

# 中国碳市场风险测度

王 影 张远晴 董 锋\*

**摘要:**随着我国碳市场的成功试点和统一碳市场的建立,对我国碳市场的风险水平进行测度成为亟待解决的问题。本文分别运用 GARCH-VaR 和 GARCH-CVaR 构建我国碳市场风险测度模型并对北京、湖北、广东和深圳四个试点碳市场的风险水平进行测度。结果发现:第一,在不同分布的假定下,各个碳排放权交易所适用的 GARCH 族模型不同,且 GARCH 族模型的结果揭示了各个市场的收益波动存在非对称性和杠杆效应,利多消息能比利空消息给各市场带来更大冲击。第二,通过对比 VaR 与 CVaR 估计值,可以发现 CVaR 具有更优良的性质。同时,根据 DLC 统计量最小原则,找出各个碳排放权交易市场相应的计算 CVaR 效果最佳模型,方便更准确测度市场风险。基于研究结论,本文建议要提升市场流动性水平,降低流动性风险;建立碳市场价格稳定机制;加强市场风险的监测和管理,提高风险防范能力。

**关键词:**碳交易;市场风险;GARCH 模型;CVaR 值

## 一、引言

碳排放带来的影响是不分区域的、持续的,世界各地的碳排放具有相同的增温效果,从而使得碳排放的影响具有区域可替代性。同时,因为碳减排会产生一定的成本,并且这种成本在各国之间存在差异性,所以碳排放权本身就具有了价值,碳排放权价格也就应运而生。目前,全球有 67 个管辖区正在实行碳定价机制,这些辖区占全球经济总量的一半左右、拥有的

---

\*王影,中国矿业大学经济管理学院,邮政编码:221116,电子信箱:15715201640@163.com;张远晴,中国矿业大学经济管理学院,邮政编码:221116,电子信箱:18852254830@163.com;董锋(通讯作者),中国矿业大学经济管理学院,邮政编码:221116,电子信箱:dongfeng2008@126.com。

本文系国家自然科学基金项目“禁售燃油车?环境效应、时机选择和实施策略研究”(71974188)、“2030 年碳排放达峰目标视域下的我国区域碳市场模拟研究”(71573254),教育部人文社科基金工程科技人才培养专项“人工智能技术与能源产业融合发展和相关人才培养模式创新研究”(19JDGC011),江苏省社科基金基地项目“中国特色社会主义生态文明内涵、区域差异测度和制度体系建设——以江苏省为例”(17JDB004)的阶段性成果。感谢匿名审稿专家提出的修改建议,文责自负。

温室气体量占全球四分之一以上,并且碳定价机制平均覆盖了它们约一半的温室气体排放量,即大约80亿吨二氧化碳当量,相当于全球温室气体排放的15%,由此可见碳定价在应对气候变化方面发挥着重要的作用。碳排放权交易市场的建立使得碳排放权具有了稀缺性,成为了经济资源。同时,越来越多的投资者开始将目光转移至碳排放权交易市场,碳排放权开始具有流动性以及投资价值,逐渐实现了由商品属性向金融属性的过渡,成为一种金融资产。正是基于碳排放权的金融属性,本文可以使用金融理论方法测度各个碳排放权交易市场的风险情况。

关于碳市场风险的基本含义,国内外学者对此展开了大量的研究,主要涉及碳交易风险、碳金融风险 and 碳市场风险。通过对碳金融风险进行深入研究,有学者发现碳金融风险包括预测的碳价格和支付碳风险的概率,并就碳立法和碳政策的不确定性考察投资者的态度,从而提出相应的政策和建议(Barradale, 2014)。Linacre等(2011)关于碳市场风险的研究表明碳市场有很大的概率存在市场风险。碳交易风险贯穿于碳交易过程的始终,可以分为三种类型,即履约风险、价格风险和政策风险(Larson & Parks, 1999)。随着研究的深入,碳交易风险的定义不断扩大,涉及经济风险、政策的不确定风险及碳交易操作风险、政治风险、市场风险和流动风险等诸多内容(王留之、宋阳, 2009;王巧芳, 2009;刘志成, 2012;魏一鸣等, 2010)。此外,研究人员还从企业(魏东等, 2012)、商业银行参与碳金融(张晨等, 2015)等角度分析了碳市场交易的风险。

对碳交易风险含义的界定逐渐清晰后,学者们开始关注碳交易市场风险的测算。目前使用较多的风险测度方法可以归纳为两类:第一种方法是风险相对测度法,它常常用于反映市场因素的波动与金融资产价格变化间的敏感性关系。比较常用的该类指标主要有久期(Duration)和凸性(Convexity)等指标。第二种方法是风险绝对测度方法,主要是用金融资产的波动性收益与平均收益的差值来量化风险程度。该类指标主要有由Markowitz(1952)提出的方差风险测度指标,具体是指使用统计学中的方差或标准差来度量风险。除此之外,一些学者也提出了其他的用于风险测度的方法和理论。最早使用的是偏距方法,主要是根据资产收益概率分布左尾部的某种“矩”对风险进行测度(Bawa, 1975; Fishburn, 1977)。也有学者提出绝对离差指标,即用收益与其均值差值的绝对值来表示风险情况(Simaan, 1997)。除此之外,采用观测期内金融资产价格的最大值和最小值的偏差、市场风险定量测度方法、风险价值指标等度量风险大小也比较常见(Young, 1998; Rockafeller & Uryasev, 2002)。随着研究的深入,研究人员逐渐倾向于采用GARCH模型、非对称的GARCH模型、VaR模型、EGARCH模型等分析欧盟碳市场的碳价格波动特征、碳期货价格与碳现货价格之间的非线性动态关系、各时期碳排放配额的收益和现货价格的波动特征及宏观经济变量之间的关系(陈晓红、王陟昀, 2010; 凤振华、魏一鸣, 2011; 杨翱, 2014; 蒋晶晶等, 2015)。

关于碳交易市场的风险控制,学者们也提出了不同的观点。有学者通过对欧盟碳市场进行深入的研究,指出风险控制的关键在于市场参与者要把握好高排放行业的环境问题与碳交易之间的关系(Labatt & White, 2007)。也有学者通过分析发现我国碳市场短期环境改善效果不明显,投资者可以通过碳远期进行碳市场风险防控(Ehrhart et al., 2005; 裴辉儒、张颖, 2015)。此外,杜莉等(2014)通过欧盟碳市场的研究发现从政府和金融机构的角度提高风险甄别和防控能力也是一个较为可行的做法。

综上所述,目前关于碳排放权交易市场风险分析的研究对象具有局限性,多集中于欧盟碳市场。而关于我国碳市场风险分析的研究相对较少,也缺少相关的建议与政策。因此,为解决这一问题,本文特在以下方面做出创新:考虑不同分布假设以及置信水平,运用GARCH-VaR和GARCH-CVaR模型测度各个碳市场价格收益序列的风险;并对不同模型的风险测度效果进行比较分析,选取测量效果最佳的模型,这将有助于优化我国碳排放权交易市场风险模型、促进理论创新以及完善监管政策,推动碳排放权交易市场价格风险管理理论在我国的发展。

## 二、方法与数据

### (一)测度方法

#### 1. VaR模型

VaR是指在一定概率水平(置信度)下,某一金融资产或证券组合价值在未来特定时期内的最大可能损失(马嫣然等, 2020),其数学公式为:

$$Prob(\Delta P_{\Delta t} > -VaR) = 1 - \alpha \quad (1)$$

其中,  $\Delta P_{\Delta t}$  为投资组合在持有期  $\Delta t$  内的收益,  $\alpha$  为风险度量的显著性水平。正态分布下, VaR的数学表达式为:

$$VaR = PZ_{\alpha}\sigma_{\Delta t} \quad (2)$$

其中,  $P$  为资产的价格,  $Z_{\alpha}$  表示标准正态分布下置信度  $\alpha$  对应的分位数,  $\sigma$  为组合收益率的标准差。

#### 2. CVaR模型

条件风险价值(CVaR)是指在一定的置信水平下,在持有金融资产的时期内,其可能面临的损失超过VaR值的条件期望,反映的是超额损失的平均水平。

设  $F(X, Y)$  是损失函数,  $X$  为决策向量,  $Y$  是随机变量。对每一  $X$ , 由  $Y$  引起的损失  $F(X, Y)$  是  $R$  上服从某一分布的随机变量,  $P(Y)$  是  $Y$  的密度函数, 则  $F(X, Y)$  的分布函数如下, 代表了损失不超出阈值(临界值)  $\alpha$  的概率为:

$$\varphi(X, \alpha) = \int_{F(X, Y) \leq \alpha} P(Y) dY \quad (3)$$

与给定置信水平  $\beta$  下的损失对应的 CVaR 定义为:

$$VaR_{\beta}(X) = \alpha_{\beta}(X) = \min\{\alpha \in R: \varphi(X, \alpha) \geq \beta\} \quad (4)$$

$$CVaR = \varphi_{\beta}(X) = E[F(X, Y) | F(X, Y) \geq VaR_{\beta}(X)] = (1 - \beta)^{-1} \int_{F(X, Y) \geq \alpha_{\beta}(X)} F(X, Y) P(Y) dY \quad (5)$$

本文选取了模型参数法来求取各个碳排放权交易市场的碳价格收益序列的 VaR 及 CVaR 值:

$$r_t = \mu_t + \epsilon_t \quad (6)$$

$$\sigma_t^2 = \alpha_0 + \sum_{i=1}^q \alpha_i \epsilon_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^p \beta_j \sigma_{t-1}^2 \quad (7)$$

方程(6)为均值方程,方程(7)是条件方差方程,  $\sigma_t^2$  为过去所有残差的正加权平均,非常符合波动率的聚集效应。CVaR 在正态分布、t 分布、GED 分布(广义误差分布)下的计算方式如下:

用  $\alpha$  表示对应于某一置信水平  $c$  的分位数,用  $q$  表示大于  $\alpha$  的分位数,则 CVaR 可表示为:

$$\begin{aligned} CVaR &= E[p_{t-1} q \sigma_t | p_{t-1} q \sigma_t > p_{t-1} \alpha \sigma_t] = p_{t-1} \sigma_t E[q | q > \alpha] = p_{t-1} \sigma_t E[-q | -q < -\alpha] \\ &= p_{t-1} \sigma_t \frac{\int_{-\infty}^{-\alpha} -q f(q) dq}{\int_{-\infty}^{-\alpha} f(q) dq} = \frac{p_{t-1} \sigma_t}{1-c} \int_{-\infty}^{-\alpha} q f(q) dq \end{aligned} \quad (8)$$

在正态分布下, CVaR 的计算公式值为:

$$CVaR = \frac{p_{t-1} \sigma_t}{1-c} \int_{-\infty}^{-\alpha} q \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{q^2}{2}} dq = \frac{p_{t-1} \sigma_t}{(1-c)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{q^2}{2}} \quad (9)$$

在 t 分布下, CVaR 的计算公式为:

$$CVaR = \frac{p_{t-1} \sigma_t}{1-c} \int_{-\infty}^{-\alpha} q \frac{\Gamma\left(\frac{d+1}{2}\right)}{\sqrt{d\pi} \Gamma\left(\frac{d}{2}\right)} \left(1 + \frac{q^2}{d}\right)^{-\frac{d+1}{2}} dq = \frac{p_{t-1} \sigma_t}{1-c} \frac{\sqrt{d}}{(d-1)\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma\left(\frac{d+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{d}{2}\right)} \left(1 + \frac{q^2}{d}\right)^{-\frac{d+1}{2}} \quad (10)$$

在 GED 分布下, CVaR 的计算公式为:

$$CVaR = -\frac{p_{t-1} \sigma_t}{1-c} \int_{-\infty}^{-\alpha} q \frac{d \exp\left[-\frac{1}{2} \left|\frac{q}{\lambda}\right|^d\right]}{\lambda 2^{\left[\frac{d+1}{d}\right]} \Gamma\left(\frac{1}{d}\right)} dq \quad (11)$$

### 3. VaR 与 CVaR 的比较研究

CVaR 与 VaR 都能将风险量化,是十分有效的度量风险的工具,两者的相同之处在于: VaR 与 CVaR 都是运用数学公式将风险量化,让投资者能够更加直观地看到风险的变化。除

此之外,在计算 VaR 和 CVaR 时,风险偏好者可以选取 95% 的置信水平,风险厌恶者可以选取 99% 的置信水平,因此, VaR 和 CVaR 都可以满足每一个投资者的风险偏好,监管机构也可以根据其来更准确地监测风险,这都有助于投资者和监管机构更好地预防风险。同时, VaR 与 CVaR 均是将风险标的为潜在的损失,这符合现代风险管理理念。

虽然目前 VaR 方法能够将风险量化,被广泛应用,但从学术及实际经验角度看, CVaR 比 VaR 更为优良,主要表现在以下几个方面:

(1) CVaR 方法可以充分测量尾部的损失。通过 VaR 方法对因突然发生的事件或者市场剧烈波动产生的尾部信息的损失不能及时监测到,而这些会使金融单位的运作遭受损失以及监管机构的监管失效。相反, CVaR 测量的平均风险值可以弥补上述缺陷,能够充分测量尾部的损失。

(2) VaR 方法不具备风险度量的一致性。风险度量指标需要具备可加性,但是 VaR 是不具备凸性的,而次可加性是凸性的一种特例。因此, VaR 不能够满足风险度量要求的一致性要求。相反, CVaR 兼具凸性和可加性,对于基于分散化投资的股票组合模型具有重要意义。

## (二) 样本、变量选取与数据处理

### 1. 样本选择

自 2011 年《关于开展碳排放权交易试点工作的通知》出台以后,北京、天津、上海、重庆、广东、湖北、深圳七个碳排放权交易试点相继启动。从碳排放权交易市场成立之初到目前正在建设的全国统一碳排放权交易市场,每个碳交易市场在交易方式、制度设计等方面都经历了很多的变革,但就各个碳排放权交易市场交易情况来看,部分碳排放权交易市场存在着交易活跃度较低的情况,这可能是由于各个碳排放权交易场所处区域存在经济及地理上的差异。本文选取 2014 年 4 月 28 日为研究起点,研究时间截至 2018 年 8 月 31 日,并依据当日有无成交量来判断当日是否为有效交易日,对比分析了各个碳排放权交易市场的交易情况(见表 1)。

表 1 有效交易日及占比

交易所	交易日(天)	有效交易日(天)	有效交易占比
湖北	1066	1045	98%
深圳	1066	982	92.12%
广东	1066	833	78.10%
北京	1066	668	62.70%
上海	1066	588	55.16%
天津	1066	396	37.14%
重庆	1031	295	28.61%

从表1中可以看出,交易最为活跃的是湖北碳排放权交易市场,有效交易日占比最高。交易最不活跃的是重庆碳排放权交易市场,有效交易日占比最低。因此,为了有效揭示碳排放权交易市场的运行机制并保证后文中模型估计结果的准确性,本文仅选取湖北、深圳、广东、北京的相关数据作为研究对象。

本文选取时间范围为2014年4月28日至2018年8月31日,选取所有碳排放权交易市场均开始交易的2014年4月28日为研究起点,研究时间截至2018年8月31日,并且剔除了节假日。碳价格取自于Wind数据库,用 $P$ 表示。本文采用对数收益率法对收益率进行计算。各个碳排放权交易市场价格收益率序列的计算公式具体如下所示:

$$r_t = \ln \frac{P_t}{P_{t-1}} \quad (12)$$

其中 $r_t$ 为当天的日收益率, $P_t$ 为当天成交均价, $P_{t-1}$ 为前一天的成交均价。通过上述计算公式得到北京碳价格收益率( $r_{t1}$ )、湖北碳价格收益率( $r_{t2}$ )、广东碳价格收益率( $r_{t3}$ )、深圳碳价格收益率( $r_{t4}$ )。

## 2. 描述性统计分析

图1至图4依次展示了北京、湖北、广东以及深圳碳排放权交易市场的价格收益率序列图。从图中可以发现,四个碳排放权交易市场的价格收益率序列图波动趋势各不相同。但是,四个碳排放权交易市场的价格收益率异常值出现的频率比较高,并且出现时间比较集中,这种现象正是验证了碳价格收益率序列的波动具有集聚性,即收益率序列随时间变动,波动形式主要为一段时间内的持续升高或降低。因此,可以考虑使用GARCH类模型计算各个碳排放权交易市场的波动率。

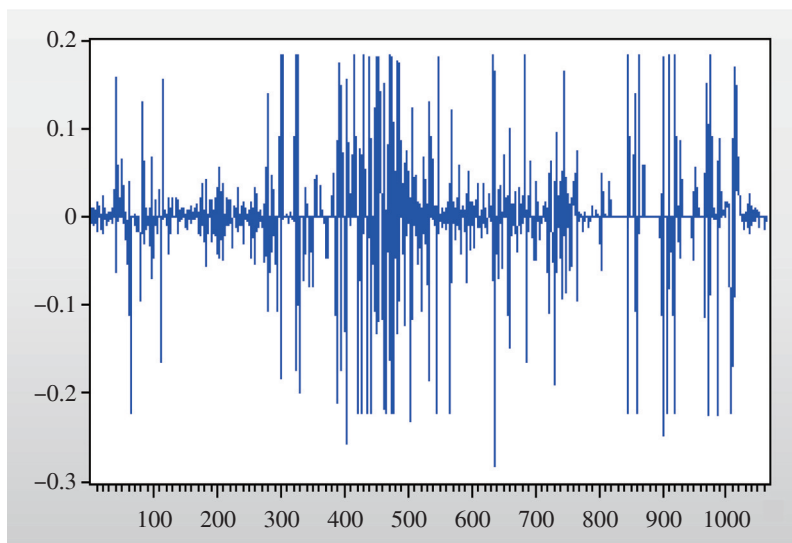


图1 北京碳市场价格收益率

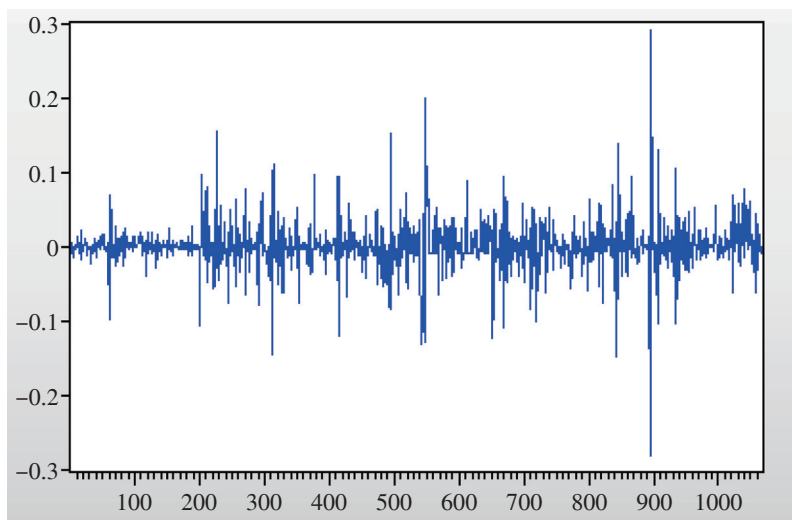


图2 湖北碳市场价格收益率

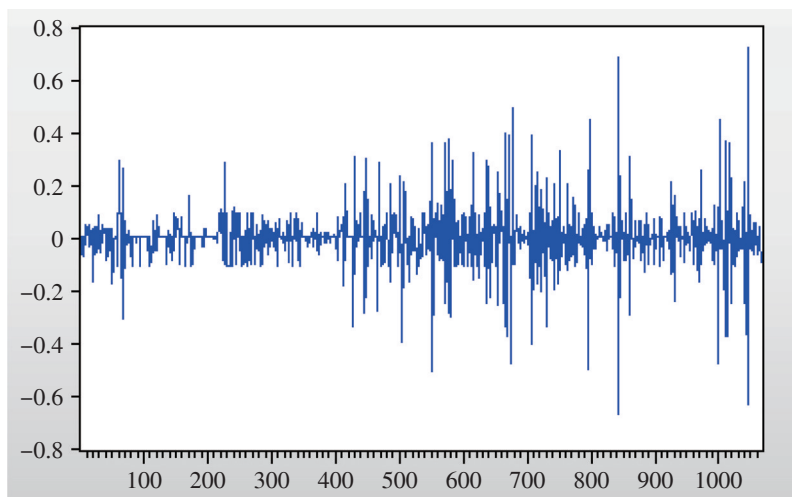


图3 广东碳市场价格收益率

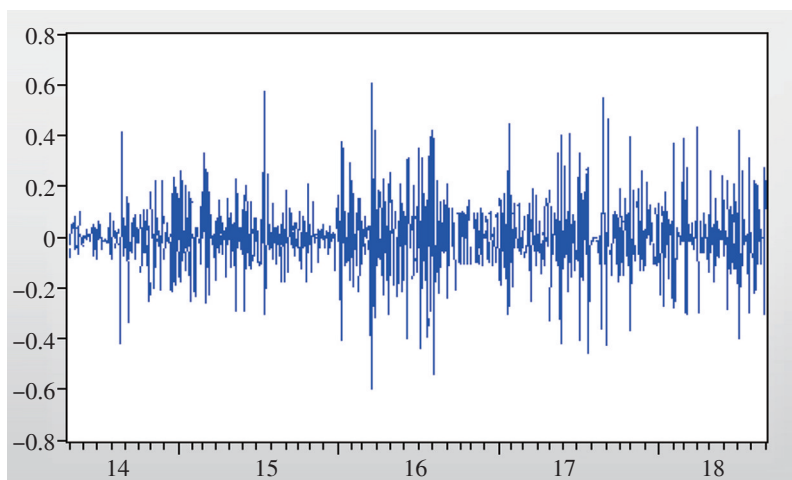


图4 深圳碳市场价格收益率

表2是对四个碳排放权交易市场的价格收益率序列的描述性统计分析,从表2中价格收益率的偏度、峰度以及JB统计量可以看出,北京碳排放权交易市场价格收益率序列是左偏的,其余则是右偏的。另外,所有碳排放权交易市场的价格收益率序列的峰度大于正态分布的峰度3,说明该序列具有尖峰厚尾的特征。

表2 碳市场价格收益序列描述性统计

碳市场	均值	最大值	最小值	标准差	偏度	峰度	JB统计量
北京	0.000256	0.183751	-0.283055	0.057873	-0.758946	9.759609	2129.836
湖北	8.99e-05	0.290040	-0.282303	0.033667	0.164764	16.45380	8036.909
广东	-0.001602	0.719634	-0.666830	0.106119	0.128096	13.30278	4713.196
深圳	-0.000790	0.607153	-0.597297	0.134291	0.153072	5.776395	346.2179

### 三、实证结果分析

#### (一)基于GARCH族模型的实证分析

考虑到金融资产收益率序列往往具有尖峰厚尾的特征,本文分别考虑了正态分布、t分布和GED分布下的几种不同的GARCH(1,1)类模型并进行建模。结果见表3—6。其中, $\omega > 0$ 表示存在正的杠杆效应, $\omega < 0$ 表示存在负的杠杆效应, $\omega \neq 0$ 则信息是非对称的; $\delta$ 为常数项。

表3 北京碳市场的各类GARCH模型估计结果

分布	模型	$\omega$	$\alpha$	$\beta$	$r$	$\delta$	
正态分布	GARCH	0.000142*** (9.47E-06)	0.112710*** (0.009877)	0.849278*** (0.008417)			
	EGARCH	-0.762274*** (0.037932)	0.016758 (0.017324)	0.899412*** (0.005621)	0.295024*** (0.017923)		
	TGARCH	0.000142*** (9.46E-06)	0.110049*** (0.016334)	0.849732*** (0.008432)	0.003999 (0.021933)		
	PGARCH	7.28E-05* (4.06E-05)	0.100337*** (0.011179)	0.850440*** (0.009211)	0.009132 (0.047484)	2.197665*** (0.172286)	
t分布	模型	$\omega$	$\alpha$	$\beta$	$r$	$\delta$	DOF
	GARCH	1.09E-07 (5.19E-07)	42.50616 (207.6405)	0.313990*** (0.009922)			2.011727
	EGARCH	-1.301540*** (0.371947)	0.477753 (0.422923)	0.766666*** (0.016616)	3.961912 (3.190672)		2.006847



续表 3 北京碳市场的各类 GARCH 模型估计结果

分布	模型	$\omega$	$\alpha$	$\beta$	$r$	$\delta$	
t 分布	TGARCH	1.54E-08 (1.13E-08)	2.673646 (1.840249)	0.460272*** (0.010562)	1.457694 (1.184109)		2.085866
	PGARCH	0.000393 (0.001444)	2.318698*** (0.800009)	0.585910*** (0.014775)	0.209125*** (0.043600)	0.645755*** (0.036789)	2.007565
GED 分布	模型	$\omega$	$\alpha$	$\beta$	$r$	$\delta$	GED
	GARCH	0.003055** (0.001021)	2.745238* (0.983095)	0.510330*** (0.073723)			0.172710
	EGARCH	-1.419268*** (0.154678)	0.078846 (0.086981)	0.809972*** (0.023112)	1.072055*** (0.156339)		0.223222
	TGARCH	0.032002** (0.016199)	4.451390 (3.635010)	0.517025** (0.159408)	1.712474 (5.084298)		0.135771
	PGARCH	0.000936 (0.001528)	3.648598* (2.170631)	0.279323** (0.086081)	0.180189** (0.088781)	1.839790*** (0.505015)	0.231323

注: \*、\*\*、\*\*\* 分别表示对应系数在 10%、5% 和 1% 水平上显著, 括号内为标准差, DOF 为自由度。下表同。

从表 3 中可以看出, 在北京碳排放权交易市场中, 其相应变量序列只有在正态分布的 GARCH 模型中所有的参数能够显著且满足  $\alpha + \beta$  小于 1 的约束条件。同时, 为了进一步确认该模型的有效性, 本文检验了正态分布下 GARCH 模型的回归残差, 发现不存在 ARCH 效用, 说明正态分布下的 GARCH 模型可以刻画收益率序列的异方差现象。同时,  $\omega$  参数大于 0, 表明北京碳排放权交易市场的均衡收益率水平大于零, 市场风险较小。这可能是由于北京碳排放权交易所启动较早, 机构和制度相对完善, 因此更能够有效地防范极端风险的发生。参数  $\alpha$  都大于零表明价格的波动具有集聚性, 具体是指过去的波动扰动会促进市场未来的波动且波动幅度逐渐减缓, 波动的幅度在一定时间内会延续, 表明交易参与者都有着较强的投机动机。条件方差方程中的  $\beta$  系数明显大于  $\alpha$ , 说明非常意外的市场信息对未来波动产生较小的修正。另外,  $\alpha + \beta$  的值非常接近于 1, 说明北京碳排放权交易市场的波动具有持久性, 当前的信息对预测未来的条件方差很重要。北京碳排放权市场主体以大型履约机构为主, 主要的交易动机在于满足履约需求, 在非履约期的交易动力较低, 从而市场的整体流动性风险水平较高。就市场主体的交易动机而言, 北京碳排放权交易所的市场主体主要是大型企业和各类公共事业单位, 这类市场主体对履约成本不敏感, 加之履约成本相比营收总额比率较低, 从而缺乏管理碳资产的积极性。此外, 北京碳排放权交易市场的非履约主体数量较低, 投资需求不足, 也导致履约期外市场流动性风险较高。北京碳排放权交易市场波动的集聚性和持续性表明市场定价机制不够完善、波动水平较高, 主要是由于市场流动性不足导致成交价格离散, 并且价格跳跃行为普遍存在, 离散和跳跃的价格变化致使波动性较高。

表4 湖北碳市场的各类GARCH模型估计结果

分布	模型	$\omega$	$\alpha$	$\beta$	$r$	$\delta$	
正态分布	GARCH	0.000303*** (1.83E-05)	0.490429*** (0.059485)	0.310722*** (0.035564)			
	EGARCH	-3.402536*** (0.200540)	0.010114 (0.037539)	0.588813*** (0.025277)	0.734622*** (0.056099)		
	TGARCH	0.000303*** (1.87E-05)	0.386198*** (0.065180)	0.328175*** (0.037748)	0.150140 (0.105709)		
	PGARCH	0.072637*** (0.020626)	0.329851*** (0.032011)	0.416547*** (0.025898)	0.143701*** (0.048351)	0.437285*** (0.078694)	
t分布	模型	$\omega$	$\alpha$	$\beta$	$r$	$\delta$	DOF
	GARCH	0.000321 (0.000361)	4.188349 (4.829791)	0.333731 (0.042086)			2.157639
	EGARCH	-2.310455*** (0.302639)	0.014254 (0.085701)	0.729447*** (0.032105)	1.463876** (0.573576)		2.246249
	TGARCH	0.000271 (0.000276)	2.657483 (2.785803)	0.360023*** (0.042474)	2.403382 (2.733585)		2.733585
	PGARCH	0.026121 (0.016391)	0.824098** (0.357069)	0.459334*** (0.049791)	0.209750** (0.081649)	0.648617*** (0.162071)	2.179759
GED分布	模型	$\omega$	$\alpha$	$\beta$	$r$	$\delta$	GED
	GARCH	0.000128*** (2.22E-05)	0.957939*** (0.184624)	0.329886*** (0.052620)			0.764758
	EGARCH	-2.634948*** (0.326924)	0.006892 (0.059936)	0.713383*** (0.040083)	0.838142*** (0.095900)		0.784498
	TGARCH	0.000120*** (2.15E-05)	0.708654*** (0.175171)	0.352982*** (0.054538)	0.481326 (0.314502)		0.763758
	PGARCH	0.022333* (0.013229)	0.452558*** (0.082218)	0.505855*** (0.051842)	0.219078** (0.094926)	0.597695*** (0.155581)	0.794415

在表4中,湖北碳排放权交易市场价格收益序列在正态分布下的GARCH和PGARCH模型、GED分布下的PGARCH模型中,所有参数具有显著性并且均满足 $\alpha+\beta$ 的值小于1的约束条件,这意味着湖北碳排放权交易市场中存在着尖峰厚尾现象且波动具有持久性。同时,其参数 $\omega$ 均大于0,说明湖北碳排放权交易市场存在显著的正的杠杆效应,“利空”影响明显小于“利多”的影响。原因在于,湖北碳排放权交易市场最先引入个人和机构投资者,有效地提高碳交易市场的活跃度,且第二产业结构偏重,控排企业配额需求大,对碳排放权具有“刚性需求”,因此投资者能够更加理性地对待“利空”消息对市场的冲击,不会跟风大量抛售持有资

产;当面临“利多”消息时,投资者的信心和热情被激活,积极参与市场交易,有利于市场的发展。

表 5 广东碳市场的各类 GARCH 模型估计结果

分布	模型	$\omega$	$\alpha$	$\beta$	$r$	$\delta$	
正态分布	GARCH	0.000828*** (7.19E-05)	0.361882*** (0.024273)	0.638227*** (0.015739)			
	EGARCH	-0.936626*** (0.054362)	-0.046673* (0.026751)	0.872406*** (0.010329)	0.488924*** (0.025791)		
	TGARCH	0.000955*** (7.35E-05)	0.265984*** (0.038282)	0.619842*** (0.015822)	0.240178*** (0.074024)		
	PGARCH	0.018044*** (0.003999)	0.277312*** (0.017311)	0.702549*** (0.015346)	0.339618*** (0.062684)	0.810759*** (0.084403)	
t分布	模型	$\omega$	$\alpha$	$\beta$	$r$	$\delta$	DOF
	GARCH	0.000203 (0.002227)	74.57757 (827.2086)	0.368778*** (0.018130)			2.009823
	EGARCH	-1.453831*** (0.343741)	0.116144 (0.162456)	0.755092*** (0.027644)	2.082608 (1.467851)		2.099208
	TGARCH	0.000201 (0.001921)	60.75204 (587.7007)	0.369380*** (0.018371)	7.804723 (76.49674)		2.011309
PGARCH	0.014534 (0.009208)	1.440636* (0.785937)	0.522772*** (0.030255)	0.111092 (0.070307)	0.850802*** (0.132554)	2.098695	
GED分布	模型	$\omega$	$\alpha$	$\beta$	$r$	$\delta$	GED
	GARCH	0.000661*** (0.000157)	1.001524*** (0.239673)	0.449716*** (0.047143)			0.488700
	EGARCH	-1.634196*** (0.199553)	-0.059054 (0.076030)	0.773864*** (0.033746)	0.830956*** (0.110833)		0.504928
	TGARCH	0.000267*** (7.27E-05)	0.385760*** (0.107373)	0.685752*** (0.031605)	-0.010073 (0.131972)		0.681974
PGARCH	0.003833 (0.003004)	0.884485*** (0.210312)	0.542543*** (0.047375)	0.156663 (0.099576)	1.223092*** (0.221055)	0.402477	

从表 5 中可以看出,广东碳排放权交易市场价格收益序列在正态分布下 GARCH、EGARCH、TGARCH 及 PGARCH 模型中,所有参数均通过显著性检验,并且  $\alpha+\beta$  的值基本都小于 1,说明广东碳排放权交易市场存在明显的尖峰厚尾现象,并存在着持久性波动。同时,参数  $\omega$  都不等于零,表明广东碳排放权交易市场存在杠杆效应。

表6 深圳碳市场的各类GARCH模型估计结果

分布	模型	$\omega$	$\alpha$	$\beta$	$r$	$\delta$	
正态分布	GARCH	0.002884*** (0.000381)	0.189923*** (0.033939)	0.613334*** (0.044976)			
	EGARCH	-1.280200*** (0.170043)	-0.074125** (0.033373)	0.759392*** (0.034303)	0.330886*** (0.042804)		
	TGARCH	0.002920*** (0.000410)	0.164962*** (0.049929)	0.610282*** (0.048433)	0.050988 (0.066225)		
	PGARCH	0.000895 (0.001167)	0.173309*** (0.038179)	0.600601*** (0.059870)	0.023253 (0.081646)	2.523361*** (0.589643)	
t分布	模型	$\omega$	$\alpha$	$\beta$	$r$	$\delta$	DOF
	GARCH	0.001903*** (0.000453)	0.661270*** (0.165232)	0.501053*** (0.055753)			3.286940
	EGARCH	-1.096632*** (0.176572)	-0.067780 (0.059523)	0.844463*** (0.034170)	0.648609*** (0.097882)		3.424446
	TGARCH	0.002078*** (0.000484)	0.532140** (0.170433)	0.478724*** (0.057858)	0.336392 (0.230717)		3.254109
	PGARCH	0.021105* (0.013102)	0.505435*** (0.113188)	0.494698*** (0.057752)	0.193445* (0.099051)	1.013146*** (0.247294)	3.219399
GED分布	模型	$\omega$	$\alpha$	$\beta$	$r$	$\delta$	GED
	GARCH	0.002431*** (0.000488)	0.412608*** (0.102264)	0.514970*** (0.068016)			1.019888
	EGARCH	-1.234275*** (0.224961)	-0.070826 (0.065449)	0.803922*** (0.043290)	0.539712*** (0.090151)		1.013308
	TGARCH	0.002561*** (0.000510)	0.337839*** (0.125420)	0.496650*** (0.070580)	0.179609 (0.176509)		1.018379
	PGARCH	0.014982 (0.011851)	0.382914*** (0.095284)	0.523683*** (0.072330)	0.172704 (0.123720)	1.243654*** (0.331449)	1.009203

在表6中,可以看出深圳碳排放权交易市场价格收益序列在正态分布下的GARCH和EGARCH模型、t分布的PGARCH模型、GED分布下的GARCH模型中,所有参数具有显著性,并且 $\alpha+\beta$ 的值基本都小于1,同样说明深圳碳排放权交易市场存在明显的尖峰厚尾现象及持久的波动性,参数 $\omega$ 不等于零,表明深圳碳排放权交易市场存在着杠杆效应。

结合各类检验结果以及实证分析结果不难发现:四个碳排放权交易市场的价格收益序列数据均存在明显的波动集聚性和尖峰厚尾性;各个碳排放权交易市场的价格收益序列平稳但存在自相关性。由于国家宏观经济的影响,在大的市场环境下,四个市场在价格波动和市场

风险的表现方面具有显著的同步性。因此,监管当局可以制定相应的风险管控措施,例如进行风险对冲和匹配交易。不同交易市场面临的风险具有差异性,四个交易市场的价格波动均较为剧烈,其中广东和深圳交易市场较湖北和北京交易市场出现极端波动现象的数值更高,表明广东和深圳的碳市场更有可能面临极端风险,碳交易市场的参与者更需要重视小概率事件带来的大风险。

## (二)基于GARCH族模型的VaR计算及回测检验

为了全面刻画碳排放权交易市场的风险波动情况,本文选取了95%和99%两个置信度来进行比较,并基于上文中对GARCH族模型参数的分析以及VaR的计算公式求出了相应置信度水平下各个碳排放权交易市场的VaR值(见表7—10)。

对于根据GARCH-VaR模型计算出的VaR值,还需对其有效性进行回测检验,进而判断各模型的计算结果是否准确。一般利用Kupiec(1995)提出的似然比检验来对VaR模型展开有效性研究。主要原理为:VaR模型是否有效取决于实际损失大于VaR的比例 $P^*$ 与相应置信水平 $c$ 下的期望概率值 $P$ 的差距。假设总样本数为 $T$ 天,失败天数为 $N$ ,那么 $P^*$ 为失败天数与总样本的比值,即 $P^*=N/T$ ;失败的期望概率为 $P=1-c$ 。零假设为 $P^*=P$ ,即将对VaR模型准确性的评估转化为检验失败率 $P^*$ 是否与 $P$ 显著不同。Kupiec(1995)提出了零假设 $P^*=P$ 的似然比概率:

$$LR = -2 \ln \left[ (1-p)^{T-N} P^N \right] + 2 \ln \left[ (1-P^*)^{T-N} (P^*)^N \right] \quad (13)$$

在零假设条件下,统计量LR服从自由度为1的 $\chi^2$ 分布。LR统计量在95%的置信水平下,临界值为3.841;在99%的置信水平下,临界值为6.635。

基于以上VaR值计算方法及回测检验方法,表7—10中展示了在95%及99%置信水平下,各个碳市场的VaR值及LR统计量。

表7 北京碳市场的VaR值及回测检验结果

分布	模型	置信水平	最大值	最小值	均值	标准差	失败天数	失败率(%)	LR统计量
正态分布	GARCH	95%	11.6325	1.2177	4.3778	1.7552	39	3.6689	4.3519
		99%	16.4265	1.7195	6.1820	2.4785	18	1.6933	4.2726

表7中的结果显示,在95%的置信水平下,北京碳排放权交易市场在研究期间内每日面临的最大损失可能为11.6325元,平均损失则为4.3778元;在99%的置信水平下,每日面临的最大损失可能为16.4265元,平均损失则为6.1820元。从对北京碳排放权交易市场价格收益序列的VaR值的分析中可以看出,在95%的置信水平下,LR值大于临界值,拒绝原假设。在99%的置信水平下,LR值小于临界值,接受原假设,这说明正态分布下的GARCH模型可以有效地度量北京碳排放权交易市场极端情形下的风险,但不能有效地度量正常情况下的风险。

表8 湖北碳市场的 VaR 值及回测检验结果

分布	模型	置信水平	最大值	最小值	均值	标准差	失败天数	失败率(%)	LR 统计量
正态分布	GARCH	95%	5.0718	0.4335	0.9797	0.4916	47	4.4173	0.7903
		99%	7.1621	0.6121	1.3835	0.6942	21	1.9737	7.9381
	PGARCH	95%	3.2938	0.2886	0.9397	0.4281	41	3.8533	3.1868
		99%	4.6512	0.4076	1.3270	0.6045	22	2.0677	9.3655
GED 分布	PGARCH	95%	4.1671	0.2295	0.9192	0.5735	46	4.3233	1.0728
		99%	7.6745	0.4227	1.6930	1.0563	7	0.6579	1.4306

通过表8分析正态分布下的回测检验结果发现:在95%的置信水平下,正态分布下的GARCH及PGARCH模型均能够满足LR值小于临界值的条件,接受原假设。在99%的置信水平下,LR值则均大于临界值,拒绝原假设。这说明,正态分布下的GARCH及PGARCH模型可以有效度量湖北碳排放权交易市场正常情况下的风险。GED分布下的PGARCH模型在99%和95%的置信水平下VaR计算结果均通过了Kupiec检验,这意味着湖北碳排放权交易市场采用GED分布下的PGARCH模型来估计VaR是最适合的。同时,从GED分布下PGARCH模型的VaR计算结果可知,在95%的置信水平下,湖北碳排放权交易市场在研究期间内每天面临的最大损失可能为4.1671元,平均损失为0.9192元。在99%的置信水平下,湖北碳排放权交易市场每天面临的最大损失可能为7.6745元,平均损失为1.6930元。

表9 广东碳市场的 VaR 值及回测检验结果

分布	模型	置信水平	最大值	最小值	均值	标准差	失败天数	失败率(%)	LR 统计量
正态分布	GARCH	95%	22.7144	1.0372	2.9477	2.2702	41	3.8534	3.1868
		99%	32.0755	1.4647	4.1625	3.2059	18	1.6917	4.2586
	EGARCH	95%	20.4235	0.8553	2.8824	2.1699	43	4.0414	2.1968
		99%	28.8405	1.2077	4.0703	3.0642	17	1.5977	3.2506
	TGARCH	95%	23.5195	1.0351	2.9387	2.2571	36	3.3835	6.5722
		99%	33.2124	1.4617	4.1498	3.1872	13	1.2218	0.4938
	PGARCH	95%	19.6116	0.8662	2.8880	2.1391	47	4.4173	0.7903
		99%	27.6940	1.2232	4.0782	3.0207	23	2.1617	10.8858

从表9中可以得知,TGARCH模型仅在99%置信水平下,LR值小于临界值;PGARCH模型仅在95%的置信水平下,LR值小于临界值,这说明以上两种模型在正态分布下,分别能有效度量极端情况下的风险。而正态分布下的GARCH模型及EGARCH模型均能在95%及99%的置信水平下通过Kupiec检验,这说明以上模型均适用于VaR值的计算。以GARCH模型为例,在95%置信水平下,广东碳排放权交易市场在样本期间内每天面临的最大损失不超过

22.7144元,平均损失不超过2.9477元;在99%置信水平下,每天面临的最大损失不超过32.0755元,平均损失不超过4.1625元。

表 10 深圳碳市场的 VaR 值及回测检验结果

分布	模型	置信水平	最大值	最小值	均值	标准差	失败天数	失败率(%)	LR 统计量
正态分布	GARCH	95%	19.8630	3.3156	6.7391	2.1890	61	5.7385	1.1674
		99%	28.0490	4.6821	9.5164	3.0911	19	1.7874	5.3956
	EGARCH	95%	19.0868	3.0220	6.7216	2.0548	61	5.7385	1.1674
		99%	26.9529	4.2675	9.4918	2.90167	17	1.5992	3.2628
t分布	PGARCH	95%	48.2648	2.7097	10.6752	5.1001	14	1.3170	42.4448
		99%	90.7012	5.0922	20.0612	9.5842	4	0.3763	5.4826
GED分布	GARCH	95%	27.0365	2.6092	6.6768	2.8415	59	5.5503	0.6554
		99%	49.7929	4.8053	12.2965	5.2331	9	0.8467	0.2663

从表 10 中显示的结果可知,t分布下的 PGARCH 模型仅在 99%的置信水平下,LR 值小于临界值,接受原假设,说明 t 分布下的该模型仅能有效度量深圳碳排放权交易市场极端情况下的风险。而正态分布下的 GARCH 模型、EGARCH 模型及 GED 分布下的 GARCH 模型均在 95%和 99%的置信水平下通过了 Kupiec 检验,这说明以上模型均适用于 VaR 值的计算。以正态分布下的 GARCH 模型为例,在 95%的置信水平下,深圳碳排放权交易市场在样本期内每天面临的最大损失为 19.8630 元,平均损失为 6.7391 元;在 99%的置信水平下,每天面临的最大损失为 28.0490 元,平均损失为 9.5164 元。

### (三)基于 GARCH 族模型的 CVaR 计算及回测检验

基于上文中 GARCH 族模型的参数估计结果及不同分布下的 CVaR 计算公式,本文求出了各个碳排放权交易市场的 CVaR 值。同时,本文运用了回测检验来判断各模型结果的准确性。与 VaR 回测检验的不同之处在于:CVaR 主要借助 VaR 失败时,CVaR 与实际损失值之间的差异来评价模型结果的有效性。因此,需要计算 DLC 来量化 CVaR 值与超过 VaR 的实际损失值之间的差异。具体表示为:

$$DLC = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N CVaR_i \right| \quad (14)$$

其中,计算 DLC 的具体方式为:首先计算出损失超过 VaR 的实际损失的平均值,然后找出与其对应的 CVaR 并求出其平均值,两者平均值的差值即为 DLC。N 为实际失败天数,  $X_i$  表示超过 VaR 的实际损失。统计量 DLC 越小,则实际损失的平均值和相对应的 CVaR 的平均值越接近,意味着 CVaR 模型的有效性越高;相反,则 CVaR 模型的准确性就越低。

表 11 至表 14 显示了各个碳排放权交易市场的 CVaR 值及 DLC 检验结果。通过对比可以看出, CVaR 的估计值往往高于 VaR 的估计值,这进一步表明 CVaR 方法比 VaR 方法具有

更优良的性质, CVaR考虑了超过 VaR 模型的概率及条件期望值。因此, 应采用正态分布下的 GARCH-CVaR 模型来衡量北京碳排放权交易市场价格收益序列的风险状况。具体结果见表 11。

表 11 北京碳市场的 CVaR 值及回测检验结果

分布	模型	置信水平	最大值	最小值	均值	标准差	DLC 统计量
正态分布	GARCH	95%	14.423	1.510	5.428	2.176	1.3743
		99%	18.635	1.951	7.013	2.812	1.5532

从表 12 中可以看出, 在 95% 的置信水平下, 湖北碳排放权交易市场在 GED 分布下的 PGARCH 的 DLC 统计量最小, 这说明 95% 置信水平下, GED 分布下的 PGARCH 模型 CVaR 值的计算结果优于正态分布及 GED 分布下的其他模型。在 99% 置信水平下, 则是正态分布下的 GARCH 模型的 DLC 统计量最小, 意味着极端情况下, 正态分布下的 GARCH 模型估计的 CVaR 结果优于其他模型。综上所述, 对于湖北碳排放权交易市场, GED 分布下的 PGARCH 模型及正态分布下的 GARCH 模型是最适用于计算 CVaR 值的。

表 12 湖北碳市场的 CVaR 值及回测检验结果

分布	模型	置信水平	最大值	最小值	均值	标准差	DLC 统计量
正态分布	GARCH	95%	6.2885	0.5375	1.2147	0.6095	0.1518
		99%	8.1251	0.6944	1.5695	0.7876	0.1753
	PGARCH	95%	4.0839	0.3579	1.1651	0.5308	0.2683
		99%	5.2767	0.4624	1.5054	0.6858	0.1952
GED 分布	PGARCH	95%	6.3346	0.3489	1.3974	0.8719	0.0852
		99%	8.9376	0.4923	1.9716	1.2301	0.2849

从表 13 中可以看出, 在 95% 的置信水平下, 广东碳市场在正态分布下的 PGARCH 模型的 DLC 统计量最小, 说明该模型的 CVaR 计算结果最有效。同时, 在相同的置信水平条件下, GARCH 模型的计算效果最差。在 99% 的置信水平条件下, 最有效的 CVaR 计算模型为正态分布下的 GARCH 模型, 而 TGARCH 模型的 DLC 统计量最大, 计算效果最差。

表 13 广东碳市场的 CVaR 值及回测检验结果

分布	模型	置信水平	最大值	最小值	均值	标准差	DLC 统计量
正态分布	GARCH	95%	28.1631	1.2861	3.6548	2.8148	0.6069
		99%	36.3885	1.6617	4.7222	3.6369	0.6696
	EGARCH	95%	25.3227	1.0604	3.5738	2.6905	0.5700
		99%	32.7185	1.3701	4.6176	3.4763	0.7042
	TGARCH	95%	29.1614	1.2834	3.6436	2.7985	0.5827
		99%	37.6783	1.6582	4.7078	3.6158	0.7913
	PGARCH	95%	24.3160	1.0740	3.5807	2.6523	0.5653
		99%	31.4178	1.3877	4.6265	3.4269	0.7193



表 14 深圳碳市场的 CVaR 值及回测检验结果

分布	模型	置信水平	最大值	最小值	均值	标准差	DLC 统计量
正态分布	GARCH	95%	24.6278	4.1110	8.3556	2.7140	0.9378
		99%	31.8206	5.3117	10.7960	3.5067	2.0176
	EGARCH	95%	23.6653	3.7469	8.3340	2.5478	0.7305
		99%	30.5770	4.8413	10.7681	3.2919	2.0162
t 分布	PGARCH	95%	77.3747	4.3440	17.1136	8.1761	1.5579
		99%	135.8348	7.6261	30.0438	14.3534	1.3073
GED 分布	GARCH	95%	41.0987	3.9663	10.1494	4.3194	0.8613
		99%	57.9872	5.5961	14.3201	6.0943	1.9920

从表 14 中可以看出,在 95% 的置信水平下,正态分布下 EGARCH 模型的 DLC 统计量最小,最适用于计算深圳碳排放权交易市场正常情况下的 CVaR 值,而 t 分布下的 PGARCH 模型 DLC 统计量最大,计算效果最差。在 99% 的置信水平下,t 分布的 PGARCH 模型的 DLC 统计量最小,该模型更加适用于计算深圳碳排放权交易市场极端情况下的风险,而相对来说,正态分布下的 GARCH 模型对 CVaR 值的计算效果最不理想。

#### 四、结论与政策建议

##### (一) 研究结论

本文使用基于 GARCH 模型下的 VaR 及 CVaR 方法对四个试点碳市场的风险水平进行测度并得出以下结论:

(1) 在不同分布假设下,各碳市场适用的 GARCH 族模型不同。北京碳市场在正态分布下的 GARCH 模型的参数均显著;湖北碳市场在正态分布下的 GARCH、PGARCH 模型及 GED 分布下的 PGARCH 模型的参数均显著;广东碳市场在正态分布下 GARCH、EGARCH、TGARCH 及 PGARCH 模型中的参数均显著;深圳碳市场在正态分布下的 GARCH 和 EGARCH 模型、t 分布的 PGARCH 模型、GED 分布下的 GARCH 模型中的参数均显著。

(2) GARCH 族模型结果显示各个碳市场的收益波动存在非对称性和杠杆效应,“利多”消息比“利空”消息对各碳市场的冲击更大。通过对比 VaR 与 CVaR 估计值发现 CVaR 具有优良的性质。

(3) 在 95% 的置信水平下,北京碳市场更适合正态分布下的 GARCH 模型;湖北碳市场更适合 GED 分布下的 PGARCH 模型;广东碳市场更适合正态分布下的 PGARCH 模型;深圳碳市场适合正态分布下的 EGARCH 模型。在 99% 的置信水平下,北京碳市场适合正态分布下的

GARCH模型;湖北碳市场适合正态分布下的GARCH模型;广东碳市场更适合正态分布下的GARCH模型;深圳碳市场适合t分布下的PGARCH模型。

## (二)政策建议

(1)提升市场流动性水平,降低流动性风险。鉴于目前我国碳排放权交易市场仍存在市场交易活跃度不足的情况,应适当降低纳入减排计划的二氧化碳排放量门槛,丰富碳排放权交易市场参与主体种类。首先,参考减排成本和减排弹性,纳入更多控排企业,增加履约主体。其次要吸引更多非履约主体投资碳排放权,增加市场投机性,提升市场流动性水平。此外,建设全国统一的碳排放权交易市场需从选定的目标行业即发电行业开始,逐步融入更多行业,扩大碳市场的辐射区域。

(2)建立碳市场价格稳定机制。由于我国碳市场尚处于起步阶段,市场制度正在建设和完善中,碳市场的作用范围有一定的限度。鉴于此,采用免费配额分配和配额拍卖相结合的制度并适当增加配额拍卖的占比是目前较为合适的选择。碳价的剧烈波动必然损害碳市场的建立,打击投资者信心。因此,需要相对稳定的碳价来支撑碳市场的良好运行。政府应发挥宏观调控作用,采取措施保障碳资产的存续性,并尽快推出更多碳交易产品,丰富投资者选择的同时对冲市场风险。此外,要平衡碳价波动和企业减排效果,一方面避免低碳价引起的市场活跃度不高、企业参与度不高,不利于实现碳减排目标;另一方面控制碳价涨幅,鼓励企业加大减排投入。

(3)加强市场风险的监测和管理,提高风险防范能力。首先要提升碳市场履约主体的管理意识和动力,这不仅需要通过市场化的价格机制应对“预算软约束”问题,还需要相关部门将碳管理绩效纳入履约主体的考核体系中。其次,监管部门要完善市场体制机制,加强市场监测与防控,预防重大风险事件。未来将会出现更多的碳排放衍生品,这需要市场参与主体有更高的碳资产管理能力,因此碳市场参与主体要加强风险意识,主动适应市场可能出现的新情况。

## 附录:

附表1

单位根检验结果

碳市场	ADF值	1%临界值	5%临界值	10%临界值	P值	平稳性
北京	-29.38307	-3.436284	-2.864048	-2.568157	0.0000	平稳
湖北	-40.32519	-3.436278	-2.864046	-2.568156	0.0000	平稳
广东	-21.48884	-3.436296	-2.864054	-2.568160	0.0000	平稳
深圳	-18.45870	-3.436313	-2.864061	-2.568164	0.0000	平稳

附表 2

ARCH 效应检验结果

碳市场	F-statistic	P 值	Obs×R <sup>2</sup>	P 值
北京	62.25000	0.0000	58.90800	0.0000
湖北	268.8887	0.0000	214.9268	0.0000
广东	143.7844	0.0000	126.8632	0.0000
深圳	55.76057	0.0000	53.07387	0.0000

附表 3

北京碳市场自相关与偏自相关表

	AC	PAC	Q 统计量	P 值
1	-0.179	-0.179	34.163	0.000
2	-0.123	-0.160	50.389	0.000
3	0.042	-0.013	52.291	0.000
4	-0.042	-0.059	54.200	0.000
5	-0.040	-0.059	55.926	0.000
6	0.010	-0.026	56.029	0.000
7	-0.041	-0.061	57.822	0.000
8	-0.032	-0.060	58.890	0.000
9	-0.011	-0.053	59.029	0.000
10	0.001	-0.032	59.029	0.000
11	-0.063	-0.092	63.283	0.000
12	0.000	-0.052	63.283	0.000
13	0.000	-0.048	63.283	0.000
14	-0.004	-0.036	63.301	0.000
15	0.012	-0.022	63.470	0.000
16	0.043	0.019	65.495	0.000
17	-0.041	-0.045	67.288	0.000
18	-0.013	-0.042	67.478	0.000
19	-0.011	-0.054	67.600	0.000
20	0.022	-0.009	68.123	0.000
21	0.029	0.014	69.061	0.000
22	0.009	0.007	69.158	0.000
23	-0.049	-0.052	71.815	0.000
24	0.093	0.073	81.250	0.000
25	-0.014	0.005	81.457	0.000
26	-0.095	-0.081	91.346	0.000
27	0.010	-0.035	91.459	0.000
28	0.061	0.035	95.534	0.000
29	-0.003	0.022	95.543	0.000
30	-0.020	-0.016	95.971	0.000

续附表3

北京碳市场自相关与偏自相关表

	AC	PAC	Q 统计量	P 值
31	-0.055	-0.070	99.286	0.000
32	-0.038	-0.071	100.90	0.000
33	0.044	0.007	103.01	0.000
34	-0.000	-0.019	103.01	0.000
35	0.003	0.002	103.02	0.000
36	0.006	-0.013	103.05	0.000

附表4

湖北碳市场自相关与偏自相关表

	AC	PAC	Q 统计量	P 值
1	-0.210	-0.210	47.035	0.000
2	-0.006	-0.052	47.072	0.000
3	0.011	-0.001	47.205	0.000
4	0.032	0.036	48.327	0.000
5	-0.023	-0.008	48.871	0.000
6	-0.035	-0.042	50.218	0.000
7	-0.041	-0.062	52.003	0.000
8	-0.010	-0.037	52.122	0.000
9	-0.037	-0.051	53.630	0.000
10	-0.040	-0.060	55.355	0.000
11	0.078	0.059	61.894	0.000
12	-0.061	-0.037	65.949	0.000
13	0.067	0.051	70.824	0.000
14	-0.018	-0.001	71.161	0.000
15	0.015	0.003	71.401	0.000
16	-0.067	-0.074	76.215	0.000
17	0.067	0.033	81.075	0.000
18	-0.007	0.012	81.130	0.000
19	0.000	0.007	81.130	0.000
20	-0.047	-0.038	83.582	0.000
21	0.057	0.041	87.155	0.000
22	0.018	0.031	87.498	0.000
23	0.040	0.068	89.268	0.000
24	-0.024	-0.006	89.883	0.000
25	-0.055	-0.066	93.239	0.000
26	0.005	-0.035	93.272	0.000
27	0.034	0.041	94.516	0.000
28	-0.074	-0.065	100.49	0.000

续附表 4

湖北碳市场自相关与偏自相关表

	AC	PAC	Q 统计量	P 值
29	0.034	0.031	101.78	0.000
30	0.012	0.021	101.94	0.000
31	-0.019	-0.002	102.33	0.000
32	0.009	-0.007	102.42	0.000
33	-0.033	-0.028	103.65	0.000
34	0.068	0.033	108.73	0.000
35	-0.004	0.014	108.75	0.000
36	0.044	0.055	110.91	0.000

附表 5

广东碳市场自相关与偏自相关表

	AC	PAC	Q 统计量	P 值
1	-0.273	-0.273	79.686	0.000
2	0.036	-0.041	81.103	0.000
3	-0.019	-0.021	81.481	0.000
4	0.014	0.004	81.677	0.000
5	0.076	0.088	87.893	0.000
6	-0.068	-0.025	92.815	0.000
7	0.008	-0.018	92.892	0.000
8	-0.055	-0.062	96.108	0.000
9	0.066	0.033	100.73	0.000
10	-0.075	-0.057	106.72	0.000
11	0.048	0.022	109.18	0.000
12	0.019	0.044	109.56	0.000
13	-0.025	-0.004	110.22	0.000
14	0.045	0.031	112.44	0.000
15	-0.028	0.003	113.27	0.000
16	0.025	0.005	113.95	0.000
17	-0.014	-0.005	114.17	0.000
18	0.051	0.048	117.02	0.000
19	-0.023	0.008	117.59	0.000
20	0.016	0.014	117.86	0.000
21	-0.017	-0.011	118.18	0.000
22	0.012	0.011	118.34	0.000
23	0.020	0.013	118.79	0.000
24	0.000	0.023	118.79	0.000
25	0.005	0.009	118.81	0.000
26	-0.013	-0.003	118.99	0.000

续附表5 广东碳市场自相关与偏自相关表

	AC	PAC	Q 统计量	P 值
27	0.042	0.033	120.88	0.000
28	-0.001	0.023	120.88	0.000
29	-0.021	-0.022	121.38	0.000
30	0.002	-0.008	121.39	0.000
31	0.078	0.086	128.15	0.000
32	-0.070	-0.039	133.50	0.000
33	0.003	-0.022	133.51	0.000
34	0.011	0.010	133.65	0.000
35	-0.093	-0.101	143.10	0.000
36	0.067	-0.001	147.98	0.000

附表6 深圳碳市场自相关与偏自相关表

	AC	PAC	Q 统计量	P 值
1	-0.344	-0.344	126.72	0.000
2	-0.056	-0.198	130.02	0.000
3	0.054	-0.043	133.19	0.000
4	-0.083	-0.103	140.58	0.000
5	0.039	-0.028	142.19	0.000
6	-0.046	-0.073	144.51	0.000
7	-0.023	-0.076	145.10	0.000
8	0.035	-0.027	146.39	0.000
9	-0.033	-0.046	147.55	0.000
10	-0.001	-0.043	147.55	0.000
11	-0.009	-0.049	147.64	0.000
12	-0.020	-0.059	148.07	0.000
13	0.064	0.022	152.47	0.000
14	-0.047	-0.030	154.87	0.000
15	-0.016	-0.049	155.16	0.000
16	0.040	-0.006	156.87	0.000
17	-0.022	-0.017	157.41	0.000
18	-0.025	-0.054	158.10	0.000
19	0.008	-0.038	158.17	0.000
20	0.070	0.060	163.43	0.000
21	-0.045	-0.007	165.60	0.000
22	0.010	0.004	165.71	0.000
23	-0.029	-0.039	166.60	0.000
24	0.031	0.011	167.64	0.000

续附表6 深圳碳市场自相关与偏自相关表

	AC	PAC	Q 统计量	P 值
25	0.024	0.034	168.27	0.000
26	-0.046	-0.016	170.57	0.000
27	0.050	0.039	173.29	0.000
28	-0.011	0.021	173.43	0.000
29	-0.001	0.019	173.43	0.000
30	-0.014	-0.008	173.64	0.000
31	-0.047	-0.046	176.04	0.000
32	0.035	-0.010	177.37	0.000
33	0.039	0.040	179.02	0.000
34	0.002	0.061	179.03	0.000
35	-0.063	-0.042	183.38	0.000
36	0.077	0.054	189.91	0.000

## 参考文献:

- [1] 陈晓红,王昶昀. 欧洲碳排放权交易价格机制的实证研究[J]. 科技进步与对策,2010,(19):142-147.
- [2] 杜莉,王利,张云. 碳金融交易风险:度量与防控[J]. 会计与金融,2014,(5):106-116.
- [3] 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,(03):451-455.
- [4] 蒋晶晶,叶斌,马晓明. 基于GARCH-EVT-VaR模型的碳市场风险计量实证研究[J]. 北京大学学报(自然科学版),2015,51(3):511-517.
- [5] 刘志成. 我国发展碳金融面临的风险和对策[J]. 武汉金融,2012,(6):31-33.
- [6] 马嫣然,胡旻,张大永,姬强. 国内原油期货与其他金融资产极端风险溢出[J]. 环境经济研究,2020,5(03):115-132.
- [7] 裴辉儒,张颖. 基于收益率与改善生态环境效率视角的碳金融风险研究[J]. 统计与信息论坛,2015,30(9):48-54.
- [8] 王留之,宋阳. 略论我国碳交易的金融创新及其风险防范[J]. 现代财经,2009,(6):30-34.
- [9] 王巧芳. 浅议碳市场中银行的业务模式与风险[J]. 学理论,2009,(25):142-143.
- [10] 魏一鸣,王恺,凤振华等. 碳金融与碳市场——方法与实证[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [11] 魏东,岳杰,王璟珉. 碳排放权交易风险管理的识别、评估与应对[J]. 中国人口·资源与环境,2012,22(8):28-32.
- [12] 杨翱. 基于GARCH-EVT-VaR模型的碳市场风险研究——以欧盟为例[J]. 理论探讨,2014,(4):20-25.
- [13] 张晨,杨玉,张涛. 基于Copula模型的商业银行碳金融市场风险整合度量[J]. 中国管理科学,2015,23(4):61-69.
- [14] Barradale, M. J. Investment under Uncertain Climate Policy: A Practitioner Perspective on Carbon Risk[J]. Energy Policy, 2014, (69): 520-533.
- [15] Bawa, V. S. Optimal Rules for Ordering Uncertain Prospects[J]. Journal of Financial Economics, 1975, 2(1): 95-121.
- [16] Ehrhart, K. M., C. Hoppe, J. Schleich, et al. The Role of Auctions and Forward Markets in the EU ETS: Counter Balancing the Cost Inefficiencies of Combining Generous Allocation with a Ban on Banking[J]. Climate Policy,

2005, 5(1): 31–46.

[17] Fishburn, P. C. Mean–Risk Analysis with Risk associated with Below–Target Returns[J]. American Economic Review, 1977, 67(2): 116–142.

[18] Kupiec, P. Techniques for Verifying the Accuracy of Risk Measurement Models[J]. The Journal of Derivatives, 1995, 3(2): 73–84.

[19] Larson, D. and P. Parks. Risks, Lessons Learned, and Secondary Markets for Greenhouse Gas Reductions [R]. 1999.

[20] Labatt, S. and R. R. White. Carbon Finance: The Financial Implications of Climate Change[M]. New Jersey: John Wiley & Sons. Inc. 2007.

[21] Linacre, N., A. Kossoy, and P. Ambrosi. State and Trends of the Carbon Market[R]. 2011.

[22] Markowitz, H. Portfolio Selection[J]. The Journal of Finance, 1952, 7(1): 77–91.

[23] Rockafeller, R. T. and S. Uryasev. Conditional Value–at–Risk for General Loss Distributions[J]. Journal of Banking & Finance, 2002, 26(7): 1443–1471.

[24] Simaan, Y. Estimation Risk in Portfolio Selection: The Mean Variance Model Versus the Mean Absolute Deviation Model[J]. Management Science, 1997, 43(10): 1437–1483.

[25] Young, M. R. A Minimax Portfolio Selection Rule with Linear Programming Solution[J]. Management Science, 1998, 44(5): 673–683.

## The Estimation of Carbon Market Risk in China

Wang Ying, Zhang Yuanqing and Dong Feng

(School of Economics and Management, China University of Mining and Technology)

**Abstract:** With the successful operation of China's carbon market pilot and the establishment of a unified carbon market, how to measure the risk level of China's carbon market has become a problem that needs to be solved urgently. This paper uses GARCH–VaR and GARCH–CVaR to construct estimates model of China's carbon market risk and examine the risk level of Beijing, Hubei, Guangdong and Shenzhen pilot carbon markets. The main results are as follows, firstly, under the assumption of different distributions, the GARCH family models applicable to various carbon emissions trading market are different. At the same time, the results of the GARCH family models show that there are asymmetries and leverage effects in the income fluctuations of various carbon emissions trading markets, and the bull news can bring more impact to the carbon emissions trading market than the bear news. Secondly, By comparing the VaR and CVaR estimated value, it can be found that CVaR has better properties. At the same time, according to the principle of minimum DLC statistics, the CVaR effect model for each carbon emission trading market is determined, which is convenient for each carbon emission trading market to estimate market risk more accurately. Finally, this article proposes to improve the level of market liquidity and reduce liquidity risks, establish a carbon market price stabilization mechanism, strengthen the monitoring and management of market risks, and improve risk prevention capabilities.

**Keywords:** Carbon Trading; Market Risk; GARCH Model; CVaR Value

**JEL Classification:** G19, G28

(责任编辑:朱静静)