

引用格式: 赵树然, 张洁, 李金宸, 等. 波动分解视角下中国能源业系统性风险溢出[J]. 资源科学, 2023, 45(3): 637-651. [Zhao S R, Zhang J, Li J C, et al. Systemic risk spillover of China's energy industry based on the perspective of volatility decomposition[J]. Resources Science, 2023, 45(3): 637-651.] DOI: 10.18402/resci.2023.03.13

波动分解视角下中国能源业系统性风险溢出

赵树然^{1,2}, 张洁¹, 李金宸¹, 任培民³

(1. 中国海洋大学经济学院, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋发展研究院, 青岛 266100;

3. 青岛大学经济学院, 青岛 266071)

摘要:【目的】能源行业与国家安全和经济发展息息相关,其系统性风险不容忽视。本文旨在研究常态和极端情形下能源行业间系统性风险溢出方向及特点,为能源行业系统性风险管理提供新的思路与方法。【方法】本文基于波动分解视角,将能源行业的波动风险分解为连续性和跳跃性成分,并通过向量自回归模型的广义误差方差分解思想,构建系统分析下各能源子行业及各波动成分间的溢出矩阵及溢出指标,并据此从静态和动态两个角度,研究了中国能源行业系统性波动风险溢出效应。【结果】实证结果表明:①能源行业有明显的跳跃性波动,行业内极端跳跃风险的积累会导致行业间系统性风险增加。②能源行业之间的系统风险溢出具有显著的时变性,在股市动荡期风险易向行业外扩散,系统性风险水平相对较高,但在稳定期则易转向行业内传染,系统性风险水平相对较低。③能源行业波动风险易在同种风险类型中传导,交叉风险传染有限,其中,能源系统性波动风险在行业间的溢出主要通过连续对连续路径实现,而行业内主要为跳跃对跳跃路径。④煤炭行业是连续性风险的最大发出者,电力行业是跳跃性波动风险的唯一发出者,新能源行业是以跳跃性波动形式接收外部风险的最大接收者。【结论】应密切关注能源行业系统性风险,并根据其传染特点进行灵活动态监管,稳定时期需重点关注行业内同类型风险间的溢出,在波动较大时期,应重点关注风险在跨行业和跨成分间的传染,坚决守住不发生系统性风险的底线。

关键词: 能源行业; 系统性风险; 跳跃检验; 广义误差方差分解; 波动率风险; 中国

DOI: 10.18402/resci.2023.03.13

1 引言

系统性风险是指某一事件引发整个系统严重不稳定或崩溃的可能性,主要表现为风险在行业间的相互传染与扩散^[1,2]。自2008年美国金融危机以来,金融业的系统性风险受到各国政府和研究人员的广泛关注。与金融行业相比,能源行业系统性风险的研究则相对有限,这与能源行业在国家经济中的重要地位显然不符。能源行业之所以也存在系统性风险,主要源于子行业间复杂的关联关系,如能源之间的替代效应^[3]、能源部门企业间的生产关联^[4,5]、能源产业间的技术共享关系^[6],以及能源商品金融化带来的金融市场方面的关联^[7,8]等。

早期由于能源行业间的关联关系相对简单,能源行业系统性风险并没有像金融行业那样凸显和频发,且多以某一能源供给短缺、能源价格飙升为导向,主要通过生产关系等向其他非能源行业传导,而能源行业内部之间的传导则相对有限。但随着技术的进步、全球能源结构的转变、国际地缘政治风险等各类事件的频繁发生,能源子行业间的关联关系越来越复杂,能源行业发展的不确定性空前增加,也致使能源行业系统性风险的内部传导越来越明显。如2021—2022年欧洲能源危机,天然气等化石能源价格攀升,风能以及核能等新能源难以弥补发电缺口,此后又传导到了污染程度更高的煤炭

收稿日期: 2022-09-05; 修订日期: 2023-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(72271224); 教育部人文社会科学规划基金项目(18YJA79013); 国家社会科学基金项目(19BTJ042)。

作者简介: 赵树然, 女, 湖南邵阳人, 博士, 教授, 研究方向为系统性风险管理。E-mail: zhshuran@163.com

通讯作者: 张洁, 女, 山东青岛人, 博士研究生, 研究方向为能源经济与风险管理。E-mail: joyzhang2420@163.com

行业,欧洲等地区的电力成本增加,电力价格也出现大幅上涨。受益于国家有关部门对能源行业的积极调控管理,中国并未出现严重的能源系统性风险,但是近几年,局部地区煤炭荒、柴油荒、拉闸停电等现象的出现也说明中国能源形势不容乐观。2021年,由于煤炭价格上涨导致部分地区电荒的相关现象,反映出中国能源行业也存在系统性风险隐患。在此背景下,准确识别能源行业系统性风险溢出方向及特点,对于防范能源行业系统性风险具有重要意义。

2 文献综述

对能源系统性风险的相关研究包括其对整个经济系统的冲击以及在不同市场的传染。在经济系统层面,学者认为劳动、资本和技术为经济增长的源泉,而能源作为重要的工业生产资料,对宏观经济产出有重要影响。如能源危机对经济总量的冲击^[9,10]和能耗模式演变对经济发展的影响^[11,12]。能源行业对不同市场风险传染层面,包括对农产品市场和金融市场等。对农产品市场的风险传染方面,Shahzad等^[13]研究了石油作为全球经济因素对不同农产品价格的影响,发现石油对农产品的溢出效应是不对称的,且在金融动荡期间会加强。对金融市场的风险传染方面,Chen等^[14]分析了石油和外汇市场的极端风险对中国股市溢出效应,指出大多时期中国股市不确定性波动受石油市场不确定性变化的影响更大。Yin等^[15]从国际股市风险传染的角度进行研究,指出油价冲击对国际股市系统性风险溢出有显著影响。对其他市场的风险传染方面,Naeem等^[16]使用动态条件关联-广义自回归条件异方差(DCC-GARCH)模型,调查了能源市场的不确定性对美国12个行业影响,指出其对金融和房地产等行业产生了积极影响;对消费服务,医疗保健等行业产生负面影响。Ouyang等^[17]研究商品市场系统性风险时发现,能源商品对其他商品系统性风险最高,其价格变化最容易引起市场波动。但学界就能源行业对其他行业的系统性风险传染情况并没有达成一致观点。Kerste等^[18]通过额外破产企业预期比例EAF研究能源行业和金融行业的系统性风险时,指出能源行业对其他行业风险传染不显著,他认为能源交易不像金融交易那样产生复杂的债

务人和债权人关系,因此系统性风险较低。同时他也指出能源行业内部系统性风险传染明显。

随着研究的深入,越来越多的学者开始关注能源行业内的系统性风险溢出。风险溢出是风险传染的表现,具有明显的溢出方向。在系统性风险形成过程中,行业间通过信息传递、风险交叉传染而表现的关联特征为风险溢出^[19]。能源行业系统性风险不能通过在能源行业内的分散投资来消除,且能源子行业的风险积累到一定程度就会向外溢出,影响其他能源子行业以及其他国家的能源行业。Tan等^[20]发现石油与清洁能源之间存在非对称性风险溢出,极端下行风险更容易在石油和清洁能源股票市场传递。Wu等^[21]从全球能源公司的角度,研究了能源系统性风险溢出,并指出油气行业为系统风险贡献水平最高的行业。Ouyang等^[22]从产业链角度研究了能源商品之间的风险传染,指出能源行业风险传染一般是从石化行业向煤炭行业传导,各行业风险主要是从上游向下游产品溢出。随着全球能源市场复杂性和关联性程度的进一步加深,也有一些学者从不同国家的角度对国际能源体系的系统性风险进行研究。Zhu等^[23]通过高斯图模型(GGM)估计了27个国家石油部门之间的系统性风险溢出,得出不同国家能源行业之间的复杂网络关系。Zhou等^[24]以俄乌冲突为例研究了欧洲国家间石油和天然气市场的系统性风险,指出俄乌冲突显著增加了欧洲天然气和石油市场的系统性风险,并且,与石油市场相比,天然气市场的系统性风险更高,上升速度更快,下降速度更慢。此外,一些学者就能源行业内系统性风险的成因进行了研究。Zhu等^[25]研究了能源系统内能源企业系统性风险对能源安全的影响,指出能源风险事件冲击通过导致能源生产和能源投资下降显著影响能源安全。Xiong等^[26]通过动态网络和加权马氏距离相结合的新型混合方法,研究了国际能源市场体系的整体系统性风险水平,指出单一能源市场的异常价格行为和能源市场间的动态价格相关性是国际能源市场中造成系统性风险的两个主要因素。

另一方面,许多实证研究表明,能源行业内波动风险除表现为日常平稳连续性波动情形下的常态性风险溢出外,还存在突发的尾部性风险^[27-30]。

2023年3月

Maslyuk等^[31]通过非参数跳跃检测对能源价格的非连续性跳跃的发生频率及方向特征进行了研究,指出能源期货与现货之间以及不同能源之间存在频繁的跳跃联动。Xu等^[32]通过引入拓扑吸收揭示能源系统性风险中的“风险跳跃”现象,并对不同能源价格间的关联性进行研究,指出原油期货价格波动影响能源价格体系的稳定性,且能源价格波动的长期相关性将导致较高的系统风险。此外,由于能源商品的地缘政治性质^[33],能源商品金融化,以及大多数能源公司的高杠杆率^[34],能源行业的极端风险较其他非金融行业更具传染性。

综上所述,大多数学者对能源行业内部系统性风险已达成共识,但现有研究主要集中于不同国家或某两能源子行业间,从能源行业系统层面出发的研究较少,且未能揭示中国能源行业间系统性风险传染的方向及渠道。另外,上述关于能源系统性风险的研究几乎是从能源价格风险方面入手,很少涉及其波动风险,尤其是极端波动风险。基于此,本文以综合反映行业变化的股市行业指数为数据对象,从能源行业波动率的连续-跳跃分解视角入手,以连续性成分反映常态性波动风险,即行业基本面变化,跳跃性波动反映极端事件带来的突发风险,系统研究煤炭行业、电力行业、油气行业和新能源行业4个能源子行业之间,常态和尾部系统性波动风险的溢出及两者的交叉溢出问题,以期明晰不同能源行业之间的系统性波动风险传染机制与传染特征,为政策制定及能源风险管理提供理论支撑。

3 研究方法、指标构建、数据和样本

3.1 研究方法

传统的风险溢出研究方法多基于回归模型,通过观测回归系数的显著性和正负性来考察溢出特征。这类方法仅从局部两两行业相互溢出的视角出发,未能站在系统高度进行审视。为此,本文参照Diebold-Yilmaz(DY)溢出法,利用向量自回归(VAR)模型的方差分解思想,从系统角度,构建各能源子行业的波动风险溢出矩阵。另一方面,为了研究正常和极端情况下风险溢出的差异,本文将波动率分解为连续和跳跃两类成分,具体过程如下。

3.1.1 总体波动的连续-跳跃分解

已实现波动率作为方差度量指标,相比于传统的样本方差和基于广义自回归条件异方差

(GARCH)类模型的条件方差,具有灵活、易于实现的优点,且计算时无需模型,因而在高频金融领域,得到广泛应用。当变量具有跳跃特性时,已实现波动率衡量的是总体波动,即由连续变化和跳跃变化两部分产生的共同波动(连续性波动和跳跃性波动)。因此如何从总波动中分解出跳跃性成分,是本文模型中首要需解决的问题。下文采用Barn-dorff-Nielsen等^[35]提出的双幂变差法进行提取。该方法所得结果具有稳健性和一致性。

考虑到该方法是基于一天中相等时间间隔的高频数据,本文选取各能源行业指数5分钟交易价格数据,记 P_{ij} 为第 t 天的第 j 个5分钟观测的资产价格(按照中国交易规则 j 最大可取48),则已实现日波动率(未纠偏)(rv_t)为:

$$rv_t = \sum_{j=1}^{48} r_{ij}^2 \quad (1)$$

式中: $r_{ij} = \ln P_{ij} - \ln P_{i(j-1)}$ 为 $j-1$ 到 j 时间内的高频对数收益率。受交易频率、买卖报价差等微观结构噪音的影响,已实现波动率作为日波动率的估计量,随着采样频率的增加,易产生显著偏差。为此,本文利用核估计的方法,对波动率进行如下纠偏:

$$RV_t = \sum_{j=1}^{48} r_{ij}^2 + 2 \sum_{h=1}^q \left(1 - \frac{h}{q+1}\right) \sum_{j=1}^{48-h} r_{i(j+h)} r_{ij} \quad (2)$$

式中: RV_t 为已纠偏的已实现波动率;参照杨科等^[36],取 $q=1$ 。理论上,当存在跳跃性波动,但不存在市场噪声时,随采样频率增加,区间间隔 $\Delta \rightarrow 0$,此时 RV_t 依概率趋向于价格的连续性波动和跳跃性波动之和。本文选取常用的CTZ跳跃检验法^[37],将跳跃性成分从 RV_t 中剥离,同时得到余下的连续性成分。该方法可有效降低检验统计量中各估计量的偏差,其具体检验统计量(C_TZ_t)如下:

$$C_TZ_t = \Delta^{-\frac{1}{2}} \frac{(RV_t - C_TBPV_t)RV_t^{-1}}{\sqrt{\left(\frac{\pi^2}{4} + \pi - 5\right) \max\left\{1, \frac{C_TTRIPV_t}{C_TBPV_t^2}\right\}}} \quad (3)$$

式中: Δ 为区间间隔; C_TBPV_t 和 C_TTRIPV_t 分别为阈值型双幂次变差和三幂次变差的校正,其具体公式参见Corsi等^[37]。理论上,在不存在跳跃的情形下, C_TZ_t 渐近服从标准正态分布。因此,可设定原假设为 H_0 :第 t 天不存在跳跃性波动。当检验统计

量 C_TZ_t 大于临界值 ϕ_α (标准正态分布的 α 分位数) 时, 可以拒绝原假设, 即存在跳跃性波动, 且跳跃性波动成分 J_t 可表示为:

$$J_t = I(C_TZ_t > \phi_\alpha) \cdot \max([RV_t - C_TBPV_t], 0) \quad (4)$$

这里 $I(\cdot)$ 为示性函数, 当 $C_TZ_t > \phi_\alpha$ 成立时其值为 1, 否则为 0。相应地, 连续性波动成分 C_t 为:

$$C_t = RV_t - J_t \quad (5)$$

3.1.2 系统性波动风险溢出矩阵的构造

假设能源系统有 n 个子行业, 记 $\tilde{x}_t = [C_{1t}, J_{1t}, \dots, C_{nt}, J_{nt}]$ 为第 t 天各子行业连续性波动和跳跃性波动成分共同构成的 $2n$ 维向量, 其中 C_{it} , J_{it} 分别为第 t 日子行业 i 的连续性波动和跳跃性波动成分。对 \tilde{x}_t 建立 P 阶向量自回归模型 (VAR) 为:

$$\tilde{x}_t = \sum_{j=1}^P \Phi_j \tilde{x}_{t-j} + e_t \quad (6)$$

式中: Φ_j 为滞后项 \tilde{x}_{t-j} 的系数矩阵; $e_t \sim N(0, \Sigma)$ 。关于最大滞后阶数通过 Schwarz 准则进行判断, 模型参数通过极大似然估计实现。

进一步, 利用 H 期的广义误差方差分解, 计算 \tilde{x}_t 中第 j 个变量 \tilde{x}_{jt} 的冲击对第 k 个变量 \tilde{x}_{kt} 的方差影响值 $g_{k \leftarrow j}^{(H)}$, 即 \tilde{x}_{kt} 的预测方差有多大比例是由 \tilde{x}_{jt} 的新息冲击引起的。

$$g_{k \leftarrow j}^{(H)} = \frac{\sum_{h=0}^{H-1} (\epsilon_k' \delta_j^{-1} \Omega_h \Sigma \epsilon_j)^2}{\sum_{h=0}^{H-1} \epsilon_k' \Omega_h \Sigma \Omega_h' \epsilon_k} \quad (7)$$

式中: ϵ_j 为第 j 位置上为 1, 其他位置为 0 的向量; δ_j 为第 j 个因素新息的标准差; Σ 为 VAR 模型中 e_t 的协方差阵; Ω_t 为上述 VAR 模型转变为向量移动平均模型形式后的系数矩阵。 $g_{k \leftarrow j}^{(H)}$ 值一定程度上可衡量 \tilde{x}_{kt} 的整体方差视角下, \tilde{x}_{jt} 对 \tilde{x}_{kt} 的方差溢出程度。若该值较小, 说明第 j 个变量对第 k 个变量的影响小, 反之则说明影响大。

对 \tilde{x}_{kt} 受到的 $2n$ 个影响冲击进行归一化后, 可得 \tilde{x}_{jt} 的影响份额 (百分比):

$$\psi_{t,k \leftarrow j}^{(H)} = \frac{g_{k \leftarrow j}^{(H)}}{\sum_{j=1}^d g_{k \leftarrow j}^{(H)}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: $d=2n$ 为变量个数。以 $\psi_{t,k \leftarrow j}^{(H)}$ 为元素构造 \tilde{x}_t 变量间的波动溢出矩阵 $C^{(H)}$:

$$C^{(H)} = \begin{bmatrix} \psi_{1 \leftarrow 1}^{(H)} & \psi_{1 \leftarrow 2}^{(H)} & \cdots & \psi_{1 \leftarrow d}^{(H)} \\ \psi_{2 \leftarrow 1}^{(H)} & \psi_{2 \leftarrow 2}^{(H)} & \cdots & \psi_{2 \leftarrow d}^{(H)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{d \leftarrow 1}^{(H)} & \psi_{d \leftarrow 2}^{(H)} & \cdots & \psi_{d \leftarrow d}^{(H)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

3.2 系统性波动溢出度量指标构建

为区分式 (9) 中连续性波动和跳跃性波动的相关溢出, 本文将矩阵 $C^{(H)}$ (式 9) 中的元素记为 $\psi_{j_k \leftarrow i_l}^{(H)}$, 表示从行业 l 的成分 i 到行业 k 的成分 j 的波动性溢出, 其中 $i, j \in \{C, J\}$, C, J 分别代表连续性和跳跃性波动。本文从以下 4 个层面构建能源系统性风险溢出的相关指标。

首先, 建立两波动成分间 (跨成分) 溢出指标, 即在整体能源系统层面上的连续到连续 ($C \leftarrow C$)、连续到跳跃 ($J \leftarrow C$)、跳跃到连续 ($C \leftarrow J$) 和跳跃到跳跃 ($J \leftarrow J$) 路径上的行业平均溢出, 则从成分 i 到成分 j 的行业平均溢出可表述为:

$$M_{j \leftarrow i}^{(H)} = \frac{1}{n} \sum_{k,l} \psi_{j_k \leftarrow i_l}^{(H)} \quad (10)$$

其次, 构建两两能源子行业间 (跨行业) 的溢出指标, 即在总波动水平上行业间不同波动风险的平均溢出, 则从行业 l 到行业 k 的溢出可表示为 $S_{k \leftarrow l}^{(H)} = \frac{1}{2} \sum_{i,j} \psi_{j_k \leftarrow i_l}^{(H)}$ 。当 $k=l$ 时, 它表示行业内溢出的总体水平。

第三, 为进一步描述各能源行业与整个能源系统的关联程度, 通过细分行业和波动风险, 度量了各子行业在能源系统性风险溢出贡献, 包括各能源子行业的各波动成分对整个能源系统的溢出, 受到能源系统的溢出以及净溢出, 则从行业 l 中的 i 成分向能源系统的溢出、受到溢出, 以及净溢出可表示为:

$$\begin{aligned} M_{\leftarrow i_l}^{(H)} &= \sum_{j,k} \psi_{j_k \leftarrow i_l}^{(H)} \\ M_{i_l \leftarrow \cdot}^{(H)} &= \sum_{j,k} \psi_{i_l \leftarrow j_k}^{(H)} \\ NM_{\leftarrow i_l}^{(H)} &= M_{\leftarrow i_l}^{(H)} - M_{i_l \leftarrow \cdot}^{(H)} \end{aligned} \quad (11)$$

最后, 构建了能源行业系统性风险汇总指标, 即能源系统中两两行业之间的溢出效应的总平均

2023年3月

水平,则能源行业系统性风险总溢出可以表示为:

$$M^{(H)} = \frac{1}{2n(n-1)} \sum_{k,l,k \neq l} S_{k \leftarrow l}^{(H)} \quad (12)$$

3.3 数据和样本

由于能源业之间存在复杂的关联关系,若利用频率较低的行业统计数据,不仅存在风险预警的时滞问题,也较难全面反映系统性风险错综复杂的传导路径。另一方面,股票市场作为反映国民经济发展的晴雨表,可综合反映各能源公司的基本面和信息冲击的传导影响,因此,本文选取股市能源子行业指数来反映各行业的整体走势,具体包括国证煤炭指数(SZ399436)、国证电力指数(SZ399438)、国证油气指数(SZ399439)和国证新能源指数(SZ399412)。样本数据时间为2015年1月5日到2020年7月31日,总共有1359个交易日。这个时间区间涵盖了两个关键时期,即2015年下半年至2016年初中国能源行业相关政策的改革期(“十三五”规划、供给侧结构性改革政策)和2020年上半年Covid-19的爆发期,这为研究不同经济运行情况下能源行业波动风险溢出情况提供了可能。此外,为估计日度波动的跳跃性成分和连续性成分,本文选取具有较好降噪效果的5分钟高频数据^[38]。所有数据均来源于wind数据库。

4 结果与分析

4.1 能源行业跳跃-连续波动分析

表1为提取波动率日度跳跃性和连续性成分重要跳跃变量的统计描述。其中,跳跃天数为样本期内CTz跳跃检验显著的天数,跳跃频率为这些跳跃

天数占总天数的比重,跳跃幅度比为跳跃幅度占总波动率比重的平均值。考虑相比于单跳,连续跳跃更能反映风险事件冲击的持续影响,也一定程度反映了各指标的恢复能力,表1进一步给出了2个、3个及以上连续跳跃相关统计数据。跳跃频率为跳跃次数与总天数的比率。

表1显示,煤炭行业各类跳跃频率和波动幅度均为最高,而电力的波动幅度最低,油气行业的跳跃频率最低。值得注意的是,新能源行业的波动幅度都相对较高,而跳跃次数则相对较低,说明其跳跃风险并不频繁,但一旦发生,影响很大。综上,相对而言,煤炭、电力、油气、新能源行业分别属于跳跃高概率-高幅度、高概率-低幅度、低概率-低幅度、低概率-高幅度类型。从直观上看,煤炭及电力行业的跳跃高概率可能与市场化水平高、规模大、参与者众多等特性有关,这些特性使得两行业易受各方因素影响,导致跳跃相对频繁;而煤炭和新能源行业跳跃高幅度可能与政策导向有关,这两行业分别是政策控制和鼓励的重点,更易受政策导向的冲击,而这类冲击往往又比较强烈,因而表现出较高的跳跃幅度。

为了清晰展示能源子行业在不同交易日连续性波动和跳跃性波动的动态变化情况,图1进一步给出了95%显著性水平下的时序图。图1显示,从2015年下半年到2016年上半年,4个行业的所有成分都频繁大幅波动,尤其是新能源行业的成分跳跃最明显,而电力行业的成分跳跃最频繁,原因主要是在此期间去杠杆政策、股市熔断机制的出台。2016

表1 95%置信水平下跳跃性波动情况描述统计

Table 1 Descriptive statistics of fluctuating jumps at 95% confidence level for four energy sectors

	煤炭	电力	油气	新能源
跳跃天数	385 ¹	322 ²	270 ⁴	308 ³
跳跃频率	0.2833 ¹	0.2369 ²	0.1987 ⁴	0.2266 ³
单跳次数	191 ¹	188 ²	167 ⁴	173 ³
2个连续跳跃次数	61 ¹	46 ²	29 ⁴	42 ³
3个及以上跳跃次数	24 ¹	14 ⁴	15 ³	17 ²
连续幅度(10 ⁻⁴)	2.4036 ¹	1.2428 ⁴	1.5575 ³	2.0469 ²
跳跃幅度(10 ⁻⁴)	1.043 ¹	0.546 ⁴	0.699 ³	0.848 ²
总波动(10 ⁻⁴)	3.4466 ¹	1.7888 ⁴	2.2565 ³	2.8949 ²
跳跃幅度比	0.3293 ¹	0.2964 ³	0.2443 ⁴	0.3084 ²

注:表中各数据右上角数字为各指标在4个行业中的排名。下同。

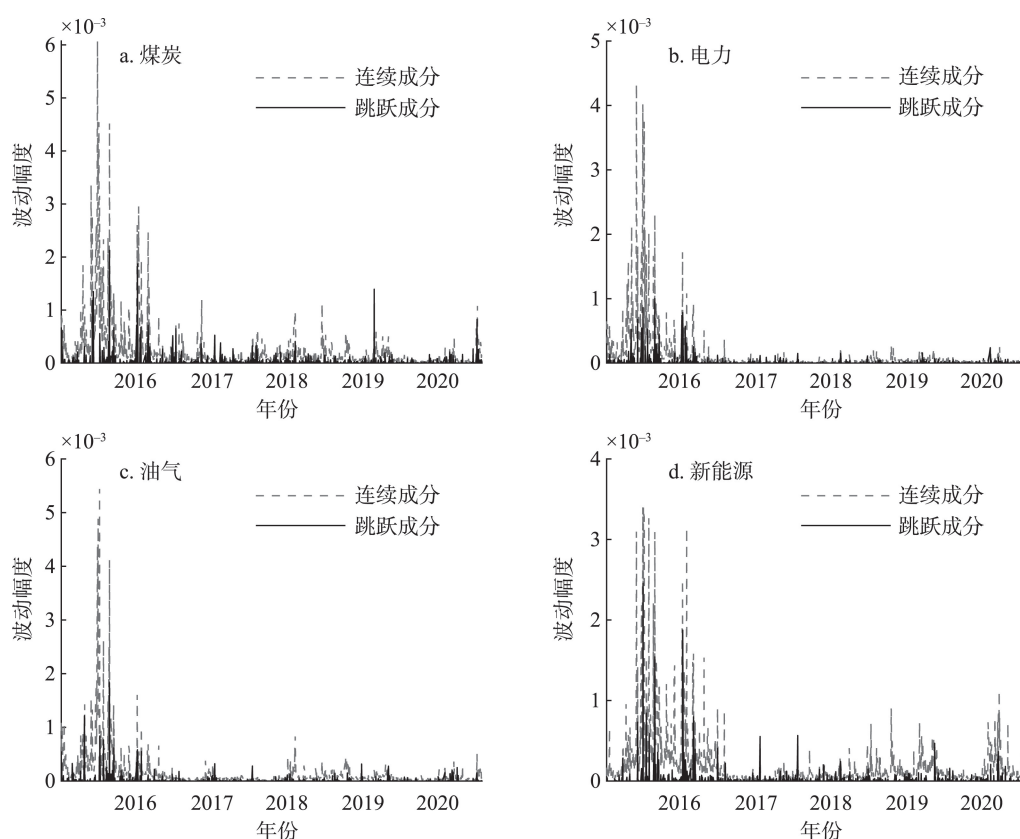


图1 95%显著性水平下能源行业连续性和跳跃性波动成分的时序图

Figure 1 Time series of the continuity and the jump volatility components in energy industries at 95% confidence level

年以后,煤炭和新能源行业的波动率比其他2个行业跳得更频繁、更猛烈。2020年初,由于Covid-19的爆发导致能源消费的低迷,这4个行业都有集群式的小跳。还需要注意的是,2019年2月26日,煤炭行业出现了异常的跳跃。这主要因为,国际能源署在发布的《全球煤炭市场报告(2018—2023)》指出,未来全球煤炭需求将保持稳定,中国的煤炭消费呈结构性下降。

4.2 静态系统性风险溢出效应

本文基于全样本10步($H=10$)预测误差方差分解对能源行业系统性风险静态溢出效应进行研究,并在稳健性检验部分对预测天数为5、15天以及不同预测窗口的滚动情况进行了检验。

4.2.1 跨成分溢出效应

表2给出了能源行业系统性波动风险溢出矩阵。其中,对角线矩阵(阴影部分)为行业内部溢出,非对角线矩阵块为行业间的相互溢出。由表2可知,无论是行业内部还是行业之间, $C \leftarrow C$ 和 $J \leftarrow J$

路径上的溢出显著高于C和J之间的交叉溢出,说明同类型风险溢出在能源行业内占据主导。从同类型风险溢出路径来看,在行业内,跳跃溢出明显大于连续溢出,而在行业间有相反的结果。这表明在防范能源行业系统性风险的过程中,应多关注能源行业自身的跳跃风险和能源行业之间的连续风险。同时,不同成分间的溢出效应也不容忽视。从不同风险溢出路径看,行业内部沿 $J \leftarrow C$ 路径的溢出效应明显高于相应的反向溢出效应,行业间(除电力行业对外溢出)也有类似结果。这表明跨成分净溢出的方向以连续性成分到跳跃性成分溢出为主。

为了研究能源系统层面两个波动成分之间的相互传染,本文在表2的基础上,进一步沿4条路径将所有行业间的相互溢出进行汇总,并求平均,以突出两类风险在系统层面的相互传染,具体结果见表3。表中的净溢出是对外溢出减风险流入后的净值,旨在反映该部分是风险发送者还是接受者。

表2 能源行业系统性波动风险的溢出矩阵($C^{(H)}$)(%)

Table 2 Spillover matrix of volatility risks in the energy system (%)

		煤炭		电力		油气		新能源	
		连续	跳跃	连续	跳跃	连续	跳跃	连续	跳跃
煤炭	连续	30.52	0.74	21.12	5.13	19.30	0.92	19.10	3.15
	跳跃	2.57	51.05	1.93	15.87	1.65	11.93	2.76	12.25
电力	连续	23.52	0.19	33.11	2.93	19.39	0.33	19.63	0.92
	跳跃	5.93	11.82	5.56	41.08	5.36	8.21	7.43	14.61
油气	连续	23.18	0.51	21.57	2.68	32.34	1.59	16.91	1.21
	跳跃	3.77	12.72	2.12	10.07	6.41	54.06	4.74	6.10
新能源	连续	21.57	0.52	19.73	6.36	17.83	1.58	29.96	2.45
	跳跃	7.68	10.67	5.46	16.10	6.42	5.28	5.19	43.20

在整个能源系统层面,表3也显示出能源行业系统性波动风险以同类型风险溢出为主。这表明能源行业风险防范过程中应更多关注同类型波动风险间的溢出效应。另外由表3知,连续性成分的净溢出是正的,表明连续性成分是风险发送者,而跳跃性成分是接受者。

表3 系统层面下两类波动风险的相互溢出

($M_{C \leftarrow C}^{(H)}$, $M_{J \leftarrow C}^{(H)}$, $M_{C \leftarrow J}^{(H)}$, $M_{J \leftarrow J}^{(H)}$)

Table 3 Cross-component spillovers at the system level

	连续	跳跃
连续	92.20	7.80
跳跃	18.75	81.26
净溢出	10.95	-10.95

注:净输出是扣除风险流入后的风险溢出,旨在反映该波动成分是风险发送者还是接收方。其计算为列的总和与所在的行之间的差额。下文的净溢出计算方法相同。

4.2.2 跨行业溢出效应

通过将不同能源行业间的各风险传染路径进行加总平均,研究两两能源行业间溢出和净溢出(表4),并刻画不同能源行业间同类型风险的净溢出情况(图2)。表4的对角线元素几乎是非对角线元素的两倍,说明能源行业波动风险外溢效应主要在行业内部。此外,所有的非对角线元素都明显大于零,且下三角元素略大于对应的上三角元素,说

表4 总波动率的跨行业溢出效应($S_{k \leftarrow k}^{(H)}$, $S_{k \leftarrow l}^{(H)}$)

Table 4 Cross-industry spillovers of total volatility

	煤炭	电力	油气	新能源
煤炭	42.44	22.03	16.90	18.63
电力	20.73	41.34	16.65	21.30
油气	20.09	18.22	47.20	14.49
新能源	20.22	23.83	15.56	40.40
净溢出	3.48	5.40	-3.69	-5.19

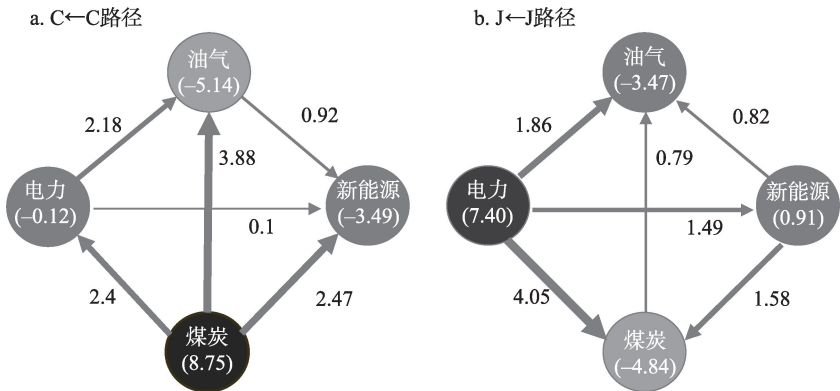


图2 同类型波动风险在能源子行业间的净溢出

Figure 2 Net spillovers of the same type volatility risk between energy subsectors

注:a、b子图分别为能源行业间连续风险间溢出和跳跃风险间溢出。箭头方向表示风险溢出方向,线上数字表示风险溢出的大小。节点处括号里面的数字为净溢出水平,其中数值越大,节点颜色越深,表示对外溢出水平越高。

明行业间存在着强烈的非对称双向外溢效应。从净溢出来看,电力、煤炭行业(净溢出为正)为主要的风险输出方。这主要因为电力行业作为主要的二次能源与其他能源行业都有紧密的联系,当电力行业发生风险时可以通过发电环节对其他能源行业产生冲击,因此电力行业为最大的风险净输出方。此外,目前中国煤炭行业规模较大,能源消耗仍以煤炭为主,在这种情况下,煤炭行业也会对其他行业带来较大冲击。另一方面,新能源的净溢出效应为-5.19,是最大的风险接收方。这是由于新能源行业作为新兴行业没有传统能源行业发展成熟,风险防范机制尚未完善,因此易受到其他传统能源行业的冲击。

由于无论是在行业内部还是在行业之间,波动风险都倾向于在同类型的波动成分中扩散,因此本文进一步研究了同类型成分之间的传染特征。图2分别画出了行业之间沿C←C(左)和J←J(右)路径的净溢出。

在图2中可以看到,沿着C←C路径,煤炭行业是最大的风险发出者,对所有其他行业输出风险,且对油气行业的溢出最大。另外,油气行业和新能源行业为主要的风险接受者,净溢出为-5.14和-3.49。同时,本文发现沿着J←J路径,电力行业是最大的风险发出者,且对煤炭行业的冲击最大。另外,煤炭行业和油气行业是跳跃风险接受者,其净溢出

为-4.84和-3.47。由图2知,煤炭行业主要以连续日常风险的方式对外溢出,且主要受到电力行业和新能源行业的跳跃风险溢出。这与中国当前能源转型的现实表现相符。煤炭行业平稳转型,对其他能源行业表现为日常连续风险;同时,由于煤炭受到电力以及新能源这类清洁能源的替代,因此煤炭行业易受到电力行业、新能源行业的极端风险冲击。而电力行业主要以跳跃性波动对外产生溢出,这可能是因为相较于其他能源行业,电力行业涉及业务范围更广,更易发生突发性跳跃风险。另外,从风险接受者角度来看,在风险防范过程中,要关注油气行业以及新能源行业可能面临的常规风险,以及煤炭行业和油气行业可能面临的跳跃风险。

4.2.3 与其他能源行业的溢出效应

表5分析了某一能源行业对、受到其他能源行业在4条路径下的溢出情况。其中,模块A、B、C为各行业对外的风险溢出、接收行业外的风险流入、该行业对外的净溢出;合计1-3为其前两行对应项之和,反映了两类风险的合计情况。

由表5可以看出,煤炭行业连续性成分的总溢出和流入分别为85.65和68.72,都明显大于其相应的跳跃性成分,即36.43和46.39。其他能源行业也有相同的结论。连续性成分在与其他能源行业的溢出中占主导地位,这表明中国能源系统风险主要是通过连续方式进行传染,发生突发(跳跃)风险相对来说较小。此外,在净溢出方面,4个行业的连续

表5 各能源子行业两类波动风险对内对外溢出情况

Table 5 Spillovers from and to outside industries

	连续				跳跃			
	煤炭	电力	油气	新能源	煤炭	电力	油气	新能源
A: 对其他能源行业溢出								
连续	68.27 ¹	62.42 ²	56.52 ⁴	55.64 ³	1.22 ⁴	14.17 ¹	2.83 ³	5.28 ²
跳跃	17.38 ¹	9.51 ⁴	13.43 ³	14.93 ²	35.21 ²	42.04 ¹	25.42 ⁴	32.96 ³
合计1	85.65 ¹	71.93 ²	69.95 ⁴	70.57 ³	36.43 ³	56.21 ¹	28.25 ⁴	38.24 ²
B: 受到其他能源行业溢出								
连续	59.52 ³	62.54 ¹	61.66 ²	59.13 ⁴	6.34 ⁴	18.72 ²	10.63 ³	19.56 ¹
跳跃	9.20 ¹	1.44 ⁴	4.40 ³	8.46 ²	40.05 ¹	34.64 ²	28.89 ⁴	32.05 ³
合计2	68.72 ¹	63.98 ⁴	66.06 ³	67.59 ²	46.39 ³	53.36 ¹	39.52 ⁴	51.61 ²
C: 与其他能源行业的净溢出								
连续	8.75 ¹	-0.12 ³	-5.14 ⁴	-3.49 ²	-5.12 ²	-4.55 ¹	-7.80 ³	-14.28 ⁴
跳跃	8.18 ²	8.07 ³	9.03 ¹	6.47 ⁴	-4.84 ⁴	7.40 ¹	-3.47 ³	0.91 ²
合计3	16.93 ¹	7.95 ²	3.89 ³	2.98 ⁴	-9.96 ²	2.85 ¹	-11.27 ³	-13.37 ⁴

2023年3月

性成分的净溢出都是正,而除电力行业外,跳跃性成分的净溢出都是负的。这说明能源子行业主要是以连续性成分对能源系统净溢出,接受能源系统的跳跃溢出。这与表3所示的系统层面两成分间溢出的结论相似。

从不同能源子行业角度发现,煤炭行业的连续性成分的总溢出、总流入和总净溢出是所有行业中最大的,所以煤炭行业是连续性波动风险的最大发送者。在跳跃性成分方面,电力行业是最大的风险发送者,它的跳跃总溢出和总流入最高。这是由于电力行业与其他行业联系紧密,易受各类突发事件冲击,具有最高的跳跃频率。此外,需要注意的是,新能源行业是跳跃性风险净溢出为-13.37,远小于连续性波动风险的净溢出2.98,这导致其成为总波动风险的最大接收者,这也可以解释表4新能源行业净溢出最小。最后,油气行业的两个成分的溢出和流入分别为69.95、28.25、66.06和39.52,在对应排序中都很靠后。这意味着油气行业与其他能源行

业的相互溢出程度最小。

4.3 动态系统性风险溢出效应

考虑到风险传染往往具有时变性,进一步采用滚动窗口法来分析随能源行业动态溢出效应。Greenwood-Nimmo等^[39]的研究表明,溢出效应对滚动窗口的长度并不明显敏感,因此,选取常规的250个交易日(大约1年)的窗口进行滚动预测。

4.3.1 能源行业各路径动态溢出情况

图3绘制了2016年1月—2020年7月所有两两能源行业的系统性风险溢出沿4条路径的时间序列。图3中,在每个行业内(见对角线图),同类型风险溢出明显高于不同风险间的溢出,且 $J \leftarrow J$ 较大。相反,在不同行业之间,只有在样本的早期,同类型风险溢出与不同类型风险溢出的差异才明显出现(见非对角线图),且 $C \leftarrow C$ 更高;在2017年初至2018年底的稳定期,4条路径相互交织,各路径溢出程度相差不大。

在比较行业内 $C \leftarrow C$ 和 $J \leftarrow J$ 溢出效应的时变性

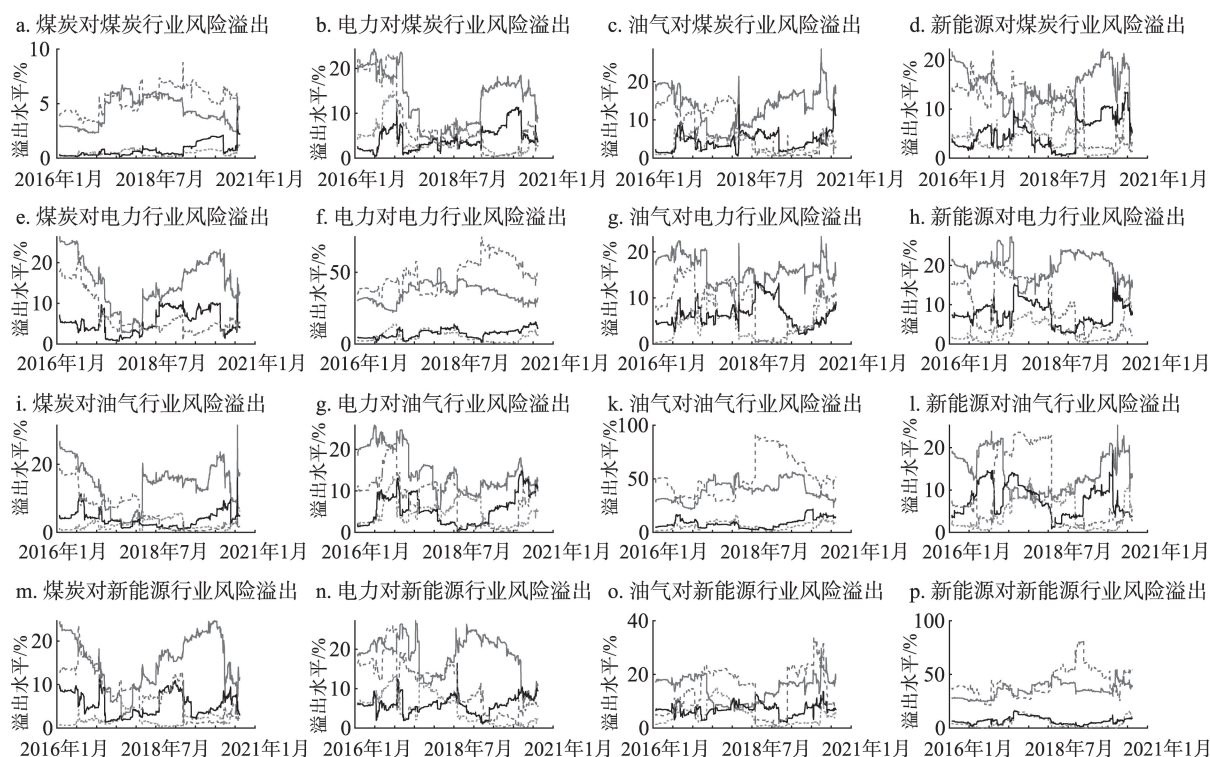


图3 2016年1月—2020年7月能源子行业两类波动风险溢出的时序图

Figure 3 Time series of systemic risk spillovers from January 2016 to July 2020

注:对角线位置为行业内波动风险溢出,非对角线位置为两两行业间波动风险的溢出。每一行为一个行业受到其他行业的风险溢出情况,每一列为该行业对其他行业的风险溢出情况。粗实线、粗虚线、细虚线和细实线分别为连续对连续路径、跳跃对跳跃路径、跳跃对连续路径、连续对跳跃路径上的波动溢出。

时,发现 $J \leftarrow J$ 溢出效应在样本期间的波动更为剧烈。这个结果可能是因为这两个波动成分是由不同类型的事件引起的。跳跃总是由极端事件引起,这些事件的种类更多,因此更容易导致波动性的溢出效应,而连续性的波动风险通常由常规事件产生,所以带来的影响较平缓。

4.3.2 跨成分动态溢出效应

为了分析不同成分间的动态溢出效应,图4给出了2016年1月—2020年7月两类风险在行业内和行业间的平均溢出时序图,其中,左侧图为4个行业内沿不同路径的平均溢出,右侧图为行业间沿不同路径的平均溢出。

在关注样本期开始和结束时期(即图4a—4d中的两个阴影区域)的溢出效应时发现,在行业内部,同类型风险间溢出效应都基本处于各自的低水平,而在不同行业之间,它们处于各自的高水平。此

外,行业内外同类型风险溢出效应以相反的趋势波动。这些结果表明,行业内的同类型波动溢出效应的模式与行业间的溢出效应相反,行业间的系统性风险传染通常在动荡时期上升,而在稳定时期下降。上述现象说明,在震荡时期,能源行业波动风险易向子行业间扩散,而股市平稳时期,波动风险易转向行业内传染。这符合在市场崩溃或动荡时行业间的传染更加明显的事实。

此外,图4e、4f显示,跨成分溢出效应在行业内和行业间两类波动风险的交叉溢出走势基本相同,水平大致相当。另一方面,注意到 $C \leftarrow J$ 的净溢出绝大部分时间为负数,这再次表明,在行业内和行业间,波动风险的交叉溢出方向主要以连续对跳跃方向为主。

4.3.3 动态跨行业溢出效应

图5模块A将所有其他能源子行业视为整体,

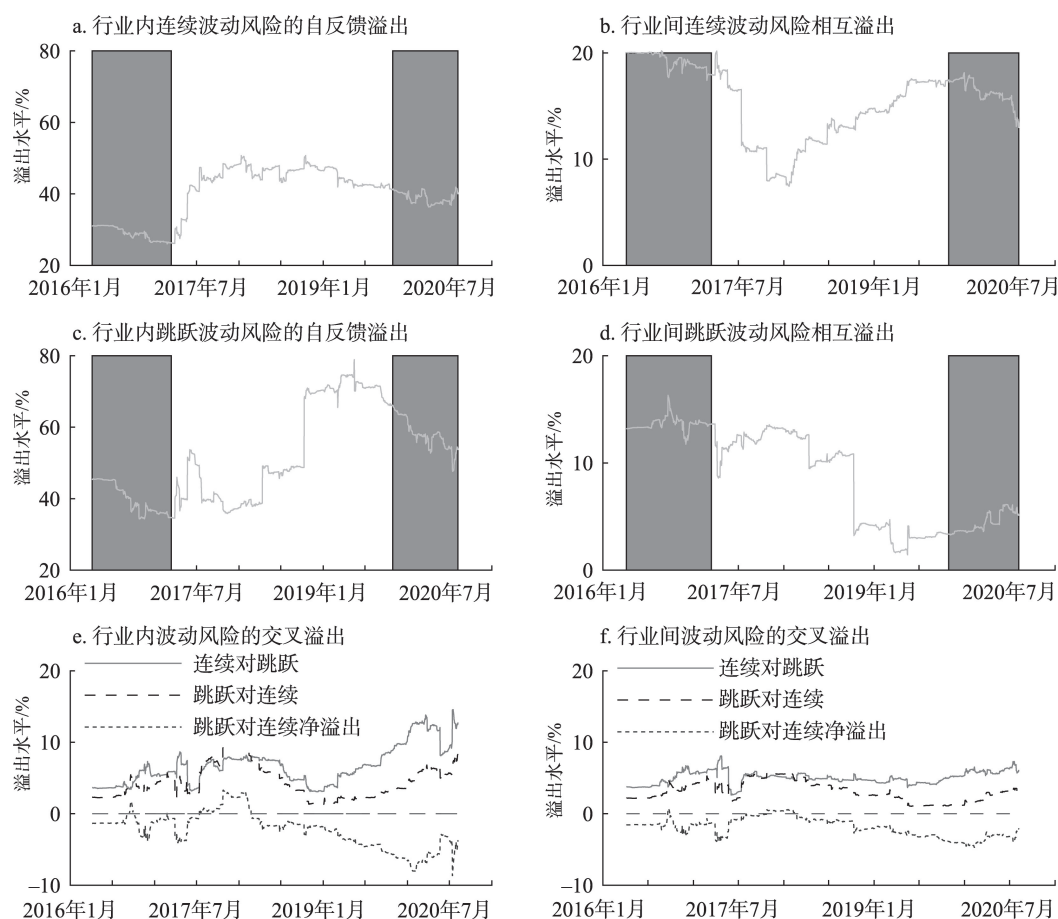


图4 2016年1月—2020年7月波动成分之间的动态溢出效应

Figure 4 Dynamic spillovers between two volatility components from January 2016 to July 2020

2023年3月

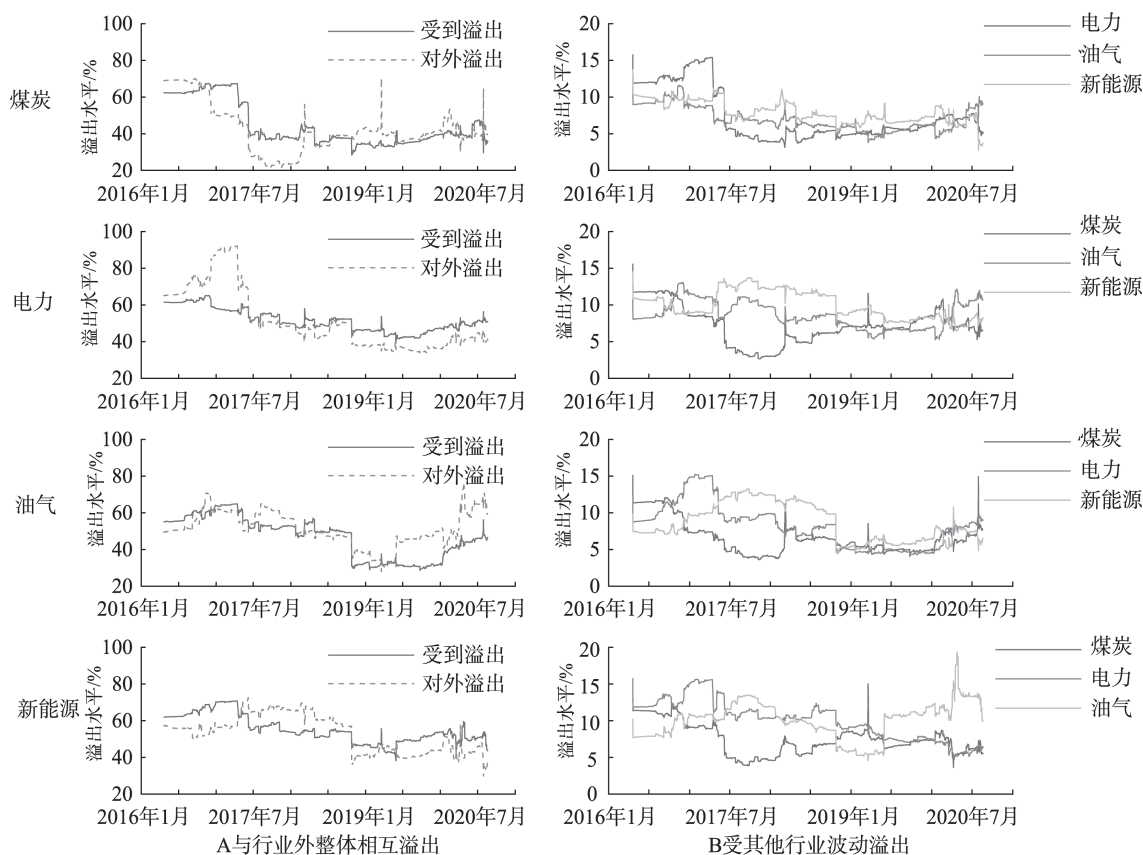


图5 2016年1月—2020年7月能源子行业间风险溢出情况

Figure 5 Spillovers from and to a certain energy subsector from January 2016 to July 2020

给出了单一行业与能源行业整体间系统性波动风险相互溢出的时序图,模块B为该行业接受其他某一能源行业的波动溢出时序图。

图5模块A显示能源行业波动风险相互溢出水平呈U型。在2016年和2020年处于高位,这主要是受2016年经济增速持续放缓、能源领域供给侧结构性改革启动、“十三五”规划的制定,及2020年疫情导致的能源需求骤减等系列重大事件的影响。随着各能源改革政策推出,2017年中国能源行业风险溢出水平逐步降低,但受国际能源政治环境以及新冠疫情影响2019年下半年能源行业系统性风险水平逐步上升。进一步细分行业看,模块B显示,在2016年上半年,各行业受煤炭行业的冲击最大,说明煤炭行业作为“十三五”规划元年能源行业调控的关注重点,易使其风险向其他行业传导;而自2016年下半年开始,受煤炭行业去产能的逐步落实,清洁能源的替代加快等的影响,煤炭行业的对

外冲击强度开始逐渐递减。另一方面,新能源行业在2017—2018年的对外溢出风险显著增强,在2018年底、2019年初虽然开始有所下降,但随后继续保持上升态势,说明随着国家政策的支持以及绿色环保理念的日益深入,其重要性愈发凸显。事实上,以清洁能源著称的新能源行业在“十三五”期间获得了各路资本和政策的大力支持,整个行业得到了较为长足的发展,消纳利用水平持续向好,能源消费占比不断提升,已进入了发展的新时期。此外,由于2016年11月7日能源发展“十三五”规划审议通过、电力多项“十三五”规划发布,以及2017年两会提出能源发电将逐步取代煤电等电力行业相关信息冲击,电力行业在2016年底和2017年对外风险溢出处于高位。

4.3.4 能源行业系统溢出效应

为分析能源行业动态溢出效应,本文绘制了汇总4条路径的跨行业溢出效应的时序图。由图6

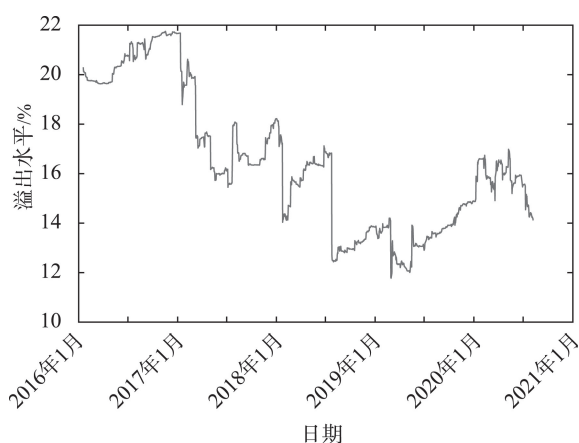


图6 2016年1月—2020年7月能源行业间的系统性风险溢出

Figure 6 Systemic risk spillovers between energy industries from January 2016 to July 2020

知,平均而言,两两能源行业之间的交叉溢出不容忽视,占样本期间总溢出的10%~22%,并表现出强烈的时间变化性。具体来说,在2016年期间,能源行业间溢出水平最高,占比超过20%,这可能是与能源行业发展的“十三五”规划和供给侧结构性改革政策的发布相关。此外,在2019年上半年能源行业系统溢出效应呈现出急剧下降的趋势,并波动到样本中的最低点(低于15%),且在2019年下半年至2020年初进一步呈明显上升趋势,最后,在局部高位上略有波动。上述结果表明,在能源系统中,动荡时期的跨行业溢出水平很高。而图4中能源行业内跳跃风险溢出在动荡时期前处于高位,说明行业内极端跳跃风险的积累,导致能源行业间系统性风险增加。

4.4 稳健性检验

为了检验不同预测步长和滚动窗口下能源行业系统性波动风险在能源行业内是否仍表现出上述特点,本文对滚动样本动态溢出进行稳健性检验。分别对基于200、250和300个交易日滚动窗口的5、10和15步预测误差进行了方差分解。图7显示了系统性交叉溢出水平,包括跨行业溢出和跨成分溢出。图7显示,对于不同的预测期和不同的滚动窗口长度,动态交叉溢出的平均水平波动相似。不同水平的溢出效应在所有面板上的表现几乎相同,说明本文的结果具有稳健性。

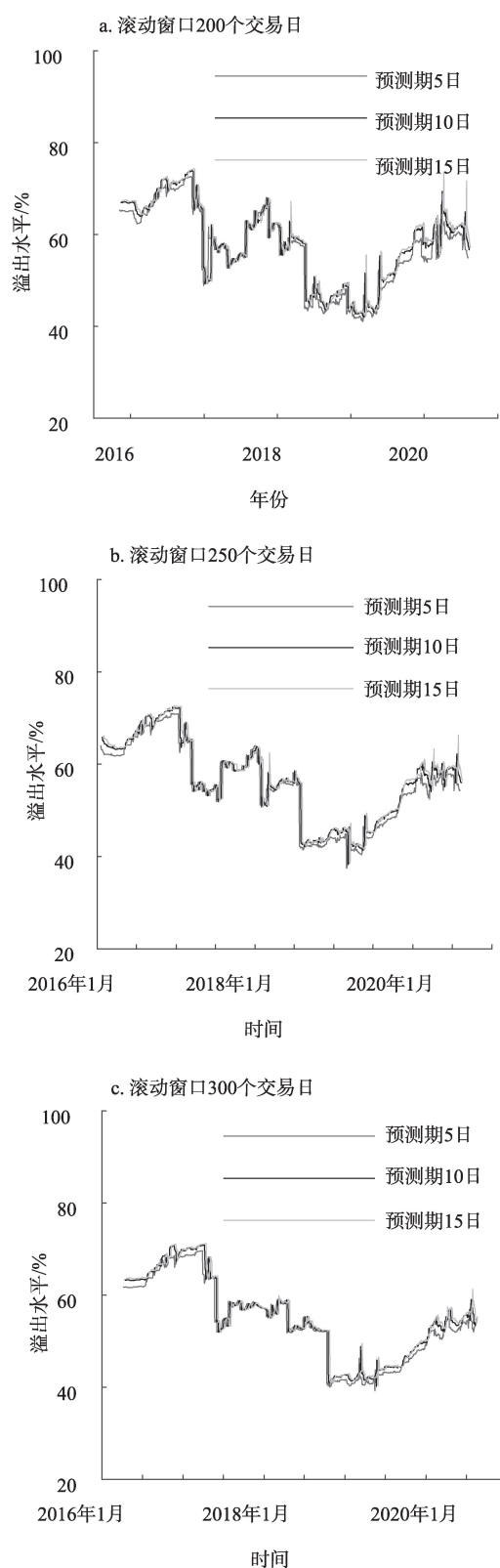


图7 2016年1月—2020年7月不同预测期和滚动窗口下的系统交叉溢出水平

Figure 7 Systemic cross-spillover levels under different forecast horizons and rolling windows from January 2016 to July 2020

2023年3月

5 结论和政策建议

5.1 结论

能源系统的稳定对一个国家的发展至关重要。本文从波动连续性成分和跳跃性成分的分解视角出发,研究了能源行业间的系统性波动风险溢出方向与特点。得出以下结论:

(1)能源行业有明显的跳跃性波动,不同能源子行业有不同的跳跃性波动模式。相对而言,煤炭、电力、油气、新能源行业分别属于跳跃高概率-高幅度、高概率-低幅度、低概率-低幅度、低概率-高幅度类型。并且,能源行业内极端跳跃风险的积累会导致能源行业间系统性风险增加。

(2)能源行业之间的系统风险溢出具有显著的时变性,在股市动荡期风险易向行业外扩散,系统性风险水平相对较高,但在稳定期则易转向行业内传染,系统性风险水平相对较低。

(3)从溢出路径来看,无论是行业内部还是行业之间,能源行业系统性波动风险都倾向于在同类型波动成分间溢出。并且在行业内部,J \leftarrow J路径的溢出更为显著,而行业之间C \leftarrow C路径的溢出更为显著。相对而言,交叉成分的溢出效应相对有限,而且主要沿着J \leftarrow C的路径。

(4)在通常情况下,煤炭行业是连续性风险的最大发出者,电力行业是跳跃性波动风险的唯一发出者,新能源行业是以跳跃性波动形式接收外部风险的最大接收者。在总波动风险水平上,电力行业和新能源行业分别是最大的风险发送者和最大的接受者。

5.1 政策建议

基于本文的研究结果,对能源行业系统性风险防范提供了以下建议:

(1)增加能源行业系统性风险防范意识,根据不同能源行业风险特点进行行业内监管,明确风险来源,防范能源行业内部极端风险积累与扩散。尤其需高度关注煤炭行业的日常波动风险和电力行业的极端波动风险。

(2)根据能源行业间两类波动风险传染特点完善相应监管模块和能源行业间监管协调机制,从而实现能源行业间风险联防联控。尤其是易受其他能源行业风险冲击的新能源和油气行业,更应关注其他行业对其的极端风险溢出。

(3)根据不同时期风险特点,实现灵活动态监管。在过度波动时期,应密切关注跨行业和跨成分的溢出效应;而在稳定时期,则应重点关注行业内部同类型风险溢出效应。同时根据风险溢出方向提前做好应对准备,阻断风险传播与扩散渠道,坚决守住不发生系统性风险的底线。

(4)继续鼓励新能源等清洁能源发展,增加能源供给多元性,并且进一步优化能源结构和供应链管理,增强能源行业竞争力。

参考文献(References):

- [1] 叶五一, 谭轲祺, 缪柏其. 基于动态因子 Copula 模型的行业间系统性风险分析[J]. 中国管理科学, 2018, 26(3): 1-12. [Ye W Y, Tan K Q, Miao B Q. Analysis of systemic risk among industries via dynamic factor copulas[J]. Chinese Journal of Management Science, 2018, 26(3): 1-12.]
- [2] 翟永会. 系统性风险管理视角下实体行业与银行业间风险溢出效应研究[J]. 国际金融研究, 2019, (12): 74-84. [Zhai Y H. Research on the risk spillover effect between entity industry and banking industry from the perspective of systemic risk management[J]. Studies of International Finance, 2019, (12): 74-84.]
- [3] 严良, 熊伟伟, 王小林, 等. 供需错配下能源替代路径优化[J]. 资源科学, 2019, 41(9): 1655-1664. [Yan L, Xiong W W, Wang X L, et al. Energy substitution path optimization under supply and demand mismatch[J]. Resources Science, 2019, 41(9): 1655-1664.]
- [4] Pindyck R S. The dynamics of commodity spot and futures markets: A primer[J]. Energy, 2001, 22(3): 1-29.
- [5] 赵文琦, 胡健, 赵守国. 中国能源产业的要素配置效率与产业升级化[J]. 数量经济技术经济研究, 2020, 37(12): 146-162. [Zhao W Q, Hu J, Zhao S G. Factor allocation efficiency of energy industry and industry upgrading in China[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2020, 37(12): 146-162.]
- [6] 汪鹏, 王翹楚, 韩茹茹, 等. 全球关键金属-低碳能源关联研究综述及其启示[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 669-681. [Wang P, Wang Q C, Han R R, et al. Nexus between low-carbon energy and critical metals: Literature review and implications[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 669-681.]
- [7] Ji Q, Li J P, Sun X L. New challenge and research development in global energy financialization[J]. Emerging Markets Finance and Trade, 2019, 55: 2669-2672.
- [8] 龚旭, 姬强, 林伯强. 能源金融研究回顾与前沿方向探索[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(12): 3349-3365. [Gong X, Ji Q, Lin B Q. Literature review and frontier direction exploration of energy finance[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2021, 41(12): 3349-3365.]

- [9] Hamilton J. Oil and the macroeconomy since World War II[J]. *Journal of Political Economy*, 1983, 91(2): 228–248.
- [10] Balke N S, Brown S P A. Oil supply shocks and the U.S. economy: An estimated DSGE model[J]. *Energy Policy*, 2018, 116: 357–372.
- [11] 赵娜娜, 王志宝, 李鸿梅. 中国能耗模式演变及其对经济发展的影响[J]. *资源科学*, 2021, 43(1): 122–133. [Zhao N N, Wang Z B, Li H M. Change of energy consumption pattern and its impact on economic development in China[J]. *Resources Science*, 2021, 43 (1): 122–133.]
- [12] 唐绍祥, 姜峰. 能源消费新模式对宏观经济的作用机制和影响分析[J]. *宏观经济研究*, 2020, (10): 145–153. [Tang S X, Lou F. An analysis of the mechanism and impact of new energy consumption mode on macroeconomic [J]. *Macroeconomics*, 2020, (10): 145–153.]
- [13] Shahzad S J H, Hernandez J A, Al-Yahyaee K H, et al. Asymmetric risk spillovers between oil and agricultural commodities[J]. *Energy Policy*, 2018, 118: 182–198.
- [14] Chen L, Wen F, Li W, et al. Extreme risk spillover of the oil, exchange rate to Chinese stock market: Evidence from implied volatility indexes[J]. *Energy Economics*, 2022, DOI: 10.1016/j.eneco.2022.105857.
- [15] Yin L B, Feng J B, Han L Y. Systemic risk in international stock markets: Role of the oil market[J]. *International Review of Economics & Finance*, 2021, 71: 592–619.
- [16] Naeem M A, Balli F, Bruin A, et al. Energy commodity uncertainties and the systematic risk of US industries[J]. *Energy Economics*, 2020, DOI: 10.1016/j.eneco.2019.104589.
- [17] Ouyang R L, Chen X, Fang Y, et al. Systemic risk of commodity markets: A dynamic factor copula approach[J]. *International Review of Financial Analysis*, 2022, DOI: 10.1016/j.irfa.2022.102204.
- [18] Kerste M, Matthijs G, Jarst W, et al. Systemic risk in the energy sector: Is there need for financial regulation?[J]. *Energy Policy*, 2015, 78: 22–30.
- [19] 刘超, 郭亚东. 多时间尺度下行业间系统性金融风险溢出及拓扑结构分析[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(10): 46–59. [Liu C, Guo Y D. Systemic financial risk spillover and its topology analysis of sector indexes in China under a multi-scale view[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 30(10): 46–59.]
- [20] Tan X P, Geng Y, Vivian A, et al. Measuring risk spillovers between oil and clean energy stocks: Evidence from a systematic framework[J]. *Resources Policy*, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102406.
- [21] Wu, F, Zhang D Y, Ji Q. Systemic risk and financial contagion across top global energy companies[J]. *Energy Economics*, 2021, DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105221.
- [22] Ouyang R L, Zhuang C K, Wang T T, et al. Network analysis of risk transmission among energy futures: An industrial chain perspective[J]. *Energy Economics*, 2022, DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105798.
- [23] Zhu B, Liu J H, Lin R D, et al. Cross-border systemic risk spillovers in the global oil system: Does the oil trade pattern matter? [J]. *Energy Economics*, 2021, DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105395.
- [24] Zhou E, Wang X Y. Dynamics of systemic risk in European gas and oil markets under the Russia–Ukraine conflict: A quantile regression neural network approach[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 3956–3966.
- [25] Zhu B, Deng Y Y, Lin R D, et al. Energy security: Does systemic risk spillover matter? Evidence from China[J]. *Energy Economics*, 2022, DOI: 10.1016/j.eneco.2022.106252.
- [26] Xiong S, Chen W. A robust hybrid method using dynamic network analysis and weighted Mahalanobis distance for modeling systemic risk in the international energy market[J]. *Energy Economics*, 2022, DOI: 10.1016/j.eneco.2022.105954.
- [27] Zhu B, Lin R, Liu J. Magnitude and persistence of extreme risk spillovers in the global energy market: A high-dimensional left-tail interdependence perspective[J]. *Energy Economics*, 2020, DOI: 10.1016/j.eneco.2020.104761.
- [28] 龚旭, 林伯强. 跳跃风险、结构突变与原油期货价格波动预测[J]. *中国管理科学*, 2018, 26(11): 11–21. [Gong X, Lin B Q. Jump risk, structural breaks and forecasting crude oil futures volatility [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(11): 11–21.]
- [29] 刘振华, 丁志华, 段钊平. 气候政策不确定性会加剧能源市场间极端风险溢出吗?[J]. *系统工程理论与实践*, 2023, (1): 1–25. [Liu Z H, Ding Z H, Duan Z P. Does climate policy uncertainty exacerbate extreme risk spillovers across energy markets?[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2023, (1): 1–25].
- [30] Chen Y X, Ma F, Zhang Y J. Good, bad cojumps and volatility forecasting: New evidence from crude oil and the U.S. stock markets [J]. *Energy Economics*, 2019, 81: 52–62.
- [31] Maslyuk–Escobedo S, Rotaru K, Dokumentov A. News sentiment and jumps in energy spot and futures markets[J]. *Pacific-Basin Finance Journal*, 2017, 45: 186–210.
- [32] Xu H, Wang M G, Yang W G. Spatiotemporal dynamics analysis and systemic risk measurement of energy price system based on complex network[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2019, DOI: 10.1016/j.physa.2019.03.067.
- [33] 杨宇, 何则. 中国海外油气依存现状、地缘风险与应对策略[J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1614–1629. [Yang Y, He Z. China’s overseas oil and gas dependence: Situation, geographical risks, and countermeasures[J]. *Resources Science*, 2020, 42(8): 1614–1629.]
- [34] 丁日佳, 高青. 去杠杆背景下我国煤炭行业杠杆率合理水平测算[J]. *统计与决策*, 2020, 36(22): 148–152. [Ding R J, Gao Q. Under the background of deleveraging, the reasonable level of leverage ratio of China’s coal industry is measured[J]. *Statistics & Decision*, 2020, 36(22): 148–152.]

- [35] Barndorff-Nielsen O E. Power and bipower variation with stochastic volatility and jumps[J]. *Journal of Financial Econometrics*, 2004, 2(1): 1–37.
- [36] 杨科, 陈浪南. 中国股市高频波动率跳跃的特征分析[J]. *系统工程学报*, 2012, 27(4): 492–497. [Yang K, Chen L N. Jump dynamics of high-frequency volatility in Chinese stock markets[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2012, 27(4): 492–497.]
- [37] Corsi F, Pirino D, Reno R. Volatility forecasting: The jumps do matter[R]. *Global COE Hi-Stat Discussion Paper Series* gd08-036, 2008.
- [38] Bollerslev T, Li S Z Z, Zhao B Z. Good volatility, bad volatility, and the cross section of stock returns[J]. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 2020, 55(3): 751–781.
- [39] Greenwood-Nimmo M, Nguyen V H, Rafferty B. Risk and return spillovers among the G10 currencies[J]. *Journal of Financial Markets*, 2016, 31: 43–62.

Systemic risk spillover of China's energy industry based on the perspective of volatility decomposition

ZHAO Shuran^{1,2}, ZHANG Jie¹, LI Jinchen¹, REN Peimin³

(1. School of Economics, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Institute of Marine Development, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. School of Economics, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: [Objective] The energy industry is closely related to national security and economic development, and its systemic risks cannot be ignored. This study explored the industry-level volatility interconnections and examined the direction and characteristics of systemic risk spillover from the normal and extreme energy market states. It provides a new perspective and technical support for systemic risk management in the energy industry. [Methods] Based on the volatility decomposition approach, we decomposed the volatility risk of each energy industry into continuity and jump components, and then constructed the connection matrix and spillover indicators between these components through the generalized variance decomposition method of the vector autoregressive model. Subsequently, the systemic risk spillover effects in China's energy industries were analyzed from static and dynamic perspectives. [Results] The empirical results suggest that: (1) There are obvious jump fluctuations in the energy industry, and the accumulation of jump risk in the energy industry will lead to an increasing systemic risk; (2) The systemic risk spillover in the energy industry is significantly time variant. The risk tends to spread outside the industry during fluctuation periods and shifts to the intra-industry contagion during the stable periods; (3) Either within or between industries, volatility risks tend to be transferred within the same type of volatility components, and the net spillover direction between two components is along the continuity-to-jump path; (4) The coal industry is the largest sender of the continuity risk, the electricity industry is the only sender of the jump risk, and the new energy industry is the largest receiver of external risk in the form of volatility jumps. [Conclusion] The government should pay more attention to both cross-industry and cross-component spillovers during turbulent periods while paying attention to the self-feedback spillover within industries during stable periods, so as to prevent local risk from accumulating and spreading to the whole energy system.

Key words: energy industry; systemic risk; jump test; generalized variance decomposition; volatility risk; China