

中国和欧盟碳排放权市场的 非对称多重分形统计分析

王宏勇,许柳柳

(南京财经大学 应用数学学院,江苏 南京 210023)

摘要: 中国碳排放权市场的建立对促进经济社会的可持续发展具有重要意义,碳排放权市场的波动特征及市场效率也受到了学界的广泛关注。以中国湖北省碳排放权市场和欧盟碳排放权市场为研究对象,利用非对称多重分形去趋势波动分析方法(A-MF-DFA),研究中国和欧盟碳市场价格波动的多重分形特征和市场效率,并分析不同趋势下的市场多重分形性来源。实证结果表明:两个市场的波动存在明显的非对称多重分形性,且两个市场上升趋势的多重分形性强于下降趋势的多重分形性;欧盟市场的效率比中国市场的效率稍高;在上升趋势下,两个市场收益率序列的多重分形性来源于序列的长程相关性和胖尾分布,但胖尾分布的贡献更大;而在下降趋势下,胖尾分布是造成多重分形性的主要来源。

关键词: 碳排放权市场;非对称性;多重分形分析;市场有效性

中图分类号: F224.9; F830.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6049(2022)05-0001-11

一、引言与文献综述

随着全球人口数量与经济规模的不断增长,减少温室气体排放、探索碳封存技术、开发和利用新能源,以实现经济社会和生态环境和谐共存的低碳经济发展模式是经济社会可持续发展的必然选择。1997年12月,《联合国气候变化框架公约的京都议定书》允许将二氧化碳排放权作为一种商品进行交易,发达国家之间可以通过买卖碳排放权来实现减排目标。欧盟作为最早启动碳排放权市场的组织,为世界各国建立碳排放权交易市场提供了经验。中国作为世界上第二大经济体,自觉承担起全球二氧化碳减排的责任,从2013年开始,在全国8个试点省市相继建立了碳排放权交易市场。截至2021年6月,全国碳交易试点配额累计成交二氧化碳量达到4.8亿吨,累计成交额约114亿元。在所有碳排放试点省市中,碳排放权交易累计成交量和成交额最高的是湖北省,分别占全国碳排放权交易的32.46%和28.81%^①。中国碳排放权市场的建立与发展,为落实“2030年前实现碳达峰,2060年底实现碳中和”的重大战略决策提供了重要支撑。

随着碳市场的不断发展,越来越多的学者和投资者关注市场的价格波动特征和市场效率等问题。价格波动情况能反应信息对市场的影响,研究价格的波动行为可以在一定程度上预测市场未来的收

收稿日期:2022-03-31;修回日期:2022-08-31

基金项目:国家社会科学基金一般项目“‘一带一路’可持续发展中中国企业生态位提升与共生机制研究”(20BGL028);江苏省研究生科研与实践创新计划项目“疫情前后中美两国黄金和原油价格波动性分析及预测”(KYCX21_1499)

作者简介:王宏勇(1963—),男,江苏扬州人,理学博士,南京财经大学应用数学学院教授,研究方向为分形理论与金融应用;许柳柳(1997—),女,安徽黄山人,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。

①数据来源于产业信息网(<https://www.chyxx.com/industry/202106/955701.html>)。

益。市场效率是指市场价格对相关信息变化的反映程度,是市场资源配置、信息显示和传递、制度设计以及市场行为等方面效率的总和。研究市场效率有利于投资者获取更有效的市场信息,做出更加理性的投资行为,规避市场风险。

目前,一些学者基于 GARCH 类计量经济模型研究了碳市场的波动性等问题。Byun and Cho^[1]比较研究了三种计量模型(GARCH 模型、隐含波动率模型和 k-近邻模型)对碳期货市场价格波动性的预测能力,发现 GARCH 模型的表现优于其他两种,并指出能源市场的波动性可用于预测碳期货市场的波动性。Zhou and Li^[2]运用 GARCH 模型探讨了中国碳排放交易价格的波动特征,发现碳排放价格的收益率序列存在波动聚集、尖峰胖尾和非正态分布的特征;他们还使用 VAR-VEC 模型发现,碳排放价格与能源价格、宏观经济指标、空气质量指数之间存在长期均衡关系。Ye *et al.*^[3]构建了 GARCH-MIDAS-EUEPU 模型和 GARCH-MIDAS-GEPU 模型,研究欧洲和全球经济政策的不确定性对欧洲碳市场波动性的影响,结果发现两者都会加剧欧洲碳现货收益率的长期波动性,且全球经济政策不确定性的影响更大。

还有一些其他的计量经济学方法也被应用到碳市场的研究中。Guo and Feng^[4]使用改良的向量自回归(VAR)模型研究中国碳排放权交易市场的波动溢出问题,发现中国碳排放交易试点省市之间存在波动溢出效应,但相互影响都比较小。辛姜和赵春艳^[5]使用马尔可夫区制转换向量自回归(MS-VAR)模型分析了中国碳排放权交易市场的波动性,发现现阶段国内碳排放权市场的价格波动较大,与金融市场、能源市场、工业市场以及国外碳市场的联动性较低,但会逐步增强。魏宇等^[6]利用动态模型选择(DMS)和动态模型平均(DMA)等方法,比较研究了我国碳排放权交易价格的预测效果,结果发现 DMS 的预测结果精度更高。Kim *et al.*^[7]采用带跳跃或不跳跃的随机波动模型来表示欧盟碳排放配额(EUA)期货价格的波动状态,并估计每日波动率和模型参数,根据带跳跃模型的计算,发现跳跃项能通过捕获波动率的突然变化来描述市场的异常波动,此外,即使控制了跳跃的影响,仍发现杠杆效应明显存在于 EUA 市场中。

虽然许多学者使用传统计量经济学的方法对碳市场进行了研究,并取得了一些重要成果,但较少涉及碳市场的异质性、波动的长记忆性等方面的讨论,也缺乏对市场波动非线性特征的细致描述。众所周知,包括碳排放权市场在内的金融市场是一个非线性动态复杂系统。近些年,基于分形理论与方法的碳市场波动性及效率的研究方兴未艾。Zheng *et al.*^[8]运用去趋势波动分析(DFA)方法分析了欧洲气候交易所 EUA 期货价格波动,结果发现, EUA 价格变化的波动性具有长记忆特征。刘静^[9]采用重标方差(V/S)法和 DFA 法分析了 EU-ETS 和中国碳交易体系的单分形特征,发现 EUA 和核证减排(CER)交易体系的第二阶段均存在长期记忆性,交易的第三阶段均存在状态反持续性。然而, DFA 方法属于单分形分析法,它仅能对时间序列的整体特征进行描述,缺乏对序列局部特征的细致刻画。Kantelhardt *et al.*^[10]对 DFA 法进行了推广,得到了多重分形去趋势波动分析(MF-DFA)方法,用于研究非平稳时间序列的波动特征和分形性质。Cao and Xu^[11]基于经验模式分解(EMD)和 MF-DFA 方法分析了 CER 和 EUA 期货市场的多标度特征,发现两者都存在多重分形性和长期相关性,并指明长程相关性和胖尾分布是引起序列多重分形性的主要原因。Fan *et al.*^[12]采用 MF-DFA 方法,研究了我国 7 个试点省市的碳价格收益率序列的波动特征以及碳市场的多重分形性和市场效率等问题,指出中国的碳市场效率较低。Zhuang *et al.*^[13]采用多重分形去趋势交互相关分析(MF-DCCA)方法探讨了碳市场和原油市场之间的相关性,发现两者之间存在着明显的幂律关系,而且在小波动情况下这种关系更加持久。Zou and Zhang^[14]运用 MF-DCCA 方法研究了欧洲碳期货市场价格和交易量之间的相关性和多重分形性,发现碳期货的价格和交易量都存在多重分形性,两者之间存在非线性依赖关系,并指出多重分形性的主要来源是序列的长程相关性及胖尾分布。王宏勇和冯佑帅^[15]使用 MF-DCCA 方法,分析了我国碳排放权市场、能源市场和原油市场三者之间的交互相关性,发现三个市场之间的波动关系都存在着明显的多重分形特征,并且指明碳市场与其他两个市场的相关性较弱。汪文隽等^[16]基于 MF-DCCA 方法,发现欧盟和湖北碳排放市场在成立初期时的量价关系存在多重分形特征,且湖北省

碳市场的风险比欧盟碳市场的风险更大。

以上的分形分析方法虽然考虑了时间序列整体和局部的分形性质,但是金融市场的价格波动通常存在非对称性的多重分形特征^[17-20]。因此,为了反映时间序列在不同趋势(上升和下降)时的多重分形特征,Alvarez-Ramirez *et al.*^[21]将 DFA 方法改进为非对称去趋势波动分析(A-DFA)方法,用于考察时间序列标度行为的非对称性。碳市场作为金融市场中的新兴市场,在其价格上升和下降的不同阶段也展现出不同的波动行为。然而,鲜有文献对碳市场的价格波动进行非对称性分析,同时也没有将成熟碳市场与新兴碳市场的非对称波动行为进行比较研究。鉴于此,本文将运用非对称多重分形去趋势波动分析(A-MF-DFA)方法^[22],比较分析中国湖北省碳排放权交易市场和欧盟碳排放权交易市场价格波动的非对称性特征、市场效率,并探究两个市场在价格波动的不同趋势下多重分形性的来源。本文的实证研究更加精细地刻画了碳市场在上升或下降趋势时的波动特征及市场效率,丰富了碳市场研究的文献,而关于中欧两个市场的比较研究结果则可以对中国建立全国统一的碳排放权市场提供有益参考。

二、A-MF-DFA 方法描述

给定时间序列 $\{x(t)\}$, $t=1, 2, \dots, N$ 其中的 N 表示时间序列的长度。

第 1 步 构造侧面序列。

$$y(t) = \sum_{j=1}^t (x(j) - \bar{x}), t = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

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

第 2 步 将序列 $\{x(t)\}$ 和 $\{y(t)\}$ 划分成长度为 s 的 $N_s = [N/s]$ 个互不重叠的子序列, $[\cdot]$ 表示向下取整函数。为了使序列的所有数据都能参与计算,从序列的末端再对其进行同样的分割,这样就得到了 $2N_s$ 个子序列。在分割中,一般设定 $5 \leq s \leq N/4$ 。将序列 $\{x(t)\}$ 及其侧面序列 $\{y(t)\}$ 的长度为 s 的第 j 个子序列 $\{X_{j,k}\}$ 和 $\{Y_{j,k}\}$ 表示如下:

当 $j=1, 2, \dots, N_s$ 时,有:

$$\begin{cases} X_{j,k} = x[(j-1)s+k], \\ Y_{j,k} = y[(j-1)s+k], \end{cases} k=1, 2, \dots, s \quad (2)$$

当 $j=N_s+1, N_s+2, \dots, 2N_s$ 时,有:

$$\begin{cases} X_{j,k} = x[N-(j-N_s)s+k], \\ Y_{j,k} = y[N-(j-N_s)s+k], \end{cases} k=1, 2, \dots, s \quad (3)$$

第 3 步 用最小二乘法拟合侧面序列 $2N_s$ 个子序列的局部趋势。第 j 个子序列 $\{Y_{j,k}\}$ 的线性拟合函数取为:

$$Y_j(k) = a_{yj} + b_{yj}k, j=1, 2, \dots, 2N_s \quad (4)$$

计算方差:

$$F^2(j, s) = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s [Y_{j,k} - \tilde{Y}_j(k)]^2 \quad (5)$$

第 4 步 构造 q 阶平均波动函数。

当 $q \neq 0$ 时,有:

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{2N_s} \sum_{j=1}^{2N_s} [F^2(j, s)]^{q/2} \right\}^{1/q} \quad (6)$$

$$F_q^+(s) = \left\{ \frac{1}{M^+} \sum_{j=1}^{2N_s} \frac{\text{sign}(b_{yj}) + 1}{2} [F^2(j, s)]^{q/2} \right\}^{1/q} \quad (7)$$

$$F_q^-(s) = \left\{ \frac{1}{M^-} \sum_{j=1}^{2N_s} \frac{-[\text{sign}(b_{yj}) - 1]}{2} [F^2(j, s)]^{q/2} \right\}^{1/q} \quad (8)$$

当 $q=0$ 时,有:

$$F_0(s) = \exp\left\{\frac{1}{4N_s} \sum_{j=1}^{2N_s} \ln[F^2(j, s)]\right\} \quad (9)$$

$$F_0^+(s) = \exp\left\{\frac{1}{M^+} \sum_{j=1}^{2N_s} \frac{\text{sign}(b_{yj} + 1)}{2} \ln[F^2(j, s)]\right\} \quad (10)$$

$$F_0^-(s) = \exp\left\{\frac{1}{M^-} \sum_{j=1}^{2N_s} \frac{-[\text{sign}(b_{yj}) - 1]}{2} \ln[F^2(j, s)]\right\} \quad (11)$$

其中 $M^+ = \sum_{j=1}^{2N_s} \frac{\text{sign}(b_{yj}) + 1}{2}$ 和 $M^- = \sum_{j=1}^{2N_s} \frac{-[\text{sign}(b_{yj}) - 1]}{2}$ 分别代表上升和下降趋势的子序列个数。

如果 $b_{yj} \neq 0, j = 1, 2, \dots, 2N_s$, 则有 $M^+ + M^- = 2N_s$ 。

第 5 步,如果时间序列存在长程幂律相关关系,则有:

$$F_q(s) \sim s^{H(q)}, F_q^+(s) \sim s^{H^+(q)}, F_q^-(s) \sim s^{H^-(q)} \quad (12)$$

其中 $H(q)$ 、 $H^+(q)$ 和 $H^-(q)$ 分别为整体趋势、上升趋势和下降趋势的广义 Hurst 指数,它们可以用来描述时间序列在不同趋势下幂律关系的标度行为。如果 $H(q)$ 、 $H^+(q)$ 或 $H^-(q)$ 随着 q 的变化而变化,说明序列的自相关关系是多重分形的,否则是单分形的。此外,若 $H(q)$ 、 $H^+(q)$ 或 $H^-(q) > 0.5$,说明序列的自相关关系是持续性的;若 $H(q)$ 、 $H^+(q)$ 或 $H^-(q) < 0.5$,说明序列的自相关关系是反持续性的;如果 $H(q)$ 、 $H^+(q)$ 或 $H^-(q) = 0.5$,则说明时间序列服从正态分布^[10]。

广义 Hurst 指数 $H(q)$ 和 Renyi 指数 $\tau(q)$ 有如下关系:

$$\tau(q) = qH(q) - 1 \quad (13)$$

若 $\tau(q)$ 随着 q 非线性变化,则说明时间序列存在多重分形特征^[23]。

对式(13)作 Legendre 变换,得到时间序列的奇异指数 α 和多重分形谱 $f(\alpha)$ 。

$$\alpha = H(q) + qH'(q) \quad (14)$$

$$f(\alpha) = 1 + q[\alpha - H(q)] \quad (15)$$

多重分形谱 $f(\alpha)$ 可以用来描述时间序列的多重分形性。如果时间序列是多重分形的,则 $f(\alpha)$ 呈钟形状。 $f(\alpha)$ 的宽度越大,表明序列的多重分形性越强,市场的效率越低,因而市场的风险就越高^[24]。

三、数据处理与统计检验

由于欧盟碳排放权市场是世界上形成最早、交易体系最完善、成交量最大的碳排放权市场,因此,本文选取欧盟碳排放配额(EUA)交易的每日结算价格作为研究的第一组样本数据,样本时间从2014年4月28日到2021年10月19日,此阶段的欧盟碳市场已经相对成熟。虽然中国的碳排放市场起步较晚,但是湖北省的碳排放配额和交易额都位居中国碳交易试点省市第一,发展迅速。因此,我们选取中国湖北省碳排放配额(HB)交易的每日结算价格作为第二组样本数据,选取的样本时间与所选欧盟碳市场的样本时间相同。首先对样本数据进行对数差处理,得到日对数收益率序列,分别有1875个和1728个有效样本^①。

图1和图2分别展示了欧盟和湖北省碳排放配额交易的日价格和日收益率的波动情况。从图1可以看到,从2018年初到2018年8月,EUA的价格进入第一个上涨期,之后一直在20欧元至30欧元之间波动;但从2020年9月到2021年10月,EUA的价格快速上涨,已达到65欧元左右。湖北省碳排放权市场价格从2018年的6月到2019年5月进入明显的上涨期,并于2019年5月达到了价格巅峰,接近55元左右;价格随后开始下跌,直至2020年6月份,接下去又开始逐渐回升。此外,我们看到2019年底暴发的新冠疫情对于两个市场的价格影响不大。从图2可以看到整个样本时期,湖北省市

^①数据来源于 Wind 数据资讯。

场比欧盟市场的价格波动更加剧烈,但是欧盟市场的连续效应更为明显。

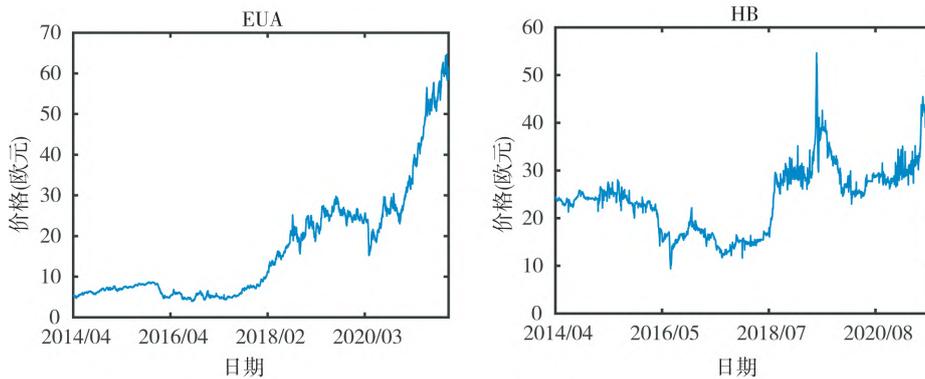


图1 欧盟和湖北省碳排放配额交易的每日价格动态

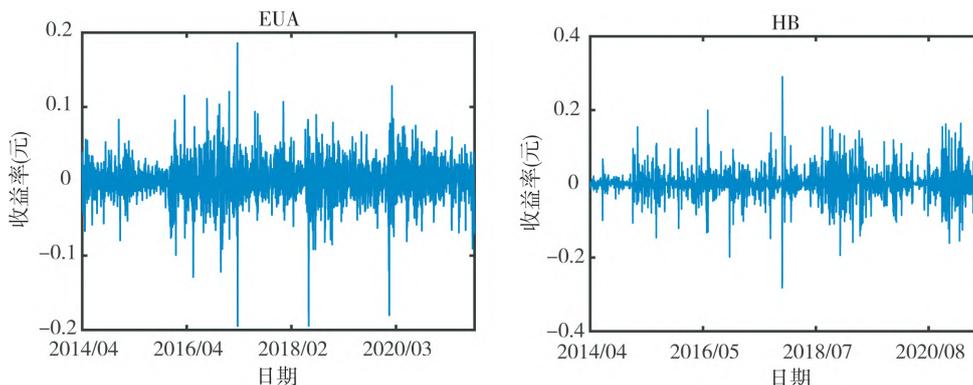


图2 欧盟和湖北省碳排放配额交易的每日价格收益率动态

表1 EUA与HB收益率序列的描述性统计量

	均值	最大值	最小值	标准差	峰度	偏度	J-B 统计量
EUA	0.001 3	0.185 9	-0.194 7	0.028 9	8.003 7	-0.313 1	1 986.672 ***
HB	0.000 3	0.290 0	-0.282 3	0.040 2	9.197 8	0.077 8	2 767.498 ***

注: ***表示在1%的显著性水平下拒绝原假设。

表1展示了欧盟和湖北省碳排放配额价格收益率序列的描述性统计量。由表1可知,HB市场的标准差比EUA的标准差大,这说明湖北省碳排放权市场价格波动更加剧烈,可能是由于中国碳排放市场建立较晚、市场尚不成熟、信息效率比较低,因此更容易受到宏观经济活动的影响^[25-27]。表1中两个收益率序列的偏度都不为0,欧盟市场是左偏,而湖北省市场向右偏,且两个序列的峰度均大于3,这说明两个市场的收益率序列均不服从正态分布,分别存在左偏、右偏和尖峰胖尾的分布特征。J-B统计量也表明在1%的显著性水平下,两个市场都拒绝正态分布的原假设。

四、多重分形实证分析

(一) 多重分形性分析

本文将运用A-MF-DFA方法对EUA和HB收益率序列的波动特征进行实证分析。

图3绘制了两个收益率序列的 $\log F_2(s) \sim \log(s)$ 。从图3可以看出,无论是欧盟碳排放权市场还是湖北省碳排放权市场,上升趋势和下降趋势的波动图不完全重合,这就说明两个市场都存在明显的非对称多重分形特征。对于欧盟碳市场而言,在整个时期内,大时间尺度下,上升和下降趋势与整体趋势之间的偏差相对较大;而对于湖北省碳排放权市场而言,在整个时期内,上升和下降趋势与整体趋势的偏差相对较小。因此,欧盟碳市场的长期投资者应当注意长期投资的不对称性影响。

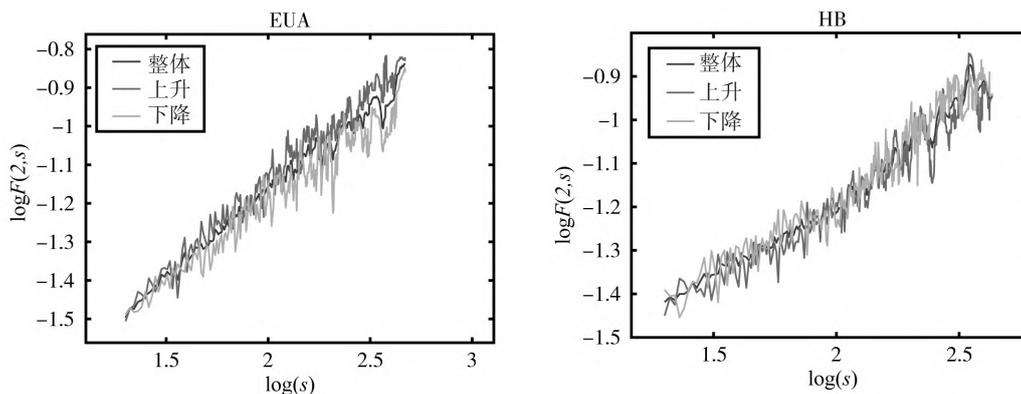
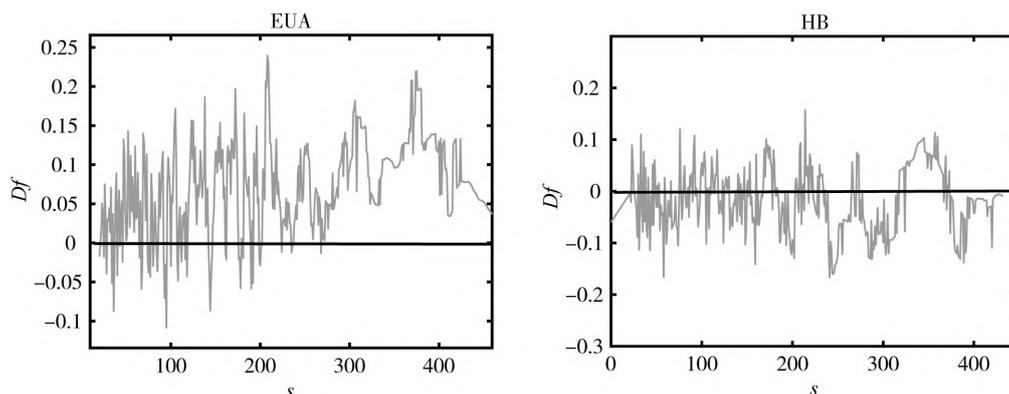
图3 欧盟和湖北省碳排放权市场的 $\log F_2(s) \sim \log(s)$ 

图4 欧盟和湖北省碳排放权市场多重分形性的过度不对称性动态

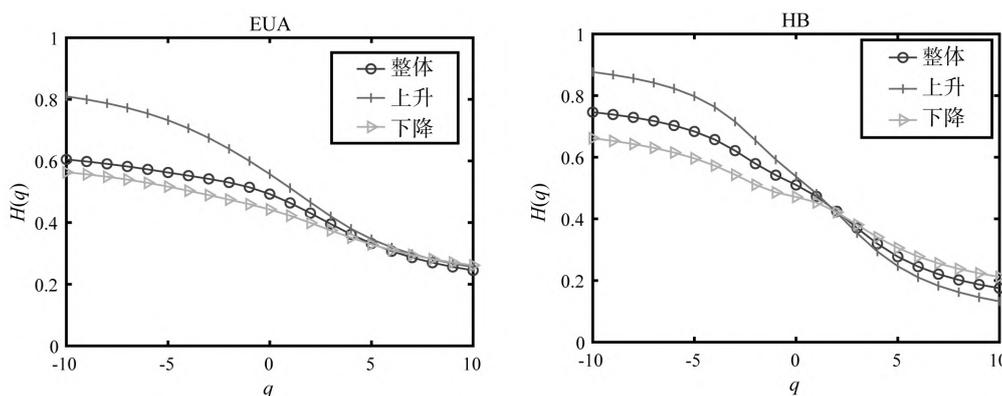


图5 欧盟和湖北省碳排放权市场的广义 Hurst 指数

图4描绘的是欧盟市场和湖北省市场多重分形性的过度不对称性的动态,其中,纵坐标 $Df = \log F_2^+(s) - \log F_2^-(s)$ 。由图4可见,在样本时期内,两个市场都表现出上行和下行的多重分形特征。

图5给出了当 q 取值 -10 到 10 时,由 A-MF-DFA 方法计算得到的广义 Hurst 指数。从图中可以看出,随着 q 的增大,不同趋势下的广义 Hurst 指数值逐渐减少,而且上升和下降趋势的 Hurst 指数值不一样,这也说明欧盟和湖北省两个市场的波动都存在非对称的多重分形特征,市场的有效性会受到市场趋势和时间标度的影响。总体来说,两个市场在小波动时的非对称性比在大波动时更加明显。对于欧盟市场,在小波动情形下,下降趋势的 Hurst 指数更接近于整体趋势的 Hurst 指数,而在大波动情形下,三种趋势的 Hurst 指数几乎一致,这说明在小波动下,欧盟市场在价格上涨时的波动不对称性更加显著,因而隐含的风险将高于下降时的风险。在湖北省市场中,无论是小波动还是大波动,上升

趋势和下降趋势的 Hurst 指数与整体趋势的 Hurst 指数之间的差距都比较接近,说明无论是在小波动下的正持续性,还是大波动下的反持续性,湖北省市场在上升与下降两种趋势时的波动非对称性都较明显,但上升趋势的多重分形性更强,隐含的风险更高。

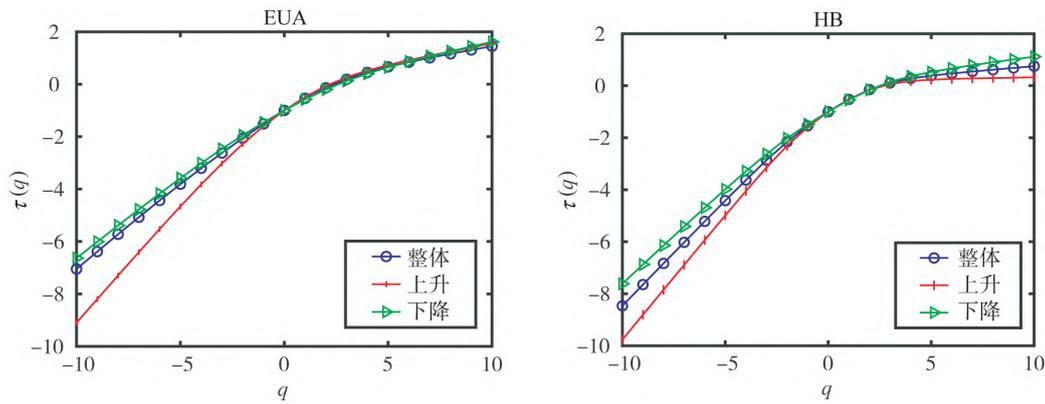


图 6 欧盟和湖北碳排放权市场的 $\tau(q) \sim q$

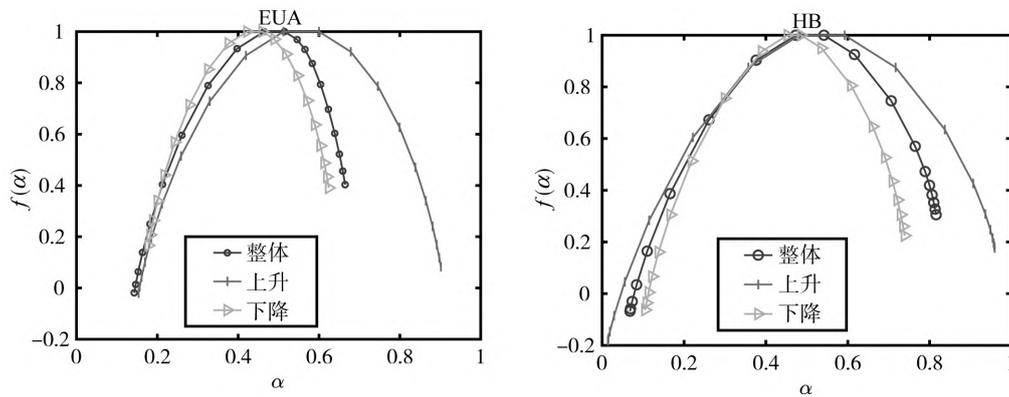


图 7 欧盟和湖北碳排放权市场的多重分形谱 $f(\alpha) \sim \alpha$

图 6 绘出了 Renyi 指数 $\tau(q) \sim q$,可以看出 $\tau(q)$ 图形是向上凸的曲线,反映了 $\tau(q)$ 是 q 的非线性函数,说明 EUA 和 HB 市场都存在多重分形特征。此外,可以看到,无论是小波动还是大波动,EUA 市场下降趋势与整体趋势的 $\tau(q) \sim q$ 图的形状非常接近;而在小波动下,上涨趋势与整体趋势之间的差距比较明显,说明在小波动下,价格上涨时的市场效率较低。对于 HB 市场,无论是小波动还是大波动,上升和下降趋势与整体趋势之间都存在较明显的差异,说明 HB 市场的总体效率均较低。

图 7 给出了 EUA 和 HB 碳市场的多重分形谱 $f(\alpha) \sim \alpha$,可以看出两个市场在不同趋势下的多重分形谱图均呈钟形,进一步证实了两个市场在不同趋势下的波动具有多重分形特征,且上升趋势的图形开口最大,说明两个市场上升趋势时的多重分形行为要比整体和下降趋势时的更加复杂。

为了量化两个市场的有效性,我们运用市场效率测度(MDM)来计算市场的效率,公式如下^[28]:

$$MDM = \frac{1}{2} [|H(-10) - 0.5| + |H(10) - 0.5|] \quad (16)$$

若 MDM 的值为 0,则说明市场是有效的。MDM 的值越大,说明市场越低效。表 2 给出了两个市场在不同趋势下市场效率的测度值。从表 2 可以看到,所有的 MDM 值均不为 0,说明两个市场都是低效的,且两个市场在上升趋势时的效率都是最低的。进一步可以看到,在三种趋势下,HB

表 2 两个市场效率的测度

	Overall	upwards	downwards
EUA	0.115 2	0.193 0	0.093 8
HB	0.203 2	0.275 8	0.145 4

市场的效率均低于欧盟市场的效率。可能的原因是,在样本时期内,欧盟碳市场已经相对比较成熟了,而中国的碳排放市场才建立不久,尚需进一步完善。

(二) 多重分形性来源分析

接下来本文将探讨在上升和下降的不同趋势下,两个市场价格收益率序列的多重分形性来源。一般地,时间序列的多重分形性主要来源于两个方面:一是由于小波动和大波动引起的不同长程相关性;二是波动中的胖尾分布^[29]。多重分形性究竟是受长程相关性还是胖尾分布的影响,可以通过对原始序列进行打乱重排,得到打乱序列;再对原始序列进行相位随机化处理,得到替代序列;最后通过比较原始序列、打乱序列和替代序列的多重分形强度(Δh)和多重分形谱宽度($\Delta\alpha$)来判断。

图8展示了在上升趋势下,EUA和HB两个市场收益率序列(原始、打乱和替代序列)的广义Hurst指数。图9展现了相应的多重分形谱。表3给出了相应的多重分形参数。由图8和表3可见,在上升趋势下,两个收益率序列(原始、打乱和替代序列)的广义Hurst指数均随 q 的变化而变化,并且所有打乱序列和替代序列的多重分形强度 Δh 值均小于它们的原始序列的 Δh 值,说明在上升趋势下,原始序列的长程相关性和胖尾分布对其多重分形性均有贡献,但由于两个替代序列的 Δh 值明显小于打乱序列的 Δh 值,表明胖尾分布对这两个原始序列的多重分形性贡献更大。另外,通过观察图9和表3可发现,替代序列的多重分形谱宽度 $\Delta\alpha$ 值最小,说明胖尾分布对两个收益率序列多重分形性的影响更大。

图10、图11和表4分别展示了在下降趋势下,EUA和HB收益率序列(原始、打乱和替代序列)的广义Hurst指数、多重分形谱和多重分形参数。由此可见,在下降趋势下,EUA打乱序列的多重分形强度 Δh 和多重分形谱宽度 $\Delta\alpha$ 略小于原始序列的 Δh 和 $\Delta\alpha$,而替代序列的 Δh 和 $\Delta\alpha$ 明显小于原始序列的 Δh 和 $\Delta\alpha$,说明在下降趋势下,胖尾分布是EUA原始序列多重分形性的主要来源。而HB打乱序列的 Δh 和 $\Delta\alpha$ 均大于原始序列的 Δh 和 $\Delta\alpha$,替代序列的 Δh 和 $\Delta\alpha$ 均显著小于原始序列的 Δh 和 $\Delta\alpha$,说明胖尾分布对该序列的多重分形性影响更大。简而言之,在下降趋势下,胖尾分布是造成EUA和HB收益率序列多重分形性的主要来源。

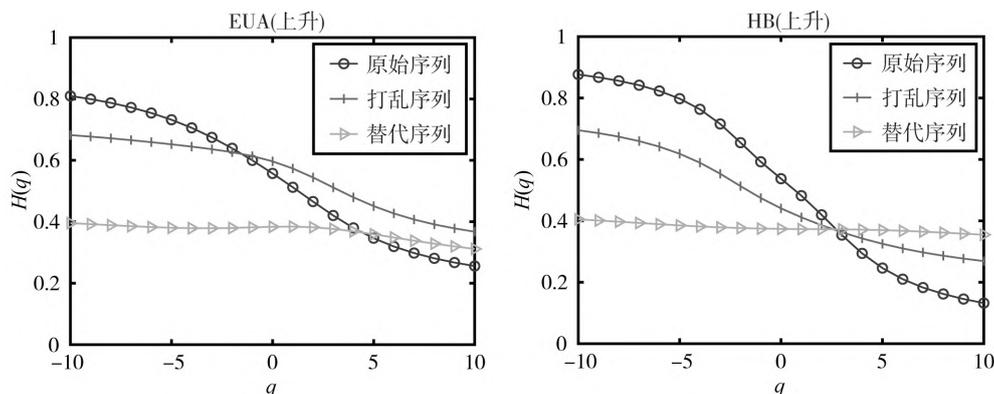


图8 上升趋势下两个收益率序列的广义Hurst指数

表3 上升趋势下两个收益率序列的多重分形参数

序列	EUA		HB	
	Δh	$\Delta\alpha$	Δh	$\Delta\alpha$
原始序列	0.553 8	0.747 6	0.744 3	0.944 9
打乱序列	0.314 8	0.457 1	0.426 2	0.583 3
替代序列	0.084 0	0.187 3	0.050 1	0.115 6

表4 下降趋势下两个收益率序列的多重分形参数

序列	EUA		HB	
	Δh	$\Delta\alpha$	Δh	$\Delta\alpha$
原始序列	0.301 9	0.446 4	0.450 2	0.634 0
打乱序列	0.287 7	0.419 9	0.594 6	0.818 1
替代序列	0.146 1	0.238 7	0.046 1	0.116 1

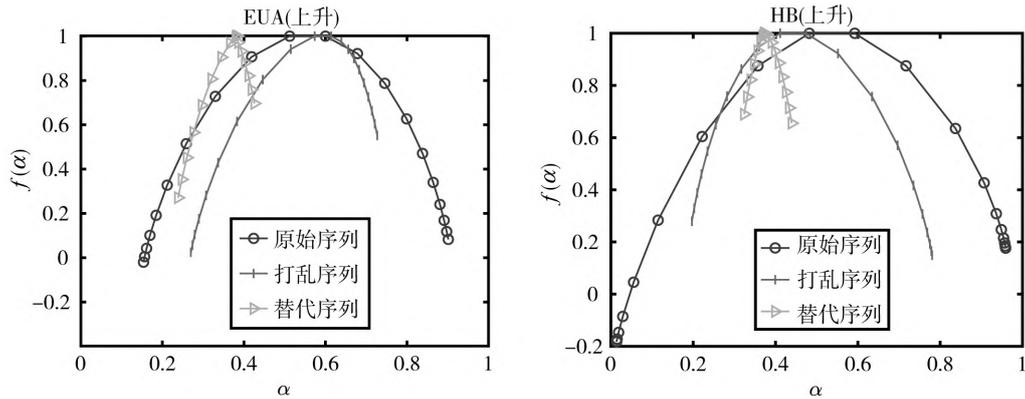


图9 上升趋势下两个收益率序列的多重分形谱

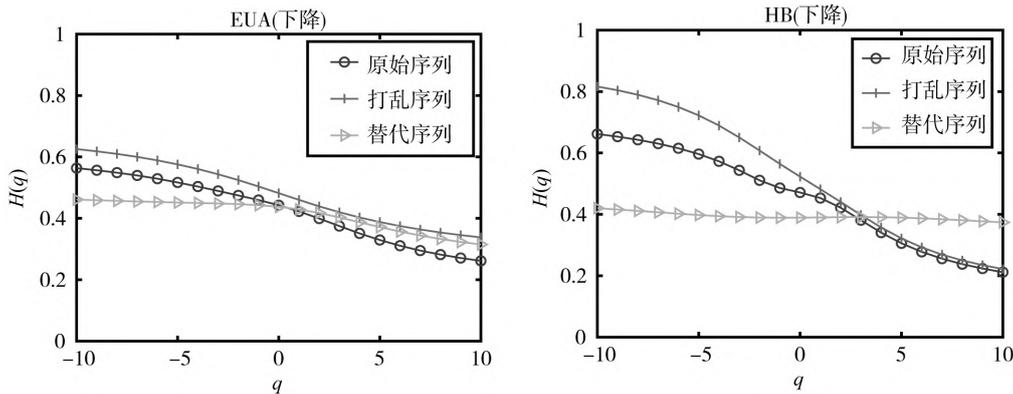


图10 下降趋势下两个收益率序列的广义Hurst指数

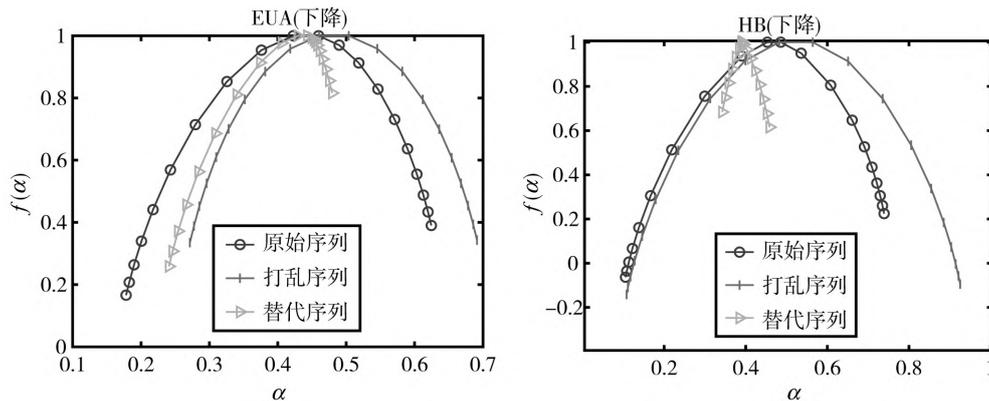


图11 下降趋势下两个收益率序列的多重分形谱

五、结论与建议

本文使用 A-MF-DFA 方法,实证研究欧盟和中国碳排放权市场在整体、上升和下降趋势下的多重分形性及市场有效性,并且探究了两个市场收益率序列多重分形性的来源,得到以下三个主要结论: (1) 欧盟和中国碳排放权市场的波动都存在非对称多重分形性,且上升趋势的多重分形性更强。具体来说,在小波动下,欧盟碳排放权市场在上升趋势时的不对称多重分形性更加显著;对于湖北省碳排放权市场,无论是小波动还是大波动,市场的非对称波动都较明显,但上升趋势的多重分形性更强。(2) 两个市场均非有效市场,湖北省碳排放权市场的效率更低。欧盟碳排放权市场在价格下跌时,市场效率与整体市场的效率比较接近;而湖北省市场在价格上涨时效率最低。(3) 两个市场收益率序列多重分形性的主要来源在不同趋势下有所不同。在上升趋势时,两个序列的长程相关性和胖尾分布均是引起多重分形性的主要来源,但是胖尾分布对多重分形性的贡献更大;而在下降趋势时,只有胖

尾分布是造成两个序列多重分形性的主要来源。

根据欧盟和中国碳市场的波动特征及市场效率的分析,本文为中国碳市场的政策制定者和投资者提出如下三点建议:(1) 鉴于全球经济一体化的发展趋势,欧盟碳市场和中国碳市场在不同趋势下的市场波动必然存在一定的联系。对于新兴的中国碳市场而言,自然会受到世界上较为成熟的碳市场的影响,并且两者在不同趋势下的波动特征也存在一定的相似性。因此,建议我国政府相关部门借鉴欧盟碳市场的发展经验,制定适合中国国情的碳排放权交易政策,提高市场信息披露程度,规范市场投资行为,提高市场效率。(2) 鉴于我国目前碳市场的交易主要是现货交易,投资主体主要是相关控排企业,个人投资者和投资机构参与较少,导致市场交易不活跃、流动性不高,市场也不具备价格发现功能,因此,从碳市场的长远发展来看,应该加强市场资源配置,建立碳市场的期货交易机制,这也是保障“双碳”目标得以实现的重要制度设计,有助于推动我国碳排放市场的健康稳定发展。(3) 对于投资者而言,在选择欧盟市场交易时,应注意保持投资组合的多样化和风险管理;而在进行中国碳市场交易时,要注意控制短期内的投资风险。

参考文献:

- [1] BYUN S J, CHO H. Forecasting carbon futures volatility using GARCH models with energy volatilities [J]. *Energy economics*, 2013, 40(C): 207-221.
- [2] ZHOU K, LI Y. Influencing factors and fluctuation characteristics of China's carbon emission trading price [J]. *Physica A*, 2019, 524(5): 459-474.
- [3] YE S Q, DAI P F, NGUYEN H T, et al. Is the cross-correlation of EU carbon market price with policy uncertainty really being? A multiscale multifractal perspective [J]. *Journal of environmental management*, 2021, 298(5): 113490.
- [4] GUO L, FENG C. Are there spillovers among China's pilots for carbon emission allowances trading? [J]. *Energy economics*, 2021, 103(C): 105574.
- [5] 辛姜, 赵春艳. 中国碳排放权交易市场波动性分析——基于 MS-VAR 模型 [J]. *软科学* 2018(11): 134-137.
- [6] 魏宇, 张佳豪, 陈晓丹. 基于 DMS 和 DMA 的我国碳排放权交易价格预测方法研究——来自湖北碳市场的经验证据 [J]. *系统工程* 2022(4): 1-16.
- [7] KIM J, PARK Y J, RYU D. Stochastic volatility of the futures prices of emission allowances: a Bayesian approach [J]. *Physica A*, 2017, 465(C): 714-724.
- [8] 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(C): 9-15.
- [9] 刘静. 欧盟碳排放市场分形特征研究 [D]. 北京: 北方工业大学 2015.
- [10] 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): 87-114.
- [11] CAO G, XU W. Multifractal features of EUA and CER futures markets by using multifractal detrended fluctuation analysis based on empirical model decomposition [J]. *Chaos solitons & fractals*, 2016, 83(C): 212-222.
- [12] 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(5): 113333.
- [13] ZHUANG X, WEI Y, ZHANG B. Multifractal detrended cross-correlation analysis of carbon and crude oil markets [J]. *Physica A*, 2014, 399(2): 113-125.
- [14] ZOU S, ZHANG T. Multifractal detrended cross-correlation analysis of the relation between price and volume in European carbon futures markets [J]. *Physica A*, 2020, 537(2): 122310.
- [15] 王宏勇, 冯佑帅. 中国碳市场、能源股票市场和原油市场的多重分形分析 [J]. *南京财经大学学报* 2020(2): 49-59.
- [16] 汪文隽, 汤丽娟, 陈玲玲. 欧盟和湖北碳市场量价关系的多重分形特征对比研究 [J]. *云南师范大学学报(哲学社*

- 会科学版) 2017(1) : 107-114.
- [17] NAEEM M A , BOURI E , PENG Z , et al. Asymmetric efficiency of cryptocurrencies during COVID-19 [J]. *Physica A* , 2021 , 565(2) : 125562.
- [18] YAO C Z , MO Y N , ZHANG Z K. A study of the efficiency of the Chinese clean energy stock market and its correlation with the crude oil market based on an asymmetric multifractal scaling behavior analysis [J]. *North American journal of economics and finance* , 2021 , 58(12) : 101520.
- [19] MENSİ W , VO X V , KANG S H. Upward/downward multifractality and efficiency in metals futures markets: the impacts of financial and oil crises [J]. *Resources policy* , 2022 , 76(10) : 102645.
- [20] REHMAN M U , AHMAD N , VO X V. Asymmetric multifractal behaviour and network connectedness between socially responsible stocks and international oil before and during COVID-19 [J]. *Physica A* , 2022 , 587(2) : 126489.
- [21] ALVAREZ-RAMIREZ J , RODRIGUEZ E , ECHEVERRIA J C. A DFA approach for assessing asymmetric correlations [J]. *Physica A* , 2009 , 388(12) : 2263-2270.
- [22] CAO G , CAO J , XU L. Asymmetric multifractal scaling behavior in the Chinese stock market: based on asymmetric MF-DFA [J]. *Physica A* , 2013 , 392(4) : 797-807.
- [23] SHADKHOV S , JAFARI G R. Multifractal detrended cross-correlation analysis of temporal and spatial seismic data [J]. *The European physical journal B* , 2009 , 72(4) : 679-683.
- [24] ZUNINO L , TABAK B M , FIGLIOLA A , et al. A multifractal approach for stock market inefficiency [J]. *Physica A* , 2008 , 387(26) : 6558-6566.
- [25] 武思彤. 中国碳价格影响因素研究[D]. 长春: 吉林大学 2017.
- [26] 王小燕, 周思敏, 徐晓莉, 等. 基于图结构自适应 Lasso 的碳排放权价格影响因素分析[J]. *统计与信息论坛* 2022 (4) : 73-83.
- [27] 赵振智, 程振, 吕德胜. 国家低碳战略提高了企业全要素生产率吗? ——基于低碳城市试点的准自然实验[J]. *产业经济研究* 2021(6) : 101-115.
- [28] WANG Y , LIU L , GU R. Analysis of efficiency for Shenzhen stock market based on multifractal detrended fluctuation analysis [J]. *International review of financial analysis* , 2009 , 18(5) : 271-276.
- [29] ZHOU W. 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)

Asymmetric Multifractal Statistical Analysis of Carbon Emission Markets in China and EU

WANG Hongyong , XU Liuliu

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

Abstract: The establishment of China's carbon emission market has great significance to promote the sustainable development of economic society. The volatility characteristics and market efficiency of the carbon emission market have attracted widespread attention. Taking the Hubei carbon emission market and the EU carbon emission market as research objects , this paper uses the asymmetric multifractal detrended fluctuation analysis (A-MF-DFA) method to study multifractal characteristics and market efficiency of the two carbon markets , and to analyze sources of market multifractality under different trends. The empirical results indicate evidence of an obvious asymmetrical multifractal characteristic for the volatility of two markets , and that the multifractality of the two markets in upward trends is stronger than that in downward trends. The efficiency of the EU market is slightly higher than that of the Chinese market. In addition , it is pointed out that the multifractality of return series of the two markets in upward trends comes from the long range correlation and the fat-tailed distribution , but the fat-tailed distribution contributes more to the multifractality , while in the downward trends , the fat-tailed distribution is the main source of multifractality.

Key words: carbon emission market; asymmetry; multifractal analysis; market effectiveness