\rho_{ij,t} = \frac{E_{t-1}(r_{i,t} r_{j,t})}{\sqrt{E_{t-1}(r_{i,t}^2) E_{t-1}(r_{j,t}^2)}} \quad (5)$$

其中

$$R_t = (1 - \alpha - \beta) R + \alpha (\varepsilon_{i,t-1} \varepsilon_{j,t-1}) + \beta (R_{t-1}) \quad (6)$$

条件方差溢出效应模型如下：

$$h_{i,t} = \omega_i + \alpha_i \varepsilon_{i,t-1}^2 + \gamma_i D_{t-1} \varepsilon_{i,t-1}^2 + \beta_j h_{j,t-1} \quad (7)$$

### 3.3. 溢出测度模型

#### 3.3.1. 时域分析——DY

$$X_t = \sum_{i=1}^N Y_i X_{t-i} + \varepsilon_t \quad (8)$$

在此基础上，将 VAR 模型转化成多变量滑动平均模型：

$$X_t = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \varepsilon_{t-i} \quad (9)$$

H 步预测误差方程中来自  $X_j$  的部分  $\mathcal{G}_{ij}^g(H)$ ，表示为：

$$\mathcal{G}_{ij}^g(H) = \frac{\sigma_{ij}^{-1} \sum_{h=0}^{H-1} (e_i' A_h \Omega e_j)^2}{\sum_{h=0}^{H-1} (e_j' A_h \Omega A_h' e_i)} \quad (10)$$

$$\tilde{\mathcal{G}}_{ij}^g(H) = \frac{\mathcal{G}_{ij}^g(H)}{\sum_{j=1}^N \mathcal{G}_{ij}^g(H)} \quad (11)$$

式中：

$$\sum_{j=1}^N \tilde{\mathcal{G}}_{ij}^g(H) = 1 : \sum_{i,j=1}^N \tilde{\mathcal{G}}_{ij}^g(H) = N。$$

用总溢出指数来度量整体的风险联动程度：

$$TSI(H) = \frac{\sum_{i,j=1,i \neq j}^N \tilde{\mathcal{G}}_{ij}^g(H)}{\sum_{i,j=1}^N \tilde{\mathcal{G}}_{ij}^g(H)} \times 100 = \frac{\sum_{i,j=1,i \neq j}^N \tilde{\mathcal{G}}_{ij}^g(H)}{N} \times 100 \quad (12)$$

用方向溢出指数来度量某个市场与其余所有市场之间的溢出程度：

$$DSI_{j \leftarrow i}(H) = \frac{\sum_{j=1,i \neq j}^N \tilde{\mathcal{G}}_{ji}^g(H)}{\sum_{i,j=1}^N \tilde{\mathcal{G}}_{ji}^g(H)} \times 100 \quad (13)$$

$$DSI_{i \leftarrow j}(H) = \frac{\sum_{j=1,i \neq j}^N \tilde{\mathcal{G}}_{ij}^g(H)}{\sum_{i,j=1}^N \tilde{\mathcal{G}}_{ij}^g(H)} \times 100$$

用净溢出指数来度量单个市场对于其他市场的净溢出：

$$NSI_{ij}(H) = \left( \frac{\sum_{j=1,i \neq j}^N \mathcal{G}_{ji}^g(H)}{\sum_{i,j=1}^N \tilde{\mathcal{G}}_{ji}^g(H)} - \frac{\sum_{j=1,i \neq j}^N \mathcal{G}_{ij}^g(H)}{\sum_{i,j=1}^N \tilde{\mathcal{G}}_{ij}^g(H)} \right) \times 100 \quad (14)$$

净配对溢出指数用来衡量单个市场之间波动溢出效应：

$$S_{ij}^g(H) = \left( \frac{\mathcal{G}_{ji}^g(H)}{\sum_{i,k=1}^N \tilde{\mathcal{G}}_{ik}^g(H)} - \frac{\mathcal{G}_{ij}^g(H)}{\sum_{j,k=1}^N \tilde{\mathcal{G}}_{jk}^g(H)} \right) \times 100 = \frac{\tilde{\mathcal{G}}_{ji}^g(H) - \tilde{\mathcal{G}}_{ij}^g(H)}{N} \times 100 \quad (15)$$

#### 3.3.2. 频域分析——BK

广义因果谱可以定义为：

$$f_{j,k}(\omega) \equiv \frac{\sigma_{kk}^{-1} \left| \left( \psi(e^{-i\omega}) \Sigma \right)_{j,k} \right|^2}{\left( \psi(e^{-i\omega}) \Sigma \psi'(e^{i\omega}) \right)_{j,j}} \quad (16)$$

进一步引入  $j$  方差的频率份额作为权重函数:

$$\Gamma_j(\omega) = \frac{\psi_{j,j}(e^{-i\omega})\Sigma\psi'(e^{i\omega})}{\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}(\psi(e^{-i\lambda})\Sigma\psi'(e^{i\lambda}))_{j,j}d\lambda} \quad (17)$$

$\Gamma_j(\omega)$  表示在给定频率上  $j$  的功率。那么, 在频率带  $d$  上的广义方差分解为:

$$\theta_d^{j,k} = \frac{1}{2\pi}\int_d\Gamma_j(\omega)f_{j,k}(\omega)d\omega \quad (18)$$

式中:  $d=(a,b)$ ;  $a,b\in(-\pi,\pi)$ ,  $a < b$ : 而且

$$\theta_\infty^{j,k} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}\Gamma_j(\omega)f_{j,k}(\omega)d\omega \quad (19)$$

等于时域下  $H$  趋近于无穷时的  $\theta_H^{j,k}$ 。 $\theta_d^{j,k}$  可进一步标准化为:

$$(\tilde{\theta}_d)_{j,k} = \frac{(\theta_d)_{j,k}}{\sum_k(\theta_\infty)_{j,k}}(\tilde{\theta}_\infty)_{j,k} \quad (20)$$

在频率带  $d$  上的总溢出指数  $C^d$ 、方向性溢出指数  $C_{j^*}^d$  和  $C_{*j}^d$ 、净溢出指数  $C_{j,net}^H$ 、净配对溢出指数  $C_{jk}^H$  分别为

$$\begin{aligned} C^d &= \frac{\sum_{k,j=1;k\neq j}^N(\tilde{\theta}_d)_{j,k}}{N}\times 100 \\ C_{j^*}^d &= \sum_{k=1;k\neq j}^N(\tilde{\theta}_d)_{j,k}\times 100 \\ C_{*j}^d &= \sum_{k=1;k\neq j}^N(\tilde{\theta}_d)_{k,j}\times 100 \\ C_{j,net}^d &= C_{*j}^d - C_{j^*}^d \\ C_{jk}^d &= \left((\tilde{\theta}_d)_{k,j} - (\tilde{\theta}_d)_{j,k}\right)\times 100 \end{aligned} \quad (21)$$

## 4. 实证研究

### 4.1. 数据来源及处理

为研究国际原油期货市场与中国原油市场之间的风险溢出, 本文选取 WTI、BRENT 这 2 种主要原油期货表征国际原油期货市场, SC 表征中国原油市场。WTI 数据来源于美国能源信息署(www.eia.gov), BRNET 和 SC 数据来源于 Choice 金融终端, 收盘价数据区间为 2018 年 3 月 26 日至 2023 年 6 月 30 日, 因为 SC 发行时间较短, 故对缺失值取上一交易日收盘价。为了满足建模对数据平稳性的要求, 将原始序列作如下转换:

$$L\_X_t = 100 \times LN(X_t/X_{t-1}) \quad (22)$$

表 1 为转换后数据的描述性统计。

Table 1. Descriptive statistics of daily return data

表 1. 日收益率数据描述性统计

Variables	Observations	Mean	Standard Deviation	Min	Max
SC	1278	0.0187	0.0695	-14.8319	10.1111
WTI	1278	0.0001	0.0010	-0.4808	0.4507
BRENT	1278	0.0052	0.0823	-27.9761	27.6528

SC、WTI、BRENT 序列均通过单位根检验。从图 1 中可以明显看出，三组收益率序列均围绕均值上下波动，在一定时间范围内波动较大，具有明显的波动聚集性。原油期货收益率在 2020 年上半年附近波动剧烈，其他时间段波动相对平缓。另外，从波动的聚集性看，国际原油期货市场与中国原油期货市场之间具有显著的正相关性。因此，可以认为其在风险方面有较强的互补性，并且两者间可能存在着双向引导关系。

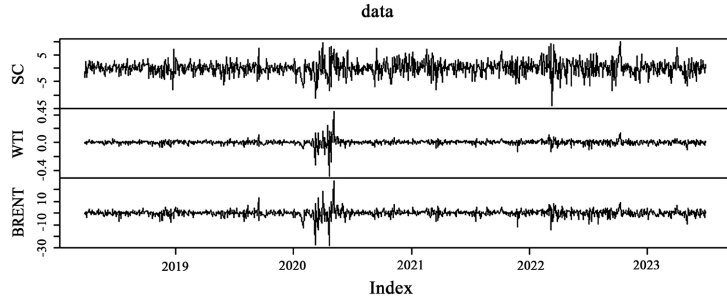


Figure 1. Yield timing chart  
图 1. 收益率时序图

#### 4.2. VAR-BEKK/DCC-GARCH (1, 1)模型

据 AIC 信息准则，确定滞后阶数为 3 阶。测试系统稳定性，构建残差累计和如图 2，这里使用“OLS-CUSUM”，它给出的是残差累积和，在该检验生成的曲线图中，累积和没有超出两条临界线，说明参数具有稳定性。

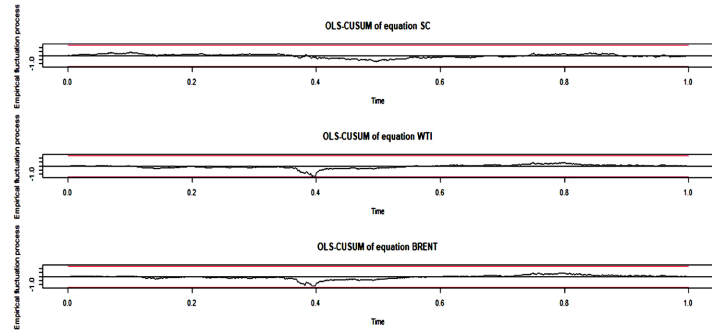
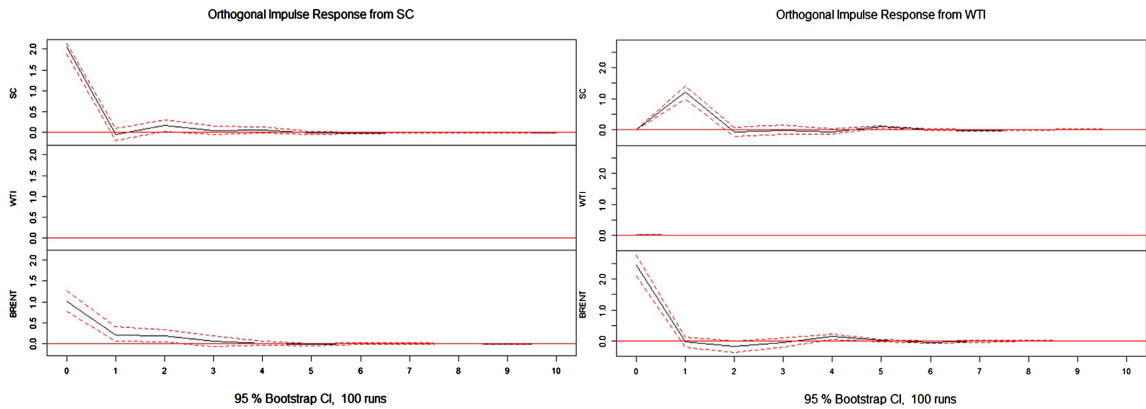
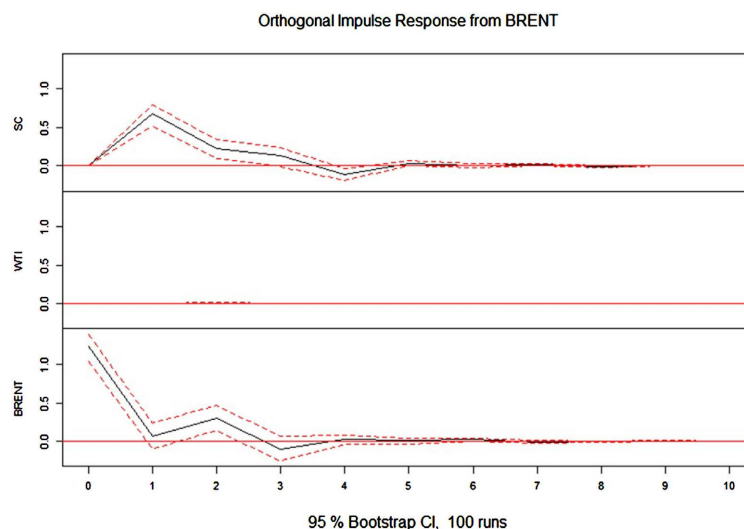


Figure 2. Graph of the cumulative sum of crude oil futures residuals  
图 2. 三大原油期货残差累积和图





**Figure 3.** Diagram of the impulse response function of the three major crude oil futures  
**图 3.** 三大原油期货脉冲响应函数图

图 3 是 SC、WTI、BRENT 对各个变量的脉冲响应，其中可以看出来自 SC、BRNET 的正向冲击不断减小，其余变量的冲击较小。

对波动溢出效应的检验，一般采用 BEKK-GARCH (1, 1)模型，以下是 Winrats 软件对波动溢出效应回归结果。

**Table 2.** Parameter estimation results of multivariate BEKK-GARCH (1, 1) model

**表 2.** 多元 BEKK-GARCH (1, 1)模型参数估计结果

元素	估计系数	t 统计量
A (1, 2)	0.0026***	3.3524
A (1, 3)	0.2718***	3.9468
A (2, 1)	-21.2915***	-2.7642
A (2, 3)	-30.9997***	-3.6759
A (3, 1)	0.0154	0.2246
A (3, 2)	0.0014	1.3972
B (1, 2)	-0.0038***	-6.9521
B (1, 3)	-0.3632***	-7.6034
B (2, 1)	15.0855***	2.9856
B (2, 3)	9.5515***	3.8654
B (3, 1)	0.0200	0.3133
B (3, 2)	-0.0002	-0.3609
A (1, 2)	0.0026***	3.3524
A (1, 3)	0.2718***	3.9468
A (2, 1)	-21.2915***	-2.7642
A (2, 3)	-30.9997***	-3.6759
A (3, 1)	0.0154	0.2246
A (3, 2)	0.0014	1.3972

从表 2 中可以看出 SC 和 WTI 呈现显著的双向波动溢出现象，SC 和 WTI、WTI 和 BRENT 存在单向波动溢出，而表 3 WALD 检验结果也支持了这一结论。

**Table 3.** Parameter estimation results of WALD test**表 3.** WALD 检验估计结果

条件假设	$H_0 : \alpha_{ij} = \beta_{ij} = 0$	$H_0 : \alpha_{ji} = \beta_{ji} = 0$
SC-WTI	9.2356*** (3.1854)	5.2875** (2.6388)
SC-BRENT	10.8646*** (4.5693)	5.1287 (0.5993)
WTI-BRENT	8.6592*** (9.2795)	9.4785*** (7.6359)

接着通过 DCC-GARCH (1, 1)模型研究 SC、WTI、BRENT 之间的静态相关系数和动态相关性，其参数回归结果如表 4 所示，动态相关系数如图 4 所示。

**Table 4.** Parameter estimation results of multivariate DCC-GARCH (1, 1) model**表 4.** 多元 DCC-GARCH (1, 1)模型参数估计结果

元素	估计系数	t 统计量
C1	0.1079***	4.1838
C2	0.0001***	6.0019
C3	0.2414***	6.0067
A1	0.1246***	7.3143
A2	0.1317***	4.7636
A3	0.1149***	4.2289
B1	0.8630***	5.7235
B2	0.8348***	3.3051
B3	0.8586***	3.2976
DCC(A)	0.0510***	5.2495
DCC(B)	0.9393***	4.5641

### 4.3. DY/BK 溢出指数

表 5 为各个变量间的时域静态溢出指数表。滞后阶数根据 AIC 和 SC 准则确定为 3 阶，广义方差分解的预测期选为 10 个样本区间；“TO”表示某市场对其他市场的溢出效应，“FROM”表示受其他市场风险溢出的程度，“NET”表示两者的差值，即对其他市场的净溢出程度。

**Table 5.** Static spillover index table in the time domain**表 5.** 时域静态溢出指数表

	SC	WTI	BRENT	FROM
SC	41.89	29.34	28.77	58.11
WTI	6.65	50.53	42.82	49.47
BRENT	7.49	42.54	49.97	50.03
TO	14.13	71.88	71.59	157.61
NET	43.97	22.41	21.56	78.80/52.54

从上表可以看出，SC、WTI、BRENT 均为风险净溢出方。从单一市场的角度来看，WTI 与 BRENT 之间的风险溢出效应最强(WTI-BRENT: 42.54%, BRENT-WTI: 42.82%)，从国际原油市场与国内原油市场的角度来看，SC 与 WTI 和 BRENT 的风险溢出效应强度类似。

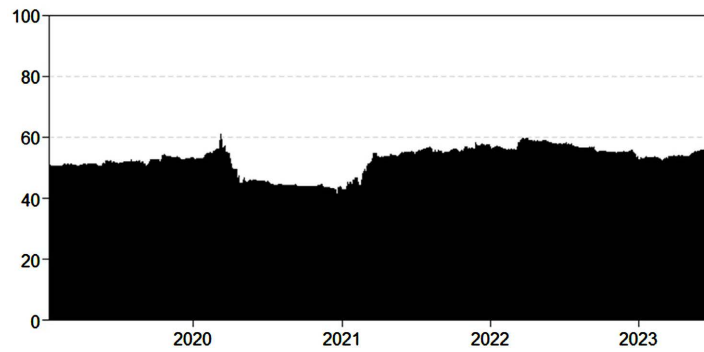


Figure 4. Total spillover effect  
图 4. 三大原油期货总溢出

图 4 可知，SC、WTI、BRNET 原油期货的总溢出效应(50%附近上下波动)较强。

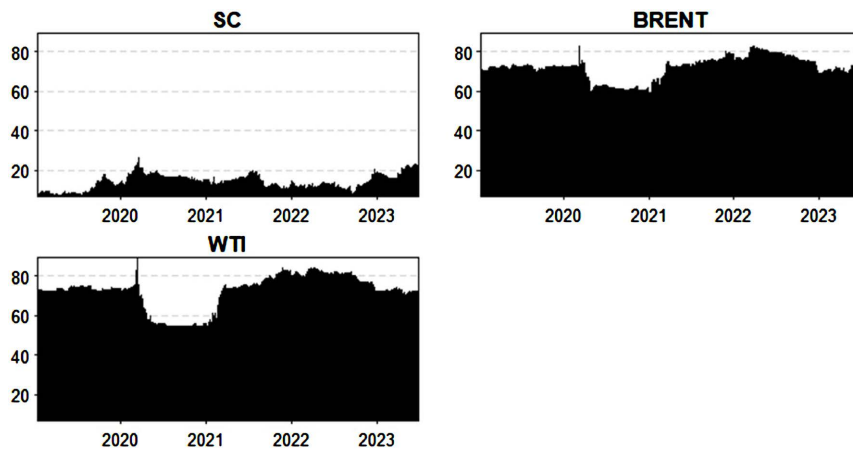


Figure 5. Directional spillover effect  
图 5. 三大原油期货方向溢出(To)

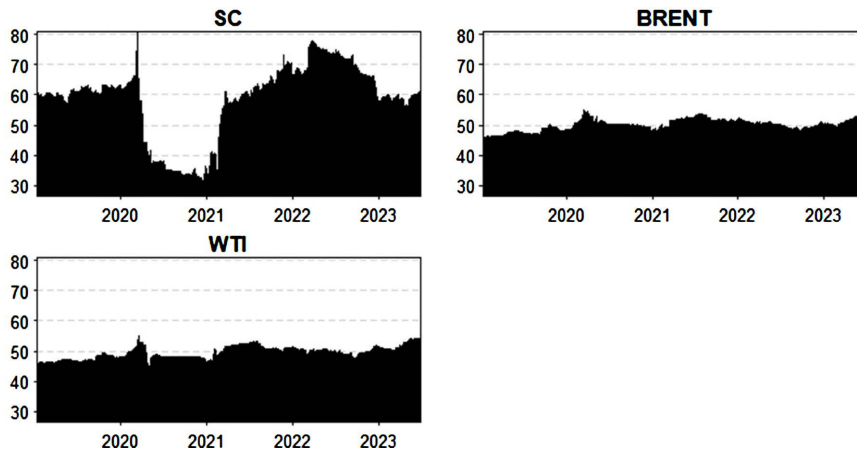


Figure 6. Directional spillover effect  
图 6. 三大原油期货方向溢出(From)

图 5 和图 6 可知，SC 对 BRENTE 和 WTI 的波动溢出强度较小，受 BRENTE 和 WTI 溢出效应的影响较大，WTI 和 BRENTE 的方向溢出类似。

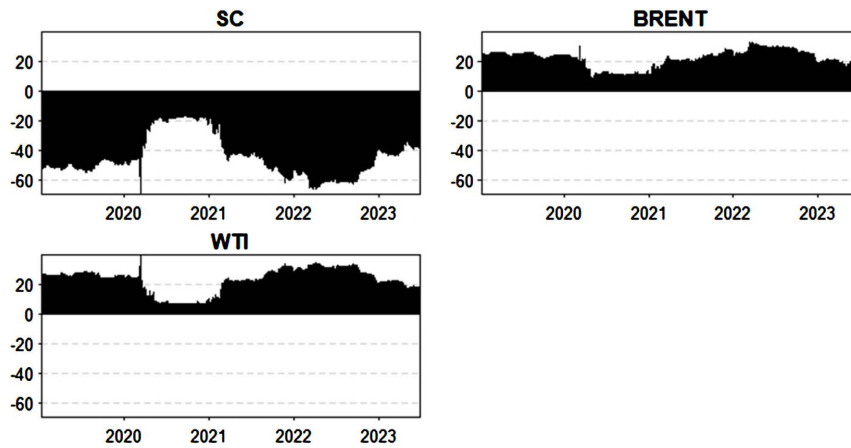


Figure 7. Net spillover effect  
图 7. 三大原油期货净溢出

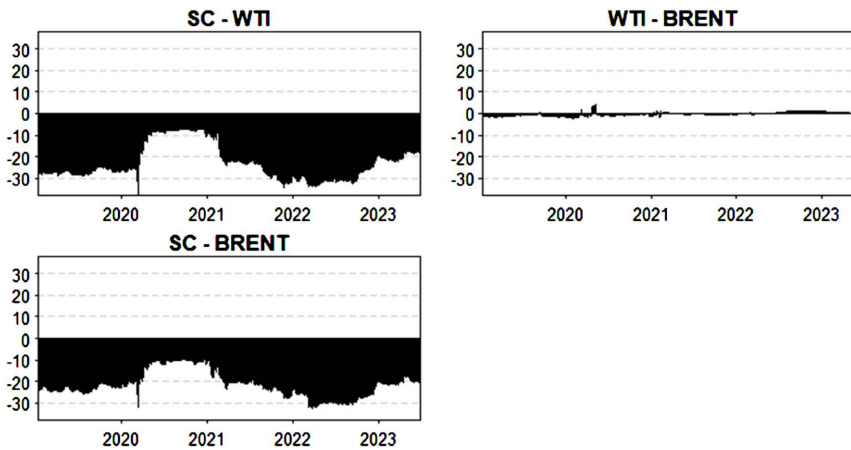


Figure 8. Spillover effect in pairs  
图 8. 三大原油期货成对溢出

图 7 可知，SC 的净溢出为负，说明其是风险溢出接收方，WTI 和 BRENTE 的净溢出均为正，说明其均为风险净溢出方，风险将会传染到其余两市场。图 8 中，SC-WTI，SC-BRENTE 的成对溢出效应较为显著，WTI-BRENTE 的成对溢出效应较弱。

借鉴已有 BK 溢出研究，本文将频域空间划分为高频  $d_1 = \left(\frac{\pi}{5}, \pi\right)$  和低频  $d_2 = \left(0, \frac{\pi}{5}\right)$ ，溢出效应如表 6 所示。

Table 6. Frequency domain spillover index table  
表 6. 频域溢出指数表

	SC	WTI	BRENTE	FROM
	面板 A (1-5)			
SC	33.23	20.75	21.12	41.87
WTI	4.01	43.02	35.33	39.33
BRENTE	4.47	33.82	42.07	38.29
TO	8.48	54.57	56.45	119.50
Net	-33.39	15.24	18.15	59.75/39.83

续表

	面板 B (5-INF)			
SC	10.15	7.33	7.41	14.75
WTI	0.96	9.23	7.46	8.42
BRENT	1.24	8.62	9.78	9.86
TO	2.20	15.95	14.87	33.03
Net	-12.55	7.53	5.01	16.52/11.01

从表 6 中可以看到，整体而言，高频比低频的溢出效应显著，无论高频还是低频，SC 的净溢出均为负，说明其为风险净接收方，这与 DY 溢出的结果相吻合。

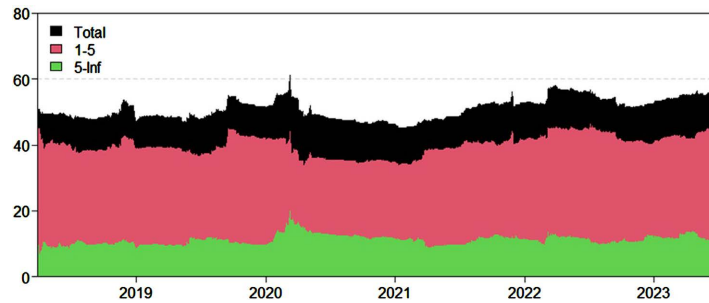


Figure 9. Total spillover effect  
图 9. 三大原油期货总溢出

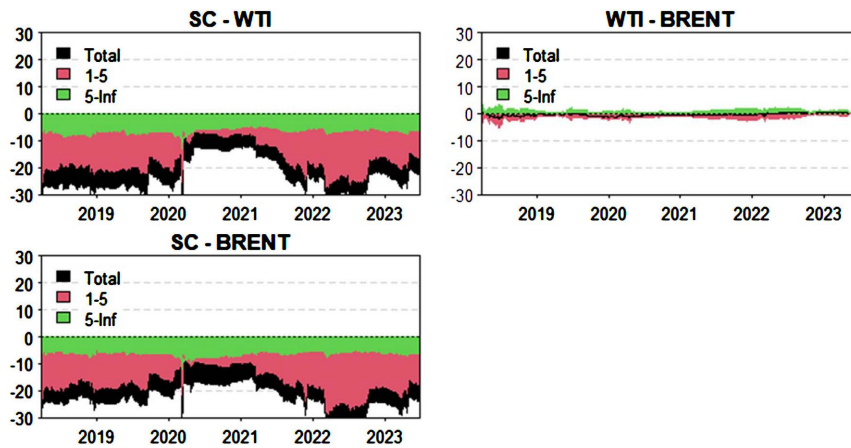


Figure 10. Total spillover effect in pairs  
图 10. 三大原油期货成对溢出

由图 9 可知，WTI、BRENT、SC 的总溢出在 50% 上下波动。图 10 可知，SC-WTI，SC-BRENT 的成对溢出效应较为显著，WTI-BRENT 的成对溢出效应较弱。

#### 4.4. 稳健性检验

稳健性检验检验条件改变时理论是否对现象仍具有稳定的解释能力，稳健性检验的方法有变量替换法，调整样本期法，分样本回归法等。故此处采用替换法，在前述实证中，均以 INE 代表中国原油市场，可以考虑用大庆原油现货(dq)和胜利原油现货(sl)来代替 SC，其时域溢出如图 11~12 所示，频域溢出如图 13~14 所示。

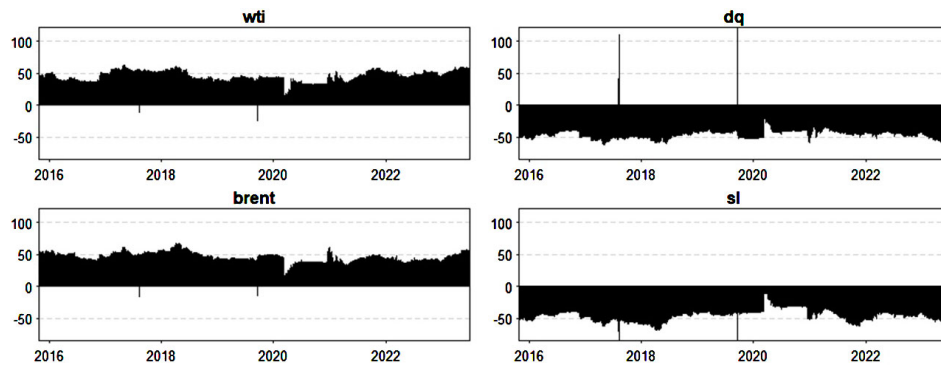


Figure 11. Net spillover effect  
图 11. 原油期货与现货的净溢出

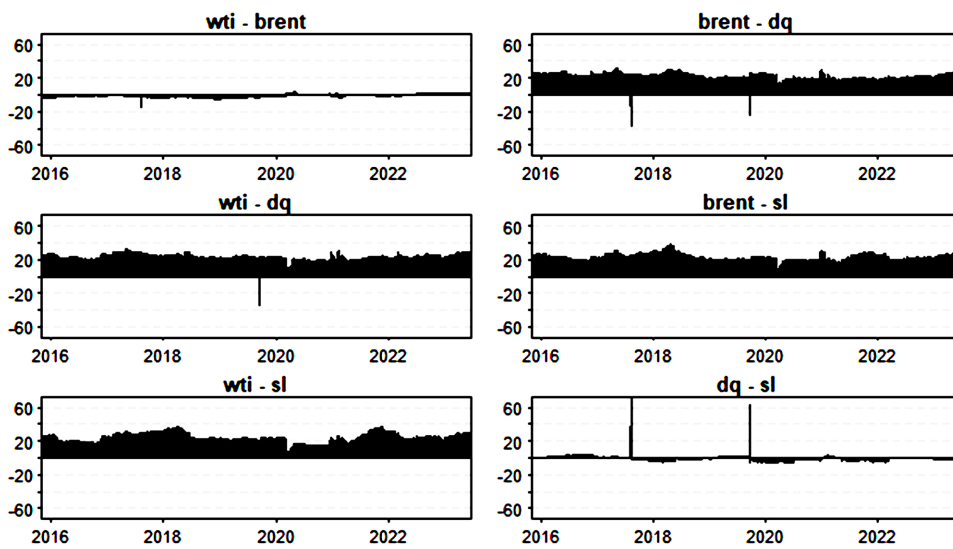


Figure 12. Spillover effect in pairs  
图 12. 原油期货与现货的成对溢出

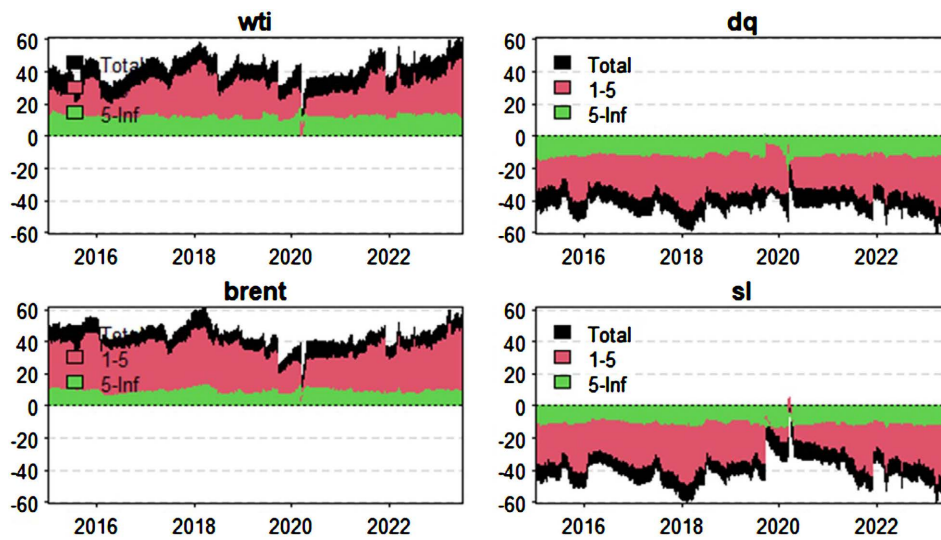


Figure 13. Net spillover effect  
图 13. 原油期货与现货的净溢出

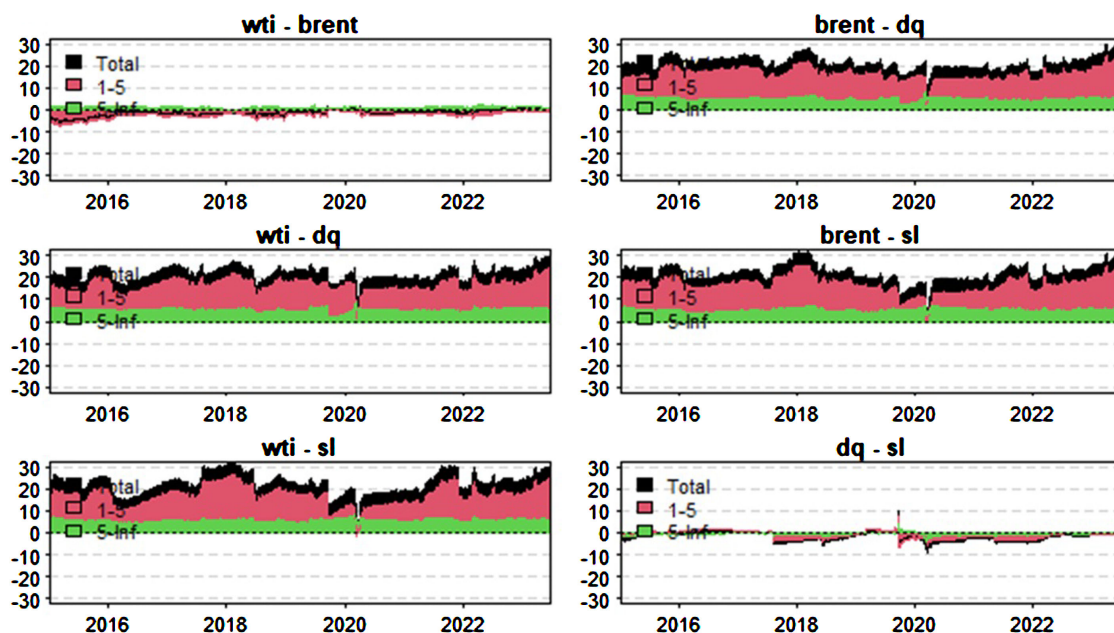


Figure 14. Spillover effect in pairs  
图 14. 原油期货与现货的成对溢出

## 5. 结论

本文通过 VAR (3)-BEKK/DCC-GARCH (1, 1)模型对 WTI 和 BRENT 这两个主要的国际原油期货与中国原油市场的波动溢出效应进行实证检验，并通过 DY 溢出指数和 BK 溢出指数进行定量分析，结果表明国际原油期货市场与中国原油市场之间确实存在波动溢出现象，具体结论如下：

(1) 在国际原油期货市场和原油市场之间存在着波动溢出效应，且国际原油期货市场和原油市场之间的波动溢出比国际原油期货市场和原油现货市场之间的波动溢出显著；

(2) 国际原油期货市场为净溢出方，高频数据比低频数据的溢出效应显著。国际原油期货市场与原油市场之间的波动溢出会随时间的变化而变化，2020 年附近的波动溢出效应稍弱，可能是疫情影响，全球原油供大于求，原油价格暴跌。

本论文在研究过程中还存在一定的局限性，对某些问题还需要进一步探讨，具体包括以下几个方面：

(1) 研究对象：本文的研究对象仅局限于 WTI、BRENT、INE 期货价格数据，在后续研究中希望可以将更多国际原油期货如阿曼原油纳入考虑范围；

(2) 研究方法：本文采用 BEKK/DCC-GARCH 模型定性研究国际能源期货市场与中国股市之间的波动溢出效应，通过 DY 和 BK 溢出指数对波动溢出效应进行测度，后续可以考虑纳入小波分辨和 MSV、Copula 模型，且对时间区间进行长期和短期的划分。

## 参考文献

- [1] Lin, S.X. and Tamvakis, M.N. (2001) Spillover Effects in Energy Futures Markets. *Energy Economics*, **23**, 43-56. [https://doi.org/10.1016/s0140-9883\(00\)00051-7](https://doi.org/10.1016/s0140-9883(00)00051-7)
- [2] Thömmes, M. and Winker, P. (2013) Multivariate Modelling of Cross-Commodity Price Relations along the Petrochemical Value Chain. In: Lausen, B., Van den Poel, D. and Ultsch, A., Eds., *Algorithms from and for Nature and Life: Classification and Data Analysis*, Springer International Publishing, 427-435. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-00035-0\\_43](https://doi.org/10.1007/978-3-319-00035-0_43)
- [3] Yang, J. and Zhou, Y. (2020) Return and Volatility Transmission between China's and International Crude Oil Futures

- Markets: A First Look. *Journal of Futures Markets*, **40**, 860-884. <https://doi.org/10.1002/fut.22103>
- [4] Liu, M. and Lee, C. (2021) Capturing the Dynamics of the China Crude Oil Futures: Markov Switching, Co-Movement, and Volatility Forecasting. *Energy Economics*, **103**, Article ID: 105622. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105622>
- [5] Silvapulle, P. and Moosa, I.A. (1999) The Relationship between Spot and Futures Prices: Evidence from the Crude Oil Market. *Journal of Futures Markets*, **19**, 175-193. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9934\(199904\)19:2<175::aid-fut3>3.3.co;2-8](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9934(199904)19:2<175::aid-fut3>3.3.co;2-8)
- [6] Miroslava, J. (2020) Volatility Patterns of Brent Crude Oil Spot and Futures Prices during Major Economic Crises. *Journal of Energy Economics*, **45**, 123-145.
- [7] 李英良. 国内外原油期货市场的动态相关性研究——基于 DCC-GARCH 模型[J]. 中国商论, 2021(7): 19-23.
- [8] 田洪志, 姚峰, 李慧. 中国是否拥有原油的国际定价权?——基于油价间独立性与传导性视角[J]. 中国管理科学, 2020, 28(11): 90-99.
- [9] 王良, 李璧肖, 马续涛, 郑炜. 中国原油期货与国际原油期货的价格波动溢出效应及其持续性——基于 BEKK-MGARCH 模型的研究[J]. 系统工程, 2021, 39(3): 102-120.
- [10] Zavadská, M., Morales, L. and Coughlan, J. (2020) Brent Crude Oil Prices Volatility during Major Crises. *Finance Research Letters*, **32**, Article ID: 101078. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2018.12.026>
- [11] McAleer, M. and da Veiga, B. (2008) Forecasting Value-at-Risk with a Parsimonious Portfolio Spillover GARCH (PS-GARCH) Model. *Journal of Forecasting*, **27**, 1-19. <https://doi.org/10.1002/for.1049>
- [12] Wang, Y. and Guo, Z. (2018) The Dynamic Spillover between Carbon and Energy Markets: New Evidence. *Energy*, **149**, 24-33. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.145>
- [13] Antonakakis, N., Chatziantoniou, I. and Gabauer, D. (2020) The Impact of Euro through Time: Exchange Rate Dynamics under Different Regimes. *International Journal of Finance & Economics*, **26**, 1375-1408. <https://doi.org/10.1002/ijfe.1854>
- [14] Tan, X., Geng, Y., Vivian, A. and Wang, X. (2021) Measuring Risk Spillovers between Oil and Clean Energy Stocks: Evidence from a Systematic Framework. *Resources Policy*, **74**, Article ID: 102406. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102406>
- [15] Nasreen, S., Tiwari, A.K., Eizaguirre, J.C. and Wohar, M.E. (2020) Dynamic Connectedness between Oil Prices and Stock Returns of Clean Energy and Technology Companies. *Journal of Cleaner Production*, **260**, Article ID: 121015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121015>
- [16] Janda, K., Kristoufek, L. and Zhang, B. (2022) Return and Volatility Spillovers between Chinese and U.S. Clean Energy Related Stocks. *Energy Economics*, **108**, Article ID: 105911. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105911>
- [17] Diebold, F.X. and Yilmaz, K. (2012) Better to Give than to Receive: Predictive Directional Measurement of Volatility Spillovers. *International Journal of Forecasting*, **28**, 57-66. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2011.02.006>
- [18] Baruník, J. and Křehlík, T. (2018) Measuring the Frequency Dynamics of Financial Connectedness and Systemic Risk. *Journal of Financial Econometrics*, **16**, 271-296. <https://doi.org/10.1093/jjfinec/nby001>