

# 中国碳市场、能源股票市场和原油市场的多重分形分析

王宏勇,冯佑帅

(南京财经大学应用数学学院,江苏南京210023)

**摘要:** 随着中国碳排放权市场的建立和发展,碳市场的波动特征及其与其他金融市场之间的相互关系受到了广泛关注。以深圳碳排放权、沪深300能源指数和大庆原油的收益率序列为样本数据,运用多重分形分析法研究我国碳排放权市场、能源股票市场和原油市场波动的动力学特征、市场风险大小以及交互相关关系。实证研究表明,三个市场的波动均存在明显的多重分形特征,且碳市场的多重分形性强度大于能源股票市场和原油市场的多重分形性强度,意味着碳市场的风险大于后两个市场的风险。此外,证实了三个市场之间的交互相关性在不同时间标度下呈现出不同的多重分形特征。研究还发现,能源股票市场与原油市场的相关性最强,而碳市场与其他两个市场之间的相关性较弱。

**关键词:** 碳排放权市场;能源股票市场;原油市场;交互相关性;多重分形分析

**中图分类号:** F224.9; F830.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-6049(2020)02-0049-11

## 一、引言与文献综述

全球温室气体排放导致的气候变化已引起国际社会的高度关注。在各种温室气体中,二氧化碳排放的影响占整个大气变暖的50%以上。因此,控制二氧化碳排放已成为缓解全球变暖的关键途径。1997年12月,《联合国气候变化框架公约》缔约方在日本京都通过了《京都议定书》,旨在限制发达国家温室气体排放量。2005年1月1日,碳排放权交易在欧洲气候交易所正式启动。自此,碳排放权交易不仅通过市场手段促进节能减排,而且其本身具有金融资产属性。

中国是以煤炭为主要消费能源的发展中国家,2017年煤炭消费量占整个能源消费结构的61.83%,持续快速的经济增长使中国成为自2009年以来世界上最大的二氧化碳排放国<sup>[1]</sup>。为了实现减排,同时与国际碳排放交易市场接轨,2011年10月,我国在七个省市开展碳排放权交易试点工作。2013年6月18日,深圳碳排放权交易平台率先启动运营,其余六个省市交易平台随后也陆续启动运营。2017年12月,全国统一的碳排放权交易市场正式启动,标志着我国碳交易市场迈入了一个崭新的发展阶段<sup>[2]</sup>。鉴于我国碳交易市场的建立与发展对于减缓全球气候变化和经济社会的可持续发展具有重要的战略意义,因此,自其诞生以来,便受到了国内外经济学者和市场投资者的广泛关注。

近年来,越来越多的经济学者开始研究碳排放权价格波动的影响因素,以便探索发展低碳经济的

收稿日期:2019-12-31;修回日期:2020-03-17

基金项目:教育部人文社会科学研究规划基金项目“金融系统复杂性的表征、成因及演化研究”(12YJAZH020);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17-4203)

作者简介:王宏勇(1963—),男,江苏扬州人,南京财经大学应用数学学院教授,博士,研究方向为分形理论与金融应用;冯佑帅(1994—),男,湖北黄冈人,南京财经大学应用数学学院硕士研究生,研究方向为分形理论与金融应用。

新途径。学者们发现,我国区域碳排放权价格不仅受到其他区域碳价的影响<sup>[3]</sup>,而且受到宏观经济发展、工业发展水平、能源价格以及汇率等因素的影响<sup>[4]</sup>;而在 EU ETS 内,影响碳交易价格最重要因素是政策的制定和排放权的分配,同时原油、天然气和煤炭等能源价格是影响欧盟碳排放权(EUA)价格的重要因素<sup>[5]</sup>。Benz and Truck<sup>[6]</sup>研究了 EUA 收益率的波动性,发现政治因素、天气的不确定性以及未来交易的不确定性等因素也会影响碳排放权价格。Yu and Mallory<sup>[7]</sup>研究发现汇率对碳排放权的价格也有显著的影响,但这种影响是通过能源替代机制发挥作用。

上述文献研究表明,碳排放权的价格受到多种因素的影响,那么碳价格的变化与这些影响因素之间存在怎样的相互关系? Hammoudeh *et al.*<sup>[8]</sup>采用分位数回归法研究欧盟碳排放权价格与原油、天然气、煤炭等能源价格之间的关系,发现欧盟碳排放权价格与这些影响因素之间均存在一定的联系,且在不同的状态下影响的程度可能不同。Zhang and Sun<sup>[9]</sup>使用 DCC 和 BEKK 模型研究碳与三种化石能源价格的时变相关性及波动效应,发现煤炭市场与碳市场的关联度最高,天然气和布伦特原油的价格与碳价格的关联度次之。此外,煤炭市场与碳市场之间存在明显的单向波动溢出,三种化石燃料价格对碳市场价格的波动性有不对称的影响。海小辉和杨宝臣<sup>[10]</sup>运用 DCC-MVGARCH 模型分析了 EU ETS 第二阶段(2008—2012 年)欧盟排放权交易市场与能源市场的动态条件相关关系,发现碳市场与各能源市场之间呈现正相关关系。陶春华<sup>[11]</sup>通过建立 VAR 模型和脉冲响应函数,讨论了中国碳排放权交易市场与股票市场之间的关系,指出上海碳排放权价格与高碳排放行业股票之间存在明显的负相关关系。

上述这些文献主要采用分位数回归模型、DCC 和 BEKK 模型、DCC-MVGARCH 模型、VAR 模型等研究碳排放权价格与其各影响因素之间的线性相关关系。然而,碳排放权交易市场是一个具有分形和混沌结构的非线性复杂系统<sup>[12-13]</sup>。因此,许多学者使用分形统计分析方法刻画碳排放权交易市场的波动特征及其与其他市场之间的交互相互关系。例如,Zheng *et al.*<sup>[14]</sup>使用消除趋势波动分析法(DFA)研究 EUA 期货的价格波动,证实了 EUA 收益波动存在长期自相关性。Fan *et al.*<sup>[15]</sup>运用多重分形消除趋势波动分析法(MF-DFA)探究中国碳市场的多重分形性和市场效率,发现短期和长期的价格收益率序列都是多重分形的,且指出七个试点碳市场缺乏效率。Zhuang *et al.*<sup>[16]</sup>采用多重分形消除趋势交互相关分析法(MF-DCCA)研究碳市场与原油市场的相互关系,发现核证减排量和欧盟配额与原油市场之间存在显著且具有多重分形特征的交互相关关系。Cao and Xu<sup>[17]</sup>基于最大重叠小波变换的 MF-DCCA 方法研究 EUA 与能源市场之间的非线性关系,发现它们之间存在多重分形的交互相互关系,并且指出多重分形性是由序列的长程相关性和波动的胖尾概率分布造成的。Fang *et al.*<sup>[18]</sup>运用 MF-DCCA 方法研究了中国和欧洲市场的碳排放配额与股票收益率序列之间的交互相关性,结果表明,它们之间的交互相关性存在显著的多重分形特征,而且中国市场比欧洲市场的多重分形性强。

自从中国碳排放权交易市场建立以来,它的波动特征以及与其他相关市场的交互关系便受到了学者们的广泛关注。本文将运用 MF-DFA 研究我国碳排放权市场、能源股票市场和原油市场的内在波动特征,揭示市场的风险大小。同时,运用多标度多重分形消除趋势交互相关分析法(MM-DCCA)构造三维空间的 Hurst 曲面,定量地可视化研究三个市场之间的交互相关性,刻画市场间交互关系的动力学特征。本文研究的创新点和意义主要表现在下列三个方面:第一,相较于现有文献大多只是研究碳排放权市场、能源市场和股票市场中两个市场之间的相关关系,本文首次从三维视角对它们三者之间的交互关系进行可视化研究,刻画了三者之间交互关系的复杂性行为。第二,尽管有学者分别采用 VAR 模型和 MGARCH-BEKK 模型研究碳市场、股票市场和原油市场的动态相关性<sup>[19-20]</sup>,但他们的研究仅仅关注欧洲和美国市场,而本文则是首次对中国碳排放权市场、股票市场和原油市场三者之间交互相关性进行研究,所得结果将有助于我国相关部门和市场投资者深入了解我国碳市场的运行特征及其对相关市场的风险溢出效应,也有助于完善全国碳市场的交易机制,充分发挥碳市场的价格发现功能。第三,基于本文的研究提出了若干建议和对策,这对政府有关部门制定和完善相关政策,加强对碳市场的监管,实现经济社会提质增效和绿色低碳发展有重要意义。

## 二、多重分形分析方法描述

MF-DFA 是由 Kantelhardt *et al.* [21] 在 Peng *et al.* [22] 提出的 DFA 基础上推广而来,用于研究非平稳时间序列的内在波动特征与分形性质。由于 DFA 和 MF-DFA 在时间序列分析中的重要应用,它们已被拓展到用于分析两个时间序列之间相关关系的 DCCA [23]、MF-DCCA [24] 和 MM-DCCA [25]。这些多重分形分析方法已成功应用于刻画不同金融市场之间的动态相互关系 [26-29]。

给定两个时间序列  $\{x(i)\}$  和  $\{y(i)\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  这里  $N$  表示序列的长度。

第一步: 计算两个序列的侧面序列:

$$X(i) = \sum_{k=1}^i [x(k) - \bar{x}], Y(i) = \sum_{k=1}^i [y(k) - \bar{y}], i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$\text{其中 } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x(k), \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y(k)。$$

第二步: 将两个侧面序列  $X(i)$  和  $Y(i)$  分割成长度均为  $s$  的  $N_s = \text{int}(N/s)$  个互不重叠的子区间。为了使  $X(i)$  和  $Y(i)$  中的所有数据都能用于计算,从序列的另一端再重复这个分割过程,这样总共得到  $2N_s$  个子区间。在分割中设定  $10 \leq s \leq N/4$ 。

第三步: 使用最小二乘法拟合这  $2N_s$  个子区间  $v(v = 1, 2, \dots, 2N_s)$  的局部趋势,计算局部协方差:

$$F^2(s, v) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s |X[(v-1)s+i] - P^v(i)| \cdot |Y[(v-1)s+i] - T^v(i)|, v = 1, 2, \dots, N_s \quad (2)$$

$$F^2(s, v) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s |X[N - (v - N_s)s + i] - P^v(i)| \cdot |Y[N - (v - N_s)s + i] - T^v(i)|, v = N_s + 1, N_s + 2, \dots, 2N_s \quad (3)$$

其中  $P^v(i)$  和  $T^v(i)$  分别是序列  $X(i)$  和  $Y(i)$  在区间  $v$  中的拟合多项式。

第四步: 计算  $q$  阶消除趋势协方差波动函数:

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} [F^2(s, v)]^{q/2} \right\}^{1/q}, q \neq 0 \quad (4)$$

$$F_0(s) = \exp \left\{ \frac{1}{4N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} \ln [F^2(s, v)] \right\}, q = 0 \quad (5)$$

其中  $q$  是一个实数。当  $q = 2$  时,上述步骤就是标准的 DCCA 算法。

第五步: 对每个固定的  $q$ ,分析  $F_q(s)$  对  $s$  的双对数图,确定  $F_q(s)$  的标度行为。如果两个序列  $\{x(i)\}$  和  $\{y(i)\}$  之间存在长程幂律交互关系,则有:

$$F_q(s) \sim s^{h_{xy}(q)} \quad (6)$$

这里  $h_{xy}(q)$  称为广义交互相关指数,它能够用来描述两个序列之间的交互相关性特征。

上述五个步骤便是经典的 MF-DCCA 算法。特别,当序列  $\{x(i)\}$  和  $\{y(i)\}$  相等时, MF-DCCA 就是 MF-DFA,此时,广义交互相关指数  $h_{xy}(q)$  就是广义 Hurst 指数  $h(q)$ 。为了可视化地分析序列的多重分形性在不同时间标度下的波动行为,将执行以下步骤。

第六步: 使用一个滑动拟合窗经过标度  $s$  的全部取值范围,得到一个重叠窗的序列。随后计算每个窗口内的  $q$  阶波动函数  $F_q(s)$ ,由此得到  $h_{xy}(q)$  关于标度  $s$  的拟连续变化关系,用二元函数  $h_{xy}(q, s)$  表示这种关系,该二元函数的图形为 Hurst 曲面,其上每点的高度对应于  $(q, s)$  的广义交互相关指数  $h_{xy}(q, s)$  值。由于滑动拟合窗的中心和窗口自身在计算  $h_{xy}(q, s)$  的过程中不断变化,为了更好地展示 Hurst 曲面,我们用  $s = (a + b) / 2$  代表拟合窗口  $s \in [a, b]$  即用拟合窗的中心来校准时间标度轴。通过在每个拟合窗口中运用 MF-DCCA 方法,就可对时间序列进行多标度多重分形消除趋势交互相关性分析。

广义交互相关指数  $h_{xy}(q, s)$  与广义 Hurst 指数  $h(q)$  有类似的性质与解释。若  $h_{xy}(q, s)$  依赖于  $q$  而变化, 则说明两个序列之间的交互相关关系是多重分形的; 若  $h_{xy}(q, s)$  与  $q$  无关, 则表明两个序列之间的交互相关关系是单分形的。当  $h_{xy}(q, s) > 0.5$  (或  $h_{xy}(q, s) < 0.5$ ) 时, 表明两个序列间的交互相关关系是长程持续性的(或反持续性的); 而当  $h_{xy}(q, s) = 0.5$  时, 说明两个序列不交互相关或至多短程交互相关。

广义 Hurst 指数  $h(q)$  与 Renyi 指数  $\tau(q)$  之间有如下的分析关系<sup>[21]</sup>:

$$\tau(q) = qh(q) - 1 \quad (7)$$

若  $\tau(q)$  是  $q$  的非线性函数, 则时间序列具有多重分形特征。通过 Legendre 变换可得奇异指数  $\alpha$  和多重分形谱  $f(\alpha)$  的关系式:

$$\alpha = h(q) + qh'(q), f(\alpha) = q[\alpha - h(q)] + 1 \quad (8)$$

若多重分形谱  $f(\alpha)$  关于  $\alpha$  的图形呈单峰钟形, 则表明时间序列具有多重分形特征; 若图形是一个单点, 说明其仅具有单分形特征。在多重分形分析中  $\Delta h = h(q)_{\max} - h(q)_{\min}$  用来度量序列的多重分形性强度,  $\Delta h$  越大, 表明序列的多重分形性越强, 市场蕴含的风险越大。此外, 多重分形谱的宽度  $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$  能够反映多重分形性的程度,  $\Delta\alpha$  越大, 表明多重分形性的程度越高, 意味着市场波动的非线性复杂性越高。

### 三、数据描述与统计检验

为了研究我国碳排放权市场、股票市场和原油市场三者之间的关系, 本文选择深圳碳排放权现货价格作为中国碳排放权市场价格的代表<sup>①</sup>。另外, 由于能源市场与碳排放权市场密切相关, 故选取沪深 300 能源指数<sup>②</sup>作为股票市场的代表。与此同时, 选取大庆原油<sup>③</sup>现货的收盘价作为原油市场的代表。注意到, 国内原油价格与国际原油价格有着几乎完全相似的波动趋势<sup>[30]</sup>, 这样本文在研究三个市场之间的相关性时, 就不会由于国际油价的波动而对本文的研究结果产生影响。由于三个指数初始发布日期不同, 因此需要保证三个市场的样本序列是同步的。为此, 我们统一选取三个市场收盘数据的样本时期为 2013 年 6 月 18 日至 2018 年 9 月 26 日, 剔除三者不相匹配的数据, 每个序列都有 1 128 个数据<sup>④</sup>。图 1 是这三个市场收盘价在样本时期内的走势图。



图 1 深圳碳排放权、沪深 300 能源指数和大庆原油的每日收盘价走势

从图 1 可见, 深圳碳排放权价格在市场成立之初迅速上涨后又逐渐下跌, 随后几年价格波动时高时低, 无明显趋势。沪深 300 能源指数从 2014 年 7 月起逐渐上行但随后又快速下行, 在 2014 至 2015 年期间出现了一个明显的波峰。而大庆原油价格自 2013 年 6 月平稳运行一段时期后, 从 2014 年 6 月起一路下跌至 2016 年 1 月跌至谷底, 随后缓慢回升。

图 2 展示了上述三个市场收盘价的日对数收益率序列  $r_t$  的波动状态, 这里  $r_t = \ln(P_t) -$

①由于深圳碳排放权现货价格起始日期最早, 为使数据样本的长度足够长, 故作如此选择。

②沪深 300 能源指数是沪深 300 指数成分中能够反映能源行业公司股票价格的指数。

③大庆油田是中国第一大石油生产基地, 它决定了中国原油市场的价格机制。

④数据来源于 Wind 资讯。

$\ln(P_t/P_{t-1})$   $P_t$  为第  $t$  日收盘价。在图 2 中,从收益率来看,在整个样本时期内,三个对数收益率的值均在 0 上下波动,表明三个市场均不存在长期获利趋势。从波动性来看,三个市场均存在明显的波动与波动聚集现象,且碳排放权市场的波幅明显大于股票市场和原油市场的波幅。这是由于我国碳排放权市场尚处于初级阶段,运营时间较短,市场机制等不完善,从而导致碳排放权价格更容易受到外部因素的影响,因此波动幅度较大。

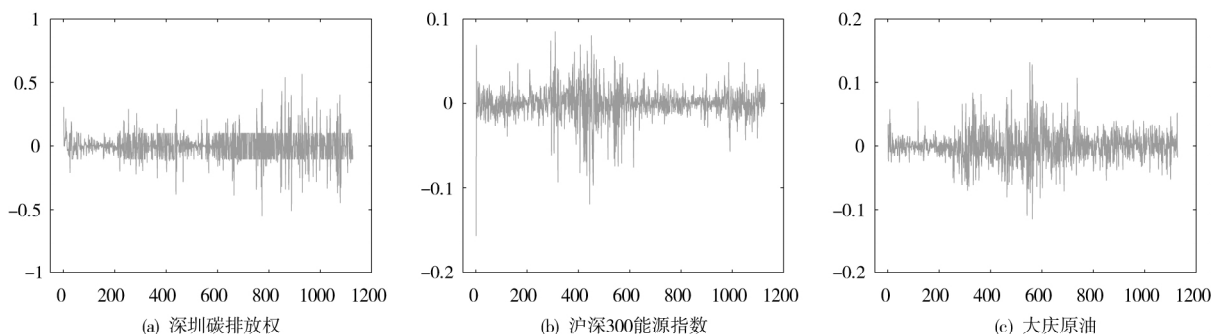


图 2 深圳碳排放权、沪深 300 能源指数和大庆原油价格的对数收益率

表 1 展示了深圳碳排放权价格、沪深 300 能源指数和大庆原油价格收益率序列的描述性统计量。由表 1 可知,与其他两个市场收益率序列相比,深圳碳排放权收益率序列的标准差最高,存在着低收益与高风险的特点。所有收益率序列的偏度均不为 0,峰度均大于 3, J-B 统计量在 1% 的显著性水平下均拒绝原假设,表明这三个收益率序列均不服从正态分布,而呈现“尖峰胖尾”的分布特征。

表 1 深圳碳排放权价格、沪深 300 能源指数和大庆原油价格收益率序列的描述性统计量

	均值	最大值	最小值	标准差	偏度	峰度	J-B 统计量
深圳碳排放权	-0.000 2	0.56	-0.55	0.107 89	-0.037	6.695	641.286 0***
沪深 300 能源	-0.000 2	0.09	-0.16	0.012 8	-1.101	11.749	3 821.943***
大庆原油	-0.000 3	0.13	-0.12	0.024 73	0.303	6.208	500.614 8***

注:\*\*\*表示在 1% 的显著性水平下显著。

下面我们采用 Podobnik *et al.* [31] 提出的相关性检验法来检测上述三个序列中两两之间是否存在统计意义上的交互相关关系。对于两个时间序列  $\{x_i\}$  和  $\{y_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , 定义它们的相关性检验统计量与交互相关函数为:

$$Q_{cc}(m) = N^2 \sum_{i=1}^m \frac{C_i^2}{N-i}, C_i = \left( \sum_{k=i+1}^N x_k y_{k-i} \right) / \sqrt{\sum_{k=1}^N x_k^2 \sum_{k=1}^N y_k^2} \quad (9)$$

通常  $Q_{cc}(m)$  渐进服从于自由度为  $m$  的卡方分布  $\chi^2(m)$ 。如果  $Q_{cc}(m)$  的值大于  $\chi^2(m)$  的临界值,则表明在一定的显著性水平下两个时间序列之间存在交互相关关系。

图 3 给出了这三个收益率序列的  $Q_{cc}(m)$  对  $m$  的双对数图以及显著性水平为 5% 的情形下卡方分布的临界值,自由度  $m$  取值从 1 到 1 000。从图 3 发现,三个收益率序列两两之间的交互相关性检验统计量均大于在 5% 显著性水平下的临界值。因此,拒绝原假设,表明三个收益率序列两两之间均存在长程交互相关关系。

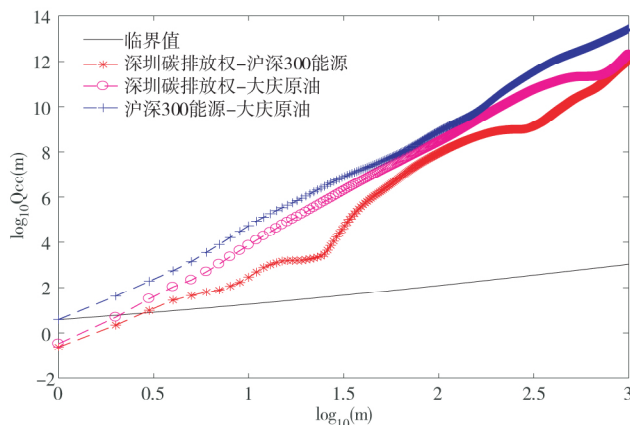


图 3  $Q_{cc}(m)$  对  $m$  的  $\log \sim \log$  双对数

四、实证分析

(一) 多重分形特征分析

本节运用 MF-DFA 方法分析深圳碳排放权、沪深 300 能源指数和大庆原油价格的对数收益率序列的波动特征和市场风险大小。在 MF-DFA 方法中,我们使用 3 阶拟合多项式消除每个序列的波动趋势,计算它们的  $q$  阶 ( $q = -10, -9, \dots, 9, 10$ ) 波动函数  $F_q(s)$  进而得到三个收益率序列的广义 Hurst 指数值,如表 2 所示。图 4 展示了  $h(q)$  随  $q$  的变化情况。

从表 2 和图 4 可以看出,三个收益率序列的广义 Hurst 指数  $h(q)$  都不等于常数 0.5,而是随着  $q$  值的变化而改变,表明三个收益率序列的自相关关系存在多重分形性。三个收益率序列的  $\Delta h$  分别是 0.761 1、0.376 3 和 0.324 9,显示深圳碳排放权市场的多重分形强度远大于沪深 300 能源指数和大庆原油市场的多重分形强度,意味着碳排放权市场的风险远大于能源股票市场和原油市场的风险。

图 5 是三个收益率序列的 Renyi 指数  $\tau(q)$  对  $q$  的关系图和多重分形谱  $f(\alpha)$  对  $\alpha$  的关系图。从图 5(a) 和 (b) 分别看出,三个收益率序列的 Renyi 指数  $\tau(q)$  关于  $q$  均呈非线性变化,且多重分形谱图均呈钟形,表明三个收益率序列都具有显著的多重分形特征。从  $\tau(q)$  曲线的弯曲程度以及多重分形谱图的开口宽度也可判断这三个收益率序列的多重分形强度的大小,所得结论与上述表 2 一致。

表 2 三个收益率序列的广义 Hurst 指数值

$q$	深圳碳排放权	沪深 300 能源指数	大庆原油
-10	0.839 2	0.739 4	0.755 3
-9	0.826 1	0.729 0	0.745 2
-8	0.809 7	0.716 4	0.733 2
-7	0.788 6	0.700 9	0.718 8
-6	0.760 6	0.681 7	0.701 7
-5	0.722 6	0.658 2	0.681 4
-4	0.669 5	0.630 6	0.657 9
-3	0.595 2	0.601 1	0.632 8
-2	0.498 3	0.574 5	0.610 0
-1	0.397 2	0.554 0	0.595 3
0	0.318 4	0.537 0	0.588 2
1	0.264 1	0.516 9	0.579 5
2	0.224 3	0.490 7	0.564 1
3	0.192 5	0.462 5	0.543 6
4	0.166 4	0.437 4	0.521 6
5	0.144 6	0.417 2	0.500 5
6	0.126 4	0.401 2	0.481 7
7	0.111 1	0.388 6	0.465 6
8	0.098 3	0.378 4	0.451 9
9	0.087 4	0.370 1	0.440 3
10	0.078 1	0.363 1	0.430 4
$\Delta h$	0.761 1	0.376 3	0.324 9

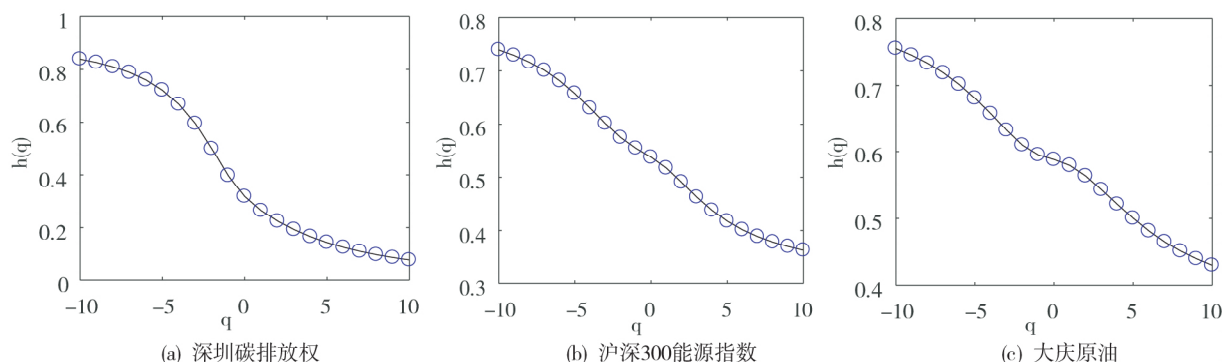


图 4 三个收益率序列的广义 Hurst 指数曲线

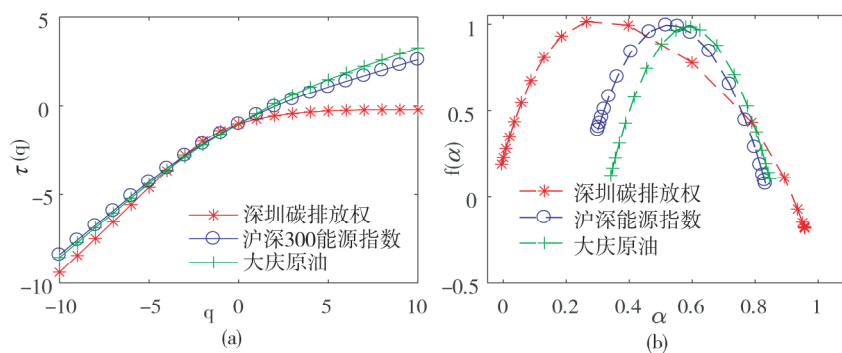


图 5 三个收益率序列的 Renyi 指数和多重分形谱



(二) 多重分形性的来源分析

上述分析证实了深圳碳排放权、沪深 300 能源指数和大庆原油的收益率序列都存在显著的多重分形特征。一般来说,造成时间序列多重分形性的主要原因有两个,分别是序列的长程相关性和波动的胖尾概率分布<sup>[32]</sup>。为了探讨这三个收益率序列的多重分形性的来源,我们对原始序列进行重排打乱和相位随机化。将原始序列重排打乱能破坏它的长程相关性,但保留其分布特征;而将原始序列相位随机化能保留它的长程相关性,但削弱了其非高斯性。因此,我们通过比较原始序列、打乱序列和替代序列的多重分形强度  $\Delta h$  和多重分形谱宽度  $\Delta\alpha$  来探究多重分形性的来源。

表 3 三个收益率序列的原始序列、打乱序列和替代序列的  $\Delta h$  和  $\Delta\alpha$

	深圳碳排放权		沪深 300 能源指数		大庆原油	
	$\Delta h$	$\Delta\alpha$	$\Delta h$	$\Delta\alpha$	$\Delta h$	$\Delta\alpha$
原始序列	0.761 1	0.962 4	0.376 3	0.532 5	0.324 9	0.505 0
打乱序列	0.225 4	0.349 5	0.342 9	0.508 4	0.310 5	0.460 6
替代序列	0.233 4	0.369 5	0.183 7	0.292 8	0.108 3	0.205 3

图 6 和图 7 分别展示了深圳碳排放权、沪深 300 能源指数和大庆原油收益率序列的原始序列、打乱序列和替代序列的广义 Hurst 指数和多重分形谱图,表 3 分别给出了相应序列的多重分形强度  $\Delta h$  和多重分形谱宽度  $\Delta\alpha$  的统计量。从图 6 和表 3 可见,三个收益率序列的打乱序列和替代序列的广义 Hurst 指数  $h(q)$  均随  $q$  的变化而变化,且它们的多重分形强度  $\Delta h$  均小于原始序列的  $\Delta h$ ,说明波动的胖尾概率分布和序列自身的长程相关性均是引起序列多重分形性的共同原因。此外,在沪深 300 能源指数和大庆原油的两个收益率序列中,替代序列的多重分形强度均小于它们对应的打乱序列的多重分形强度。因此,波动的胖尾概率分布对序列的多重分形性影响更大;但在深圳碳排放权的收益率序列中,情形与上述相反,序列存在多重分形性的原因更多是由自身的长程相关性引起。从图 7 和表 3 所示的多重分形谱宽度值也能得出与上述一致的结论。

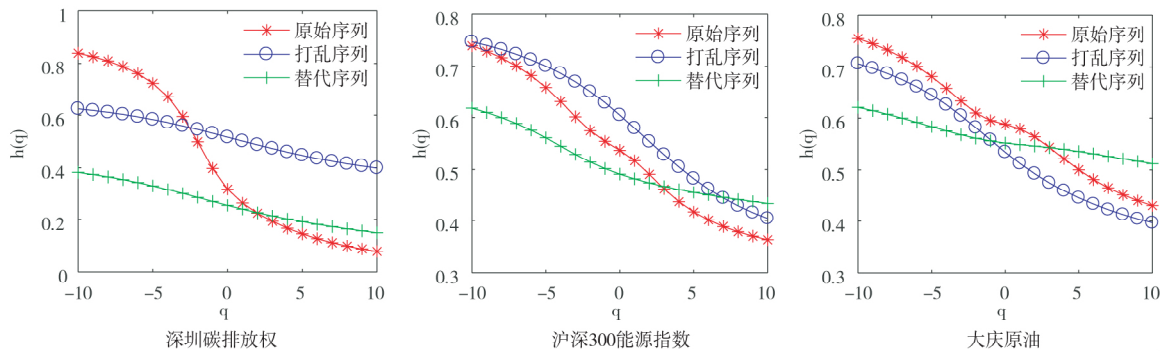


图 6 三个收益率序列的原始序列、打乱序列和替代序列的广义 Hurst 指数

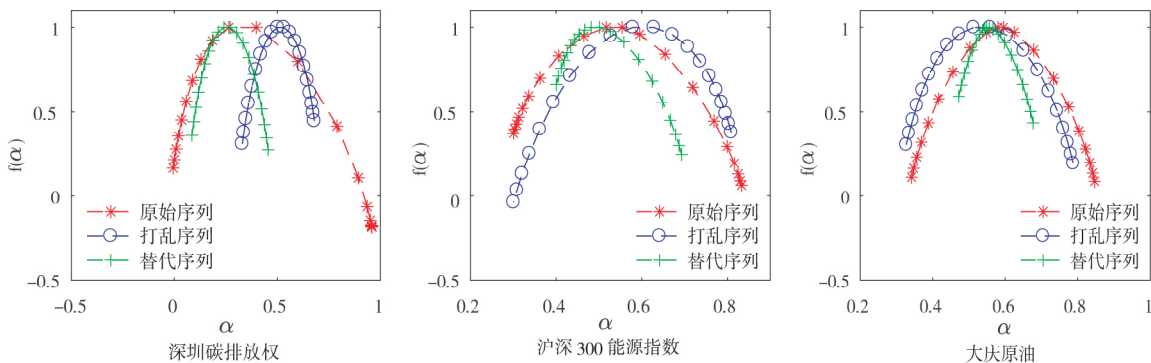


图 7 三个收益率序列的原始序列、打乱序列和替代序列的多重分形谱

### (三) 交互相关关系的多尺度多重分形分析

基于  $Q_{cc}(m)$  检验统计量仅仅能够定性地检测两个序列之间交互相关关系的存在性。本文进一步使用 MM-DCCA 方法定量地研究两个序列之间的交互相关关系, 通过计算不同时间标度  $s$  下的交互相关 Hurst 曲面  $h_{xy}(q, s)$ , 可视化描述交互相关性的变化。

图 8 绘制了三个收益率序列两两之间交互相关关系的协方差波动函数  $F_q(s)$  对标度  $s$  的双对数图。由图 8 可见, 对于不同的  $q = -10, -9, \dots, 9, 10$ , 所有的双对数曲线  $\log F_q(s) \sim \log(s)$  整体上均呈线性变化趋势, 表明三个收益率序列两两之间均存在幂律交互相关关系。

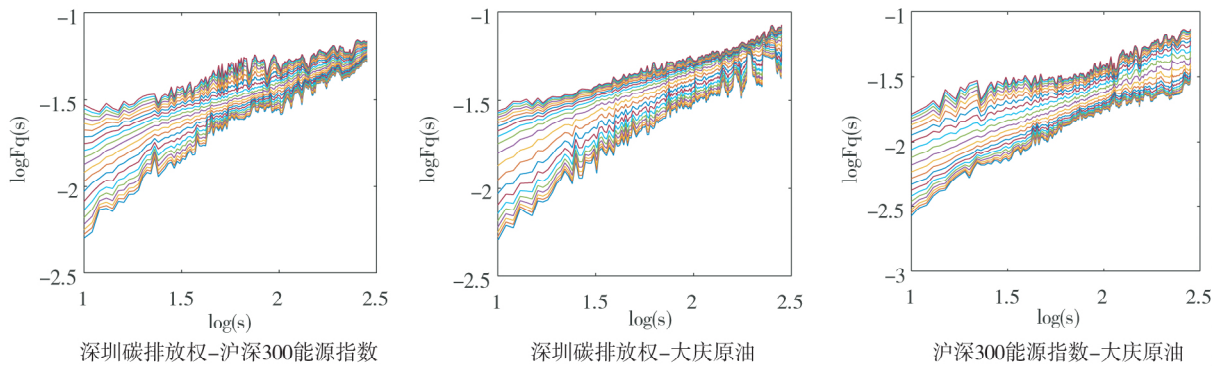


图 8 三个收益率序列两两之间的协方差波动函数的双对数

选用一个滑动拟合窗, 观察广义交互相关指数  $h_{xy}(q, s)$  分别在小标度  $s \in (10, 30)$  和大标度  $s \in (100, 300)$  情形下的变化情况。图 9 展示了 MM-DCCA 方法应用于三个收益率序列而得到的 Hurst 曲面图  $h_{xy}(q, s)$  (已用拟合窗的中心校准标度轴)。从图 9 中观察到三张 Hurst 曲面的波动状态均随着  $(q, s)$  的变化而变化, 而且其波动幅度在小标度和大标度范围内有所不同, 显示了不同的多重分形特征。

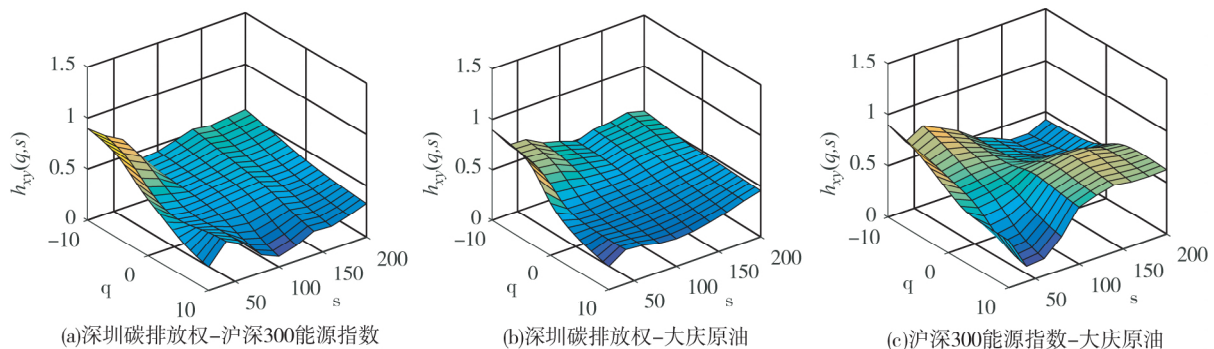


图 9 三个收益率序列之间的广义交互相关 Hurst 曲面

从图 9(a) 可见, 深圳碳排放权与沪深 300 能源指数的 Hurst 曲面在小标度处波动明显, 而在大标度处, 曲面起伏波动较为平缓, 说明这两个序列之间的交互相关关系在小标度下展示出更为复杂的动态特征。这是由于碳市场价格和沪深 300 能源指数的短期行为易受重大政治、经济事件等市场外部因素的影响, 导致在小标度情形下呈现出更为复杂的交互关系。

图 9(b) 中深圳碳排放权与大庆原油的 Hurst 曲面与其他两幅图相比, 在小标度处波动最小, 且随着标度的增加曲面渐趋于平面,  $h_{xy}(q, s)$  的值也趋近于 0.5, 表明我国碳排放权市场与原油市场的相关性较弱。主要原因在于, 一方面, 原油消耗会排放大量的二氧化碳, 必然对碳排放权的价格有所影响。通常情况下, 原油价格下降会使需求量增加, 从而带来更多的碳排放。但为了符合减排规定, 企业会加大对碳排放权的需求, 导致碳排放权价格上升, 又会迫使企业减少碳排放, 引起原油的需求量降低和油价下降。因此, 碳排放权市场与原油市场之间存在一定的相关性。另一方面, 由于我国碳排



放权市场处于初级阶段,运营时间较短,这种相关性的影响存在一定的滞后期。更重要的是,在目前,我国七个试点城市的碳排放权的分配方式很大程度上以免费分配为主、拍卖为辅,这导致了碳排放权价格通常是由市场供需状况、交易制度以及国家相关政策等因素所决定,而受原油市场的影响较小。因此,我国碳排放权市场与原油市场的相关性较弱。

图9(c)与前两幅相比,该Hurst曲面无论在小标度处还是在大标度处,都具有明显的起伏波动,显示出较强的多重分形性特征。但相比而言,Hurst曲面在小标度处的波幅要比在大标度处的波幅更大。而且,在小标度处,有一个明显的向下倾斜的斜坡,这说明能源股票市场与原油市场之间的交互相关性不是很稳定。究其原因,一方面,由于原油是全球能源市场中最重要的大宗商品之一,也是众多金融工具交易的基础资产之一,原油价格的波动在一定程度上会导致能源股票价格的变化。因此,能源股票市场与原油市场之间存在相关性。另一方面,在我国,由于能源股票市场与原油市场的定价机制不同,从而决定了这两个市场间的交互相关关系不是很稳定。事实上,我国股票市场是通过公开发行的股票询价制度确定股票价格,而原油市场则是被动地跟随国际原油市场价格的波动情况来确定和调整价格,因而这两个市场在短期内很难建立起相对稳定的交互关系。

综合观察图9,发现三张曲面在小标度处的波动均比在大标度处的波动更为明显,这说明在小标度处刻画序列的交互相关关系能够更好地揭示市场在大标度处未被发现的一些隐藏的波动信息。此外,从整体上看,在我国碳排放权市场、能源股票市场和原油市场中,前者分别与后两者之间的交互相关关系都较弱,甚至在长期看来(大时间标度下)不存在交互相关关系,说明我国碳排放权市场对能源股票市场和原油市场的影响并不明显,这也从侧面反映了我国碳排放权市场的交易并不活跃,存在着“有市场无交易”的问题。从我国碳排放权市场的现状来看,虽然在全国范围内已经制定了促进市场发展的政策法规和激励措施,然而实施效果欠佳,市场作用不明显,未能充分发挥市场机制优化配置碳排放权市场资源的功能,尚未成为投资机构和个人投资者的重要投资对象,因而对其他金融市场的影响不大。

## 五、结论与建议

本文运用多重分形统计分析方法研究了中国碳排放权市场、能源股票市场和原油市场的波动特征及市场间交互相关关系的动力学行为。主要研究结论如下:

第一,运用MF-DFA方法对三个市场的日收益率序列进行多重分形分析,发现三个市场的波动均存在多重分形性特征。此外,深圳碳排放权市场的多重分形性最强,沪深300能源指数的多重分形性次之,而大庆原油市场的强度最小。第二,探讨了引起市场多重分形性的来源,指出序列自身的长程相关性和波动的胖尾概率分布是引起多重分形性的共同原因。进一步发现,波动的胖尾概率分布对沪深300能源指数和大庆原油的两个收益率序列的多重分形性影响更大,而长程相关性对深圳碳排放权收益率序列的多重分形性贡献更多。第三,运用MM-DCCA方法分析了三个市场中两两之间的动态交互相关关系,利用滑动窗技术生成Hurst曲面,可视化描述了三个收益率序列之间的交互相关性。实证分析表明,我国能源股票市场与原油市场之间的交互相关性最强,而碳排放权市场与能源股票市场和原油市场的相关性较弱。此外,还发现Hurst曲面在小标度处的波动比在大标度处的波动更为剧烈,表明在小标度情形下刻画序列的交互相关性能够更好地揭示市场在大标度情形下未能发现的波动信息。

基于上述研究结论,本文为我国政府相关部门和市场投资者提出如下几点建议:第一,鉴于目前我国碳排放权交易主要是现货交易,碳排放权的交易方式单一且不活跃,市场不具备价格发现功能,因此,从我国碳排放权交易市场的长远发展角度分析,未来建立碳排放权期货交易机制是至关重要的。第二,目前,在我国碳排放权交易市场,进行交易的绝大多数为相关控排企业,而个人投资者和市场投资机构参与交易较少,从而导致市场流动性较弱,这也是从长期看碳排放权交易市场与其他市场之间不存在交互相关关系的原因之一。因此,建议市场管理部门应完善促进市场发展的政策法规,提高市场信息披露程度,制定激励措施,鼓励投资机构和个人投资者积极参与碳市场交易,扩大市场交

易主体 加强市场的流动性 降低市场风险。第三,对市场投资者而言,在进行碳市场产品交易时,不仅要考虑碳市场自身的信息因素,而且要综合考虑相关市场的价格波动及其风险溢出效应,合理构建资产投资组合,对冲市场风险。

#### 参考文献:

- [1] 刘海英,王钰,刘松灵. 命令控制与碳排放权可交易环境政策模拟下的减排效应[J]. 吉林大学社会科学学报, 2017(2): 57-67+205.
- [2] 冯佑帅. 空气质量指数与碳排放权价格的交互相关分析[J]. 宜宾学院学报, 2019(6): 99-105.
- [3] 王倩,高翠云. 中国试点碳市场间的溢出效应研究——基于六元 VAR-GARCH-BEKK 模型与社会网络分析法[J]. 武汉大学学报(哲学社会科学版), 2016(6): 57-67.
- [4] 杜子平,刘富存. 我国区域碳排放权价格及其影响因素研究——基于 GA-BP-MIV 模型的实证分析[J]. 价格理论与实践, 2018(6): 42-45.
- [5] 陈晓红,王陟昀. 碳排放权交易价格影响因素实证研究——以欧盟排放交易体系(EUETS)为例[J]. 系统工程, 2012(2): 53-60.
- [6] BENZ E, TRUCK S. Modeling the price dynamics of CO<sub>2</sub> emission allowances[J]. Energy economics, 2009, 31(1): 4-15.
- [7] YU J, MALLORY M L. Exchange rate effect on carbon credit price via energy markets[J]. Journal of international money and finance, 2014, 47(3): 145-161.
- [8] HAMMOUDEH S, NGUYEN D K, SOUSA R M. Energy prices and CO<sub>2</sub> emission allowance prices: a quantile regression approach[J]. Energy policy, 2014, 70(7): 201-206.
- [9] ZHANG Y J, SUN Y F. The dynamic volatility spillover between European carbon trading market and fossil energy market[J]. Journal of cleaner production, 2016, 112: 2654-2663.
- [10] 海小辉,杨宝臣. 欧盟排放交易体系与化石能源市场动态关系研究[J]. 资源科学, 2014, 36(7): 1442-1451.
- [11] 陶春华. 我国碳排放权交易市场与股票市场联动性研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2015(4): 40-51.
- [12] YU L, LI J, TANG L, et al. Linear and nonlinear granger causality investigation between carbon market and crude oil market: a multi-scale approach[J]. Energy economics, 2015, 51: 300-311.
- [13] 杨星,梁敬丽. 国际碳排放权市场分形与混沌行为特征分析与检验——以欧盟碳排放交易体系为例[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(6): 1420-1431.
- [14] ZHENG Z, XIAO R, SHI H, et al. Statistical regularities of carbon emission trading market: evidence from European union allowances[J]. Physica A, 2015, 426: 9-15.
- [15] FAN X, LV X, YIN J, et al. Multifractality and market efficiency of carbon emission trading market: analysis using the multifractal detrended fluctuation technique[J]. Applied energy, 2019, 251: 113333.
- [16] ZHUANG X, WEI Y, ZHANG B. Multifractal detrended cross-correlation analysis of carbon and crude oil markets[J]. Physica A, 2014, 399: 113-125.
- [17] CAO G, XU W. Nonlinear structure analysis of carbon and energy markets with MFDCCA based on maximum overlap wavelet transform[J]. Physica A, 2016, 444: 505-523.
- [18] FANG S, LU X, LI J, et al. Multifractal detrended cross-correlation analysis of carbon emission allowance and stock returns[J]. Physica A, 2018, 509: 551-566.
- [19] 吴振信,万埠磊,王书平. 碳交易市场、原油市场和股票市场的联动关系——基于结构突变检验和 VAR 模型的实证研究[J]. 系统工程, 2015(3): 25-31.
- [20] 李刚,朱莉. 碳市场、石油市场和股票市场之间的动态相关性研究[J]. 南京财经大学学报, 2014(3): 9-14.
- [21] KANTELHARDT J W, ZSCHIEGNER S A, KOSCIELNY-BUNDE E, et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series[J]. Physica A, 2002, 316(1-4): 87-114.

- [22] PENG C K ,BULDYREV S V ,HAVLIN S ,et al. Mosaic organization of DNA nucleotides [J]. Physical review E ,1994 ,49 ( 2 ) : 1685 - 1689.
- [23] PODOBNIK B ,STANLEY H E. Detrended cross-correlation analysis: a new method for analyzing two nonstationary time series [J]. Physical review letter ,2008 ,100( 8 ) : 084102.
- [24] ZHOU W X. Multifractal detrended cross-correlation analysis for two nonstationary signals [J]. Physical review E ,2008 , 77( 2 ) : 066211.
- [25] SHI W ,SHANG P ,WANG J ,et al. Multiscale multifractal detrended cross-correlation analysis of financial time series [J]. Physica A ,2014 ,403: 35 - 44.
- [26] 王宏勇 ,郭丽娜. 国际黄金期价与美元指数交互关系的多重分形分析 [J]. 数理统计与管理 ,2015 ,34( 5 ) : 878 - 889.
- [27] 王刚 ,王宏勇. 国内外原油市场与汇率市场的交互相关性分析 [J]. 南京财经大学学报 ,2018( 5 ) : 49 - 57.
- [28] 王童瞳 ,王宏勇. 我国证券市场交互关系的多尺度多重分形分析 [J]. 南京财经大学学报 ,2017( 3 ) : 77 - 84.
- [29] WANG H Y ,WANG T T. Multifractal analysis of the Chinese stock ,bond and fund markets [J]. Physica A ,2018 ,512: 280 - 292.
- [30] 王宏勇 ,陈晓娜. 国内外原油市场的交互相关性分析——基于多重分形的统计测度 [J]. 统计与信息论坛 ,2015 ( 12 ) : 42 - 47.
- [31] PODOBNIK B ,GROSSE I ,HORVATIC D ,et al. Quantifying cross-correlations using local and global detrending approaches [J]. The European physical journal B ,2009 ,71( 2 ) : 243 - 250.
- [32] ZHOU W X. The components of empirical multifractality in financial returns [J]. Europhysics letters ,2009 ,88( 2 ) : 28004.
- (责任编辑:黄明晴;英文校对:葛秋颖)

## Multifractal Analysis of China's Carbon Market , Energy Stock Market and Crude Oil Market

WANG Hongyong , FENG Youshuai

( School of Applied Mathematics , Nanjing University of Finance and Economics , Nanjing 210023 , China )

**Abstract:** With establishment and development of China's carbon emission market , fluctuation characteristics of the carbon market and its relationship with other financial markets have attracted extensive attention. Taking return series of Shenzhen carbon emission market , CSI 300 energy index and Daqing crude oil market as sample data , this paper uses multifractal analysis method to study the dynamic features , the risk of market and dynamic cross-correlations of volatility of China's carbon emission market , energy stock market and crude oil market. The empirical study shows that the volatility of three markets has significant multifractal characteristics , and the multifractal strength of the carbon market is greater than those of the energy stock market and the crude oil market , which means that the risk of the carbon market is greater than those of the latter two markets. In addition , it is confirmed that cross-correlations among the three markets present different multifractal characteristics in different time scales. The study also finds that the correlation between the energy stock market and the crude oil market is the strongest , while the correlation between the carbon market and the other two markets is weak.

**Key words:** carbon emission market; energy stock market; crude oil market; cross-correlation; multifractal analysis