

中国碳市场风险价值度量与实证研究

王 韧¹, 袁 珺¹, 许 豪¹, 宁 威²

(1. 湖南工商大学财政金融学院, 湖南 长沙 410205; 2. 北京工商大学经济学院, 北京 100048)

摘 要:碳市场是应对气候变化的重要工具,以金融手段助力温室气体减排,是我国实现“双碳”目标的重要路径。但由于我国在碳金融市场的发展历史较短,碳金融市场风险管理与实证方面的研究仍需进一步深化。以我国八大碳市场日成交均价为研究对象,采用新动态半参数模型对各碳市场风险进行拟合和预测,并对比传统模型度量碳市场风险的表现。结果表明:从数据上看,我国各个碳金融市场分割割据的程度较严重,市场成交价格 and 成交量存在巨大差异,不同市场价格的波动程度和频率也不同;在模型拟合度和模型预测方面,动态半参数模型整体上都比其他模型表现得更好。在关注极值理论对 CAViaR 模型的改进作用时,发现 EVT-CAViaR 模型对存在极端波动情况的地区具有改善作用。

关键词:碳金融市场;风险管理;半参数模型

中图分类号:F832.5

文献标识码:A

文章编号:1005-0566(2023)07-0142-09

Measurement and empirical study on Value-at-Risk of China carbon market

WANG Ren¹, YUAN Jun¹, XU Hao¹, NING Wei²

(1. School of Finance, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China;

2. School of Economics, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: As an important tool to address climate change, the carbon market is an important path to achieve the “double carbon” goal in China by helping to reduce greenhouse gas emissions through financial means. However, due to the short development history of carbon finance market in China, the research on risk management and empirical evidence of carbon finance market still needs to be further deepened. We use the new dynamic semi-parametric model to fit and predict the risk of each carbon market, and compare the performance of traditional models in measuring carbon market risk under different VaR predictions. The results show that, from the data point of view, China’s carbon financial markets are severely fragmented, with huge differences in transaction prices and volumes among markets, and different degrees and frequencies of price fluctuations in different markets; in terms of model fit and model prediction, the dynamic semi-parametric model performs better than other models overall; meanwhile, this paper also focuses on the effect of extreme value theory on the CAViaR model. It is found that the EVT-CAViaR model has an improvement effect on the areas with extreme fluctuations.

Key words: carbon financial markets; risk measurement; semi-parametric model

收稿日期:2022-10-15 修回日期:2023-05-29

基金项目:湖南省自然科学基金项目(2021JJ30197);湖南省教育厅科学研究重点项目(20A122)。

作者简介:王韧(1978—),女,湖南平江人,湖南工商大学财政金融学院副院长、教授,博士,研究方向为风险管理与保险。通信作者:宁威。

随着全球气温的不断升高,环境恶化、能源危机频出等问题不断涌现。碳市场作为应对气候变化的重要工具,对实现资源高效配置、推动双碳目标达成具有重要意义。党的二十大报告提出,应完善支持绿色发展的财税、金融、投资、价格政策和标准体系,发展绿色低碳产业,健全资源环境要素市场化配置体系,加快节能降碳先进技术研发和推广应用;积极稳妥推进碳达峰碳中和,立足我国能源资源禀赋,有计划分步骤实施碳达峰行动,深入推进能源革命,加强煤炭清洁高效利用,加快规划建设新型能源体系,积极参与应对气候变化全球治理^①。目前,我国碳排放体量大、任务重,急需绿色资本助力碳经济的发展^[1-2],而碳市场的出现和发展有助于促进中国碳排放进程^[3]。碳市场不仅有利于提高新能源等产业的积极性,还可以减少化石能源产业的消耗,从而推动资源有效配置,促进产业结构调整升级^[4]。但碳市场也存在较大风险,它不仅受宏观经济形势^[5-6]、市场机制^[7]影响,还与国家配额分配^[8]、能源价格^[9-11]和政策^[12-14]等外部环境息息相关。这些风险因子具有多样性、多变性的特点,尤其碳排放额(CEA)是碳市场的主要交易对象,是一种特殊的金融资产,而其价格波动是衡量碳市场风险的核心要素。因此,本文以CEA的成交均价为研究对象,对中国碳市场风险价值进行度量,并采取必要的风险管理措施,对碳市场的持续健康发展具有重要的现实意义。

一、文献综述

碳市场在全球政策、经济与能源等各方面因素影响下,具有较大的不确定性,国内外诸多学者对碳市场进行了大量研究。主要可分为两类:①对碳市场作用和影响机制的研究。尚楠等^[15]剖析了碳、电力和绿色证券市场之间的关联关系与影响原理,提出了对3个市场进行协同发展的相关建议;庞腊成等^[16]验证了所提电—碳市场协同机制和方法能够耦合不平衡电量,改变用电成本和碳排放收益;叶强等^[17]提出“公链+侧链”的碳市场体系设计方案,通过加强监管力度,从而降低市

场风险;范丹等^[18]利用双重差分模型设计碳交易政策的准自然实验,表明该政策可以提高企业全要素生产率;邹彩霞^[19]从资源和能源两个角度,对低碳与经济社会发展进行实证分析,得出低碳发展与经济发展目标相结合,协同推动经济增长方式的转变。②对碳市场碳价格波动序列研究。张晨等^[20]采用人民币汇率和CERs期货价格作为样本,发现碳市场收益率具有典型的金融时间序列特征,并且潜在的汇率风险低于碳市场收益率风险;吕靖烨等^[21]以中国湖北、上海、深圳碳市场收盘价为样本,运用小波多分辨率分析方法,描述了不同市场的短期波动和长期趋势;公维凤等^[22]以中国碳市场为对象,研究碳价格波动性及影响因素,分析了碳收益率的波动特征;Jiao等^[23]提出了一种经济状态相关方法,利用相关经济状态的历史碳回报观测来预测未来的碳市场VaR;韩国文等^[24]对企业碳排放与投票收益的相关性问题进行分析,表明在国内建立碳市场会提高风险溢价。

现有研究在碳市场风险测度方向已取得较为丰富的成果,如朱帮助等^[25]通过建立系统动力学模型,发现对碳配额的调控能有效降低风险模拟值;张大斌等^[26]基于二次分解聚合策略的预测模型对碳市场分析,结果表明二次分解聚合策略能有效提高碳价格的预测效果等。然而,我国碳市场发展历程较短,交易机制与相关数据仍不够完善,碳市场发展仍面临众多不确定因素,这一领域研究较为匮乏。同时,由于观测时期的积累和市场规模的不断扩展,前人采用的研究方法及其适用模型也可能存在较大的改进空间。据此,本文以当前我国八大区域碳市场价格数据为基础,尝试采用新ES-VaR模型对各碳交易所市场的市场风险展开分析,以期对未来中国碳市场的持续健康发展研究提供可能的新思路。

二、模型设计与构建

风险价值(VaR)是收益率的特定分位数^[27-28],本文采用Patton等^[29]提出的动态半参数模型。半参数方法消除了需要设定变量分布而可能带来的

① 来源:中国政府网 http://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm。

错误设定,很大程度上适用于碳市场。

(一) 双因素 GAS 模型

Creal 等^[30]提出了广义自回归模型(GAS),模型中强制变量选择的是 L_{FZO} 损失函数的导数和 Hessian 函数,而不再是对数似然函数。于是得出 ES 和 VaR 的 GAS(1,1)模型:

$$\begin{bmatrix} v_{t+1} \\ e_{t+1} \end{bmatrix} = w + B \begin{bmatrix} v_t \\ e_t \end{bmatrix} + A H_t^{-1} \nabla_t \quad (1)$$

式(1)中, w 是 2×1 向量, B 和 A 是一个 2×2 矩阵,强制变量由两部分组成,即 H_t 和 ∇_t 。

$$\begin{aligned} \nabla_t &= \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha v_t e_t} \lambda_{v,t} \\ \frac{1}{\alpha v_t e_t} \lambda_{e,t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial L_{FZO}(Y_t, v_t, e_t; \alpha) / \partial v_t \\ \partial L_{FZO}(Y_t, v_t, e_t; \alpha) / \partial e_t \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha v_t e_t} \lambda_{v,t} \\ \frac{1}{\alpha v_t e_t} \lambda_{e,t} \end{bmatrix} \quad (2) \end{aligned}$$

式(2)中, $\lambda_{v,t} = -v_t(1\{Y_t \leq v_t\} - \alpha)$, $\lambda_{e,t} = \frac{1}{\alpha} 1\{Y_t \leq v_t\} Y_t - e_t$, 且 $Y_t \neq v_t$ 。

假设 Y_t 是连续分布以及矩阵 H_t 与 Hessian 相关,通过 $\frac{\partial^2 E_{t-1}[L_{FZO}(Y_t, v_t, e_t; \alpha)]}{\partial v_t \partial e_t} = 0$, 可得出:

$$\begin{aligned} I_t &= \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E_{t-1}[L_{FZO}(Y_t, v_t, e_t; \alpha)]}{\partial v_t^2} & \frac{\partial^2 E_{t-1}[L_{FZO}(Y_t, v_t, e_t; \alpha)]}{\partial v_t \partial e_t} \\ \cdot & \frac{\partial^2 E_{t-1}[L_{FZO}(Y_t, v_t, e_t; \alpha)]}{\partial e_t^2} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\frac{f_t(v_t)}{\alpha e_t} & 0 \\ 0 & \frac{1}{e_t^2} \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

由于 I_t 取决于 Y_t 未知条件密度,为避免估计,将 $f_t(v_t)$ 近似等于 v_t^{-1} 一定比例。如果 Y_t 是零均值的位置尺度随机变量,近似值则完全成立, $Y_t = \sigma_t \eta_t$, $\eta_t \sim iidF_\eta(0,1)$ 。可以得到:

$$f_t(v_t) = f_t(\sigma_t v_\alpha) = \frac{1}{\sigma_t} f_\eta(v_\alpha) \equiv k_\alpha \frac{1}{v_t} \quad (4)$$

这里 $k_\alpha \equiv v_\alpha f_\eta(v_\alpha)$, 是与 v_t 相同符号的常数。通过近似值替换 $f_t(v_t)$, 定义 H_t 等于 I_t :

$$H_t^{-1} \nabla_t = \begin{bmatrix} -\frac{1}{k_\alpha} \lambda_{v,t} \\ -\frac{1}{\alpha} (\lambda_{v,t} + \alpha \lambda_{e,t}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

这里 $A H_t^{-1} \nabla_t$ 可以变换为两个元素的线性组合,可以等效采用:

$$\tilde{A} H_t^{-1} \nabla_t = A \lambda_t \quad (6)$$

式(5)中, $\lambda_t = [\lambda_{v,t}, \lambda_{e,t}]'$ 。由于强制变量的两个元素 ($\lambda_{v,t}, \lambda_{e,t}$) 不是直接相关的,而 $H_t^{-1} \nabla_t$ 的元素是相关的(由于重叠性 $\lambda_{v,t}$ 的存在),所以选择使用 $A \lambda_t$ 进行参数化。

(二) 单因素 GAS 模型

考虑 ES 和 VaR 的单因素 GAS 模型,其中风险度量都是由单一变量 k_t 驱动。

$$\begin{aligned} v_t &= a \exp\{k_t\} \quad e_t = b \exp\{k_t\}, b < a < 0 \\ k_t &= w + \beta k_{t-1} + H_t^{-1} s_{t-1} \quad (7) \end{aligned}$$

强制变量 $H_t^{-1} s_{t-1}$ 来自于 FZO 损失函数,从而可以得出:

$$\begin{aligned} s_t &\equiv \frac{\partial L_{FZO}(Y_t, a \exp\{k_t\}, b \exp\{k_t\}; \alpha)}{\partial k} \\ &= -\frac{1}{e_t} \left(\frac{1}{\alpha} 1\{Y_t \leq v_t\} Y_t - e_t \right) \\ I_t &= \frac{\partial^2 E_{t-1}[L_{FZO}(Y_t, a \exp\{k_t\}, b \exp\{k_t\}; \alpha)]}{\partial k_t^2} \\ &= \frac{\alpha - k_\alpha a_\alpha}{\alpha} \quad (8) \end{aligned}$$

式(8)中, k_α 是负常数, a_α 为 $0 \sim 1$ 。 I_t 是一个常数,并且由于对强制变量自由系数的估计,可将矩阵 H_t 设定为任何正常数,这里设定为 1。因此,单因素 GAS 模型变为:

$$\begin{aligned} k_t &= w + \beta k_{t-1} + \gamma \frac{1}{b \exp\{k_{t-1}\}} \\ &\left(\frac{1}{\alpha} 1\{Y_{t-1} \leq a \exp\{k_{t-1}\}\} Y_{t-1} - b \exp\{k_{t-1}\} \right) \quad (9) \end{aligned}$$

式(9)去掉 s_t 的负号,所以系数 γ 为正。由于 FZ 损失函数只能识别 v_t 和 e_t , 对任意常数 c , 参数向量 (w, a, b, β, γ) 和 $(w + c(1 - \beta), a \exp\{-c\}, b \exp\{-c\}, \beta, \gamma)$ 会产生相同的 VaR 和 ES 序列,因此目标函数值也相同。固定任何 w, a 或 b 值,都能解决问题,为了简化,设 $w = 0$ 。

(三) GARCH - FZ 模型

通过 FZ 损失最小化来估计模型参数,来改进 ARMA - GARCH 模型。考虑下列模型:

$$Y_t = \sigma_t \eta_t, \eta_t \sim iid F_\eta(0,1)$$

$$\sigma_t^2 = w + \beta \sigma_{t-1}^2 + \gamma Y_{t-1}^2 \quad (10)$$

变量 σ_t^2 是假设遵循 GARCH(1,1) 的条件方差,模型结构与单因素 GAS 模型类似,得出:

$$v_t = a \sigma_t, a = F_\eta^{-1}(\alpha)$$

$$e_t = b \sigma_t, b = E[\eta | \eta \leq a] \quad (11)$$

为将模型运用于预测,需要估计标准残差的 VaR 和 ES,并表示为(a,b),通过 FZ 损失最小化估计模型参数。这里设 w 为 1,估计参数向量 (a, b, β, γ) 产生拟合的 GARCH 模型。

(四) Hybrid GAS/GARCH 模型

考虑 GAS 结构的单因素模型的强制变量与波动率的 GARCH 模型的直接组合。

$$Y_t = \exp k_t \eta_t, \eta_t \sim iid F_\eta(0,1)$$

$$k_t = w + \beta k_{t-1} + \gamma \frac{1}{e_{t-1}} \left(\frac{1}{\alpha} 1\{Y_{t-1} \leq v_{t-1}\} \right) Y_{t-1} - e_{t-1} + \delta \log |Y_{t-1}| \quad (12)$$

变量 k_t 是对数波动率,按比例确定。由于该模型中的潜变量是对数波动率,本文使用滞后对数绝对收益率。模型中有 5 个参数 $(\beta, \gamma, \delta, a, b)$,通过 FZ 损失最小化来估计它们。

三、中国碳市场风险的特征事实——以深圳碳市场为例

(一) 深圳碳市场发展概述

2013 年 6 月,深圳碳市场率先成立。成立以来,深圳碳市场金融创新全国 7 项第一,碳市场流动率在全国各碳试点市场连续多年排名第一,其市场交易额更是最先达到 1 亿和 10 亿人民币。截至 2021 年,深圳市碳减排单位共计 750 家,其中包括供电、供水、供气和其他行业碳减排单位。与其他市场相比,深圳碳市场成立最早,成交量和成交额靠前,市场活跃程度高,数据齐全,且风险波动最大,所以本文以深圳碳市场作为特定案例展开分析。

(二) 深圳碳市场环境分析

1. 政治与法律环境。深圳以打造人与自然和谐共生的美丽中国典范为目标,制定了《深圳率先

打造美丽中国典范规划纲要及行动方案(2020—2025 年)》等规划,还出台了《特区生态环境保护条例》,实现了全国首个生态环境保护全链条立法。

2. 经济环境。作为国家首批低碳试点城市,深圳碳市场启动以来绝对减排量超 640 万 t,制造业企业平均碳强度下降 39%,工业增加值增长 67.1%,增加值上涨的同时实现碳排放量和碳强度的双重下降,经济增长与碳排放脱钩趋势初显。

3. 生态环境。深圳不断优化城市生态空间,建成国家森林城市,全市公园总数达 1 206 个,公园绿地 500 m 服务半径覆盖率达到 90.87%,全市 10 个区先后获评“国家生态文明建设示范区”,深圳成为全国唯一获评“国家生态文明建设示范市”的副省级城市。

4. 技术环境。深圳持续推动产业调整,推动以天然气为主的替代战略,清洁能源装机占比近 80%。在全球率先实现公交车、出租车全面纯电动化,新能源汽车销量超 54 万辆,并率先要求新建民用建筑 100% 执行绿色建筑标准,总面积达 1.4 亿平方米,规模居全国前列。

(三) 深圳碳市场风险分析

深圳碳市场波动性在我国碳市场中高居榜首。2013 年年初价格高达 100 元/t, 2014—2019 年总体处于下降趋势,在 2020 年年初上涨并在年终下降,于 2021 年恢复 20 元/t 左右的价格。深圳碳市场收益率一开始较平稳,但在 2019 年后有 3 次大幅波动发生。

虽然深圳碳市场在前期平稳发展,但在后期发生大幅波动,这可能是以下几个方面导致。

1. 过多依赖国际经验。在早期建设时,先进的国际经验确实能帮助碳市场巩固发展。但从长期来看,前期分配结果会很大程度上影响后续,缺乏灵活变动,企业无法根据自身情况,作出长远的碳减排和投资计划,对碳价波动具有长期影响。

2. 较低的投资门槛。深圳碳市场是门槛最低的。低准入门槛虽然在初期迅速提高市场规模,以达到减排目标,但随着市场整体规模上升和外

资资本介入,增加了市场不稳定性,也会让碳市场具有更高的投机性,价格波动也会变得更加频繁,市场风险上升。

3. 较高的市场化程度。相比其他碳市场,深圳碳市场更多是利用市场本身,而较少以政府主导的方式来规范碳市场,市场化能更好地发展市场,但也会增加价格波动。

4. 较为稳定的气候。相比其他碳市场,深圳位于南部地区,四季温暖湿润,很少出现极端天气情况。但一旦极端天气发生,对能源的需求反而可能会下降,对碳价格形成负面冲击。

5. 疫情冲击的影响。数据显示,在疫情期间,深圳碳市场的成交量下降严重,甚至碳金融市场几乎停滞,导致碳价下跌。相比其他碳试点市场,深圳碳市场受到的影响是最大的。

(四)深圳碳市场发展启示

深圳碳市场虽然运行时间长,市场规模大,种类较多,流动性高,但也存在极端风险发生。可见,如何对我国碳市场风险进行拟合和预测,加快碳市场体系建设,合理引导投资者预期,建立和完善突发事件和应急处理机制,实现碳资源的最优配置,有着重要的现实意义。

四、实证分析

(一)数据选取及描述性统计

本文选择我国北京、福建、广东、湖北、上海、深圳、天津、重庆 8 个碳市场的日成交均价作为研究对象,数据取自 Wind 和国泰安数据库,样本期涵盖各交易所自成立之日起至 2021 年 9 月 30 日全部交易日。为方便研究,对所有成交均价取对数收益率进行实证分析。

如表 1 所示,各市场平均收益率为 -1% ~ 1%,

表 1 各地区碳市场收益率描述性统计

城市	样本量	平均值 /%	标准差	方差	偏度	峰度
湖北	1 695	0.030 2	0.042 5	0.001 8	0.121 7	8.533 1
北京	1 184	0.054 6	0.081 7	0.006 7	-0.364 9	7.336 7
上海	1 152	0.028 5	0.068 8	0.004 7	1.528 2	32.783 7
深圳	1 793	-0.000 8	0.296 6	0.087 9	0.132 7	18.885 5
广东	1 586	-0.020 2	0.069 1	0.004 8	0.007 1	17.226 3
重庆	863	0.052 5	0.114 7	0.013 2	-0.298 7	2.952 4
天津	708	-0.007 1	0.076 5	0.005 9	0.564 6	47.199 9
福建	577	-0.168 3	0.099 5	0.009 9	0.533 5	16.580 3

方差最大的是深圳,为 0.087 9,最小的是湖北,为 0.001 8,可见各市场波动大小不一。北京、福建和重庆呈现右偏,广东、湖北、上海、深圳和天津呈现左偏,各市场峰度均大于 0,且峰度较大,呈现尖峰的分布状态。在 JB、swilk 和 sk 检验中, p 值均为 0,说明序列不服从正态分布。ADF 检验表明,序列是平稳时间序列。ARCH 效应检验中, p 值均为 0,存在明显 ARCH 效应。从自相关图、偏自相关图及 Q 检验发现,OLS 残差平方序列 $\{e^2\}$ 存在自相关,故扰动项存在条件异方差。

(二)动态半参数模型拟合

本文考虑 5% 显著水平下多头头寸的情况,将数据分为样本内和样本外。由于各地数据量有差别,故数据划分时有所差异。对样本内拟合和样本外预测,并进行 Kupiec LR 检验^[31]。

采用 GAS - 2F、GAS - 1F、GARCH - FZ 和 Hybrid 模型对样本内数据拟合的结果如表 2 所示。表 2 左侧是双因素 GAS 模型,不同列给出了不同的风险度量参数。对任意市场,系数 b 都大于 0.96,说明碳市场 VaR 序列有很高的持续性,与 GARCH 模型相似。同时所有碳市场 λ_e 的系数 α_e 都很小,远远没有统计学意义,而 λ_e 的系数 α_e 相对大一些,稍具统计性意义,说明该模型存在参数化过度。在拟合度差不多情况下,相对于 GAS - 2F 模型,GAS - 1F 模型通过 v_t 和 e_t 比例得出的强制变量系数结果更加有效,参数估计更加精确。与 GARCH - FZ 模型相比,GAS - 1F 模型虽然在拟合表现略差,但参数估计上精度更高。在模型拟合度上,Hybrid 模型表现优于单因素和双因素 GAS 模型,系数估计精度与 GAS - 1F 模型差别不大。综上所述,模型拟合度上,GARCH - FZ 模型拟合最好,而系数估计上,GAS - 1F 模型表现最好。

(三)与 GARCH - GED 和 CAViaR 模型 5% VaR 预测比较

本文关注动态半参数模型在 5% 显著度下预测风险的能力。GARCH 模型是风险预测的常用模型,与 Engle 等^[32]提出的 CAViaR 模型都在对比范围内,检验结果如表 3 所示。

表2 各碳市场样本内拟合的5%VaR参数估计

地区	系数	模型		系数	模型		
		GAS-2F			GAS-1F	GARCH-FZ	Hybrid
		VaR	ES				
湖北	ω	-0.096	-0.106	β	0.98	0.771	0.889
	b	0.982	0.987	γ	0.013	0.267	0.017
	α_v	0.076	-0.159	δ	-	-	0.062
	α_e	0.016	0.007	α	-5.57	-1.445	-5.128
	-		b	-8.084	-2.12	-7.441	
	Avg loss	2.123		-	2.133	2.048	2.097
北京	ω	-0.091	-0.077	β	0.997	0.911	0.982
	b	0.996	0.998	γ	0.011	0.48	0.011
	α_v	0.086	-0.001	δ	-	-	0.014
	α_e	0.013	0.011	α	-10.409	-0.765	-7.675
	-		b	-13.522	-1.248	-11.331	
	Avgloss	2.816		-	2.81	2.712	2.802
上海	ω	-0.246	-0.354	β	0.969	0.748	0.973
	b	0.979	0.98	γ	0.019	0.055	0.018
	α_v	-0.172	-0.164	δ	-	-	0
	α_e	0.007	0.016	α	-9.258	-2.381	-9.206
	-		b	-14.573	-3.656	-14.642	
	Avg loss	2.71		-	2.718	2.702	2.715
深圳	ω	-0.253	-0.413	β	0.988	0.805	0.979
	b	0.99	0.99	γ	0.016	0.17	0.013
	α_v	0.024	-0.012	δ	-	-	0.012
	α_e	0.015	0.024	α	-10.12	-1.915	-7.525
	-		b	-15.944	-2.78	-12.746	
	Avgloss	3.525		-	3.515	3.441	3.515
广东	ω	-0.266	-0.493	β	0.914	0.574	0.763
	b	0.974	0.968	γ	0.012	0.225	0.002
	α_v	-0.028	-0.074	δ	-	-	0.089
	α_e	0.004	0.008	α	-10.537	-1.523	-6.634
	-		b	15.245	-2.177	-9.852	
	Avg loss	2.718		-	2.714	2.625	2.656
重庆	ω	-0.223	-0.235	β	0.995	0.805	0.997
	b	0.99	0.991	γ	0.014	0.254	0.016
	α_v	-0.004	-0.003	δ	-	-	0
	α_e	0.007	0	α	-7.571	-1.292	-7.296
	-		b	-8.252	-1.807	-8.692	
	Avg loss	3.069		-	2.873	2.802	2.875
天津	ω	-0.198	-0.186	β	0.965	0.604	0.964
	b	0.964	0.976	γ	0.047	0.665	0.0399
	α_v	-0.039	0.003	δ	-	-	0.038
	α_e	0.037	0.05	α	-4.145	-1.449	-6.006
	-		b	-6.958	-2.223	-8.47	
	Avg loss	1.918		-	2.073	1.778	1.866
福建	ω	-0.313	-0.321	β	0.962	0.977	0.961
	b	0.97	0.97	γ	0.001	0	0.001
	α_v	0	0	δ	-	-	0
	α_e	0.001	0	α	-10.372	-0.868	-10.365
	-		b	-10.694	-0.912	-10.721	
	Avg loss	2.375		-	2.374	2.317	2.374

表3 各市场样本外5%VaR预测结果

模型	GAS-2F	GAS-1F	GA-FZ	Hybrid	GA-GED	SAV	AS	IGARCH
湖北地区(样本外500)								
击中次数	31	30	24	23	38	22	25	25
失败比率/%	6.20	6.00	4.80	4.60	7.60	4.40	5.00	5.00
LR p 值	0.234 6	0.319 2	0.836 4	0.677 6	0.012 9	0.530 1	1	1
北京地区(样本外500)								
击中次数	19	25	30	24	54	31	46	30
失败比率/%	3.80	5.00	6.00	4.80	10.80	6.20	9.20	6.00
LR p 值	0.199 4	1	0.319 2	0.836 4	0	0.234 6	0.000 1	0.319 2
上海地区(样本外500)								
击中次数	19	22	27	22	43	18	22	29
失败比率/%	3.80	4.40	5.40	4.40	8.60	3.60	4.40	5.80
LR p 值	0.199 4	0.530 1	0.685 2	0.530 1	0.000 8	0.131 3	0.530 1	0.422 9
深圳地区(样本外500)								
击中次数	36	31	32	42	72	60	47	53
失败比率/%	7.20	6.20	6.40	8.40	14.50	12.00	9.40	10.60
LR p 值	0.033 7	0.234 6	0.167 8	0.001 4	0	0	0	0
广东地区(样本外500)								
击中次数	11	11	10	15	18	10	13	9
失败比率/%	2.20	2.20	2.00	2.30	3.60	2.00	2.60	1.80
LR p 值	0.001 3	0.001 3	0.000 5	0.027 1	0.033 7	0.000 5	0.006 9	0.000 2
重庆地区(样本外363)								
击中次数	9	13	16	13	28	5	5	18
失败比率/%	2.48	3.58	4.41	3.58	7.71	1.38	1.38	4.96
LR p 值	0.015	0.192 3	0.597 5	0.192 3	0.027 5	0.000 2	0.000 2	0.971 1
天津地区(样本外308)								
击中次数	21	15	19	12	23	26	26	22
失败比率/%	6.82	4.87	6.17	3.90	7.47	8.44	8.12	7.14
LR p 值	0.164 3	0.916 4	0.363 1	0.355 9	0.011 3	0.020 8	0.104	0.063 2
福建地区(样本外277)								
击中次数	17	20	11	20	17	17	20	15
失败比率/%	6.16	7.25	3.99	7.25	6.16	6.16	7.25	5.43
LR p 值	0.393	0.107 5	0.423 4	0.107 5	0.393	0.393	0.107 5	0.743 6

在95%置信水平下预测5%VaR时,对于湖北和上海地区,只有GARCH-GED模型拒绝原假设。对于北京地区,只有GARCH-GED和CAViaR-AS模型拒绝原假设。对于天津地区,只有GARCH-GED和CAViaR-SAV模型拒绝原假设。对于福建地区,所有模型均通过检验。对于重庆地区,GAS-1F、GARCH-FZ、Hybrid以及IGARCH模型通过检验。对于深圳地区,GAS-1F和GARCH-FZ模型通过检验。对于广东地区,全部模型都拒绝原假设。由击中次数可知,GARCH-GED模型相对于其他模型有明显低估风险的趋势。从通过率来看,GAS-1F和GARCH-FZ模型表现最好,而预测精准度方面,GAS-1F模型表现最好。

(四)与GARCH-GED和CAViaR模型1%VaR预测比较

本文添加EVT-CAViaR模型,并在1%VaR下进行Kupiec LR检验,表4给出预测结果。

表 4 各市场样本外 1% VaR 预测结果

模型	地区	击中 次数	失败 比率 /%	LR p 值	地区	击中 次数	失败 比率 /%	LR p 值
GAS - 2F	湖北 地区 (500)	5	1.00	1	北京 地区 (500)	7	1.4	0.396 6
GAS - 1F		5	1.00	1		7	1.4	0.396 6
GARCH - FZ		7	1.40	0.396 6		10	2.00	0.047 9
Hybrid		5	1.00	1		5	1.00	1
EVT - SAV		9	1.80	0.106		15	3.00	0.000 3
EVT - AS		6	1.20	0.663		10	2.00	0.047 9
EVT - IGARCH	上海 地区 (500)	7	1.40	0.396 6	深圳 地区 (500)	12	2.40	0.007 7
GAS - 2F		4	0.80	0.641 4		12	2.40	0.007 7
GAS - 1F		5	1.00	1		11	2.20	0.019 9
GARCH - FZ		3	0.60	0.331 5		14	2.80	0.000 9
Hybrid		6	1.20	0.663		11	2.20	0.019 9
EVT - SAV		9	1.80	0.106		23	4.60	0
EVT - AS	广东 地区 (500)	9	1.80	0.106	重庆 地区 (363)	1	0.20	0.028 2
EVT - IGARCH		4	0.80	0.641 4		21	4.20	0
GAS - 2F		5	1.00	1		5	1.38	0.494 2
GAS - 1F		6	1.20	0.663		5	1.38	0.494 2
GARCH - FZ		6	1.20	0.663		4	1.10	0.847 7
Hybrid		6	1.20	0.663		4	1.10	0.847 7
EVT - SAV	天津 地区 (308)	7	1.40	0.396 6	福建 地区 (277)	5	1.38	0.494 2
EVT - AS		4	0.80	0.641 4		5	1.38	0.494 2
EVT - IGARCH		8	1.60	0.214 9		17	4.68	0
GAS - 2F		13	3.16	0		15	5.43	0
GAS - 1F		9	1.58	0.005 9		11	3.99	0.000 2
GARCH - FZ		8	1.58	0.018 9		11	3.99	0.000 2
Hybrid		10	1.58	0.001 7		14	5.07	0
EVT - SAV		11	2.77	0.000 4		10	3.62	0.000 7
EVT - AS		11	3.95	0.000 4		10	3.62	0.000 7
EVT - IGARCH		10	3.56	0.001 7		10	3.62	0.000 7

如表 4 显示,在 95% 置信水平下预测 1% VaR 时,对于湖北和广东地区,所有模型均通过检验。对于上海地区,只有 GARCH - GED 模型拒绝原假设。对于重庆地区,只有 EVT - IGARCH 模型拒绝原假设。对于北京地区,GAS - 2F、GAS - 1F 和 Hybrid 模型通过检验。对于深圳地区,所有模型均拒绝原假设。对于天津和福建地区,只有福建地区的 IGARCH 模型通过检验。从击中次数来看,模型检验通过率方面,GAS - 2F、GAS - 1F、Hybrid 和 CAViaR - IGARCH 模型表现最好,预测精准度方面,Hybrid 模型表现最好。本文关注 EVT 对 CAViaR 模型的改善效果。从击中次数来看,对于湖北、上海和广东地区,EVT - CAViaR 模型的预测效果没有提高。而在福建市场这种新兴市场和风险大的深圳市场,EVT - CAViaR 模型改善了风险的预测效果,说明 EVT - CAViaR 模型更适用于新兴市场和风险较大的市场。

综合来看,新 ES - VaR 模型在预测 5% VaR 和 1% VaR 时,预测结果整体上都优于 GARCH 模型和 CAViaR 模型,这表明在我国碳市场,动态半

参数模型的预测方法更加实用。

五、结果讨论

第一,从样本数据来看,我国碳市场分割割据程度严重,不同碳市场的价格和交易量差异较大,价格波动程度和频率也不同,这是由于各个碳市场上供求双方的需求不等,再加上不同地区经济发展程度、地理因素以及地方政策等因素导致。同时,地区风险敏感度的差异,也会使面临相同宏观因素冲击时,发生不同的价格波动。比如新冠病毒感染疫情对深圳地区碳价格波动程度影响最大,而对广东地区影响较小。从数据特征来看,所有碳市场都呈现尖峰厚尾的现象,一半地区具有左偏的分布特征,另一半地区具有右偏的分布特征。

第二,动态半参数模型拟合方面,除个别地区,不同碳市场模拟表现大体相同。双因素 GAS 模型拟合度与单因素 GAS 模型相差不大,但参数估计精准度较低。相比单因素 GAS 模型,GARCH - FZ 模型拟合度表现较好,但参数估计精度低。Hybrid 模型在模型拟合度上,表现优于单因素和双因素 GAS 模型,系数估计精准度与单因素 GAS 模型差别不大。总之,模型拟合度上,GARCH - FZ 模型拟合最好,而系数估计上,单因素 GAS 模型表现最好。

第三,模型预测方面,除广东、天津和福建以外,其他地区表现大体相同。广东地区预测 5% VaR 时表现很差,而预测 1% VaR 时表现很好,是由于广东地区发展迅速,规模全国第一,供需稳定,碳价起伏小,与前期相比,波动趋于稳定,预测 5% VaR 会高估风险。虽然广东地区波动变化较大,但极值风险却一直处于较低水平,预测 1% VaR 时表现好。对于天津和福建地区,预测 5% VaR 表现好,而预测 1% VaR 表现差,是由于其成立较晚,交易量少,中间有很长的空白期,极端风险更容易发生,才会低估极值风险。由击中次数可知,GARCH - GED 模型明显低估风险,而动态半参数模型整体上优于 GARCH 和 CAViaR 模型。综合来看,预测 5% VaR 时,通过率方面,GAS - 1F 和 GARCH - FZ 模型表现最好,预测精准度方面,GAS - 1F 模型表现最好。预测 1% VaR 时,通过率方面,GAS - 2F、GAS - 1F、Hybrid 和 CAViaR -

IGARCH 模型表现最好,而预测精准度方面,Hybrid 模型表现最好。

第四,本文还探讨了极值理论对 CAViaR 模型的改进作用。EVT-CAViaR 模型对深圳和福建地区有很好的改善结果。这可能是由于深圳地区易受外部因素影响,而福建地区成立较晚,具有较多的极端波动。在结合极值理论后,预测结果能得到明显改善,说明 EVT-CAViaR 模型在处理存在极端波动情况的市场时有一定优势,尤其是对风险敏感的市场和新兴市场。

六、结论与对策建议

第一,加快建设全国碳市场,协同碳试点市场发展。统一有效的碳市场,不光能优化市场整体机制,有利于我国碳市场未来发展,还能提振投资者信心。我国不同碳市场的风险各不相同,很重要的原因就是地域分散,受诸多环境因素影响。建立统一的碳市场,可以减少市场分割问题,统筹领导其他碳市场,增强市场之间的联系,减少极端风险发生,便于政府监管和政策实施。同时,在全国碳市场推进过程中,考虑不同碳试点市场的差异和共性,确定碳试点市场的定位,发挥其独特优势,保证试点市场与全国市场的共同发展,实现协同效应。

第二,完善碳交易市场制度,优化碳价格调控机制。目前全国碳市场才开始,在发展中会面对许多问题与挑战。我国碳试点市场频繁波动,主要是由于市场制度和价格调控机制的不完善。党的二十大报告提出,应完善碳排放统计核算制度,健全碳排放权市场交易制度势在必行。政府应对碳市场的制度和机制进行持续完善,考虑建立兼容机制,以合理调控碳市场之间的相互影响,发挥政府的引导作用。同时,政府应加快相关法律法规制定和实施,明确碳市场各参与方的权利和义务,加强监管,创造一个公开、公平、透明和规范的市场环境,营造更好的市场氛围,才能引进更多的投资者参与,提升交易主动性与市场活跃度。

第三,合理分配碳交易配额,促进企业推动碳减排。在实现碳达峰、碳中和的过程中,企业是实现目标的中坚力量。碳配额机制是影响企业是否积极参与的关键,也是其有计划分步骤行动的重

要因素。目前,我国碳配额分配方式为政府给予企业一定免费配额,而国外成熟市场大多是采取拍卖形式。除此之外,对于碳配额分配需要考虑公平和效率,不同地区发展状况差别大,企业利益诉求也不同,需要构建更合理、科学的配额机制。一方面,积极引导企业低碳转型意愿,推动多方面优化布局,结合智能和数字化等措施,促进企业低碳发展转型;另一方面,为企业提供必要支持,包括对减排技术研发的税收优惠和低碳补贴等。

第四,创新碳金融衍生产品,增强市场国际话语权。目前,我国碳市场交易不活跃,购买者是为碳排放需求而非投资需求。这是由于我国碳市场主要以碳排放权现货为标的,而非金融化程度高的衍生品。碳金融能够提高对投资者的吸引力,提高市场活跃度,增加市场供需,减少价格波动,从而遏制市场风险。同时,碳金融也能吸引国际资本加入,减少外部因素对我国碳市场的影响。一方面,政府应积极推动碳金融的创新发展,建立统一的碳金融交易平台,倡导碳金融产品创新多元化,丰富企业融资来源;另一方面,政府应鼓励学校加大碳金融人才培养力度,增加碳金融人才储备,尤其是复合型人才。

参考文献:

- [1]周新苗,刘慧宏,唐绍祥,等.不同驱动机制下绿色金融发展的宏观经济效应研究[J].中国软科学,2021(12):31-40.
- [2]余萍,刘纪显.碳交易市场规模的绿色和经济增长效应研究[J].中国软科学,2020(4):46-55.
- [3]胡剑波,郑维丹,韩君.中国货币信贷对二氧化碳排放的影响研究:基于动态面板门槛模型的实证分析[J].金融经济研究,2021,36(1):33-48.
- [4]熊娜,宋洪玲,崔海涛.产业协同融合与碳排放结构变化:东盟一体化经验证据[J].中国软科学,2021(6):175-182.
- [5]李小胜,宋马林.“十二五”时期中国碳排放额度分配评估:基于效率视角的比较分析[J].中国工业经济,2015(9):99-113.
- [6]傅京燕,黄芬.中国碳交易市场CO₂排放权地区间分配效率研究[J].中国人口·资源与环境,2016,26(2):1-9.
- [7]林伯强.碳中和进程中的中国经济高质量增长[J].

经济研究, 2022, 57(1): 56-71.

[8] 王文举, 陈真玲. 中国省级区域初始碳配额分配方案研究: 基于责任与目标、公平与效率的视角[J]. 管理世界, 2019, 35(3): 81-98.

[9] YU J, MALLORY M L. Exchange rate effect on carbon credit price via energy markets [J]. Journal of international money and finance, 2014(47): 145-161.

[10] JIN Jiayu, HAN Liyan, WU Lei, et al. The hedging effect of green bonds on carbon market risk [J]. International review of financial analysis, 2020(71): 101509.

[11] RANNOU Y, BOUTABBA M A, BARNETO P. Are green bond and carbon markets in Europe complements or substitutes? Insights from the activity of power firms [J]. Energy economics, 2021(104): 105651.

[12] 邵帅, 范美婷, 杨莉莉. 经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展: 基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察[J]. 管理世界, 2022, 38(2): 46-69, 4-10.

[13] YE Shunqiang, DAI Pengfei, 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): 113490.

[14] 刘昕禹, 杨明洪, 吴晓婷. 交通基础设施、产业结构与农业碳排放[J]. 云南财经大学学报, 2022, 38(9): 1-16.

[15] 尚楠, 陈政, 卢治霖, 等. 电力市场、碳市场及绿证市场互动机理及协调机制[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 142-154.

[16] 庞腊成, 吉斌, 徐帆, 等. 面向电—碳市场协同的负荷响应机制与效益分析初探[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 62-71.

[17] 叶强, 高超越, 姜广鑫. 大数据环境下我国未来区块链碳市场体系设计[J]. 管理世界, 2022, 38(1): 229-249.

[18] 范丹, 付嘉为, 王维国. 碳排放权交易如何影响企业全要素生产率? [J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(3): 591-603.

[19] 邬彩霞. 中国低碳经济发展的协同效应研究[J]. 管理世界, 2021, 37(8): 105-117.

[20] 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.

[21] 吕靖烨, 曹铭, 张金锁, 等. 基于小波多分辨率的中国碳排放权市场价格波动性研究[J]. 系统工程理论与实

践, 2021, 41(7): 1699-1708.

[22] 公维凤, 王丽萍, 王传会, 等. 我国碳排放权市场交易价格波动特征研究: 对 5 个碳交易试点的实证分析[J]. 中国软科学, 2022(4): 149-160.

[23] JIAO Lei, LIAO Yin, ZHOU Qing. Predicting carbon market risk using information from macroeconomic fundamentals [J]. Energy economics, 2018(73): 212-227.

[24] 韩国文, 樊呈恒. 企业碳排放与股票收益: 绿色激励还是碳风险溢价[J]. 金融经济学研究, 2021, 36(4): 78-93.

[25] 朱帮助, 唐隽捷, 江民星, 等. 基于系统动力学的碳市场风险模拟与调控研究[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(7): 1859-1872.

[26] 张大斌, 张博婷, 凌立文, 等. 基于二次分解聚合策略的我国碳交易价格预测[J]. 系统科学与数学, 2022, 42(11): 3094-3106.

[27] 文凤华, 张敏芝, 肖继宏, 等. 基于新分解方法的油价结构冲击对中国股市收益影响研究[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(8): 2071-2086.

[28] 吴鑫育, 谢海滨, 李心丹. 基于双成分已实现 EGARCH 模型的 VaR 度量研究[J]. 数理统计与管理, 2021, 40(3): 556-570.

[29] PATTON A J, ZIEGEL J F, CHEN R. Dynamic semiparametric models for expected shortfall (and Value-at-Risk) [J]. Journal of econometrics, 2019, 211(2): 388-413.

[30] CREAL D, KOOPMAN S J, Lucas A. Generalized autoregressive score models with applications [J]. Journal of applied econometrics, 2013, 28(5): 777-795.

[31] KUPIEC P H. Techniques for verifying the accuracy of risk measurement models [J]. Finance & economics Discussion, 1995, 3(2): 73-84.

[32] ENGLE R F, MANGANELLI S. CAViaR: Conditional autoregressive value at risk by regression quantiles [J]. Journal of business & economic statistics, 2004, 22(4): 367-381.

[33] 欧阳资生, 周学伟, 谢楠. 中国金融机构时变关联性测度研究: 来自频域视角的新证据[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(8): 2087-2101.

[34] 许志勇, 杨青伟, 彭芸, 等. 政府补贴会影响创新型中小企业的管理绩效吗? [J]. 管理评论, 2022, 34(9): 120-133.

(本文责编: 辛 城)