

碳中和债券市场对碳交易市场的风险溢出效应研究

茅啸天, 刘胜题

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2023年9月4日; 录用日期: 2023年10月22日; 发布日期: 2023年10月31日

摘要

本文从绿色金融体系出发, 聚焦于中国碳排放权交易市场(碳市场), 探寻其相关联市场波动对其市场风险的风险溢出效应影响。以碳中和债市场为例, 采用Copula函数对收益率序列进行耦合, 据此计算和比较碳中和债市场风险对不同碳市场风险的CoVaR值大小。实证结果表明: 中国碳试点与碳债指数二者市场风险的相关性为正, 表明两市场间存在一定程度的相关性。且在碳试点市场风险的条件在险价值的度量中, 市场风险的风险溢出效应存在一定的区域差异。此外, 关联市场冲击所导致市场风险波动的上行风险要大于下行风险, 也值得关注。本文深化了碳中和债市场与碳市场波动间的内在逻辑关系的理论认知, 并为相关部门管理碳交易市场风险、构建预警机制, 及高碳企业发行碳中和债提供了经验证据。

关键词

碳排放权交易市场(碳市场), 风险依赖, 在险价值(VaR), Copula模型, 条件在险价值(CoVaR)

Research on Risk Spillover Effect of Carbon Neutral Bond Market on Carbon Trading Market

Xiaotian Mao, Shengti Liu

School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Sep. 4th, 2023; accepted: Oct. 22nd, 2023; published: Oct. 31st, 2023

Abstract

From the perspective of a green financial system, this paper focuses on China's carbon emissions

文章引用: 茅啸天, 刘胜题. 碳中和债券市场对碳交易市场的风险溢出效应研究[J]. 运筹与模糊学, 2023, 13(5): 5896-5904. DOI: 10.12677/orf.2023.135585

trading market (carbon market) and explores the risk spillover effect of its associated market volatility on its market risk. Taking the carbon neutral bond market as an example, a Copula function is used to couple the yield series, to calculate and compare the CoVaR value of carbon neutral bond market risk to different carbon market risks. The empirical results show that the correlation between the market risk of China's carbon pilot and the carbon bond index is positive, indicating that there is a certain degree of correlation between the two markets. In the measure of the conditional insured value of the carbon pilot market risk, there are some regional differences in the risk spillover effect of market risk. In addition, the upside risk of market risk volatility due to correlated market shocks is greater than the downside risk, which is also a cause for concern. This paper deepens the theoretical understanding of the intrinsic logical relationship between the carbon-neutral debt market and carbon market volatility and provides empirical evidence for the relevant authorities to manage the risks of the carbon trading market, build an early warning mechanism, and issue carbon-neutral debt by high carbon enterprises.

Keywords

Carbon Emissions Trading Market (Carbon Market), Risk Dependence, Value at Risk (VaR), Copula Model, Conditional Value at Risk (CoVaR)

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

碳市场作为落实我国“双碳目标”的重要政策工具,其定位主要在于通过市场化机制来达成控制重点行业温室气体排放的目的,并推动绿色低碳技术的创新。而同为我国绿色金融体系一部分的绿色债券市场,通过为企业募集资金,并用于投资绿色低碳项目或低碳技术的研发。二者通过不同的实施路径,向着趋同的目标共同发展,即发展绿色低碳经济。

对比碳市场和绿色债券市场尤其是其中的子市场碳中和债市场发现,二者有关碳减排方面的目标是相一致,并且其作用的终端都为企业,据观察一些关注气候变化的碳市场交易者经常使用绿色债券来抵消碳交易市场的风险。可以推测这两个市场间存在一定程度的相关性。此外,考虑我国碳市场制度的不完善,尤其是21年新设的全国碳市场,常常面临较大的市场风险,易受极端外部冲击或季节性波动影响,短期内还存在一些异常价格波动,假设将上述两市场综合考量,从碳中和债市场对碳市场风险溢出的角度来解释碳市场的一些短期波动情况。有助于研究我国绿色金融体系各组成部分间的相互冲击,协助我们相关部门对碳市场市场风险的识别,通过对风险溢出效益的量化,对碳市场风险进行更好的风险管理。

2. 文献综述

2.1. 碳市场风险研究综述

近年来伴随着碳市场发展的逐步深入,逐渐有学者将研究目光转向对碳市场风险的来源与度量。而碳市场风险的研究主要集中于对碳价格波动的研究,现有对碳价格驱动因素的研究主要集中于能源价格 Xu (2021)、碳期货 Jin 等(2020)和金融市场 Gao (2023)方面[1] [2] [3]。在有关碳市场风险度量方面,比较有代表性的研究包括朱帮助等(2023),刘红琴和胡淑慧(2021)以及 Yang *et al.* (2022)等,这些文献均采用 VaR 方法来衡量碳市场的市场风险。其中朱帮助等(2023)采用 Regular vine copula 模型结合 VaR 和 CoVaR

的方法来衡量我国七大试点碳市场的风险[4]。刘红琴和胡淑慧(2021)则采用传统的 GARCH 模型结合 VaR 的方法来衡量我国不同试点碳市场的风险[5]。而 Yang *et al.* (2022)则认为在衡量碳市场风险时应当着重考虑碳价格的尾部特征,并通过极值理论、标准化非对称指数幂分布等方法来衡量碳市场的市场风险[6]。

2.2. 绿色债券市场风险研究综述

绿色债券市场作为一个新兴的金融市场,备受学者关注。学者们主要关注绿色债券与其他市场的关系,如能源市场、股票市场 Reboredo *et al.* (2018) [7]。Naeem *et al.* (2021)发现,从长远来看,绿色债券与原油之间存在高度相关性[8]。Nguyen *et al.* (2021)使用滚动窗口小波相关方法发现绿色债券与清洁能源之间存在密切关系[9]。Liu *et al.* (2023)证明能源市场(煤炭、原油和天然气)和碳市场之间极端风险的溢出效应,且二者间存在的尾部依赖[10]。李厚建等(2023)运用时变参数向量自回归(TVP-VAR)模型证明短期内中国绿色债券多数时候对碳价有显著负面影响[11]。

2.3. 碳市场风险与绿色债券市场风险之间的风险溢出研究综述

在上述文献中许多学者在考量碳市场和绿色债券市场的市场风险时考虑了诸如能源价格、金融市场等共同影响因素,学者们将一部分重心置于探寻两者间相关关系,诸如 Leitao *et al.* (2021)使用马尔科夫变换(MS)方法,发现绿色债券对低波动性和高波动性制度下的碳价格变动具有积极和显著的影响[12]; Rannou *et al.* (2021)从电力公司的角度出发,衡量在日常交易活动中为了降低欧洲碳价格波动造成的影响,用绿色债券或碳期货进行对冲活动的作用[13]; Jin *et al.* (2020)基于动态对冲比率模型(DCC-APGARCH、DCC-T-GARCH 和 DCC-GJR-GARCH 模型)考察碳期货收益与 VIX 指数、大宗商品指数、能源指数和绿色债券指数收益间的关联,实证结果显示绿色债券时碳期货最好的对冲工具; 仁小航等(2022)采用 quantile-on-quantile (QQ)回归方法构建的二维分位数模型实证分析了碳期货的不对称影响,其发现碳期货在中长期的积极影响和短期的不稳定表现,且当两个市场都处于极端状态时,这种影响更为明显[14]; 李厚建等(2022)采用时变参数向量自回归(TVP-VAR)模型探索油价、绿色债券指数、碳排放权价格和碳效率指数之间的动态关系,结果显示绿色债券指数在短期和中期对碳价产生积极影响[15]; 后续李厚建等(2023)在探究绿色债券市场和碳市场关联时,加入了经济政策不确定性考虑了经济环境的变化,实证结果显示绿色债券在多数时候对碳价有显著的负面影响。

综上所述,现有文献中,国内外学者就探究绿色债券市场与碳期货市场、碳排放权交易市场间的相互影响,分别从碳价波动、碳价指数回报、碳期货价格等角度出发,进行了绿色债券对碳排放权交易市场的对冲效果、冲击影响以及价格变动等方面的深入研究[16]。据此,本文在考虑绿色债券市场和碳市场相关关系的基础上,考虑绿色债券市场对碳市场的风险溢出效应,采用 Copula-GARCH 模型来衡量碳市场与碳中和债市场的依赖性,并在此基础上应用风险价值(VaR)和条件风险价值(CoVaR)来衡量碳市场的尾部风险相关性,从而精确衡量碳市场风险。基于此目标不仅深化了碳中和债市场与碳市场波动间的内在逻辑关系的理论认知,为相关部门管理碳交易市场风险、构建预警机制,及高碳企业发行碳中和债提供了经验证据。

3. 实证研究设计

3.1. GARCH 模型

GARCH 模型能够很好的捕捉金融时间序列不断变换的方差,因而成为构建时间序列边缘分布的主要方法之一。又由于应用 Copula 模型时要求边缘分布为(0, 1)均匀分布,且碳市场时间序列具有尖峰厚尾、自相关和异方差特征。因此采用 GARCH 模型来获取各碳市场中碳价格对数收益率的标准化残差序列,

由于标准化的残差序列只是去除了原序列的自相关性以及异方差性, 因此最终进行 Copula 建模后对应的相关性可以表示原序列的相关性。

ARMA (p, q)-GARCH (1, 1)模型的均值方程如式(1):

$$x_t = \phi_0 + \phi_1 x_{t-1} + \dots + \phi_p x_{t-p} + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t \quad (1)$$

条件方差方程如式(2):

$$\sigma_t^2 = \alpha_0 + \alpha_1 \varepsilon_{t-1}^2 + \beta_1 \sigma_{t-1}^2 \quad (2)$$

3.2. Copula 函数

在通过 GARCH 模型获得碳中和债指数以及各碳市场收益率的残差序列后, 运用 Copula 模型来描述碳市场对碳中和债市场不确定性的动态依赖关系。Copula 模型能够很好的捕捉不同市场间的非线性和不对称关系, 通过采用不同的静态 Copula 模型来对碳中和债指数以及各碳市场碳排放价收益率的联合分布进行建模。并使用 AIC、BIC 准则来确定最优 Copula 函数, 采用 Kendall 系数来测度两市场风险变化的一致程度。

3.3. CoVaR 模型

CoVaR 模型是基于 VaR 模型进行升级优化的, 虽然 VaR 模型能够较好的度量金融资产的最大可能损失, 但是其不能考量极端情况下的风险值, 当宏观经济不稳定等情况, 金融市场的波动性会加剧, 不同的市场间会存在风险相互传染的情况, 也是本文想研究的风险溢出效应。而使用 CoVaR 模型则可以较好预测极端情况下金融市场间的风险溢出效应, 因此本文通过采用计算 CoVaR 值来量化碳中和债市场的不确定性对碳市场的风险溢出程度。

4. 实证分析

4.1. 数据来源

我国现有一个全国碳排放权交易市场(简称: 全国碳市场)和七个碳排放权交易地方试点(简称: 碳试点)。全国碳市场自 2021 年 7 月 16 日开始运行, 平稳运行已有两年之久, 目前全国碳市场交易量呈现稳步提升的趋势, 价格也逐渐趋于稳定, 但考虑到全国碳市场仅将电力行业纳入其中, 不能全面代表我国碳市场因此将各个碳试点也纳入考虑范围之中。但考虑近两年时间, 各个碳试点的交易活跃度、交易量不同, 最终选择了深圳和湖北两个碳试点与全国碳试点一起纳入考察范围。

全国碳市场与深圳、湖北两个碳试点样本期间均为 2021 年 7 月 16 日至 2023 年 7 月 26 日。其中如果为正常交易日由于没有交易数据导致价格缺失采取用前值补充; 此外如果为正常交易日但只有一个交易市场存在交易数据则将个交易日数据剔除。最终三个交易市场(试点)的有效样本量为各 490 个, 总计样本量为 1470。

碳中和债自 2021 年 2 月首只债券发行至今已有两年多, 中证指数于 2021 年 8 月 12 日发行中证碳中和指数(931724.CSI), 其是以沪深交易所或银行间市场上市、剩余期限 1 个月以上的债券中, 选取募集资金用于具有碳减排效益的绿色项目的债券作为指数样本, 用于反映全市场碳中和债券的整体表现。因此选用与碳交易市场同期的该指数来反映碳中和债市场的风险。

通过对上述四组数据进行简单的数据处理后, 获得四个对数收益率组合分别命名为 CB (碳中和债指数)、CEA (全国碳市场)、SZE (深圳碳试点)、HBEA (湖北碳试点), 通过对数收益率的波动来反映不同市场各自的风险。ADF 单位根检验结果显示, 三个碳市场(碳试点)的收益率以及碳中和债指数的收益率

都是平稳的时间序列。但 ARCH-LM 检验表明其都存在条件异方差性, 因此本文选用 GARCH 模型来构建均值方程, 为后续构建 Copula 模型做准备。

4.2. 边际分布模型参数估计

由于上述收益率序列存在明显的厚尾特征, 因此在选择边际分布特征时本文选用 GED 分布即 ARMA-GARCH-G 模型来进行特征描述。而对于均值方程滞后阶数的选择, 本文考虑了 $p = 0 \sim 3$ 阶 $q = 0 \sim 3$ 阶的 ARMA(p, q)-GARCH(1, 1)-G 共 15 种模型, 并根据 AIC、BIC 准则选择最优模型。

Table 1. Carbon bond index and ARMA-GARCH-G model parameter estimation results of carbon market risk
表 1. 碳债指数及碳市场市场风险 ARMA-GARCH-G 模型参数估计结果

参数	碳中和债指数 CB	全国碳市场 CEA	深圳碳试点 SZA	广东碳试点 GDEA	湖北碳试点 HBEA
均值方程					
μ	0.000178*** (0.000007)	-0.000004*** (0.000001)	0.002449*** (0.000144)	-0.001698*** (0.000025)	-0.000220*** (0.000016)
AR(1)	-1.160647*** (0.028732)	0.330028*** (0.003501)	0.091388*** (0.000943)	0.797922*** (0.021117)	0.384727*** (0.008625)
AR(2)	-0.318634*** (0.027504)	-0.000937*** (0.000015)	0.595216*** (0.008296)	—	0.148082*** (0.003749)
AR(3)	0.317497*** (0.015349)	0.001553*** (0.000004)	—	—	-0.062045*** (0.002284)
MA(1)	1.588196*** (0.029910)	-0.327076*** (0.003709)	-0.103499*** (0.001634)	-1.272670*** (0.009195)	-0.601737*** (0.008991)
MA(2)	1.034409*** (0.053887)	—	-0.625478*** (0.008382)	0.355161*** (0.001941)	—
MA(3)	0.157148*** (0.017260)	—	—	—	—
方差方程					
ω	0.000020*** (0.000008)	-0.837916*** (0.007255)	-0.115775*** (0.002262)	-1.642829*** (0.010751)	-2.286025*** (0.013492)
α	0.165301*** (0.045676)	0.044893*** (0.003364)	0.004398*** (0.001640)	0.153381*** (0.001421)	-0.047277*** (0.017367)
β	0.805043*** (0.048537)	0.912353*** (0.003577)	0.977698*** (0.001293)	0.730370*** (0.002317)	0.703374*** (0.003971)
Skewness	1.068576	0.999119	0.978534	0.789359	0.966108
Kurtosis	1.219890	0.236217	0.590802	0.518526	0.800813
模型检验					
Log-L	3348.986	1904.983	580.7145	1000.405	1257.21
AIC	-13.616	-7.7305	-2.3254	-4.0425	-5.0866
BIC	-13.505	-7.6364	-2.2312	-3.9569	-4.9924
LB(5)	2.08940	0.4968	0.5993	0.11022	6.0096*
LB(9)	3.68375	0.7699	0.9025	0.18353	15.5733***
ARCH-LM(5)	2.110	0.24841	0.2164	0.08636	15.6803
ARCH-LM(7)	3.243	0.39516	0.4565	0.13060	18.7780

注: 括号中为标准误差; *, **, *** 分别表示在 10%, 5% 和 1% 的水平上显著; LB 和 ARCH-LM 分别是 Ljung-Box 检验和 ARCH-LM 检验的统计量。

由表 1 可知碳债指数以及碳市场(碳试点)收益率市场风险的 ARMA-GARCH-G 模型结果。表 1 分为均值方程、方差方程和模型检验三部分。由表可知所以 GARCH 模型的标准残差在广义误差分布 1% 水平下均为显著的, 因此本文选用 GED 分布来刻画收益率市场风险是合理的, 其次对于标准化残差的 Ljung-Box 检验和 ARCH-LM 检验则表明模型较为准确的描述了各市场风险的特征。

观察表 1 中均值方程部分可以看出, 碳债指数以及碳价收益率的市场风险均明显受到前期信息的影响同时存在不同程度的时间滞后效应。尤其体现在碳债指数收益率上, 不仅受到前三期自身信息影响, 并且持续性较强。

在方差方程部分中, 各碳市场收益率 ARCH 项系数 α 在 1% 水平下均显著且除湖北外均为正, 表明前一期的误差项即外部冲击会加剧各碳市场市场风险的波动。且各碳市场收益率的 GARCH 项系数 β 同样在 1% 水平下均显著且为正, 表明前期波动对自身冲击将随时间减弱。同时所有 GARCH 模型 $\alpha + \beta$ 的值均小于 1, 满足模型的约束条件。同时所有 $\alpha + \beta$ 的值都接近 1, 这表明碳市场收益率的市场风险的条件方差受到的冲击在短期内不易消除。

综上所述, 可得我国碳市场及碳试点普遍存在波动聚集效应, 一旦出现波动较大的市场风险便会持续一段时间, 且短期不易消除, 并且又易受外部冲击影响, 因此, 有必要关注与碳市场具备高度关联性的市场其市场风险波动, 由于市场联动以及风险溢出效应的存在, 当关联市场风险加剧出现大幅波动时, 及可能带动碳价波动。所以, 对碳市场及其关联市场风险进行持续关注, 并实施有效的预警、防范措施, 防范市场参与者出现重大损失, 并为相关管理机构提供参考数据是非常有必要的。

4.3. 碳市场及碳试点市场风险的度量

在获取市场风险的边际分布模型后, 本文采用参数法来获取各收益率的 VaR 值, 假设收益率符合本文的广义误差分布, 然后根据边缘分布模型所估计出的各项参数, 借用分布的累积分布函数计算收益率的在险价值。从计算结果表 2 来看, 不论是上行风险还是下行风险, 深圳碳试点的 VaR 值均是最高, 全国碳市场和湖北碳试点的 VaR 值较低, 而碳中和债指数收益率的 VaR 均最低。可以看出由于深圳碳试点同时交易多种产品, 导致其价格波动更加频繁, 因此与其他碳市场的投资者相比投资深圳碳试点的投资者所面临的市场风险更大。而反观碳中和市场这边, 从指数收益率可以看出, 自发布近两年碳中和债指数波动并不明显, 这与碳中和债的发行方式有着必然联系, 我国现存的碳中和债大部分在银行间市场发行, 这就提高了投资者的入市门槛, 并且由于债券的自身属性导致其交易活动发生的并不频繁, 这也是碳中和债市场风险较小的原因之一。但是仅仅比较单一的市场风险并不是本文关注的重点, 为了探寻这两市场间市场风险的相互影响程度, 下面采用 Copula 模型进行实证分析。

Table 2. VaR value of upside and downside risk of China's carbon market at 5% level

表 2. 5%水平下中国碳市场风险上行和下行的 VaR 值

序号	CB	CEA	SZEA	GDEA	HBEA
Upside VaR	0.000653	0.015786	0.264082	0.069411	0.036408
Downside VaR	-0.000294	-0.015821	-0.268840	-0.116498	-0.039205

注: 由于计算获得的 VaR 是时间序列, 为了方便比较, 因此采用均值进行描述。

4.4. 碳债指数与碳市场市场风险间的风险依赖

在构建 Copula 模型前, 先对原收益率经概率积分变换后的新序列进行 Kolmogorov-Smirnov 检验, 用以判断其是否满足 Copula 模型构建的前提条件, 即是否为均匀分布序列。由表 3 结果可得, 全国碳市场和广东碳试点概率积分变换后的序列经检验后的 p 值小于 0.05, 不能拒绝原假设, 不符合均匀分布的

特征, 因此在构建 Copula 模型时将其去除, 用剩余的深圳、湖北碳试点序列与碳中和债指数序列完成模型的构建。

Table 3. Kolmogorov-Smirnov test results

表 3. Kolmogorov-Smirnov 检验结果

序号	CB	CEA	SZEA	GDEA	HBEA
D	0.026292	0.13068	0.023673	0.066103	0.031031
P 值	0.8872	1.08e-07	0.9465	0.02762	0.7329

注: D 表示数据的经验分布函数(EDF)和理论分布函数(CDF)之间的最大差距, 如果差距过大, 表示数据与理论分布不一致。

本文依照 AIC 准则确定最优 Copula 模型, 并分析了中证碳中和债指数市场风险与各碳市场风险的非线性关系, 如表 4 所示。其中, Kendall 系数被用来测度碳试点两种风险因子变化的一致程度。

Table 4. Carbon bond index and Copula model results of carbon market

表 4. 碳债指数与碳市场的 Copula 模型结果

碳市场	family	parameter 1	parameter 2	Kendall's tau	Upper tail
深圳碳试点	Tawn type 2	1.44	0.03	0.02	0.03
湖北碳试点	Clayton	0.05	—	0.03	0

表 4 中的结果显示, 所有碳市场的市场风险与碳债指数的 Kendall 系数为正, 二者之间存在正相关关系。可以支持本文的论点, 即碳中和债市场运行出现极端风险时, 其可能会存在一定的溢出效应, 导致碳市场运行波动加剧, 进而加剧市场参与者的风险, 及相关管理部门管理难度。

通过比较 Kendall 系数的大小可知, 在湖北碳试点上, 碳中和债市场风险与碳市场风险的关系更为紧密, 风险的溢出效果更加显著, 而在深圳碳试点, 两种风险因子的相关性较弱, 风险的溢出效果较差。

4.5. 碳试点市场风险条件风险价值的度量

在获取碳债指数与碳市场市场风险间的风险依赖后, 本文依旧采用参数法进行 CoVaR 的估计, 结果如表 5 所示。

Table 5. CoVaR value of carbon bond index on carbon pilot market risk

表 5. 碳债指数对碳试点市场风险的 CoVaR 值

碳试点	Upside CoVaR (0.95)	Downside CoVaR (0.05)
深圳	0.049313	-0.041887
湖北	0.003919	0.003212

表 5 的结果显示, 对于深圳碳试点和湖北试点, 上行 CoVaR 的绝对值均大于下行 CoVaR 的绝对值, 表明在面对碳中和债市场的不确定性下, 碳市场受到冲击后产生的上方尾部风险要大于下方尾部风险。并且证实了碳中和债市场对碳市场存在一定程度的风险溢出效应。但比较两市场 CoVaR 绝对值大小可以发现, 不同碳市场受其的影响程度是不同的, 深圳碳试点受风险溢出效应的影响比湖北碳试点的更大。

5. 结论与建议

本文采用 CoVaR 方法来衡量碳中和债市场的市场风险对碳试点市场风险的风险溢出效应。考虑近两年我国碳市场的发展迅速, 因此选用全国碳市场以及深圳、广东、湖北三个碳试点作为碳市场的代表进行研究。考虑碳中和债市场交易频率不频繁, 选用中证碳中和债指数来表现碳中和债市场波动。依据收

益率序列边际分布模型参数进行 Copula 模型的估计, 以此反应两市场间的相关关系, 最后通过计算 CoVaR 值来衡量碳债指数与湖北、深圳碳试点之间的风险溢出效应。得到以下结论。首先, 全国、深圳碳价波动较大, 碳市场运行存在较大风险, 而湖北、广东市场风险较小。其次, 碳债指数对深圳、湖北市场存在一定程度的风险溢出。碳债与广东、碳债与深圳市场之间由于边际分布序列并不符合均匀分布因此无法确定是否存在风险溢出效应。最后, 我国碳市场还不成熟, 碳市场监管力度不够。根据所得结论, 针对碳市场风险控制提出了若干建议。

一是构建有效的碳市场风险预警体系。碳市场监管部门可定性分析与定量分析相结合的方法识别碳市场风险影响因素, 构建全面有效的碳市场风险预警体系。以便于监管部门及时识别碳市场风险类型、风险状况并分析风险形成原因, 及时掌握碳市场风险信息, 并据此采取相应的风险防控措施。在市场风险较高的情况下, 应采用压力测试的方法来测试碳市场在极端条件下的状况和表现。

其次, 出台相应降低和治理碳市场风险的政策。我国碳市场尚处于高速发展阶段, 应在市场建设和环境培育方面采取一系列积极的政策支持。一方面, 完善碳市场法律法规, 鼓励企业参与碳交易, 培育碳金融方面专业人才。加强对碳金融发展的支持, 为发展碳市场创造良好的外部环境。另一方面, 针对碳市场运行中暴露出的问题, 应运行合理有效的碳金融交易体系, 将碳市场风险降到最低。对于碳市场之间的风险溢出效应, 政府不仅要考虑某一市场的现状, 还要考虑其他市场的运行情况, 如相关政策变化、识别风险溢出的来源等。根据碳市场在风险溢出效应中的不同地位和作用, 应改进碳市场的机制设计, 以治理和降低碳市场风险。

最后, 加强我国碳市场的统一监管。加强碳市场的统一监管对于碳市场的健康可持续运行至关重要。我国目前全国碳市场和七大碳试点共存的局面, 可以预见短期内难以取代, 因此及时设立统一的碳金融监管机构是不可或缺的。从一级市场配额分配到二级市场配额交易, 都要采取全面监测、及时降低和管理碳市场风险的措施。同时, 努力实现碳市场统一配额分配和价格制定, 兼顾效率和公平。碳配额应通过真实、透明的碳价格进行分配, 营造公平、活跃的碳市场。通过这些措施, 可以妥善防范和降低全国和地区的碳市场风险, 为我国发展绿色可持续作出贡献。

参考文献

- [1] Xu, Y. (2021) Risk Spillover from Energy Market Uncertainties to the Chinese Carbon Market. *Pacific-Basin Finance Journal*, **67**, 101561. <https://doi.org/10.1016/j.pacfin.2021.101561>
- [2] Jin, J., Han, L., Wu, L., et al. (2020) The Hedging Effect of Green Bonds on Carbon Market Risk. *International Review of Financial Analysis*, **71**, 101509. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2020.101509>
- [3] Gao, Q., Zeng, H., Sun, G., et al. (2023) Extreme Risk Spillover from Uncertainty to Carbon Markets in China and the EU—A Time Varying Copula Approach. *Journal of Environmental Management*, **326**, 116634. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116634>
- [4] 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.
- [5] 刘红琴, 胡淑慧. 不同情境下中国碳排放权交易市场的风险度量[J]. 中国环境科学, 2022, 42(2): 962-970.
- [6] Yang, X., Zhang, C., Yang, Y., et al. (2022) A New Risk Measurement Method for China's Carbon Market. *International Journal of Finance & Economics*, **27**, 1280-1290. <https://doi.org/10.1002/ijfe.2214>
- [7] Reboredo, J.C. (2018) Green Bond and Financial Markets: Co-Movement, Diversification and Price Spillover Effects. *Energy Economics*, **74**, 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.05.030>
- [8] Naeem, M.A., Nguyen, T.T.H., Nepal, R., et al. (2021) Asymmetric Relationship between Green Bonds and Commodities: Evidence from Extreme Quantile Approach. *Finance Research Letters*, **43**, 101983. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2021.101983>
- [9] Nguyen, T.T.H., Naeem, M.A., Balli, F., et al. (2021) Time-Frequency Comovement among Green Bonds, Stocks, Commodities, Clean Energy, and Conventional Bonds. *Finance Research Letters*, **40**, 101739.

- <https://doi.org/10.1016/j.frl.2020.101739>
- [10] Liu, J., Man, Y. and Dong, X. (2023) Tail Dependence and Risk Spillover Effects between China's Carbon Market and Energy Markets. *International Review of Economics & Finance*, **84**, 553-567.
<https://doi.org/10.1016/j.iref.2022.11.013>
- [11] Li, H., Li, Q., Huang, X., *et al.* (2023) Do Green Bonds and Economic Policy Uncertainty Matter for Carbon Price? New Insights from a TVP-VAR Framework. *International Review of Financial Analysis*, **86**, 102502.
<https://doi.org/10.1016/j.irfa.2023.102502>
- [12] Leitao, J., Ferreira, J. and Santibanez-Gonzalez, E. (2021) Green Bonds, Sustainable Development and Environmental Policy in the European Union Carbon Market. *Business Strategy and the Environment*, **30**, 2077-2090.
<https://doi.org/10.1002/bse.2733>
- [13] Rannou, Y., Boutabba, M.A. and Barneto, P. (2021) Are Green Bond and Carbon Markets in Europe Complements or Substitutes? Insights from the Activity of Power Firms. *Energy Economics*, **104**, 105651.
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105651>
- [14] Ren, X., Li, Y., Yan, C., *et al.* (2022) The Interrelationship between the Carbon Market and the Green Bonds Market: Evidence from Wavelet Quantile-on-Quantile Method. *Technological Forecasting and Social Change*, **179**, 121611.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121611>
- [15] Li, H., Zhou, D., Hu, J., *et al.* (2022) Dynamic Linkages among Oil Price, Green Bond, Carbon Market and Low-Carbon Footprint Company Stock Price: Evidence from the TVP-VAR Model. *Energy Reports*, **8**, 11249-11258.
<https://doi.org/10.1016/j.egyvr.2022.08.230>
- [16] 曾诗鸿, 贾婧敏, 姚树洁, 等. 基于 Copula 模型的中国碳市场叠加风险度量[J]. 金融研究, 2023(3): 93-111.