

欧盟 EUA 和 sCER 碳期货市场的动态套利研究

Dynamic arbitrage study on the EUA and sCER carbon markets

张跃军^{1,2} 李丰羽³ 郭晓钊⁴ 常影⁵ (1.湖南大学工商管理学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学资源与环境管理研究中心, 湖南 长沙 410082; 3. 山东鲁信实业集团有限公司, 湖南 济南 250101; 4. 北京理工大学机电学院, 北京 100081; 5. 中国 21 世纪议程管理中心, 北京 100038)

摘 要 欧盟碳排放交易体系 (EU ETS) 的碳排放配额 (EUA) 和清洁发展机制 (CDM) 下经核准的碳减排量二级市场 (sCER) 交易已经成为国际典型碳期货市场。本文引入 GARCH 类模型研究它们之间的动态时变相关性, 在此基础上考察各种套利策略的有效性。结果表明, EUA 收益率和 sCER 收益率之间存在显著的时变相关性, 而且, 在样本区间内, 除全球金融危机动荡期间之外, 2009-2012 年大部分时期它们的相关程度保持在高位稳定水平。另外, 基于 GARCH 类模型的套利策略虽然能够获取时变最优套利比率, 但其有效性未必总是优于静态的 OLS 模型。

关键词 EUA; sCER; DCC-GARCH; 套利

免责声明 本文仅代表作者个人观点, 与中国 21 世纪议程管理中心、中国可持续发展研究会及联合国均无关。

Disclaimer: This brief was submitted through the Administrative Centre for China's Agenda 21 (ACCA21), Ministry of Science and Technology, China, and the Chinese Society for Sustainable Development (CSSD). The views and opinions expressed are those of the author(s) and do not necessarily represent the views of, and should not be attributed to, the Secretariat of the United Nations, the ACCA21 or the CSSD. Online publication or dissemination does not imply endorsement by the United Nations. For further information, please contact Mr. Sun Xinzhang (sunxzh@acca21.org.cn)

1 引言

碳市场是人类利用市场机制解决全球气候变暖问题的重要尝试。为了帮助欧盟成员国完成《京都议定书》提出的数量化温室气体减排目标 (即 2008-2012 年间, 欧盟温室气体排放量要比 1990 年降低 8%), 欧洲委员会从 2005 年开始实施欧盟排放交易体系 (EU ETS)。按照 EU ETS 的规定, 各成员国的排放设施每年都需要在实际排放量和被分配配额之间寻找平衡, 如果实际排放量超过了排放配额, 就需要从 EU ETS 碳市场购买配额 (EUA) 填补空缺。另外, 各排放设施也可以使用清洁发展机制 (CDM) 项目提供的经核准的减排量 (CER) 弥补配额的不足, 由于 CDM 项目发生在发展中国家, 往往还能有效减少减排成本。在 CDM 市场中, 一旦减排量得到联合国 CDM 执行委员会 (EB) 的核准, 就可以由项目开发引入碳市场交易, 从而形成 CDM 二级市场的经核准的减排量 (sCER)。

由于 EUA 和 sCER 碳市场之间的这种可替代性, 它们成为了碳期货市场投资者的重要选择。但是, 欧洲委员会限制了 CER 的使用比例, 即 2008-2012 年, CER 的使用量最高占总排放配额的 13.4%。为了突破排放限额, 相关排放设施可以采取不同的策略组合, 例如实质减排、购买 EUA、购买 sCER 等。Trotignon 和 Leguet 指出^[1], 2008 年, 欧盟成员国中 96% 的配额是 EUA, 3.9% 是 sCER (另外还有 0.1% 是 ERU)。在 EU ETS 体系中, 如何混合投资 EUA 和 sCER 期货合约, 如何获得最大的套利收益, 取决于它们之间的价格差异, 本质上体现了两种碳市场价格趋势的不同驱动机制。

自 2005 年实施碳交易以来, EUA 期货市场规模和影响力都快速增长, 目前已经成为全球碳市场的风向标; 而 sCER 期货市场经过几年发展也逐渐成为碳期货市场的重要组成部分。目前两种碳资产的期货合约都在洲际交

易所（ICE）自由交易，吸引了排放设施（企业）、碳基金、国际投行等相关利益者的密切关注。虽然跨市套利是一种较为稳健的保值和投资方式，但也面临比价稳定性、市场风险、信用风险、时间敞口风险、政策性风险等，鉴于此，考虑它们之间的套利策略及其有效性问题，对于市场投资者而言具有重要理论价值和现实意义。有学者在交流时曾质疑“既然套利机会存在，那么为何国际市场没有机构注意到这种套利机会？按照经济学常识理论，只要市场是有效的，即使存在各种套利机会，但市场上投资者的涌入会使这种套利机会消失”，对此，我们认为，EUA 和 sCER 市场套利机会的存在或者讲两者价差的存在是由于多方面的原因，例如，EUA 和 CER 具有不同的市场架构和管理制度，使用 CER 抵消排放配额具有上限（cap），参与 CER 二级市场交易的金融机构可能出现违约风险从而导致 CER 市场面临不确定性。关于这方面的详细论述，可以参阅 Nazifi^[12]。本文的贡献在于，在确认存在套利机会的情况下，我们通过动态模型，定量地分析、跟踪时变的套利机会，为投资者及时发现盈利机会和市场监管者及时看到市场极端风险而服务。

2011 年 11 月，中国国家发改委下发《关于开展碳排放权交易试点工作的通知》，正式批准在北京、天津、上海、重庆、湖北、广东、深圳“两省五市”开展碳排放权交易试点。2014 年 6 月起，两省五市碳交易试点全部开始实际交易，并计划“十三五”期间（2011-2015 年）建立起全国性的碳交易市场。但是，从目前碳市场交易状况看，各试点碳市场的交易机制和管理制度并不一致，市场价格相差较大^[2]，将来建成全国碳市场、允许全国范围内买卖和抵消碳排放配额时，将面临不同区域碳市场之间的套利问题。因此，研究欧洲碳市场套利问题对于我国政府层面规范碳市场建设、防范碳市场套利风险具有重要的实践意义和借鉴价值。

本文后续章节结构安排如下：第二部分综述前人相关研究成果；第三部分介绍本文的主要研究方法和样本

数据；第四部分是实证研究结果分析；第五部分总结全文。

2 相关文献综述

碳排放交易是国际社会为应对全球气候变暖并探索低碳经济发展而进行的金融创新，也是我国中央政府目前正在努力推动的一种节能减排市场机制。目前关于碳市场价格形成机制的研究可以主要归纳为三个方面。

首先，大量文献考察了碳价格的影响因素及其影响机制。碳市场不是一个简单的线性系统，受到一系列风险因素的综合影响，如市场供需、天气变化、国家配额分配计划、政府公告等。例如，Mansanet-Bataller 等^[3]讨论了 EU ETS 碳价与极端天气、能源价格的关系，发现大多数排放密集型能源品种都是决定碳价的主导因素，而且异常天气变化会影响碳价。Bunn 和 Fezzi^[4]采用结构 VAR 模型研究 EU ETS 的碳价与英国零售电力、天然气现货价格的关系，发现天然气价格会影响碳价，而且天然气价格和碳价都会影响电价变化。张跃军和魏一鸣^[5]利用状态空间模型、VAR 模型等方法发现欧洲化石能源价格与 EU ETS 碳价之间存在显著的长期均衡比例不断变化的协整关系，而且三种化石能源价格中，油价是影响碳价波动最显著的因素，其次是天然气和煤炭。

其次，部分文献对碳市场价格波动及其金融特征进行了深入研究。在各种风险因素综合作用下，碳市场的价格波动特征复杂，特别是后京都时代气候变化谈判存在不确定性，促使碳市场风险进一步加剧，为此，很多文献讨论了碳价的波动规律和风险状况。例如，Seifert 等^[6]采用随机均衡模型分析了 EU ETS 碳现货价格的行为特征，发现碳现货价格没有表现出季节性特性。Paolella 和 Taschini^[7]分析了欧洲碳价和美国二氧化硫价格的非条件尾部特征与异方差性，发现混合正态 GARCH 模型能够较好地反映价格的波动性。Benz 和 Trück^[8]对 EU ETS 碳现货价格收益率进行建模，发现 AR-GARCH 与马尔科夫机制转换模型能够反映碳价波动行为。

Daskalakis 等^[9]考察了 EU ETS 下三个交易所（即 Powernext、Nord Pool 和 ECX）碳价的关系，发现 EU ETS 禁止在阶段之间储存排放配额会增加碳期货定价的复杂度，对市场流动性和有效性形成负面影响。张跃军和魏一鸣^[10]引入均值回归理论、GED-GARCH 模型和 VaR 方法考察 EU ETS 碳期货市场的运行特征，发现 2005-2007 年 EU ETS 碳期货市场的价格、收益、市场波动以及市场风险的变化均不服从均值回归过程，发散性明显，暂时不具有可预测的特性。凤振华和魏一鸣^[11]运用 CAPM 模型分析了 EU ETS 的市场风险，结果发现，2005-2007 年第 2 阶段单个合约对市场风险的敏感性小于第 1 阶段，而且 2005-2007 年的系统风险和 2008-2009 年较为一致。

第三，部分文献讨论了碳市场与其他市场之间、不同碳市场之间的联动关系。例如，Oberndorfer^[12]分析了 EU ETS 碳价与电力公司股票价格的联动机制，发现 EUA 价格与欧盟最重要电力公司的股价之间呈现正相关，但是碳价上扬和下挫时，它们的关系并不对称，而且在不同时段、不同国家的情况有所区别。刘维泉和赵净^[13]利用 DCC-MVGARCH 模型分析主要股票市场与 EU ETS 碳期货价格的联动关系，结果表明主要股票市场与 EU ETS 期货价格具有直接或间接的联动关系，且是单方面的引导关系。Nazifi^[14]利用时变参数模型考察了 2008-2011 年 EUA 和 CER 价格差异的动态演化特征，研究指出，缺乏市场竞争、使用和获取 CER 受到限制、EUA 和 CER 管理制度的改变以及 CER 的不确定性，都对它们的价差产生了显著影响。类似地，王军锋等^[15]通过自回归模型和脉冲响应函数比较分析了 EUA 和 CER 价格之间的影响关系，发现碳排放配额的价格在市场上处于主导作用。Mansanet-Bataller 等^[16]讨论了第二阶段 EUA 与 sCER 的驱动因素，特别分析了它们之间出现价差的原因，文章为我们理解这两种不同碳市场的运行机制提供了重要参考。此外，前人在商品或股票期货市场套期保值或套利策略方面也已经开展了大量实证研究，为我们开展跨市场套利研究提供了重要方法基础。例如，Johnson^[17]、Ederington^[18]等较早提出用 Markowitz 的投资组合理论

来解释套期保值。之后，最优套期保值比率以及套期保值有效性问题成为期货市场研究的热门话题^[19-20]。在最优套期保值比率方面，Johnson^[17]提出的基于最小二乘法（OLS）的最小方差套期保值比率计算方法得到了广泛应用，但是该方法假定资产收益率残差服从正态分布或联合正态分布，具有固定的方差和协方差，因而算得的最优套期比率为常数，难以反映未来市场条件的不确定性，所以后来很多学者提出了最优动态套期保值比率并开展了实证研究^[21-22]。在选择不同的套期保值策略时，一般依赖于 Ederington^[18]提出的套期保值有效性度量方法。不过，目前讨论碳期货市场套利策略及其有效性的文献还不多。

综合起来，本文对前人相关文献的拓展主要表现在三个方面。首先，目前讨论碳市场的文献一般聚焦于单个碳市场价格波动、风险度量、制度分析等，本文考虑两个典型碳期货市场（即 EUA 和 sCER）之间的关系。其次，过去的相关研究主要以静态分析为主，本文考虑两个碳期货市场的动态时变相关性，研究结果将更加贴近现实。另外，本文讨论碳期货市场的时变动态套利问题，并讨论不同套利策略的有效性，目前这方面的研究还较少。

3 研究方法 with 数据

3.1 研究方法

3.1.1 DCC-GARCH 模型

我们采用 DCC-GARCH 模型考察 EUA 和 sCER 碳期货价格收益率之间的动态相关性。DCC-GARCH 模型 2002 年由 Engle^[23]提出，它使用了协方差的动态自回归过程。模型估计包括两步，首先，估计单变量 GARCH 模型的参数，用残差除以条件方差得到标准化的残差序列；然后，用标准化的残差序列估计出动态协方差矩阵的系数和条件相关系数。关于 DCC-GARCH 的详细探讨可以参阅 Santos 和 Moura 的文章^[24]。

3.1.2 动态最优套利比率

我们借鉴基于投资组合收益风险最小化（即最小方差）的最优套利保值比率，构建 EUA 和 sCER 两种碳期货市场投资组合的最优套利比率。而且，在上述动态相关性研究基础上分析两种碳期货合约之间互相对冲的动态最优套利比率。

下面以 sCER 对 EUA 期货合约进行跨市场套利为例介绍动态最优套利比率求解及其有效性测量方法。为了实现跨市场套利，sCER 和 EUA 的头寸总是相反的，sCER 和 EUA 期货合约构成的套利组合的收益率为：

$$R_p = R_{eua} - hR_{scer} \quad (1)$$

其中， R_p 为套利组合的收益率， R_{eua} 和 R_{scer} 分别为 EUA 和 sCER 碳期货价格的收益率， h 为最优套利比率。则

R_p 的方差为

$$\sigma_p^2 = \sigma_{eua}^2 + h^2\sigma_{scer}^2 - 2h\rho\sigma_{eua}\sigma_{scer} \quad (2)$$

其中， ρ 为两种碳期货价格收益率的相关系数， σ_{eua} 、 σ_{scer} 分别为 EUA、sCER 碳期货价格收益率的标准差。对方程（2）求关于 h 的一阶、二阶导数，分别得到方程

（3）、（4）：

$$d\sigma_p^2/dh = 2h\sigma_{scer}^2 - 2\rho\sigma_{eua}\sigma_{scer} \quad (3)$$

$$\frac{d^2\sigma_p^2}{dh^2} = 2\sigma_{scer}^2 \quad (4)$$

令方程（3）等于 0，解得：

$$h = \rho\sigma_{eua}/\sigma_{scer} \quad (5)$$

由于方程（4）右端恒大于 0，故方程（5）为基于最小方差原则的最优套利比率。

为了尽量反映碳期货市场的各种不稳定性因素对跨市场套利的影响，我们考虑动态最优套利比率，包括两种思路，一是通过 DCC-GARCH 模型估计出两种碳期货价格收益率的条件协方差矩阵，求得时变相关系数，同时考虑固定的标准差，代入方程（5）得到时变套利比率；

二是在时变相关系数的基础上，由 GARCH 类模型求得时变标准差，代入方程（5）计算时变套利比率。

不同套利策略或模型的选择依赖于对它们的有效性判断。跨市场套利有效性表示使用某种套利比率进行交易时，相对于没有进行套利时投资组合收益率风险的减少程度。本文采用在最优套期保值比率领域得到广泛认可的 Ederington^[18]方法，来度量两种碳期货合约跨市场套利的有效性，即：

$$H_{ec} = 1 - \sigma_p^2 / \sigma_u^2 \quad (6)$$

其中， H_{ec} 为套利的有效性， σ_p^2 为碳期货套利组合收益率的方差， σ_u^2 为不进行套利时收益率的方差，在此指 EUA 价格收益率的方差 σ_{eua}^2 。 H_{ec} 越大，说明跨市场套利的效果越好，反之则套利的效果越差。

3.2 数据说明

本文采用的两种碳期货市场价格包括欧盟排放交易体系（EU ETS）的欧盟配额（EUA）期货合约价格和清洁发展机制（CDM）二级市场的经核准的减排量（sCER）期货合约价格，考察的碳期货合约均为 EUA 和 sCER 的主流合约，即 DEC12 合约，该合约于 2012 年底到期。样本区间为 2009 年 1 月 12 日到 2012 年 12 月 17 日，由此得到 1005 个碳期货价格样本，单位为欧元/吨 CO₂。数据来自 ICE 交易所。为了缓冲碳期货价格序列的波动程度，本文采用对数百分收益率，即 $R_t = 100 \times \ln(P_t / P_{t-1})$ ，其中 P_t 表示第 t 日的碳期货价格。

EUA 和 sCER 碳期货价格走势分析：EUA 和 sCER 价格的走势基本一致，有利于进行 EUA 和 sCER 跨品种套利；同时，EUA 和 sCER 期货价格收益率均出现多个异常峰值，说明碳期货价格收益率波动具有突发性，不稳定因素影响明显。另外，经检验发现在样本区间内 EUA 和 sCER 期货价格收益率具有较高的相关性（两者线性相关系数为 0.6805），表明两者适合进行跨市场交易。

4 实证研究结果分析

4.1 碳期货价格收益率序列的基本统计特征

EUA 和 sCER 碳期货价格收益率的基本统计特征如表 1 所示。可见 EUA 和 sCER 期货价格收益率的偏度都不接近于 0，而峰度都大于 3，因此，它们都具有典型的尖峰厚尾特征。JB 统计量也表明，两种碳期货价格收益率序列应该都拒绝正态分布的原假设。另外，ADF 检验结果表明这两种碳期货价格收益率在 1% 的显著性水平下具有平稳性特征。

表 1 EUA 和 sCER 碳期货价格收益率的描述性统计

	均值	标准差	最大值	最小值	偏度	峰度	JB 统计量	ADF-t 统计量
EUA 收益率	-0.09	2.46	19.40	-	0.42	8.97	1520.63 (0.00)	-26.6358 (0.00)
sCER 收益率	0.36	3.64	19.51	-	-	13.58	4948.57 (0.00)	-21.9754 (0.00)

注：小括号内为相应的显著性概率。

4.2 碳期货价格收益率的波动集聚性分析

先采用 GARCH 模型分别对 EUA 和 sCER 碳期货价格收益率的波动集聚性建模。根据 GARCH 模型的系数要求和模型整体的 AIC 值最小准则，我们在比较 GARCH(1, 1)、GARCH(1, 2)、GARCH(2, 1) 和 GARCH(2, 2) 模型后，分别选择 GARCH(1, 1) 和 TGARCH(1, 1) 模型对 EUA 和 sCER 碳市场收益率进行建模。在建立 GARCH 类模型过程中一般假定模型的残差服从正态分布，但是 EUA 和 sCER 期货价格收益率的 GARCH(1, 1) 模型的残差项显著不服从正态分布，反而具有尖峰厚尾非正态分布的特征，因此利用正态分布建模会影响 GARCH 模型的准确性。鉴于此，我们引入 Nelson^[25] 提出的广义误差分布 (GED) 对 GARCH 类模型的残差项建模。结果如表 2 所示。

在 GARCH 类模型中，ARCH 项系数与 GARCH 系数之和刻画了碳价收益率波动冲击的衰减速度，其值越接近 1 表明衰减速度越慢。表 2 的结果表明，在 5% 的显著性水平下，方差方程中 ARCH 项和 GARCH 项都是显著的。而且 EUA 碳期货价格收益率的这两项系数之和为 0.9971，说明碳价收益率波动的衰减速度较慢，持续时间较长。sCER 期货价格收益率的 TGARCH(1, 1) 模型估计结果表明，ARCH 和 GARCH 系数之和为 0.9249，波动持续时间较长，但衰减速度略快于 EUA 的价格收益率；而且杠杆效应系数为 0.1447，说明 sCER 上涨和下跌的信息作用是非对称的，下跌过程伴随着更剧烈的波动性（即市场利空消息对价格收益率波动性的影响更大）。其中，EUA 和 sCER 价格收益率的 GARCH 项系数分别为 0.8806 和 0.8418，表明它们当期方差冲击的 88.06% 和 84.18% 在下期仍然存在。进一步对上述两种 GARCH 类模型估计结果的残差序列进行 ARCH-LM 检验，结果显示已不存在具有统计意义的 ARCH 效应，说明经过 GARCH 类模型的拟合后明显降低了原碳期货价格收益率序列的波动性，而且去掉了其条件方差性。

表 2 EUA 和 sCER 价格收益率的 GARCH 类模型估计结果

参数	EUA 价格收益率	sCER 价格收益率
均值方程		
AR(1)	-0.2287 (0.00)	---
MA(1)	0.4224 (0.00)	0.1662 (0.00)
方差方程		
常数项	0.0508 (0.03)	0.0814 (0.00)
ARCH 项	0.1165 (0.00)	0.0831 (0.00)
GARCH 项	0.8806 (0.00)	0.8418 (0.00)
杠杆效应系数	---	0.1447 (0.00)
AIC 值	4.2514	4.5753
对数似然值	-2126.097	-2290.335
GED 参数	1.5909 (0.00)	1.5547 (0.00)

注：EUA 和 sCER 价格收益率分别采用 GARCH 模型和 TGARCH 模型建模；--- 表示相应模型中没有该变量；小括号内为相应的显著性概率。

从基于上述 GARCH 模型求得的条件异方差序列中可见, EUA 和 sCER 期货价格收益率的波动确实具有时变特征, 采用固定标准差或方差难以反映碳价收益率的实际波动情况。特别是 2009 年初、2011 年末到 2012 年初, 受全球金融危机爆发、欧债危机深陷泥潭导致国际市场需求不确定性因素增多等影响, 碳期货市场收益率出现剧烈波动, 而且 sCER 碳期货价格收益率波动幅度相对更为明显, 特别是在 2012 年末。由于 CDM 市场目前还处于买方市场、供大于求现象突出, 另外, 2012 年是《京都议定书》第一承诺期的截止年份, 但第二承诺期的减排目标还存在较大不确定性, 政策性风险明显, 导致 sCER 价格持续走低、收益率波动剧烈。即便如此, 总体上看, 除了局部时段碳期货价格收益率显著波动外, 样本区间内其余大部分时段两种碳期货价格收益率的波动相对稳定, 并没有显著的结构性突变。

4.3 碳期货价格收益率的动态相关系数

在上述 GARCH 类模型估计结果的基础上, 我们进一步估计 EUA 和 sCER 期货价格收益率的 DCC-GARCH 模型, 求解它们的动态关联程度。计算得到: 首先, EUA 和 sCER 期货价格收益率的相关系数并非常数, 而是随时间呈现动态变化, 并且除部分特殊时段外的大多数时候呈现相对稳定的高度正相关。该动态相关系数的最小值为 0.48, 均值为 0.91, 标准差为 0.06。其次, 2009 年上半年及 2012 年上半年, 在全球金融危机缓慢复苏、欧债危机前景渺茫的背景下, 国际碳市场不确定性陡增, 由于 EUA 供给量更容易预测、程序相对简单, 而 CDM 市场的政策性风险、项目风险、基准线风险等突出, 使得一些先前大力参与 CDM 市场的主权买家纷纷转向碳排放交易 (ET) 市场; 而且, CDM 市场最大需求方——欧盟由于低碳经济政策效应逐步显现使得温室气体排放的需求逐步减少, 另外, 金融危机后一些金融机构和中介结构为了避险更倾向于投资被低估的资产, 这都导致 CDM 市场需求减少。归结起来, EUA 和 sCER 作为两种不同的碳期货

产品, 具有不同的定价机制, 导致在 2009 年上半年及 2012 年上半年, 它们的价格下跌幅度不一致, 相关性略有下挫并出现跳跃。

4.4 碳期货合约的套利比率比较分析

我们采用三种策略对 EUA 和 sCER 期货合约进行套利, 分别考虑使用 sCER 期货合约对 EUA 合约进行套利和使用 EUA 期货合约对 sCER 合约进行套利。

①根据 Johnson^[17]提供的最小二乘回归 (OLS) 方法进行套利。例如, 对 EUA 和 sCER 期货价格收益率进行最小二乘回归, 得到基于 OLS 估计的最优套利比率为 1.0067, 说明每单位 EUA 合约需要 1.0067 单位的 sCER 合约来对冲风险。类似地, 使用 EUA 期货合约对 sCER 合约进行套利的最优比率为 0.4600。

②把由前文 GARCH (1, 1) 类模型估计的 EUA 和 sCER 期货价格收益率的条件标准差代入方程 (5), 相关系数使用常相关系数, 即两种碳期货价格收益率的线性相关系数 0.6805, 得到基于常相关-GARCH 模型的最优动态套利比率。

③根据 DCC-GARCH 模型估计出 EUA 和 sCER 期货价格收益率的动态相关系数, 并采用 EUA 和 sCER 期货价格收益率序列的条件标准差, 代入方程 (5), 求得动态最优套利比率。

对三种交易策略的时变最优套利比率进行比较可知, 不论是哪个方向的套利交易, 基于 DCC-GARCH 模型与常相关-GARCH 模型的动态最优套利比率随时间不断变化但趋势基本一致, 而且前者略高; 另外, 使用 sCER 期货合约对 EUA 合约进行套利时, 它们基本上低于基于传统 OLS 方法的固定最优套利比率, 但使用 EUA 期货合约对 sCER 合约进行套利时, 它们基本上高于传统 OLS 方法的最优套利比率。换言之, 相比基于动态模型的套利策略, 采用基于 OLS 方法的静态套利策略可能高估或低估碳期货市场风险。

4.5 各种套利模型的有效性比较

根据方程（6）计算上述各种套利策略的有效性，并与完全套利策略（即套利比率固定为1）的有效性相比较，结果如表3所示。我们发现：

一方面，在使用 sCER 期货合约对 EUA 合约进行套利交易时，基于 DCC-GARCH 模型的有效性（0.6369）相对最高，其次是常相关-GARCH 模型（0.5992），最后是 OLS 方法（0.4630）和完全套利模型。但是，与静态套利模型相比，动态套利的有效性的幅度有明显提高，例如，基于常相关-GARCH 模型、DCC-GARCH 模型的套利有效性比基于 OLS 方法分别提高了 14、17 个百分点。

另一方面，在使用 EUA 期货合约对 sCER 合约进行套利交易时，基于 OLS 方法的套利的有效性（0.4630）相

对最高，与完全套利相近，而基于常相关-GARCH 模型（0.4477）和 DCC-GARCH 模型（0.4342）的动态套利的有效性稍逊于前两者。

可见，采用动态最优套利比率在 EUA 和 sCER 碳期货市场之间进行套利交易的有效性与静态方法相比，并不总是具有明显优势，动态模型在碳期货市场提高套利有效性的成效方面具有局限性。这与 Lien^[26]讨论期货与现货市场套期保值有效性时的研究结果类似。我们认为，这主要是由于在本文考察的样本区间内，大部分时候碳期货市场相对稳定，比价关系基本稳定，较少出现明显结构性突变的情况（即样本数据保持了相对稳定的条件方差和协方差），因此有时候采用 OLS 方法进行套利交易并不逊色。

表 3 各种套利策略的有效性比较

	sCER→EUA	EUA→sCER
完全套利	-0.1752	0.4630
基于 OLS 方法的套利	0.4630	0.4630
基于常相关-GARCH 模型的套利	0.5992	0.4477
基于 DCC-GARCH 模型的套利	0.6369	0.4342

注：sCER→EUA 表示使用 sCER 合约对 EUA 合约进行套利，EUA→sCER 表示使用 EUA 合约对 sCER 合约进行套利。

5 结论与展望

综合上述讨论分析，我们得到主要结论包括两个方面。一方面，EUA 和 sCER 碳期货价格收益率之间存在时变的相关性，而且除了 2009 年初、2011 年末和 2012 年初由于世界经济缓慢复苏，欧债危机持续发酵，市场不确定性明显，造成两种碳期货合约市场走势偏离之外，大部分时段两者的相关程度较高，可见 DCC-GARCH 类模型能够较好地刻画它们之间的动态关联性。

另一方面，GARCH 类模型考虑了碳期货价格波动的异方差特征，反映了时变的条件协方差和相关性，但是基于动态模型（包括 DCC-GARCH 和常相关-GARCH）的套利交易的有效性未必总是明显优于静态的 OLS 方法，甚至

有时候还不如 OLS 方法的有效性。我们认为原因主要是样本区间内大部分时期碳期货市场的行情相对稳定，特别是两种碳期货产品的比价关系基本稳定。这可以为相关利益者在碳期货市场选择跨市场套利的合适时机、时间跨度和交易策略提供决策参考，也将为我国投资者将来在国内跨碳市场投资提供借鉴。

当然，本文关于碳期货市场动态套利问题的研究也存在进一步拓展的空间，例如，将来可以考虑引入更多的动态模型进行套利交易，包括 BEKK-GARCH、CCC-GARCH、COPULA-GARCH 等，选择更加合适的模型支持投资决策。

参考文献

- [1] Trotignon R, Leguet B. How Many CERs by 2013[R]. Mission Climat Working Paper, 2009.
- [2] 庞韬, 周丽, 段茂盛. 中国碳排放权交易试点体系的连接可行性分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(9): 6-12.
- [3] Mansanet-Bataller M, Pardo-Tornero Á, Valor E. CO₂ Prices, Energy and Weather[J]. The Energy Journal, 2007, 28(3): 73-92.
- [4] Bunn D W, Fezzi C. Interaction of European carbon trading and energy prices[R]. FEEM Working Papers, 2007.
- [5] 张跃军, 魏一鸣. 化石能源市场对国际碳市场的动态影响实证研究[J]. 管理评论, 2010, 22(6): 34-41.
- [6] Seifert J, Uhrig-Homburg M, Wagner M. Dynamic Behavior of CO₂ Spot Prices[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2008, 56(2): 180-194.
- [7] Paoletta M S, Taschini L. An Econometric Analysis of Emission Allowance Price[J]. Journal of Banking & Finance, 2008, 32(10): 2022-2032.
- [8] Benz E, Trück S. Modeling the Price Dynamics of CO₂ Emission Allowances[J]. Energy Economics, 2009, 31(1): 4-15.
- [9] Daskalakis G, Psychoyios D, Markellos R N. Modeling CO₂ Emission Allowance Prices and Derivatives: Evidence from the European Trading Scheme[J]. Journal of Banking & Finance, 2009, 33(7): 1230-1241.
- [10] 张跃军, 魏一鸣. 国际碳期货价格的均值回归: 基于 EU ETS 的实证分析[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(2): 214-220.
- [11] 凤振华, 魏一鸣. 欧盟碳市场系统风险和预期收益的实证研究[J]. 管理学报, 2011, 8(3): 451-455.
- [12] Oberndorfer U. EU Emission Allowances and the Stock Market: Evidence from the Electricity Industry[J]. Ecological Economics, 2009, 68(4): 1116-1126.
- [13] Nazifi F. Modelling the Price Spread between EUA and CER Carbon Prices[J]. Energy Policy, 2013, 56: 434 - 445.
- [14] 刘维泉, 赵净. ECX 碳排放期货与欧美股市联动性研究: 基于 DCC-MVGARCH 模型的实证分析[J]. 兰州学刊, 2011, (5): 37-41.
- [15] 王军锋, 张静雯, 刘鑫. 碳排放权交易市场碳配额价格关联机制研究: 基于计量模型的关联分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1): 64-69.
- [16] Mansanet-Bataller M, Chevallier J, Hervé-Mignucci M, et al. EUA and sCER Phase II Price Drivers: Unveiling the Reasons for the Existence of the EUA-sCER Spread[J]. Energy Policy, 2011, 39(3): 1056-1069.
- [17] Johnson L L. The Theory of Hedging and Speculation in Commodity Futures[J]. Review of Economic Studies, 1960, 27(3): 139-151.
- [18] Ederington L H. The Hedging Performance of the New Futures Markets[J]. Journal of Finance, 1979, 34(1): 157-170.
- [19] Lee H T. Optimal Futures Hedging under Jump Switching Dynamics[J]. Journal of Empirical Finance, 2009, 16(3): 446-456.
- [20] Chiu W Y. A Simple Test of Optimal Hedging Policy[J]. Statistics & Probability Letters, 2013, 83(4): 1062-1070.
- [21] Tse Y K, Lien D. Fractional Cointegration and Futures Hedging[J]. The Journal of Futures Markets, 1999, 19(4): 457-474.

[22] 廖厥椿. 基于 DCC-MVGARCH 模型的股指期货与股票市场动态相关性研究[J]. 经济研究导刊, 2011, (13): 75-77.

[23] Engle R F. Dynamic Conditional Correlation: a Simple Class of Multivariate Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity Models[J]. Journal of Business and Economic Statistic, 2002, 20(3): 339-350.

[24] Santos A P A, Moura G V. Dynamic Factor Multivariate GARCH Model[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2014, 76: 606 - 617.

[25] Nelson D B. ARCH Models as Diffusion Approximations[J]. Journal of Econometrics, 1990, 45(1-2): 7-38.

[26] Lien D. A Note on the Superiority of the OLS Hedge Ratio[J]. The Journal of Futures Markets, 2005, 25(11): 1121-1126.

作者简介: 张跃军, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为能源金融与碳金融。Email: zyjmis@126.com.
通信地址: 湖南省长沙市湖南大学工商管理学院, 邮编: 410082.

基金项目: 国家自然科学基金项目“石油金融与碳金融系统建模”(编号: 71322103); 国家自然科学基金项目“碳排放配额交易的市场机制与政策研究”(编号: 71273028); 国家自然科学基金项目“高维度、非线性、非平稳及时变金融数据建模和应用”(编号: 71431008)。