

# 中国碳市场与电力市场间的风险溢出效应研究

## ——基于BK溢出指数模型

王喜平 王婉晨

(华北电力大学经济管理系, 保定 071000)

**〔摘要〕** 研究碳市场与电力市场间的风险溢出效应, 对于有效防范碳金融风险以及国家节能减排战略的稳步推进具有重要意义。本文基于广义方差分解谱构建溢出指数, 从频域视角考察中国碳市场与电力市场在短、中、长期的静态溢出和时变溢出, 并根据溢出指数构建溢出网络, 探究风险的中心与演化。结果表明: 中国碳市场与电力市场之间的风险溢出短期>中期>长期, 且存在一定的波动性和不确定性, 受宏观经济状况影响较大。发电企业接收到的风险量与火电装机比例有关, 发电企业输出风险的能力与发电量有关。在短期, 碳市场属于风险净接收方, 而在中长期, 碳市场属于风险净溢出方。基于上述结论提出了相关政策建议。

**〔关键词〕** 碳市场 电力市场 BK溢出指数 频域 溢出网络 广义方差分解

DOI: 10.3969/j.issn.1004-910X.2022.05.007

〔中图分类号〕 F426.61; F832.5 〔文献标识码〕 A

### 引言

进入21世纪, 伴随着极端天气、自然灾害的频发, 加速传统能源向清洁低碳转型、积极应对气候变化成为全球共同性议题。我国积极宣传并推动碳达峰、碳中和目标的实施, 既是践行习近平生态文明思想的重大实践, 也体现了促进经济社会绿色转型的决心与担当。目前, 碳排放交易市场是全球公认的促进低碳经济发展和减少温室气体排放的最有效手段, 已在全球30多个国家和地区付诸实施。我国在试点市场的基础上, 全国碳排放权交易已于2021年7月正式开市, 但由于其交易标的复杂性、时间的跨期性以及结果的不确定性, 碳金融市场呈现出比传统股票市场更大的不稳定性, 蕴含着巨大的风险。与此同时, 发电企业作为首批纳入全国碳市场的行业, 同时参与碳市场和电力市场。致使两个市场的参与主体高度一致、交错重叠、相互影响, 应当形成合力、实现协同发展。因此, 准确刻画碳市场与电力市场之间的溢出效应对碳交易市场风险管理、国家节能减排战略的稳步推进以及双碳目标的实现具

有重要意义。

近年来, 有关碳市场与能源市场之间的溢出效应研究已成为学界关注的焦点。事实上, 已有大量研究证明, 碳市场与能源市场之间存在明显的溢出效应。欧盟碳市场作为目前全球最具代表性的碳交易市场, 是许多研究的主要考察对象。如Liu和Chen(2013)<sup>[1]</sup>基于FIEC-HYGARCH模型, 研究证实了欧盟碳市场与原油、煤炭、天然气市场之间存在波动溢出效应。Balciyar等(2016)<sup>[2]</sup>采用MS-DCC-GARCH模型研究发现能源市场对欧盟碳市场的风险传导具有显著的波动性和时变性。Zhang和Sun(2016)<sup>[3]</sup>基于DCC-TGARCH和BEKK-GARCH模型, 证实了欧盟碳市场与煤炭市场、天然气市场具有明显的单向溢出效应, 但与原油市场之间溢出效应并不明显。Wang和Guo(2018)<sup>[4]</sup>运用Diebold和Yilmaz(简称为DY)溢出指数研究发现WTI原油与天然气市场对欧盟碳市场的溢出效应较强, 且一些重大政策变化会导致溢出指数发生较大波动。Tan等(2020)<sup>[5]</sup>运用DY溢出指数模型研究发现化石能源、大宗商品

收稿日期: 2022-03-15

基金项目: 河北省社会科学基金项目“基于共享经济模式的雄安新区综合能源利用体系研究”(项目编号: HB19YJ011)。

作者简介: 王喜平, 华北电力大学经济管理系教授, 博士, 硕士生导师。研究方向: 能源经济与可持续发展。王婉晨, 华北电力大学经济管理系硕士研究生。研究方向: 能源金融。

市场以及股市对欧盟碳期货的溢出效应较为显著,且溢出强度与重大危机事件紧密相关。

随着中国碳试点市场投入运行,国内外学者开始关注中国碳市场与能源市场的联动性和溢出效应。Lin 和 Chen (2019)<sup>[6]</sup>运用 VAR(1)-DCC-GARCH(1,1)模型和 VAR(1)-BEKK-GARCH(1,1)模型研究发现国内碳市场与煤炭市场和新能源市场之间存在一定的相关性和风险溢出效应。刘建和等(2020)<sup>[7]</sup>运用 VAR 和 DCC-GARCH 模型分析发现我国焦煤市场与碳市场之间的溢出效应在所有能源市场中最强。赵领娣等(2021)<sup>[8]</sup>运用 DY 溢出指数模型研究发现中国碳市场与能源市场之间存在双向溢出效应,但不同区域碳市场与能源市场间溢出效应的特征和净溢出关系存在差异。

然而,上述针对碳市场与能源市场之间溢出效应的研究,仅局限于煤炭、石油、天然气等化石能源。在我国,二氧化碳排放主要来自于能源活动,其排放量约占全社会二氧化碳排放量的 87%、全部温室气体排放量的 73%,但其中电力部门是重要的碳排放部门,约占能源碳排放的 40%,因此探究碳市场与电力市场之间的风险溢出效应具有重要意义。Ji 等(2019)<sup>[9]</sup>运用 DY 溢出指数模型研究发现碳市场价格与欧洲主要电力公司股票收益之间存在强烈的信息溢出,碳市场为信息接收者,且越大型电力公司往往对外信息溢出越明显。从动态来看,溢出指数呈现不稳定状态,其波动与碳市场运营状况和金融市场的风险事件有关。Yang (2020)<sup>[10]</sup>运用 DY 溢出指数研究发现碳市场是欧盟“碳-电力”系统的净接收方,德国和奥地利的电力公司在系统中起主导作用,且电力需求在风险溢出传递过程中起到了至关重要的作用。

从方法论的角度来看,虽然 DY 溢出指数模型可以克服 GARCH 模型不能具体刻画溢出的方向和强度的缺陷。但该模型仅局限于时域下溢出效应的探究,无法衡量频域下不同程度的溢出效应。Barunik 和 Krehlik (2018)<sup>[11]</sup>基于广义方差分解谱构建的溢出指数模型(简称为 BK),可以捕捉在高频率短周期、中频率中周期和低频率长周期下溢出程度的相同和不同,而传统的时域研究无法获取这种差异。因此,深入探究不同频域下碳市场与电力市场间的溢出效应对于精准把握风险溢出的时效性至关重要。

本文的贡献主要体现在以下两个方面:(1)不同于针对中国碳市场的大部分研究关注碳市场与化石能源市场之间的溢出效应,本文选取的研究对象针对中国的电力上市公司,且样本量选取具有一定广泛性,结合了大、中、小不同规模的发电企业,以及火电、水电、风电、光电和核电等多种发电模式,识别溢出机制和规律,丰富了已有研究;(2)大多运用溢出指数模型的文献,只针对溢出的强度和方向测算 DY 溢出指数,而本文在 DY 溢出指数的基础上,运用 BK 溢出指数,分析在短、中、长期状态下碳市场与电力市场之间的溢出效应,研究更具有全面性。与此同时,本文在溢出指数的基础上构建溢出网络,刻画经济一体化背景下碳市场与外部市场之间的交互关联,识别“碳-电力”系统中的风险溢出中心。

## 1 理论分析与模型构建

### 1.1 理论分析

众所周知,市场间的溢出效应是指一个市场的发展变化不仅会对自身产生影响,还会对其他市场产生的影响。本质上,溢出效应是一种信息的跨市场传播现象。与此同时,溢出效应的机制可以用两种理论来解释:(1)有效市场理论。①由于市场之间共同信息的存在,以及不同市场对信息的反应速度不同,会导致强有效市场对弱有效市场产生风险溢出;②由于市场私有信息存在,会导致一个市场所产生的波动信息溢出到其他市场。(2)行为金融理论。由于市场参与者往往都是非理性的,因此投资者情绪、羊群效应和启发式决策等投资行为,会导致两个市场之间的信息流动更加频繁,尤其是在经济不平稳时期,会进一步放大市场间的溢出效应。

具体到本文所选取的研究对象来说,图 1 示了碳市场与电力市场间的风险溢出机制,从中可以看出:发电企业在参与碳市场交易时,由于碳排放约束的存在,将会影响其发电决策和投资行为。因此,碳价格的波动将影响电力公司的发电成本,进而影响这些公司的股票价值;另外,发电企业发电方式的变动,也会影响碳排放权的供求,进而影响碳价格。因此,发电企业的经营发展状况将通过影响电力市场发电结构来影响碳价格。此外,极端气候、宏观经济波动和政策变动冲击也都会对碳和电力市场造成一定的影响,

这些危机事件的出现也会进一步加强各市场之间的关联性。

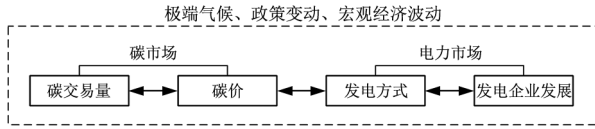


图1 碳市场与电力市场风险溢出机制

综上所述,随着碳市场的不断发展以及经济一体化的不断深入,其与电力市场之间的风险溢出效应也会更加显著。已有研究表明,波动率是市场信息的主要携带者,因此,本文基于波动率概念度量碳市场与电力市场之间的风险溢出效应。

## 1.2 模型构建

### 1.2.1 时域下的溢出测度——DY 溢出指数

(1) 构建一个平稳的  $N$  变量  $p$  阶向量自回归模型(VAR):  $X_t = \sum_{i=1}^p Y_i X_{t-i} \varepsilon_t$ 。其中,  $Y_i$  为系数矩阵;  $\varepsilon : (0; \Sigma)$  为独立同分布的扰动项向量; (2) 将 VAR 模型转化成为多变量滑动平均模型(VMA)形式的表达式,即  $X_t = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \varepsilon_{t-i}$ 。其中,  $A_i$  是一个  $N \times N$  单位的矩阵,并且对于  $i < 0, A_i = 0$ , 如果  $i = 0$ , 则  $A_i$  为  $N$  维的单位矩阵。

该模型中,变量  $X_j$  对于变量  $X_i$  溢出效应的估计值为变量  $X_i$  的  $H$  步预测误差方程中来自于  $X_i$  的部分  $\vartheta_{ij}^g(H)$ , 对于  $H=1,2,\dots,n$ , 其公式可以表示为:

$$\vartheta_{ij}^g(H) = \frac{\sigma_{ij}^{-1} \sum_{h=0}^{H-1} (e_i' A_h \Omega e_j)^2}{\sum_{h=0}^{H-1} [e_j^{H-1} (e_j' A_h \Omega A_h' e_i)]} \quad (1)$$

其中,  $\Omega$  为误差向量  $\varepsilon$  的方差矩阵;  $\sigma_{ij}$  为第  $i$  个变量预测误差的标准差;  $e_i$  为选择向量, 其为第  $i$  个元素是 1, 其余元素是 0 的  $N$  维列向量。方差分解表中每列元素之和不等于 1, 即  $\sum_{j=1}^N \vartheta_{ij}^g(H) \neq 1$ 。 $\vartheta_{ij}^g$  经过标准化处理后, 可以定义为:

$$\tilde{\vartheta}_{ij}^g(H) = \frac{\vartheta_{ij}^g(H)}{\sum_{j=1}^N \vartheta_{ij}^g(H)} \quad (2)$$

其中,  $\sum_{j=1}^N \tilde{\vartheta}_{ij}^g(H) = 1$ ;  $\sum_{i,j=1}^N \tilde{\vartheta}_{ij}^g(H) = N$ 。

总溢出指数是用来度量总体相关程度的指标,

解释整体的风险联动程度。总溢出指数记为  $TSI$ , 可由式 (3) 得出:

$$TSI(H) = \frac{\sum_{i,j=1, i \neq j}^N \tilde{\vartheta}_{ij}^g(H)}{\sum_{i,j=1}^N \tilde{\vartheta}_{ij}^g(H)} \times 100 = \frac{\sum_{i,j=1, i \neq j}^N \tilde{\vartheta}_{ij}^g(H)}{N} \times 100 \quad (3)$$

方向溢出指数用来度量某个市场与其余所有市场之间的溢出程度。式 (4) 和 (5) 可以分别度量市场  $i$  对其他市场的溢出指数、其他市场对市场  $i$  的溢出指数。

$$DSI_{j \leftarrow i}(H) = \frac{\sum_{j=1, i \neq j}^N \tilde{\vartheta}_{ji}^g(H)}{\sum_{i,j=1}^N \tilde{\vartheta}_{ji}^g(H)} \times 100 \quad (4)$$

$$DSI_{i \rightarrow j}(H) = \frac{\sum_{j=1, i \neq j}^N \tilde{\vartheta}_{ij}^g(H)}{\sum_{i,j=1}^N \tilde{\vartheta}_{ij}^g(H)} \times 100 \quad (5)$$

净溢出指数用来度量单个市场对于其他市场的净溢出, 由从市场  $i$  传导到其他市场的冲击减去其他市场传导到市场  $i$  的总冲击, 记为  $NSI$ :

$$NSI_{ij}(H) = \left( \frac{\sum_{j=1, i \neq j}^N \tilde{\vartheta}_{ji}^g(H) - \sum_{j=1, i \neq j}^N \tilde{\vartheta}_{ij}^g(H)}{\sum_{i,j=1}^N \tilde{\vartheta}_{ji}^g(H) - \sum_{i,j=1}^N \tilde{\vartheta}_{ij}^g(H)} \right) \times 100 \quad (6)$$

净配对溢出指数用来衡量单个市场之间波动溢出效应。

$$S_{ij}^g(H) = \left[ \frac{\tilde{\vartheta}_{ji}^g(H) - \tilde{\vartheta}_{ij}^g(H)}{\sum_{i,k=1}^N \tilde{\vartheta}_{ik}^g(H) - \sum_{j,k=1}^N \tilde{\vartheta}_{ik}^g(H)} \right] \times 100 = \left[ \frac{\tilde{\vartheta}_{ji}^g(H) - \tilde{\vartheta}_{ij}^g(H)}{N} \right] \times 100 \quad (7)$$

### 1.2.2 频域下的溢出测度——BK 溢出指数

基于频率响应函数  $\psi(e^{-i\omega}) = \sum_h e^{-i\omega h} \psi_h$ ,  $X_t$  在频率  $\omega$  上的谱密度  $S_X(\omega)$  为:

$$S_X(\omega) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} E(X_t X_{t-h}') e^{-i\omega h} = \psi(e^{-i\omega}) \Sigma \psi'(e^{+i\omega}) \quad (8)$$

其中  $\psi(e^{-i\omega})$  由  $\psi_h$  的傅里叶变换得到,  $i = \sqrt{-1}$ 。 $S_X(\omega)$  刻画了  $X_t$  的方差在频率  $\omega$  上是如何分布的, 它是理解频率动态的关键参数。

广义因果谱 (Generalized Causation Spectrum) 则可以定义为:

$$[f(\omega)]_{j,k} \equiv \frac{\sigma_{kk}^{-1} |[\psi(e^{-i\omega}) \Sigma]_{j,k}|^2}{[\psi(e^{-i\omega}) \Sigma \psi'(e^{+i\omega})]_{j,j}} \quad (9)$$

$[f(\omega)]_{j,k}$  表示在给定频率  $\omega$  上, 变量  $j$  的谱由变量  $k$  的冲击导致的部分。由于式 (9) 的分母为在给定频率  $\omega$  上变量  $j$  的谱, 可以将  $[f(\omega)]_{j,k}$  解释为频率内的因果关系 (Within-frequency Causation)。进一步引入变量  $j$  方差的频率份额作为权重函数:

$$\Gamma_j(\omega) = \frac{[\psi(e^{-i\omega}) \Sigma \psi'(e^{+i\omega})]_{j,j}}{\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [\psi(e^{-i\lambda}) \Sigma \psi'(e^{+i\lambda})]_{j,j} d\lambda} \quad (10)$$

$\Gamma_j(\omega)$  表示在给定频率上变量  $j$  的功率。那么, 在频率带  $d$  上的广义方差分解为:

$$(\theta_d)_{j,k} = \frac{1}{2\pi} \int_d \Gamma_j(\omega) [f(\omega)]_{j,k} d\omega \quad (11)$$

其中,  $d = (a, b)$ ,  $a, b \in (-\pi, \pi)$ ,  $a < b$ 。而且  $(\theta_\infty)_{j,k} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \Gamma_j(\omega) [f(\omega)]_{j,k} d\omega$ , 等于时域下  $H \rightarrow \infty$  时的  $(\theta_H)_{j,k}$ 。 $(\theta_d)_{j,k}$  可进一步标准化为:

$$(\tilde{\theta}_d)_{j,k} = \frac{(\theta_d)_{j,k}}{\sum_k (\theta_\infty)_{j,k}} \quad (12)$$

$(\tilde{\theta}_d)_{j,k}$  度量了在频率带  $d$  上的变量  $k$  对变量  $j$  的溢出水平。在频率带  $d$  上的总溢出指数  $C^d$ 、方向性溢出指数  $C_{j,j}^d$  和  $C_{j,j}^d$ 、净溢出指数  $C_{j,net}^H$ 、净配对溢出指数  $C_{jk}^H$  分别为:

$$C^d = \frac{\sum_{k,j=1; k \neq j}^N (\tilde{\theta}_d)_{j,k}}{N} \times 100 \quad (13)$$

$$C_{j,j}^d = \sum_{k=1; k \neq j}^N (\tilde{\theta}_d)_{j,k} \times 100 \quad (14)$$

$$C_{j,j}^d = \sum_{k=1; k \neq j}^N (\tilde{\theta})_{k,j} \times 100 \quad (15)$$

$$C_{j,net}^H = C_{j,j}^H - C_{j,j}^H \quad (16)$$

$$C_{jk}^H = [(\tilde{\theta}_d)_{k,j} - (\tilde{\theta}_d)_{j,k}] \times 100 \quad (17)$$

$C^d$ 、 $C_{j,j}^d$ 、 $C_{j,j}^d$ 、 $C_{j,net}^H$  和  $C_{jk}^H$  分别将时域下的总溢出  $TSI(H)$ 、方向性溢出  $DSI_{j \rightarrow i}(H)$  和  $DSI_{i \rightarrow j}(H)$ 、净溢出指数  $NSI_{ij}(H)$  和净配对溢出指数  $S_{ij}^g(H)$  分解到不同的频率带。

### 1.2.3 网络分析方法

为识别“碳-电力”系统中的风险溢出中心,

本文将各样本市场视为网络中的节点, 节点的中心度定义为与该节点连边的权重之和, 以衡量市场的重要性; 将两两市场间的溢出关系视为该网络的边, 以 DY 或 BK 模型计算得到的净配对溢出指数度量节点的出度和入度。

## 2 实证分析

### 2.1 变量选取与数据描述

尽管全国碳排放权交易已于 2021 年 7 月 16 日正式开市, 但目前交易数据有限, 因此本文选取区域碳交易市场数据进行研究。相较于我国其他试点市场而言, 湖北碳市场碳交易量占全国 33.14%, 碳交易额占全国 55.41%, 远高于其他市场, 在全国碳交易试点市场中具有举足轻重的地位, 因此本文选择湖北碳市场作为研究对象。

为研究碳市场与电力市场之间的风险溢出效应, 本文选取了 7 家电力上市公司作为电力市场的代表, 最终所选取公司和其他相关信息如表 1 所示。湖北碳市场交易数据来自于湖北碳排放权交易中心, 电力上市公司交易数据来自于 CSMAR (国泰安) 数据库。本文采用日波动率来表示市场之间的风险溢出, 借鉴 Schwert (1989)<sup>[12]</sup> 和 Engle 等 (2013)<sup>[13]</sup> 的方法, 计算各个市场收益率 ARMA 过程的残差序列, 将残差序列的绝对值做为波动率。所有数据的样本区间皆为 2015 年 6 月 3 日 ~ 2021 年 12 月 13 日, 且剔除了部分碳交易量为 0 的日期。表 2 给出了这 8 个变量数据的描述性统计。

由表 2 的数据可知: (1) 深南电 A 的波动率最大, 国电电力的波动率最小, 且碳市场的最大值为 0.2378, 高于其他变量, 并考虑到碳市场的标准差是除深南电 A 外所有变量中最大的, 为 0.0244, 可以看出碳市场相对于其他市场而言, 具有更大的风险不确定性; (2) 表 2 中各变量波动率序列偏度皆不等于 0, 且峰度都大于 4, JB 统计量的值也表明, 各变量的波动率序列都在 1% 的显著性水平下拒绝原假设, 即认为选取样本数据均不是正态分布, 具有尖峰厚尾的特征; (3) 采用 ADF 和 PP 两种方法进行平稳性检验, 检验结果表明, 每个波动率序列在 1% 置信水平下均平稳, 因此可以构建 DY 和 BK 溢出指数模型。

### 2.2 静态溢出指数

表 3 和表 4 报告了碳市场与股票市场之间的时域和频域风险溢出效应<sup>①</sup>, TO 行表示某市场对

表1 电力市场的选取与相关信息

名称	股票交易代码	发电类型	年度发电量(2020) (亿千瓦时)	火电装机比例(2020) (%)
国电电力	600795	火电、水电、风电、光电	3773.63	76.23
华电国际	600027	火电、水电、风电、光电	2073.17	85.81
上海电力	600021	火电、风电、光电	491.27	65.18
宝新能源	000690	火电、风电	133.02	98.64
金风科技	002202	风电	77.24	0
湖北能源	000883	火电、水电、风电、光电、核电	49	43.91
深南电 A	000037	火电	8.87	100

表2 各变量波动率的描述性统计

统计量	碳市场	国电电力	华电国际	上海电力	宝新能源	金风科技	湖北能源	深南电 A
均值	0.0203	0.0120	0.0154	0.0163	0.0179	0.0225	0.0147	0.0244
中间值	0.0110	0.0077	0.0100	0.0090	0.0111	0.0156	0.0083	0.0163
最大值	0.2378	0.1347	0.1227	0.1107	0.1092	0.1080	0.1112	0.1155
最小值	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
标准差	0.0244	0.0159	0.0182	0.0213	0.0206	0.0217	0.0191	0.0245
偏度	2.1989	3.4446	2.6332	2.6236	2.2181	1.7141	2.8132	1.6301
峰度	10.3273	17.8603	11.1961	10.0312	8.3307	5.9483	11.7998	5.2227
JB 检验	3992.3***	14666.4***	5188.5***	4207.8***	2629.3***	1117.7***	5963.7***	851.1***
ADF 检验	-7.6310***	-5.4371***	-5.2446***	-4.7731***	-6.6997***	-6.7083***	-4.9519***	-6.5257***
PP 检验	-25.2280***	-25.0290***	-30.3800***	-27.7680***	-28.5850***	-31.9400***	-23.2970***	-29.2640***

注：\*、\*\*、\*\*\* 分别表示在 10%、5%、1% 水平下显著。

其他市场的溢出效应，FROM 列表示受其他市场风险溢出的程度，NET 表示两者的差值，即对其他市场的净溢出程度。

### 2.2.1 时域静态溢出

表3为各个变量之间的时域溢出指数表，结果表明：(1) 总溢出指数为 50.72%，即 50.72% 的系统变量变化可以用系统中其他变量的变化来解释；(2) 所有市场受自身滞后效应影响均高于受其他市场风险溢出的影响。碳市场对角线上的值为 96.42%，而其他电力上市公司都至少从“碳-电力”系统中获得了 40% 以上的影响；(3) 从方向性溢出来看，各个变量之间的风险溢出效应是双向、非对称的，其中国电电力、上海电力和湖北能源为主要的风险溢出方，他们的股价波动不太可能会受到其他变量价格波动的影响，并且在“碳-电力”系统中具有主导作用；湖北碳市场、宝新能源、金风科技、深南电 A 为主要的风险接收方，其价格将面临更多的不确定性；(4) 除部分发电量较小的电力企业外，风险溢出方的火电

装机比例处于较低水平，风险接收方的火电装机比例处于较高水平。因此可再生能源发电比例较高的企业股价波动将更不容易受到碳价和其他企业股价波动的影响，成为风险溢出方。这表明，增加可再生能源发电比例将有助于发电企业降低风险；(5) 碳市场的净溢出指数为 -1.55%，这表明中国碳市场在样本期内主要是从电力市场获取信息，但向电力市场传递的信息则相对较少，这是由碳价过低和过于宽松的配额分配政策所导致的。该结论与 Li 等 (2020)<sup>[14]</sup> 的研究结果基本一致，即电力企业的股票价格波动可以为碳价格变化提供一些参考信息，但中国的碳市场尚未对电力公司产生较大的影响。

### 2.2.2 频域静态溢出

本文将频域空间划分为高频  $d_1 = \left(\frac{\pi}{15}, \pi\right)$ 、中频  $d_2 = \left(\frac{\pi}{60}, \frac{\pi}{15}\right)$ 、低频  $d_3 = \left(0, \frac{\pi}{60}\right)$ ，分别测度短期 (1~15 天)、中期 (15~60 天) 和长期 (60 天以上)

表3 各变量间的时域溢出指数表

单位:%

H=100	碳市场	国电电力	华电国际	上海电力	宝新能源	金风科技	湖北能源	深南电 A	FROM
碳市场	96.42	0.57	0.25	1.07	0.45	0.36	0.87	0.01	3.58
国电电力	0.21	35.07	16.51	14.62	8.96	5.12	14.23	5.28	64.93
华电国际	0.10	19.77	37.75	13.58	8.24	4.39	11.43	4.73	62.24
上海电力	0.43	16.75	13.16	37.13	9.00	4.24	13.59	5.69	62.86
宝新能源	0.32	13.33	8.61	10.74	44.71	4.84	11.36	6.10	55.30
金风科技	0.24	10.10	7.52	7.19	7.74	54.43	7.58	5.21	45.58
湖北能源	0.61	16.38	10.53	13.76	9.72	3.93	38.16	6.91	61.84
深南电 A	0.12	9.96	6.04	9.09	9.61	4.12	10.47	50.60	49.41
TO	2.03	86.86	62.62	70.05	53.72	27.00	69.53	33.93	50.72
NET	-1.55	21.93	0.38	7.19	-1.58	-18.58	7.69	-15.48	

情况下,碳市场与电力市场之间的溢出效应。表4为各个变量在不同频域下的静态溢出情况,结果表明:(1)短期溢出指数(28.95%)远高于中期(17.82%)和长期溢出指数(3.95%),表明时域下的溢出主要由短期溢出驱动,各变量之间的溢出效应主要发生在短期;(2)在时域和短期中,国电电力都是“碳-电力”系统的最大风险溢出者,而国电电力的年度发电量为所有变量之首。因此可以看出,在“碳-电力”系统中,股价波动对其他变量影响的大小与其发电量有一定

关联;(3)碳市场在时域以及在频域短期中均为风险的净接收方,但在中期和长期均为风险的净溢出方,说明该变量在中长期情况下,对外输出风险的能力较强。对碳市场而言,其在短期情况下,价格变动对其他电力上市公司影响较小,而在中长期时间段内,碳价会推高发电成本和电价,因此碳市场成为风险溢出方。这一结果也体现了将时域溢出划分为频域下的短、中、长期来分析溢出的重要性。

表4 各变量间的频域溢出指数表

单位:%

H=10	湖北	国电电力	华电国际	上海电力	宝新能源	金风科技	湖北能源	深南电 A	FROM
面板 A: 短期(1~15天)									
湖北	76.98	0.53	0.25	0.81	0.42	0.33	0.69	0.00	3.03
国电电力	0.16	23.96	10.29	7.87	4.94	3.22	8.22	2.91	37.61
华电国际	0.06	12.37	28.48	7.54	4.56	2.79	6.68	2.49	36.49
上海电力	0.27	8.87	7.27	25.73	4.63	2.43	7.49	2.98	33.94
宝新能源	0.20	10.32	6.68	8.06	39.44	4.06	8.88	4.78	42.98
金风科技	0.20	6.36	4.73	4.15	4.91	47.17	4.95	3.20	28.50
湖北能源	0.32	8.86	5.84	7.21	5.15	2.47	25.75	3.72	33.57
深南电 A	0.05	5.26	3.15	4.67	5.19	2.59	5.89	40.62	26.80
TO	1.26	52.57	38.21	40.31	29.80	17.89	42.80	20.08	28.95
NET	-1.77	14.96	1.72	6.37	-13.18	-10.61	9.23	-6.72	
面板 B: 中期(15~60天)									
湖北	16.54	0.03	0.01	0.22	0.02	0.03	0.15	0.00	0.46
国电电力	0.04	9.13	5.10	5.53	3.28	1.56	4.92	1.93	22.36
华电国际	0.03	6.07	7.65	4.94	3.01	1.31	3.88	1.83	21.07
上海电力	0.13	6.45	4.83	9.36	3.57	1.48	4.99	2.21	23.66

续 表

H=10	湖北	国电电力	华电国际	上海电力	宝新能源	金风科技	湖北能源	深南电 A	FROM
宝新能源	0.09	4.77	3.03	4.22	8.82	1.24	3.93	2.10	19.38
金风科技	0.04	3.07	2.29	2.49	2.32	6.11	2.15	1.65	14.01
湖北能源	0.24	6.15	3.82	5.35	3.73	1.18	10.25	2.61	23.08
深南电 A	0.05	3.84	2.35	3.61	3.63	1.25	3.76	8.32	18.49
TO	0.62	30.38	21.43	26.36	19.56	8.05	23.78	12.33	17.82
NET	0.16	8.02	0.36	2.70	0.18	-5.96	0.70	-6.16	
面板 B: 长期(60 天以上)									
湖北	2.90	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.02	0.00	0.06
国电电力	0.01	1.97	1.12	1.23	0.74	0.34	1.09	0.44	4.97
华电国际	0.01	1.33	1.62	1.09	0.67	0.29	0.86	0.41	4.66
上海电力	0.03	1.43	1.06	2.04	0.80	0.33	1.11	0.50	5.26
宝新能源	0.02	1.06	0.68	0.94	1.83	0.27	0.87	0.46	4.30
金风科技	0.01	0.67	0.50	0.55	0.50	1.16	0.47	0.35	3.05
湖北能源	0.05	1.37	0.86	1.20	0.84	0.27	2.17	0.58	5.17
深南电 A	0.01	0.86	0.53	0.81	0.79	0.27	0.83	1.66	4.10
TO	0.14	6.72	4.75	5.86	4.34	1.77	5.25	2.74	3.95
NET	0.08	1.75	0.09	0.60	0.04	-1.28	0.08	-1.36	

### 2.3 动态溢出指数

由于溢出效应随时间的动态变化无法通过静态溢出表反映, 本文进一步将滚动窗口技术<sup>②</sup>与DY、BK 溢出方法相结合, 计算各变量的总溢出指数。

图2所示为2015~2021年“碳-电力”系统总体溢出的时变情况。从频域的维度上看, 在样本期内短期溢出水平与时域溢出水平的时变轨迹高度协同, 远高于中期和长期, 且中长期的溢出水平在大多数时间内接近于0, 仅在2021年底超过了短期的溢出水平。表明时域下“碳-电力”系统的溢出效应持续时间在半个月以内, 半个月之后溢出效应就微乎其微。从整体来看, “碳-电力”系统的总溢出指数呈现出随时间变化的不同阶段, 其时变趋势在很大程度上是由政策变动和宏观经济波动所驱动的。2015~2017年初, 随着我国输配电价改革不断深入, 以及我国碳交易市场的逐步活跃, 总溢出指数维持在较高水平。2017年初~2018年初, 总溢出水平从70%波动降至20%, 与我国供给侧结构性改革以及碳市场较低的交易价格和活跃度有一定关联。后随着中美贸易战持续升级、人民币持续贬值、中国股市持续下跌等宏观经济状况波动, 整体的系统性风险上

升, 因此总风险溢出指数从2018年开始有小幅上升, 并在接下来几年中, 保持相对稳定。在2021年全国碳排放权交易正式开始之后, “碳-电力”系统的总体溢出效应呈现上升态势, 且一度长期溢出水平大于短期和中期, 即在该时间段内, 政策实施带来的溢出影响具有一定的滞后性。

### 2.4 溢出网络分析

图3报告了“碳-电力”系统的时域以及频域下的短中长期网路, 从中可以看出: (1) 国电电力公司作为系统中规模最大的电力上市公司, 处于风险溢出的中心, 进一步佐证了“发电企业输出风险的能力与发电量有关”的论点。这与Ji等<sup>[9]</sup>和Yang<sup>[10]</sup>的研究结论一致; (2) 从溢出网络的结构特征来看, 时域和短期基本一致, 中期和长期基本一致。由此可知, 在“碳-电力”系统中, 虽然风险的传导主要发生在短期, 但在短期与中长期具有不同的传导路径, 各节点在溢出网络中的地位和作用也不尽相同; (3) 对于碳市场而言, 从溢出网络图中可以更加直观地感受到, 碳市场对电力市场的中长期溢出影响比短期要大, 是风险的溢出方。从长远来看, 碳市场对促进我国电力行业向更加清洁、高效和低碳的方向发展具有重要意义。

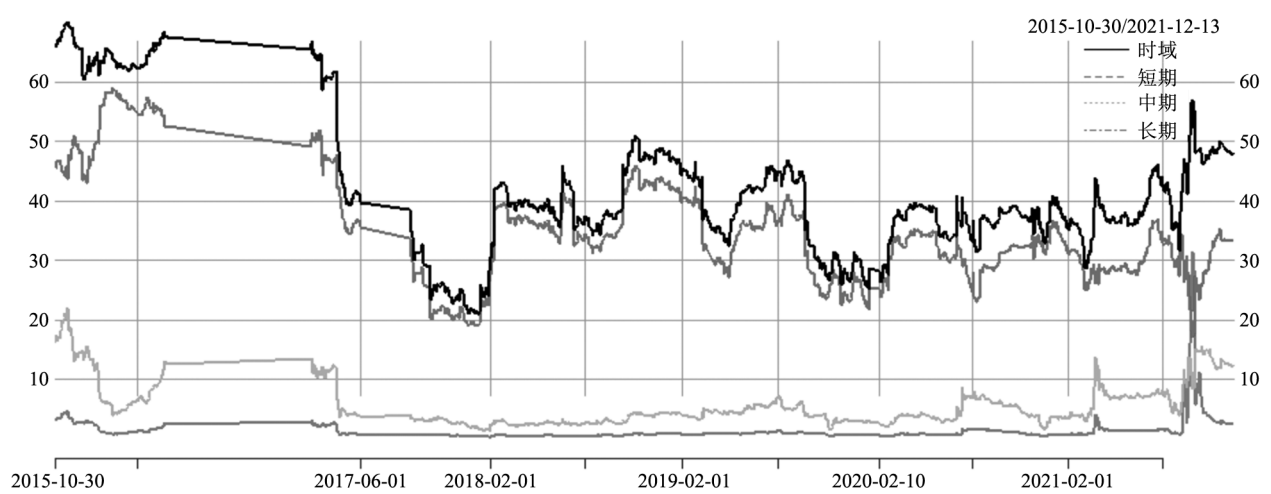


图2 碳-电力市场总溢出指数时变图

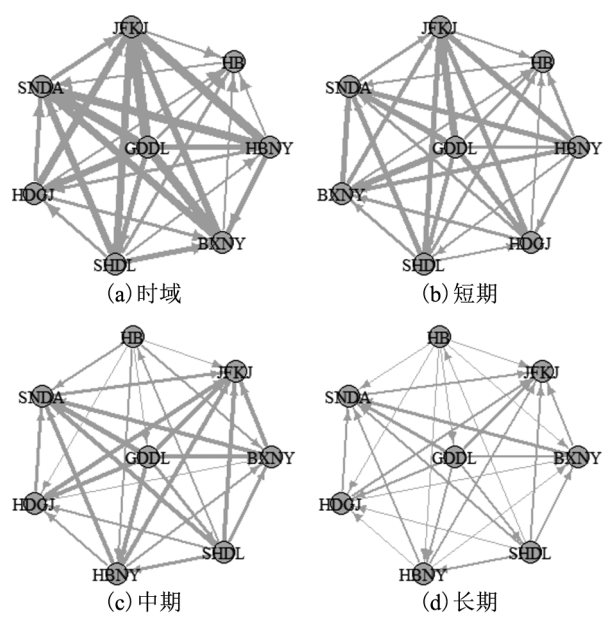


图3 “碳-电力”系统时域和频域溢出网络

2.5 溢出指数稳健性检验

(1) 用更改预测期的方法对实证结果进行稳健性检验, 计算预测期为150期和200期的静态时域溢出指数表, 具体结果见表5。可以看出表5中的结果与预测期为100期的静态溢出指数结果基本一致, 说明增加预测期H对估计结果几乎没有影响。

(2) 从更改变量顺序和更改滚动窗口期两个角度, 对时变的溢出指数进行稳健性检验。图4将变量顺序进行更改计算总溢出指数, 图5将滚动窗口期由100天更改为150天计算总溢出指数。总体来看, 更改前后总溢出指数具有相似的路径, 之前所得出的分析结论依然成立。

3 主要结论与政策建议

本文以湖北碳试点市场为研究样本, 基于广义

表5 基于不同预测期的时域溢出指数结果

单位:%

H=150/200	碳市场	国电电力	华电国际	上海电力	宝新能源	金风科技	湖北能源	深南电 A	FROM
碳市场	96.42	0.57	0.25	1.07	0.45	0.36	0.87	0.01	3.58
国电电力	0.21	35.07	16.51	14.62	8.96	5.12	14.23	5.28	64.93
华电国际	0.10	19.77	37.75	13.58	8.24	4.39	11.43	4.73	62.24
上海电力	0.43	16.75	13.16	37.13	9.00	4.24	13.59	5.69	62.86
宝新能源	0.32	13.33	8.61	10.74	44.71	4.84	11.36	6.10	55.30
金风科技	0.24	10.10	7.52	7.19	7.74	54.43	7.58	5.21	45.58
湖北能源	0.61	16.38	10.53	13.76	9.72	3.93	38.16	6.91	61.84
深南电 A	0.12	9.96	6.04	9.09	9.61	4.12	10.47	50.60	49.41
TO	2.03	86.86	62.62	70.05	53.72	27.00	69.53	33.93	50.72
NET	-1.55	21.93	0.38	7.19	-1.58	-18.58	7.69	-15.48	

方差分解谱构建的溢出指数, 从频域视角考察中国碳市场与电力市场在短、中、长期的静态溢出

和时变溢出。并在此基础上, 进一步从复杂网络视角构建“碳-电力”系统的风险溢出网络, 探寻

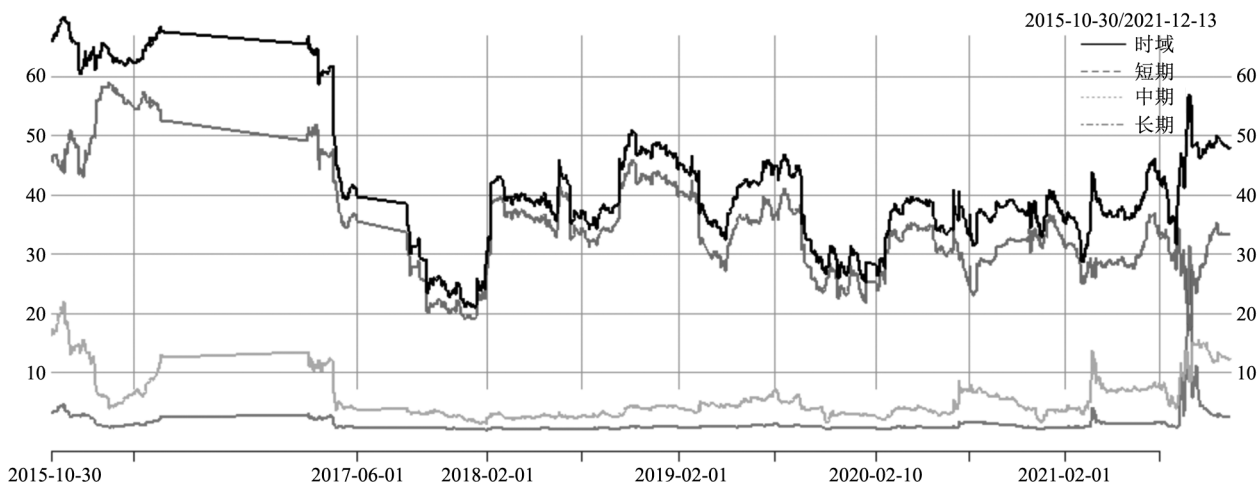


图4 稳健性检验结果(更改变量顺序)

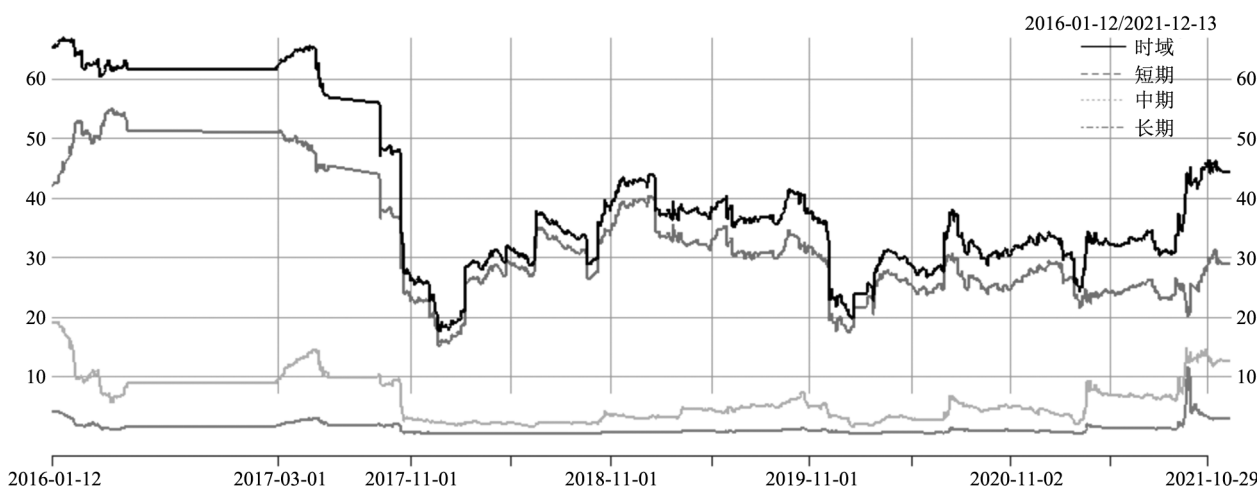


图5 稳健性检验结果(更改窗口期)

碳与电力市场间风险溢出的机制与规律。研究发现：(1) 从时域溢出来看，“碳-电力”系统总溢出指数为 50.72%，存在一定的波动性和不确定性，受宏观经济驱动较大。同时，发电企业接收到风险的多少与火电装机比例有关，火电装机比例越高的企业越容易成为风险接收方；发电企业输出风险的能力与发电量有关，年度发电量越大的企业越容易成为风险的溢出方；(2) 从频域溢出来看，“碳-电力”系统的风险溢出短期>中期>长期。对碳市场而言，短期内对电力市场的风险溢出较不显著，主要是被动受到电力市场影响。而在中长期，碳市场输出风险的能力要大于接收到的风险，属于风险的溢出方。

基于上述结论，本文得到以下启示和建议：从政策制定者角度，应着力提升碳市场与电力市场改革等政策间的协同效果，促进碳价信号的充分发挥，加强生产和投资的有效开展，提升碳市场的减排效果。从电力企业发展角度，从短期来

看，应当防范碳价波动对企业生产成本产生的冲击，及时调整碳资产配置，防范碳价波动风险。从长期来看，应当不断提升可再生能源发电比例，降低企业发电成本对碳价格的依赖程度，进而从根源上防范碳价波动带来的风险。从碳市场发展角度，应当厘清“碳-电力”系统的信息传递机制，监测电力行业的发展状况，重点关注发电量较大和火力发电占比较高的企业。同时，完善碳市场相关风险防范机制，防范由风险溢出效应导致的碳价暴跌风险，并采取适当的价格稳定机制对碳价进行干预。

注释：

- ①滞后阶数根据 AIC 和 SC 准则确定为 2 阶，广义方差分解的预测期选为 100 期(约 3 个月)。
- ②使用 100 天的滚动窗口研究各市场之间的时变溢出效应。

参 考 文 献

[1] Liu H H, Chen Y C. A Study on the Volatility Spillovers, Long Memory Effects and Interactions Between Carbon and Energy Markets: The Impacts of Extreme Weather [J]. Economic Model-

- ling, 2013, 35: 840~855.
- [2] Balçilar M, Demirel R, Hammoudeh S, et al. Risk Spillovers Across the Energy and Carbon Markets and Hedging Strategies for Carbon Risk [J]. *Energy Economics*, 2016, 54: 159~172.
- [3] Zhang Y J, Sun Y F. The Dynamic Volatility Spillover Between European Carbon Trading Market and Fossil Energy Market [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, (112): 2654~2663.
- [4] Wang Y D, Guo Z Y. The Dynamic Spillover Between Carbon and Energy Markets: New Evidence [J]. *Energy*, 2018, 149: 24~33.
- [5] Tan X P, Sirichand K, Vivian A, et al. How Connected is the Carbon Market to Energy and Financial Markets? A Systematic Analysis of Spillovers and Dynamics [J]. *Energy Economics*, 2020, (90): 104870.
- [6] Lin B Q, Chen Y F. Dynamic Linkages and Spillover Effects Between CET Market, Coal Market and Stock Market of New Energy Companies: A Case of Beijing CET Market in China [J]. *Energy*, 2019, 172: 1198~1210.
- [7] 刘建和, 梁佳丽, 陈霞. 我国碳市场与国内焦煤市场、欧盟碳市场的溢出效应研究 [J]. *工业技术经济*, 2020, (9): 88~95.
- [8] 赵领娣, 范超, 王海霞. 中国碳市场与能源市场的时变溢出效应——基于溢出指数模型的实证研究 [J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2021, 23 (1): 28~40.
- [9] Ji Q, Xia T S, Liu F. The Information Spillover Between Carbon Price and Power Sector returns: Evidence from the Major European Electricity Companies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, (208): 1178~1187.
- [10] Yang L. Idiosyncratic Information Spillover and Connectedness Network Between the Electricity and Carbon Markets in Europe [J]. *Journal of Commodity Markets*, 2020, (8): 2405~8513.
- [11] Barunik J, Krehlik T. Measuring the Frequency Dynamics of Financial Connectedness and Systemic Risk [J]. *Journal of Financial Econometrics*, 2018, 2: 271~296.
- [12] Schwert G W. Why Does Stock Market Volatility Change Over Time [J]. *Journal of Finance*, 1989, 44 (5): 1115~1153.
- [13] Engle R F, Ghysels E, Sohn B. Stock Market Volatility and Macroeconomic Fundamentals [J]. *Review of Economics & Statistics*, 2013, 95 (3): 776~797.
- [14] Li Y B, Nie D, Li B K, et al. The Spillover Effect between Carbon Emission Trading (CET) Price and Power Company Stock Price in China [J]. *Sustainability*, 2020, 12: 1~17.

## The Risk Spillover Effect Between Carbon and Power Market ——Based on BK Spillover Model

Wang Xiping Wang Wanchen

(Department of Economics and Management, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

**[Abstract]** This paper has investigated the volatility spillover and connectedness between the carbon market and power market in China by using spectral representation of generalized forecast error variance decomposition and network diagram. From a frequency domain perspective, this paper systematically investigates the spillover effect between China's carbon market and power market in the short, medium and long-term from the two dimensions of direction and level, and then uses complex network method to discuss the spillover center and evolution. We have obtained interesting and convincing empirical results that show the spillover effects of risks mainly occurs in the short term (within 15 days). More importantly, in the "carbon-power" system, the amount of risk received by power generation enterprises is related to the proportion of thermal power installed, and the capacity of power generation enterprises to export risks is related to the power generation. Meanwhile, in the short-term, the carbon market is a net risk receiver, while in the medium and long-term, the carbon market is a net risk transmitter. Our study can help investors and managers of carbon market and power market to have more comprehensive understanding of the information and volatility transmission mechanism between carbon market and power market, thus, providing them with a basis to make investment decisions and formulate policies.

**[Key words]** carbon market; power market; BK spillover index; frequency domain; connectedness; generalized variance decomposition

**[Jel classification]** O16; Q43

(责任编辑: 杨 婧)