

# 多时间尺度下载体金属铜及其伴生金属市场溢出效应研究

吴巧生, 王昱力, 毕致玮

(中国地质大学(武汉)经济管理学院, 湖北武汉, 430074)

**摘要:** 关键金属是战略性新兴产业的关键原材料, 其重要性日益凸显。多数关键金属矿产常以伴生状态存在, 产量受载体金属约束, 研究载体金属与伴生金属的价格影响关系, 对于化解价格波动带来的风险尤为重要。采用多元小波与DY溢出指数研究载体金属铜及其伴生金属镍、锡、黄金之间的市场关联与溢出效应, 结果显示, 短期时间尺度下铜-镍相关性更强, 长期时间尺度下铜-锡相关性更强。在不同时间尺度下, 铜-镍、铜-锡金属对之间存在较强的共同运动。DY溢出结果显示, 在各时间尺度下, 铜与伴生金属市场存在双向溢出效应; 铜是伴生金属市场风险的最大贡献者, 且最容易受到伴生金属市场的冲击; 在中长期的时间尺度下, 铜与伴生金属的溢出幅度变化更大, 分散组合投资效益差。

**关键词:** 载体金属; 伴生金属; 小波分析方法; 溢出效应

**中图分类号:** F426.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-3104(2025)01-0107-16

在中国推进实现“双碳”目标的进程中, 关键金属矿产是清洁能源、信息技术、先进制造业等战略性新兴产业的关键原材料, 随着战略性新兴产业的不断发展, 其需求增量不断提高<sup>[1]</sup>。然而, 关键金属矿产大多作为副产品富集生产于载体金属(如铜、铝、锌等)中<sup>[2]</sup>, 其产量受到载体金属约束<sup>[3-4]</sup>。近年来, 伴生金属价格波动剧烈。2022年3月, 伦敦金属交易所镍期货价格暴涨, 加剧了市场的混乱状况。许多冶炼企业选择取消保值操作, 转而使用现货价格或指数进行结算或参考, 以规避价格波动风险。伴生金属价格的波动会影响大规模以伴生金属作为关键原材料的战略性新兴产业的发展, 进而影响经济的高质量发展<sup>[3]</sup>。鉴于伴生金属在能源转型中的重要性, 以及对伴生金属价格波动的担忧, 以联合生产为理论基础, 开展载体-伴生金属价格之间相关性的研究受到了学界的广泛关注<sup>[4-5]</sup>。

铜、镍、锡、黄金不仅作为关键金属有着十分广泛的应用, 而且作为主要的有色金属在国民经济发展中扮演着重要角色, 它们之间存在伴生关系。Nassar在对金属的伴生性进行评估时发现接近50%的金属是铜、铁的伴生金属<sup>[4]</sup>。中国主要的铜矿床类型有斑岩型、矽卡岩型及铜镍硫化物型<sup>[6]</sup>。其中, 斑岩型铜矿床是铜金属产量的主要来源。研究发现, 金是斑岩型铜矿床的主要伴生金属, 斑岩型铜矿床中的伴生黄金的储量在上层地壳黄金中的储量最大。斑岩型铜矿床目前供应了全球近75%的铜和20%的黄金<sup>[7-9]</sup>。铜镍硫化物型矿床中共生及伴生的矿产有铅、锌、钨、锡等, 在共生以及伴生矿种中, 铜矿是锡矿的主要来源<sup>[10]</sup>。铜镍硫化物型铜矿具有镁铁质特征, 超镁铁质岩型铜镍矿床既是镍矿的主要类型, 也是铜矿的重要类型之一, 伴生镍矿主要出现在铜镍硫化物型铜矿床中<sup>[11-12]</sup>。

**收稿日期:** 2024-01-13; **修回日期:** 2024-11-20

**基金项目:** 国家社会科学基金重大项目“我国深海战略性资源勘探开发政策研究”(23&ZD107)

**作者简介:** 吴巧生, 男, 湖南娄底人, 中国地质大学(武汉)经济管理学院二级教授、博士生导师, 主要研究方向: 矿产资源经济; 王昱力, 女, 河南洛阳人, 中国地质大学(武汉)经济管理学院硕士研究生, 主要研究方向: 矿产资源经济; 毕致玮, 男, 山东淄博人, 中国地质大学(武汉)经济管理学院博士研究生, 主要研究方向: 矿产资源经济, 联系邮箱: cugbzw@cug.edu.cn

在供需矛盾日益激烈与国际金属市场价格剧烈波动的背景下,探讨载体金属与伴生金属市场的关联关系,并且从实证角度研究铜-镍、铜-锡、铜-黄金的收益率序列在多时间尺度下所呈现出的协同变动特征及溢出效应相关特性,可以获得更准确、更深刻的价格关系。这不仅可以帮助市场系统地把握载体金属与伴生金属的价格波动规律,建立价格监测系统,而且对于降低企业经营者的经营风险,促进新兴技术的研究和应用,确保相关市场及时调整监管策略具有一定的理论与现实意义。同时,明确载体金属与伴生金属市场在不同的时间尺度下的价格关联及溢出效应的趋势、程度,能够进一步理解载体金属与伴生金属的价格关联及波动规律,在指导金属市场风险管理和组合多元化投资等方面具有鲜明的现实意义。

## 一、文献综述

### (一) 金属市场波动溢出效应研究

金属供需的特点是短期缺乏弹性,因此金属市场的溢出效应主要表现为价格变化,而不是数量变化<sup>[13]</sup>。有色金属价格的溢出效应引起了学者们的广泛关注,时间序列方法常被用于测量金属价格之间的关系和溢出效应。Lien 和 Yang 使用动态条件相关 GARCH 模型研究了三个国际铜期货市场的短期收益和波动溢出效应<sup>[14]</sup>。Todorova 等使用多元异构自回归(HAR)模型研究了铝、铜、铅、镍和锌之间的波动溢出效应,发现了长期内贱金属之间强烈波动性传递的证据<sup>[15]</sup>。闻岳春等基于 DCC-MGARCH 模型,分别从收益率与波动率溢出的角度分析了国际石油、黄金、铜等主要大宗商品市场间的溢出效应<sup>[16]</sup>。Ciner 等使用 DY 方法、不对称因果检验和小波分析方法检查了贱金属市场之间的相互作用,结果显示有色金属(铝、铝合金、铜、铅、镍、锡和锌)的回报和波动性存在溢出效应<sup>[17]</sup>。

一般大宗金属之间的价格溢出效应已得到广泛讨论,但针对具有共伴生特性的关键金属之间的价格溢出效应的研究较少。近几十年来,载体-伴生金属的相关性和经济价值发生了巨大变化。探索共伴生金属之间的价格关联,能够帮助市场投资者理解市场运行规律,稳定共伴生金属市场,进一步助力战略性新兴产业的发展。

### (二) 共伴生金属市场关系研究

由于过去伴生金属在全球经济中的作用不显著,且缺乏关键数据,对载体金属和伴生金属之间价格依赖关系的研究始于 20 世纪 80 年代。Campbell 通过分析美国金属矿业联合产品的价格波动,发现联合生产载体金属和伴生产品金属的价格存在单向因果关系<sup>[6]</sup>。Naumov 等证实当载体金属和伴生金属的需求发生反向变化时,载体金属和伴生金属的价格呈负相关关系。而当载体金属的供给和伴生金属的需求发生同向变化时,伴生金属的价格变化不可预测<sup>[18]</sup>。相关学者从理论上分析了载体金属和伴生金属价格的依赖关系,指出在载体金属市场稳定的情况下,伴生金属是有限的。当伴生金属的市场需求超过伴生金属的供应限制时,生产者不会增加载体金属的产量以实现利润最大化,此时伴生金属的供应取决于对载体金属的需求(即载体金属对伴生金属有“产量约束”)<sup>[19-21]</sup>。

现有对载体金属与伴生金属价格关联的研究认为两者之间存在单向影响关系。Redlinger 等利用相关性分析方法对载体金属与伴生金属价格进行了研究,认为两者之间存在较弱的依赖性<sup>[22]</sup>; Shivenes 等通过协整检验和线性格兰杰因果关系检验发现载体金属与伴生金属之间存在单向格兰杰因果关系<sup>[23]</sup>。

从上述研究可以看出,共伴生金属价格之间存在相关关系,但学界并未达成共识。事实上,在产量约束规律下,共伴生金属之间的价格关系可能是双向格兰杰因果关系,该关系随时间尺度的变化产生变化,在不同的时间频率上,价格会显示出不同的特征。因此,单一尺度的分析难以有效反映其在不同尺度上的内部特征<sup>[24]</sup>,从而容易对其风险进行错误的估计,从双向价格关系和多尺度动态视角考虑共伴生关键金属市场之间的关系是极为必要的。

目前的文献大多从理论方面探讨共伴生金属价格的相关性, 或多讨论共伴生关键金属单向价格关系, 强调载体金属价格对伴生金属价格的重要性, 没有对其双向影响关系进行探讨。综上, 本文探讨载体金属铜与伴生金属——镍、锡、黄金的价格溢出效应。从方法上, 首先将铜与伴生金属的现货价格日数据处理为收益率序列数据, 然后运用小波多元相关(WMC)和小波多元交叉相关(WMCC)测度铜与伴生金属在不同时间尺度下的运动关系, 通过格兰杰因果检验探究短中长期的传导机制<sup>[25]</sup>, 最后运用 DY 方法分析不同时间尺度下不同金属市场间的静态与动态溢出效应。

通过将 DY 溢出指数与小波分析方法相结合, 可以清晰地理解载体金属和伴生金属之间价格关系的时间变化特征。小波多元相关(WMC)和小波多元互相关(WMCC)在测量不同频率的两个序列之间的关系时相当稳健, 可以有效地克服变量之间成对相关和交叉相关的某些限制, 有效地分析载体金属与伴生金属市场之间的关系<sup>[26-27]</sup>。小波分析方法考虑了不同的时间尺度, 通过解释其成分随时间变化而发生的变化来估计时间序列的光谱特征, 刻画了不同时间序列的短期共同运动和长期共同运动。所以, 小波分析方法能够将投资期内的短期持有期与长期持有期分开, 并揭示出市场中共同运动关系的真实动态。通过对价格数据进行小波分解, 可以更全面地洞察市场, 更好地把握市场变化的规律。

## 二、研究方法及数据来源

### (一) 研究方法

#### 1. 极大重叠离散小波变换方法(MODWT)

MODWT 将铜与伴生金属的收益率序列分解为不同的时间标量和频率分量, 其分解方程式得到的细节系数和近似系数为:

$$X = S_{j=1}^{J_0} \tilde{D}_j + \tilde{S}_{j_0} \tag{1}$$

其中,  $J=J_0$ ,  $J$  表示小波分解的层数,  $\tilde{D}_j$  表示细节系数,  $\tilde{S}_{j_0}$  表示近似系数。

相比于传统的小波变换, MODWT 的优势为: 在进行转换时无须对数据生成过程进行强力假设, 避免信息丢失; 对数据长度没有特殊要求, 能够增加多分辨率分解的低频部分的信息量。

#### 2. 小波多元相关与小波多元互相关

设  $x_t = (x_{1t}, x_{2t}, \dots, x_{mt})$  为多元随机过程,  $W_{jt} = (W_{1jt}, W_{2jt}, \dots, W_{njt})$  是通过 MODWT 得到的每个对应的小波系数,  $\phi_X(\lambda_j)$  为根据收益率序列计算的一组单尺度相关性, 即小波多元相关(WMC)的一组估计值。在给定每个小波尺度  $\lambda_j$  的情况下, 通过对回归方程中小波系数  $W_{ijt}, (i=1, 2, \dots, n)$  进行线性组合, 计算回归方程中小波系数的平方根, 得到小波系数的平方根的最大值。在一组回归变量的集合  $[z_k, k \neq i]$  上, 与变量  $z_i$  的回归对应的判定系数表示为:  $R_i^2 = 1 - 1/\rho^{ii}$ , 其中  $\rho^{ii}$  代表相关矩阵  $\rho$  的逆矩阵中第  $i$  个对角线元素。因此, WMC 计算为:

$$\phi_X(\lambda_j) = \sqrt{1 - \frac{1}{\max \text{diag} P_j^{-1}}} \tag{2}$$

在式(2)中,  $P_j$  代表  $W_{jt}$  的  $(n \times n)$  维相关矩阵, 而对角线上的最大元素则由  $\max \text{diag}(\cdot)$  获得。由于相关平方系数  $R_i^2$  等于由变量  $Z_i$  与通过从回归方程中获得的拟合值  $\hat{Z}_i$  之间相关系数的平方, 因此 WMC 可以表示为:

$$\phi_X(\lambda_j) = \frac{\text{Cov}(W_{ijt}, \hat{W}_{ijt})}{\sqrt{\text{Var}(W_{ijt})\text{Var}(\hat{W}_{ijt})}} \tag{3}$$

选择  $W_{ij}$  以使  $\phi_x(\lambda_j)$  最大化, 而  $\hat{W}_{ijt}$  是在  $W_{ij}$  尺度  $\lambda_j$  下小波系数回归中的拟合值。

由此可以进一步推导出小波多元互相关(WMCC), 在每个  $\lambda_j$  尺度上, 都可以简单地在所选标准变量的观测值和拟合值之间引入一个滞后项, 即  $\tau$ , 并将结果表示为:

$$\phi_x(\lambda_j) = \frac{\text{Cov}(W_{ijt}, \hat{W}_{ijt+\tau})}{\sqrt{\text{Var}(W_{ijt})\text{Var}(\hat{W}_{ijt+\tau})}} \quad (4)$$

交叉小波描述了两个时间序列在时间和频率上的协方差, 因此交叉小波变换可以定义为:

$$W_{xy(u,s)} = W_{x(u,s)} \times W_{y(u,s)} \quad (5)$$

其中,  $W_{x(u,s)}$  和  $W_{y(u,s)}$  是成对的金属收益率序列间的极大重叠离散小波变换系数。

本文使用小波平方相干性来测量铜与伴生金属收益率序列随时间和频率的相位情况。因此, 调整小波平方相干系数的方程为:

$$R^2(u,s) = \frac{|S(s^{-1}W_{xy}(u,s))|^2}{S(s^{-1}|W_{x(u,s)}|^2)S(s^{-1}|W_{y(u,s)}|^2)} |W_{x(u,s)}|^2 \quad (6)$$

式(6)中,  $S$  是一个平滑机制, 小波平方相干系数  $R^2(u,s)$  的范围是 0 至 1。平方系数越小, 成对的收益率序列相互依赖性越弱。

### 3. DY 溢出指数

首先设定一个滞后阶数为  $q$  的  $N$  维 VAR 模型变量为:

$$X_t = \sum_{i=1}^q \phi_i X_{t-i} + \varepsilon_t \quad (7)$$

其中,  $X_t$  表示 VAR( $q$ )模型,  $\varepsilon_t$  表示独立同分布的随机扰动项, 即  $\varepsilon_t \sim N(0, \Sigma_t)$ ,  $\Sigma_t$  为协方差矩阵,  $\phi_i$  表示第  $i$  个系数矩阵。

其次, 在假设该模型协方差平稳的基础上, 将  $X_t$  转换为移动平均公式:

$$X_t = \sum_{i=1}^{\infty} (\phi_1 X_{t-i} + \dots + \phi_p X_{t-p}) \varepsilon_t \quad (8)$$

然后, 计算两变量间的溢出效应, 对协方差矩阵进行方差分解, 可以揭示金属收益率序列中系统内变动的来源, 并衡量各金属收益率变动对其他金属收益率波动的冲击程度。

一组变量  $\{x_j\}$  对另一组变量  $\{x_i\}$  的溢出指数  $\theta_{ij}(H)$  表述为:

$$\theta_{ij}(H) = \frac{\sigma_{jj}^{-1} \sum_{h=0}^{H-1} (e_i' A_h e_j)^2}{\sum_{h=0}^{H-1} (e_i' \sum_k A_h' e_k)^2} \quad (i \neq j) \quad (9)$$

其中,  $e_i$  是  $N$  维列向量, 其第  $i$  个值为 1, 其他值均为 0。接着对  $\theta_{ij}(H)$  采取标准化处理:

$$\tilde{\theta}_{ij}(H) = \frac{\theta_{ij}(H)}{\sum_{j=1}^N \theta_{ij}(H)} \quad (i \neq j) \quad (10)$$

由此, 通过式(10)可得到方差贡献值, 帮助衡量铜与伴生金属序列在多尺度的静态溢出效应上的大小, 为了探究铜与伴生金属市场的动态溢出效应, 运用滚动的 VAR 模型, 即在滚动窗口内估计 VAR 模型常参数并计算溢出指数。动态总溢出指数表达式为:

$$S(H) = \frac{\sum_{i,j=1,t \neq j}^N \tilde{\theta}_{ij}(H)}{\sum_{i,j=1}^N \tilde{\theta}_{ij}(H)} \times 100 \tag{11}$$

一组变量  $\{x_j\}$  对另一组变量  $\{x_i\}$  的动态定向溢出指数为:

$$S(H) = \frac{\tilde{\theta}_{ij}(H)}{\sum_{i,j=1}^N \tilde{\theta}_{ij}(H)} \times 100 \tag{12}$$

**(二) 数据来源与检验**

选用载体金属铜与三种伴生金属(镍、锡、黄金)的每日收盘现货价格, 取样时间范围为 2017 年 1 月 1 日至 2022 年 8 月 31 日; 对无效数据进行剔除, 最终共有样本数据 5 248 条, 数据均来自前瞻数据库。现货市场是商品或资产实际交割的市场, 现货价格直接反映了市场供需的实际状况。现货价格更能反映实际经济活动中的价格波动, 对于分析市场中的供需变化、价格波动及波动溢出效应具有现实意义。

为减少实验结果上的误差, 在一定程度上保证时间序列的平稳性, 对四种金属的原始价格序列求取对数, 进行收益率计算( $R = \ln p_t - \ln p_{t-1}$ ),  $R_t$  表示某种期货在  $t$  时刻的收益率,  $p_t$ 、 $p_{t-1}$  为  $t$ 、 $t-1$  时刻的金属收盘现货价格。

对载体金属和伴生金属的收益率序列的初步分析见表 1。金属的平均收益在所有情况下都表现正向, 且平均收益在 0 附近。所有的收益率序列都偏离了正常分布, 均呈现为左偏分布, 这意味着负收益率比正收益率的出现频率更高。所有被检验的收益率序列在 10% 的显著水平下, 拒绝 Arch 效应不存在的原假设, 表现出残差序列的相关性。表 2 总结了不同金属的收益率之间的线性相关关系。所有金属的收益率之间都呈现出正相关性。结果显示, 铜-镍金属对显示出最高的关联性, 锡-黄金金属对的关联性最低。此外, 载体金属与伴生金属的相关性最低的是铜-黄金金属对, 伴生金属之间的相关性的大小不同。

表 1 收益率序列的描述性统计及检验

	$R_{Cu}$	$R_{Ni}$	$R_{Sn}$	$R_{Au}$
最小值	-0.07	-0.15	-0.14	-0.05
均值	$0.99 \times 10^{-5}$	$6.66 \times 10^{-5}$	$4.78 \times 10^{-5}$	$4.40 \times 10^{-5}$
最大值	0.06	0.44	0.14	0.06
偏度	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06
峰度	0.00	0.00	0.00	0.00
标准差	1.64	4.17	1.23	1.65
JB 检验	253.57*	340 737.00*	8 657.70*	1 273.30*
SW 检验	0.98*	0.77*	0.84*	0.95*
ADF 检验	-10.53*	-12.82*	-11.45*	-11.88*
PP 检验	-1 386.40*	-1 133.80*	-1 333.80*	-1 295.50*
LM(10)检验	85.72*	29.97*	213.26*	130.66*
Q(10)检验	4.69	21.21	35.70*	17.44
Q <sup>2</sup> (10)检验	130*	18.82	430.07*	230.43*

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

表2 收益率序列的相关系数

	$R_{Ni}$	$R_{Sn}$	$R_{Au}$
$R_{Cu}$	0.44	0.35	0.15
$R_{Ni}$	1.00	0.30	0.17
$R_{Sn}$	0.30	1.00	0.06

### 三、结果及分析

#### (一) 铜与伴生金属市场的协同变动

##### 1. 极大重叠离散小波变换

表3反映不同尺度对应的时期以及频段的结果。D1尺度的频率最高,出现在2~4天;D2尺度针对收益率序列中第二个精细的频率,代表4~8天的尺度;D5尺度的频率最低,表示的是每月到每季度的频段,出现时期为32~64天。参照Fernandez的不同时间尺度的解释可知,D1尺度与短期投机交易者有关,而D2~D4尺度对中期投资者具有参考价值,D5尺度对长期机构投资者来说是较为重要的。

表3 小波分解频率、尺度、时间和区间关系对照表

分解层次	尺度	时期	频段	频率
1	1/D1	2~4天	周内/短期	
2	2/D2	4~8天	每周/中短期	高
3	4/D3	8~16天	每两周/中期	↓
4	8/D4	16~32天	每月/中长期	低
5	16/D5	32~64天	每月到每季度/长期	

图1显示了将收益率序列分解为不同尺度的结果。研究对象在D1尺度下波动最为强烈,随着尺度的增加,尺度信号逐渐趋于平滑。从时域方面来看,遍及D1~D5尺度,铜收益率序列在200天(2018年1月)、800天(2020年7月)、1200天(2021年5月)附近有较为明显的高频波动,主要是因为受到了供需结构变化、人民币汇率改革等多方面的影响。在第一阶段,由于智利铜矿工人罢工的影响,铜产量下降,而新能源汽车的发展使得铜消费量攀升,需求旺盛,因此供需结构紧张,铜价持续上升。第二阶段在2020年之后,全球铜精矿供应增速放缓,矿山增产弹性较小,供给增速下滑,精铜出现了供给缺口,铜价快速上涨。在第三阶段,受到经济持续回升的影响,铜价继续震荡走高。镍的收益率序列波动剧烈的时段主要在800天之后(2022年3月)。锡的收益率序列高频波动区间集中在750~800天(2020年4月17日后的50个交易日)、880~1050天(2020年11月10日后的170个交易日)、1280~1320天(2022年7月5日后的40个交易日)。黄金的收益率序列高频波动集中在750~850天(2020年4月17日100个交易日)。通过对比发现, $R_{Cu}$ 、 $R_{Ni}$ 、 $R_{Sn}$ 与 $R_{Au}$ 序列皆在2022年3月发生明显的高频波动,金属现货价格有所回落,随着经济状况的转好,金属现货价格呈现上升趋势,收益率序列发生波动。

从频域方面来看,观察相同频率下不同时期的波动情况。在周频段的频率下,收益率序列在多数时间内以特定的频率进行着均匀的高频率波动,即收益率变化主要受市场自身的随机因素的影响。在月内尺度下,振幅变大,频率降低,收益率序列间的波动情况及波动方向的相似性增强。在长期趋势下,相同时域的各金属对的收益率序列波动幅度变小,协同变动关系明显。

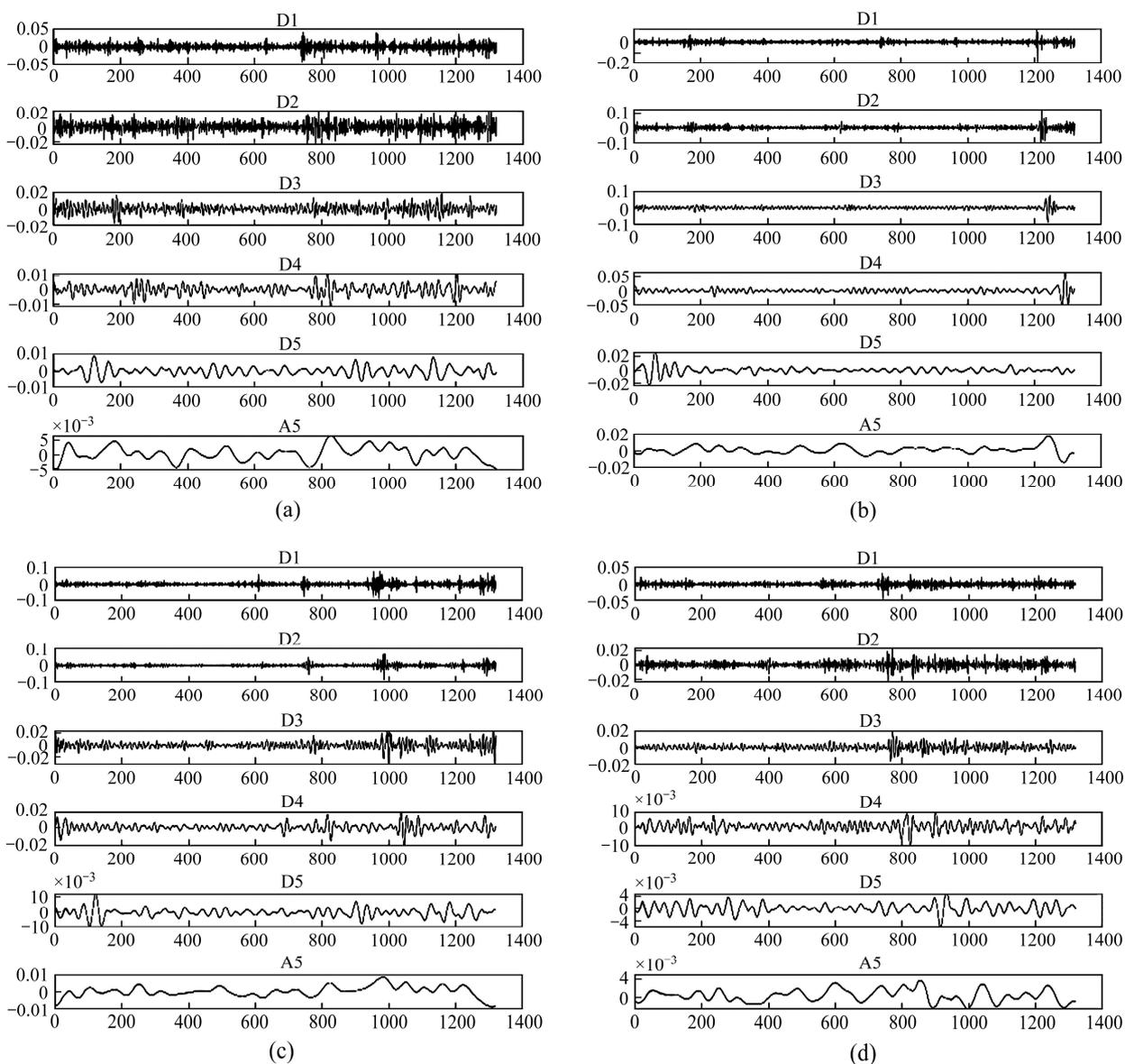


图1 收益率序列的MODWT多尺度分解图

注: (a)、(b)、(c)、(d)分别表示  $R_{Cu}$ 、 $R_{Ni}$ 、 $R_{Sn}$ 、 $R_{Au}$  的MODWT多尺度分解图。

## 2. 小波交叉相关

成对小波相关分析可以揭示载体金属与伴生金属市场间的整合关系, 成对的金属收益率序列在D1~D5尺度下的相关性如图2所示, 所有成对的金属收益率皆为正相关。铜-镍金属对的相关程度最高, 平均相关系数为0.41。在不同的时间频率上, 铜-黄金金属对的相关性最弱。本文通过进一步量化不同尺度(2~4天、4~8天、8~16天、16~32天和32~64天)的相关系数, 构建金属对的多元化排序, 评估多元化机会。铜与镍、锡之间显示出较强的相关性, 但有所区别。铜-镍金属对在短期(2~4天)内显示出更强的相关性, 意味着在短期内投资者的投资风险更大, 为保证收益的稳定, 可以采取分散的策略。铜-锡金属对则在长期(32~64天)内显示出更强的相关性, 投资机构在该时段内采取分散投资组合的形式会降低自身的投资风险。铜-黄金金属对具有相关性, 但相关性较弱, 平均相关系数约为0.16, 意味着铜-黄金金属对具有较好的多样化效益, 并在短期(2~4天)内存在更好的多元化投资组合。

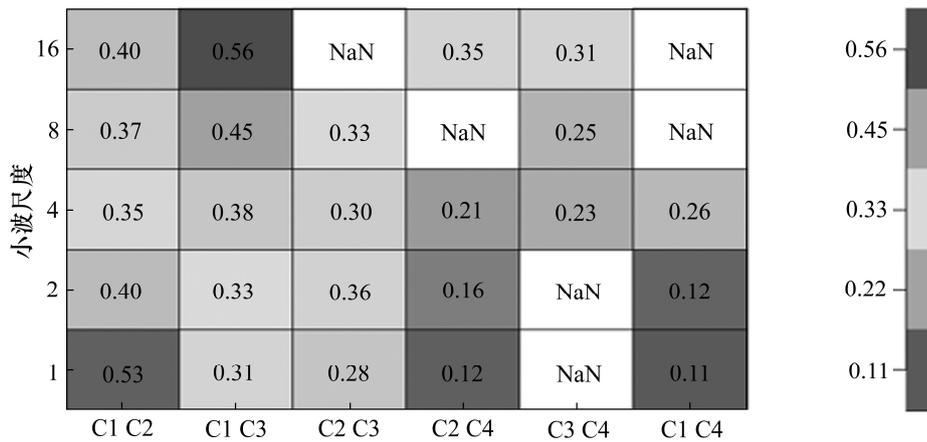


图2 收益率序列的小波相关矩阵

注: C1、C2、C3、C4 分别代表铜、镍、锡、黄金。纵轴 1、2、4、8、16, 分别代表 2~4 天、4~8 天、8~16 天、16~32 天、32~64 天的时间尺度, 右边的图例表示相关性的高低, 数值越大表示相关性越高。

### 3. 小波多元相关和互相关

图 3 中的收益率序列的小波多元相关和图 4 中的收益率序列的小波多元互相关显示了载体金属对伴生金属市场的相关性。各金属收益率序列在不同的时间和不同的频率上的多元相关性和互相关性的强弱不同。图 4 显示多元相关系数在 D3 时间尺度(8~16 天)下达到最小值, 在经历了一个小幅度的下降后逐渐上升, 直到最高尺度 D5(32~64 天), 其多元相关系数为 0.61, 总体上呈现上升趋势, 增长量为 0.14, 这标志着金属市场一体化和投资组合多样化具有可能性。

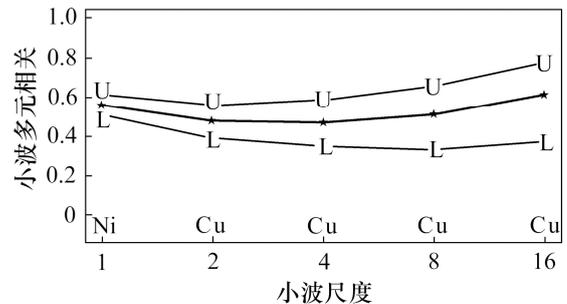


图3 收益率序列的小波多元相关

注: U、L 表示 95%置信区间的下限(L)和上限(U)。

图 4 表示的是小波多元互相关的估计值, 即在不同的小波尺度下, 与其他三种有色金属收益率多重关联度最高的有色金属收益率。将最大滞后天数参数设置为 30 天, D1~D5 尺度的多元互相关系数分别为 0.56、0.48、0.47、0.51、0.61。其中, 镍与铜在周频段与月频段内的多元互相关性较弱, 在季度频段内及在最高频率的尺度下, 其多元互相关性最强, 随时间尺度的增加, 其相关性总体上呈现出上升趋势。在所有尺度下, 铜市场在 D1(2~4 天)、D3(8~16 天)、D4(16~32 天)、D5(32~64 天)尺度下与其他金属的线性组合的多元互相关性最强, 具备成为领导者或跟随者的潜力; 在 D5 尺度上, 铜市场具备正时滞为 1 的领导者市场; 镍市场在 D2 尺度下与其他金属的线性组合的多元互相关性最强。

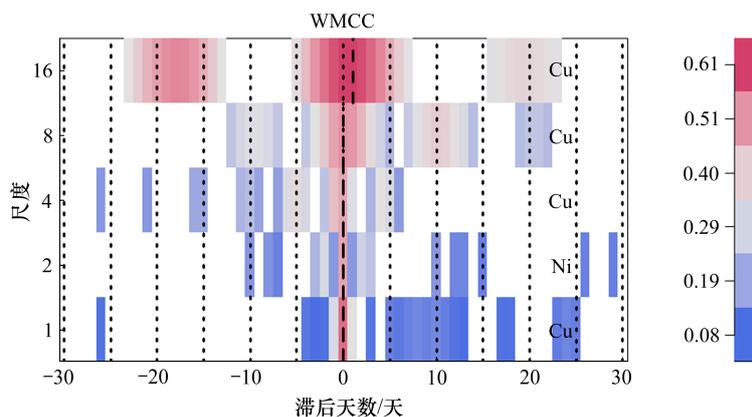


图4 收益率序列的小波多元互相关

图 5 展示了载体金属和伴生金属市场之间的小波相干性。在所有的载体金属与伴生金属的小波相干性中, 在不同的时间和不同尺度上, 铜-镍、铜-锡金属对之间有较强的共同运动, 表明这两个金属对之间有很强的相互依存关系。

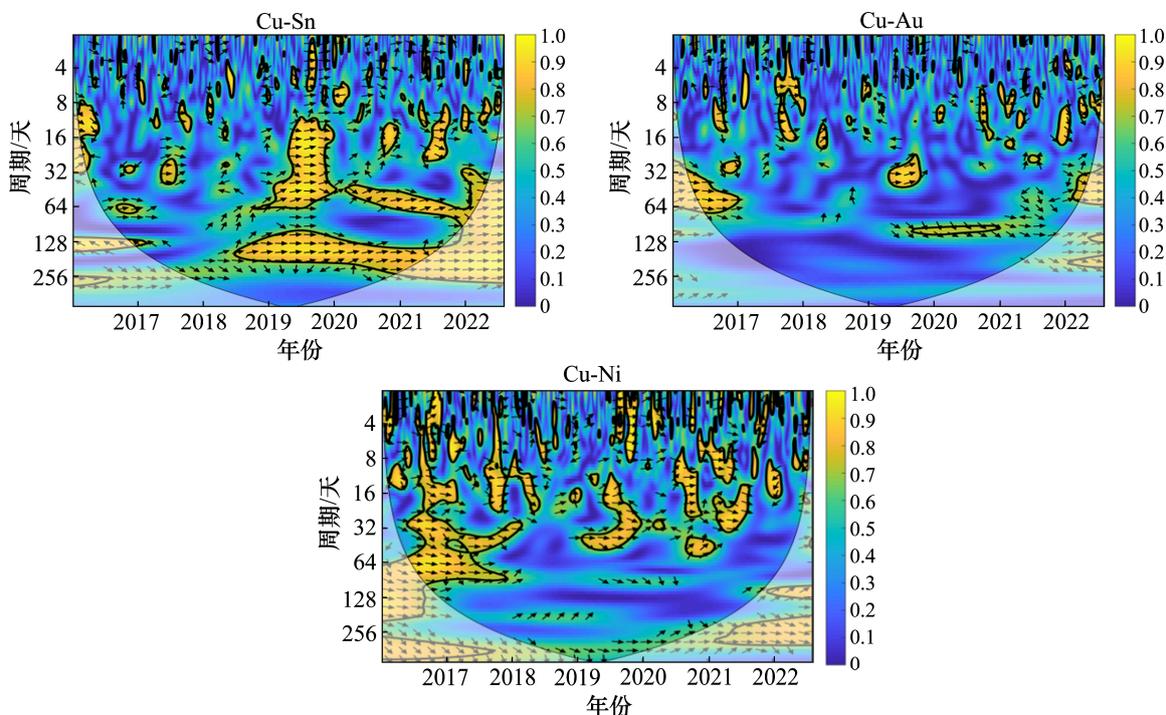


图 5 小波相干图

注: 黑色箭头的方向突出了两个市场之间的相位差。(→)代表变量同相(两个市场都朝相同的方向移动); (←)代表变量异相(两个市场都向相反方向移动); (↙)或(↗)代表第一个市场领先; (↘)或(↖)代表第一个市场滞后。横轴表示时间线, 而纵轴突出显示以天为单位的频率。黄色表示相干性程度, 越黄相干性越强。

铜-镍金属对在中、高频率(64~128 天)下有共同运动, 铜在市场中处于领导地位。铜-锡的小波相干性在 2019—2022 年的低频率和中频率下较强, 两个市场在同一方向上共同运动。在低频率(128~256 天)下, 锡在市场中处于领先地位; 在其他时域频率下, 铜市场处于领先地位。铜-黄金金属对的相关性总体上弱于铜-镍、铜-锡金属对的相关性。铜与黄金在 2017、2020 年的中频率(32~64 天)尺度下的小波相干性较强, 显示出明显的共同运动特点。在短期和长期尺度下, 这两个市场之间的相关性在不同时期内都较弱, 共同运动也较弱。从短期和中期的尺度来看, 铜对于黄金具有引领作用, 随着时间尺度的增加, 黄金逐渐处于金属市场中的领先地位。

小波多元相关的结果显示, 铜-镍金属对在高频率下的相关性最强, 铜-锡金属对在中频率和低频率下的相关性最强, 而铜-黄金金属对在高频率和低频率下都是相关性最弱的一对, 铜在 D1、D3、D4、D5 尺度中处于金属现货市场中的领先地位。评估载体金属收益率序列和伴生金属收益率序列之间的小波相干性后, 可知在中频率和低频率, 铜与伴生市场有着强烈的共同运动, 载体金属与伴生金属市场之间有很强的一体化和相互依存关系。同时, 铜市场引领锡、镍金属市场, 并且在中期和短期内引领黄金市场; 在长期, 黄金市场引领铜市场。

(二) 铜与伴生金属市场的溢出效应

1. 格兰杰因果检验

格兰杰因果检验能够从定量的角度帮助我们进一步理解铜市场与伴生金属市场之间的具体引导

关系。通过对各尺度下的信号进行平稳性检验,发现分解后的各层信号皆平稳,因此将格兰杰因果检验的滞后期数设置为2。表4显示了铜收益率序列与伴生金属收益率序列、伴生金属收益率序列与铜收益率序列的格兰杰因果检验关系。

表4 铜-伴生金属收益率序列的格兰杰因果检验结果

原假设	F 值	原假设	F 值
$R_{Cu_1}$ 不是 $R_{Ni_1}$ 的原因	2.981	$R_{Ni_1}$ 不是 $R_{Cu_1}$ 的原因	1.308
$R_{Cu_2}$ 不是 $R_{Ni_2}$ 的原因	5.727**	$R_{Ni_2}$ 不是 $R_{Cu_2}$ 的原因	4.597*
$R_{Cu_3}$ 不是 $R_{Ni_3}$ 的原因	1.813	$R_{Ni_3}$ 不是 $R_{Cu_3}$ 的原因	0.790
$R_{Cu_4}$ 不是 $R_{Ni_4}$ 的原因	1.236	$R_{Ni_4}$ 不是 $R_{Cu_4}$ 的原因	1.659
$R_{Cu_5}$ 不是 $R_{Ni_5}$ 的原因	7.422***	$R_{Ni_5}$ 不是 $R_{Cu_5}$ 的原因	16.352**
原假设	F 值	原假设	F 值
$R_{Cu_1}$ 不是 $R_{Sn_1}$ 的原因	0.898	$R_{Sn_1}$ 不是 $R_{Cu_1}$ 的原因	1.951
$R_{Cu_2}$ 不是 $R_{Sn_2}$ 的原因	1.592	$R_{Sn_2}$ 不是 $R_{Cu_2}$ 的原因	0.802
$R_{Cu_3}$ 不是 $R_{Sn_3}$ 的原因	12.22***	$R_{Sn_3}$ 不是 $R_{Cu_3}$ 的原因	14.804***
$R_{Cu_4}$ 不是 $R_{Sn_4}$ 的原因	8.083***	$R_{Sn_4}$ 不是 $R_{Cu_4}$ 的原因	2.878
$R_{Cu_5}$ 不是 $R_{Sn_5}$ 的原因	0.378	$R_{Sn_5}$ 不是 $R_{Cu_5}$ 的原因	19.289***
原假设	F 值	原假设	F 值
$R_{Cu_1}$ 不是 $R_{Au_1}$ 的原因	0.096	$R_{Au_1}$ 不是 $R_{Cu_1}$ 的原因	0.537
$R_{Cu_2}$ 不是 $R_{Au_2}$ 的原因	8.449	$R_{Au_2}$ 不是 $R_{Cu_2}$ 的原因	0.576
$R_{Cu_3}$ 不是 $R_{Au_3}$ 的原因	3.003*	$R_{Au_3}$ 不是 $R_{Cu_3}$ 的原因	1.998
$R_{Cu_4}$ 不是 $R_{Au_4}$ 的原因	2.324	$R_{Au_4}$ 不是 $R_{Cu_4}$ 的原因	1.498
$R_{Cu_5}$ 不是 $R_{Au_5}$ 的原因	4.497*	$R_{Au_5}$ 不是 $R_{Cu_5}$ 的原因	2.253

注: \*\*、\*表示在 1%、5%、10% 的显著水平上拒绝原假设,表中使用的数据是格兰杰检验所返回的 F 统计量。

结果显示,在 2~4 天的时间尺度下,铜与伴生金属之间不存在因果关系。在 4~8 天的时间尺度下,铜-镍金属对显示出双向因果关系,即铜与镍的现货价格会在该时间区间内相互影响。此外,在 1% 的显著水平下,铜现货价格变动是引起锡现货价格变动的主要原因。在 8~12 天的时间尺度下,铜-锡金属对显示出双向因果关系。在 12~16 天的时间尺度下,在 10% 的显著水平上,铜现货价格变动是黄金现货价格变动的主要原因。

从长期来看,铜收益率序列是伴生金属收益率序列的格兰杰原因。铜现货价格上涨,在长期内将会带动伴生金属现货价格上涨。而伴生金属镍和锡的收益率序列对铜收益率序列的格兰杰检验在 5% 和 1% 的显著水平下拒绝原假设,表明镍、锡现货价格的变动反过来会影响铜的现货价格,即随着伴生金属价值的提高,镍和锡会对铜产生利润补偿效应。

综上所述,载体金属与伴生金属的溢出方向随着时间尺度的变化而呈现出不同的单向、双向因果关系。这种差异的产生可能是因为伴生金属对于新兴技术和产业的发展越来越重要,伴生金属对生产、经营和采矿等方面的决策的影响作用正在增强,伴生金属的价格对载体金属的价格产生了利润补偿效应。在中期与长期,载体金属和伴生金属价格之间的格兰杰因果关系随时间尺度的变化而变化,小波相干性较强的载体金属与伴生金属现货价格之间存在着较为显著的格兰杰因果关系。因此,  $R_{Cu}$  序列、 $R_{Sn}$  序列、 $R_{Ni}$  序列、 $R_{Au}$  序列之间具有作用力,在 D2~D5 尺度下作用显著,具有溢出效应。

2. 静态溢出效应分析

四种金属收益率之间的波动性溢出的估计结果见表 5。结果显示, 在研究期内, 铜市场对其他市场的风险贡献最大, 而黄金市场向其他金属市场传递的风险最小, 黄金的主要风险来自自身。在任何时间尺度下, 黄金对自身的溢出的估计值都在 90%以上, 并且在任何时间尺度下, 黄金市场从有色金

表 5 不同时间尺度下铜-伴生金属市场的溢出效应测算结果

	$D(c, 1)$	$D(n, 1)$	$D(s, 1)$	$D(a, 1)$	From
$D(c, 1)$	73.0	18.4	7.4	1.2	27.0
$D(n, 1)$	18.8	72.5	7.9	0.9	27.6
$D(s, 1)$	9.3	6.8	83.3	0.6	16.7
$D(a, 1)$	3.1	1.4	1.0	94.5	5.6
To	31.2	26.7	16.3	2.7	76.8
净溢出	4.2	-0.9	-0.5	-2.8	19.2
	$D(c, 2)$	$D(n, 2)$	$D(s, 2)$	$D(a, 2)$	From
$D(c, 2)$	71.4	17.1	8.4	3.1	28.6
$D(n, 2)$	13.4	79.1	6.0	1.6	20.9
$D(s, 2)$	8.5	10.9	79.2	1.5	20.9
$D(a, 2)$	2.1	2.0	0.4	95.6	4.4
To	23.9	30.0	14.8	6.1	74.8
净溢出	-4.7	9.0	-6.1	1.7	18.7
	$D(c, 3)$	$D(n, 3)$	$D(s, 3)$	$D(a, 3)$	From
$D(c, 3)$	76.3	12.6	5.4	5.7	23.7
$D(n, 3)$	11.0	81.4	4.3	3.3	18.6
$D(s, 3)$	13.1	12.7	70.9	3.3	29.1
$D(a, 3)$	1.5	5.7	0.1	92.7	7.3
To	25.6	31.1	9.7	12.4	78.7
净溢出	1.8	12.5	-19.4	5.1	19.7
	$D(c, 4)$	$D(n, 4)$	$D(s, 4)$	$D(a, 4)$	From
$D(c, 4)$	69.4	12.4	10.8	7.4	30.6
$D(n, 4)$	12.9	77.1	5.8	4.2	22.9
$D(s, 4)$	8.4	5.0	80.1	6.6	19.9
$D(a, 4)$	1.8	1.8	0.3	96.1	3.9
To	23.0	19.1	17.0	18.2	77.3
净溢出	-7.6	-3.8	-3.0	14.3	19.3
	$D(c, 5)$	$D(n, 5)$	$D(s, 5)$	$D(a, 5)$	From
$D(c, 5)$	70.8	10.6	16.8	1.8	29.2
$D(n, 5)$	16.5	76.7	3.7	3.2	23.3
$D(s, 5)$	20.0	7.2	71.2	1.6	28.8
$D(a, 5)$	0.6	3.3	0.5	95.5	4.9
To	37.1	21.2	21.0	9.6	85.8
净溢出	7.9	-2.2	-7.9	2.1	21.5

注:  $D(x, i)$ 表示对金属收益率序列进行小波分解后的  $i$ 层信号,  $i=1, 2, 3, 4, 5$ ,  $x$ 表示为  $c(\text{Cu})$ 、 $n(\text{Ni})$ 、 $s(\text{Sn})$ 、 $a(\text{Au})$ 。

属市场获得的冲击都最小。除了黄金以外，铜、镍、锡从其他市场获得的冲击都较为均匀，铜市场在月内频段下获得的冲击更大。通过净溢出可以发现，铜和黄金市场在任何尺度下都是冲击其他金属市场的净贡献者，而锡市场是受到其他市场冲击的净接收者。从铜与伴生金属的情况来看，随着时间尺度的增加：铜-镍的溢出指数在减小；铜-黄金的溢出指数先增大后减小；铜-镍溢出指数的变化无明显规律，但整体上呈现为增长的趋势，增长了9.4%。

总体而言，铜-镍、铜-锡、铜-黄金金属对的溢出强度随时间尺度的变化有所区别。在任何时间尺度下，铜市场对黄金市场的溢出效应都最弱，黄金市场波动的原因主要来自自身。铜市场对镍市场的溢出效应最强，且对突发事件的冲击更为敏感。铜市场仅在长期内对锡市场显示出较强的溢出效应。综合来说，铜市场对镍市场的敏感性更高，溢出效应更强。

### 3. 动态溢出效应分析

铜与伴生金属的收益率动态溢出总指数情况如图6所示，其滚动窗口设置为200天。从趋势上看，在2019年前呈现上升趋势，最高溢出指数达到32%；在2019年，呈大幅下降趋势；2020年1月，动态溢出总指数在近6年内达到最低值；2020年4月—2020年末，呈震荡式上升趋势；由于英国退出欧洲联盟、国际贸易摩擦等方面的影响，2021年1月后，总溢出指数发生断崖式下降，之后平稳波动。从数据上看，最大的总波动率溢出超过40%，而最小的则低于10%，2021—2022年的溢出指数为24%~30%。

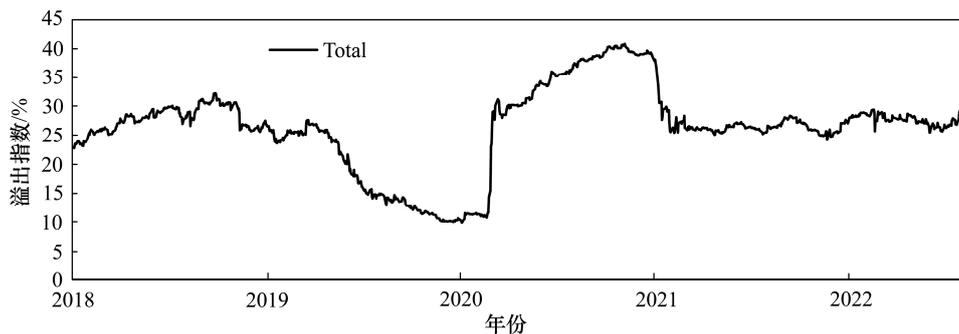


图6 铜-伴生金属市场动态溢出总指数

图7展示了不同时间尺度下的铜与伴生金属的双向动态溢出效应。可以看出，市场间的溢出方向及大小会随着时间尺度的变化而变化，且铜与伴生金属的双向溢出趋势大致相同。

从时域方面来看铜-伴生金属市场双向动态收益率溢出指数，铜序列对于镍序列的溢出幅度要大于铜序列对于锡序列、黄金序列的溢出幅度。2020年4月前后，溢出效应发生了结构性变化，主要是由于疫情的影响，针对突发事件，长尺度(长期)下的溢出变化幅度(0.5%~29%)比短尺度(短期)下的溢出变化幅度(0.6%~18%)更大，这证实了长期溢出效应易受到突发事件影响的观点。此外，从短期来看，铜对于伴生金属的溢出效应要强于伴生金属对于铜的溢出效应，但从长期来说，伴生金属对于铜的溢出效应会有所回升。

从频域方面来看铜-伴生金属市场双向动态收益率溢出指数，观察相同频率下的不同时期内的波动情况，发现在2020年4月前后，溢出效应的趋势发生了突变，铜对于镍的溢出效应及铜对于锡的溢出效应的趋势急剧上升。相反，黄金受到的铜的溢出效应在中期尺度下减弱，黄金与铜的双向溢出序列主要在2018年10月及2020年4月附近出现波峰，在D2~D4尺度下更为明显。在不同的时间尺度下，除了2020年4月前后，其他情况下的铜与镍的双向溢出效应最强。

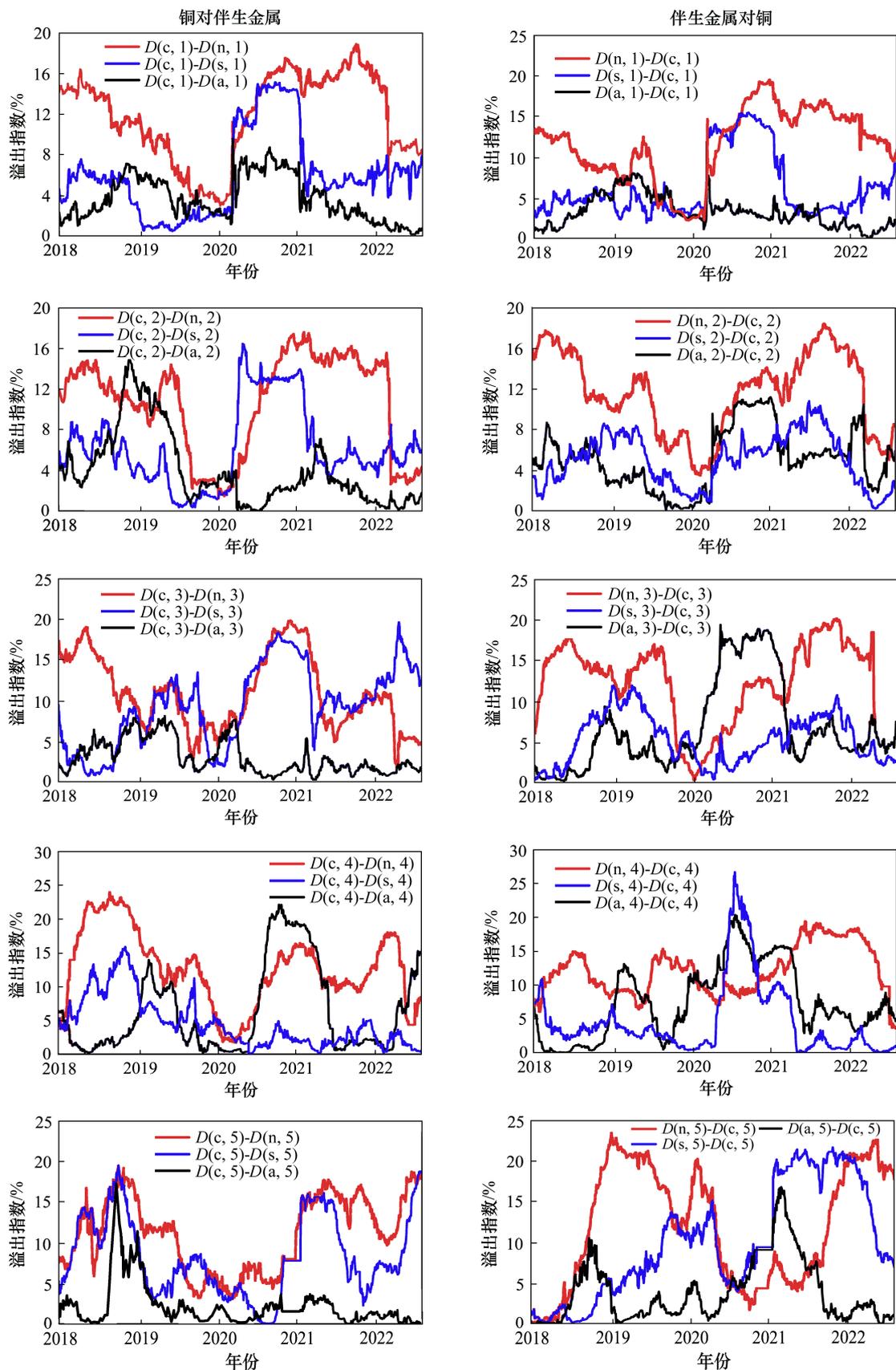


图7 不同时间尺度下铜-伴生金属市场的双向溢出效应

注:  $D(x, i)$ 表示LME小波分解后的*i*层信号,  $i=1, 2, 3, 4, 5$ ,  $x$ 表示为c(Cu)、n(Ni)、s(Sn)、a(Au); 红色折线表示铜与镍的动态溢出效应, 蓝色折线表示铜与锡的动态溢出效应, 黑色折线表示铜与金的动态溢出效应。

## 四、结论及建议

### (一) 结论

本文充分考虑了载体金属与伴生金属联合生产的独特性,在多元小波分析方法的基础上,研究了载体金属与伴生金属收益率序列的协同变动情况,分析了载体金属与伴生金属的传导方向及价格溢出效应,通过研究载体金属与伴生金属收益率序列的时变性、关联性 & 风险性,评估了载体金属与伴生金属市场对风险管理和投资组合多元化的影响。本文的研究结论如下。

(1) 在特定的时域和频域内,铜与伴生金属之间存在协同变动关系。随着时间尺度的不断增大,收益率变化方向和波动幅度逐渐显现出显著的协同变动。通过分析交叉小波相关系数,发现铜与镍收益率序列的相关性最强,且相关系数随着时间尺度增大而增大,表明在长期尺度下,铜与镍市场的协同性高于其中期尺度下的协同性,进一步说明铜镍市场长期关系的研究价值大于中期关系的研究价值。此外,铜、镍市场的协同性并非简单的线性关系。黄金与其他金属的结合度较低,提供了分散投资的机会,可以在风险管理中利用黄金组合谋求最佳效益。而铜和镍之间的伴生性较强,二者不适宜同时投资。

(2) 小波多元相关的分析结果显示,铜-镍金属对在高频率下的相关性最强,铜-锡金属对在中频率和低频率下的相关性最强,而铜-黄金金属对在高频率和低频率下都是相关性最弱。通过小波多元互相关的分析,铜在 D1、D3、D4、D5 尺度下处于金属市场中的领先地位。评估载体金属收益率序列和伴生金属收益率序列之间的小波相干性,在中频率和低频率,铜与伴生市场有着强烈的共同运动,载体金属与伴生金属市场之间有很强的一体化和相互依存关系。同时,铜市场引领锡、镍金属市场,并且在中期和短期内引领黄金市场;在长期,黄金市场领先铜市场。

(3) 载体金属和伴生金属的价格之间存在单向或双向的格兰杰因果关系。伴生金属对于新兴技术和产业的发展越来越重要,伴生金属对载体金属有着利润补偿效应。双向关系指出了载体金属和伴生金属价格之间的同期效应,随着时间的推移,领先和滞后的关系交替出现。此外,载体金属和伴生金属价格之间的格兰杰因果关系会随时间尺度的变化而变化。这种关系主要体现在中期时间尺度(4~32天)下,当发生突然事件时,生产者没有足够的时间来调整生产计划,消费者也不能及时调整其工艺,以减少原材料的消耗,铜与伴生金属的影响不显著。

(4) 载体金属与伴生金属市场之间的关系是不稳定的,两者间的波动溢出效应随时间发生变化,但都呈现出正向溢出。静态溢出效应显示,在多个时间尺度下,铜-镍溢出指数比铜-锡溢出指数、铜-黄金溢出指数大,铜-锡溢出指数仅在长期内最大。

### (二) 建议

不管是投资者、监管者还是政策制定者,通过观察载体金属-伴生金属市场在不同时间尺度下的溢出效应,来辅助决策的制订是非常必要的。

政府是政策制定者,可以通过影响载体金属市场来调控伴生金属的市场价格。铜是主要的载体金属,它对镍、锡、黄金的溢出效应较为明显,在各时间尺度下,镍、锡、黄金的价格将随着铜价的波动产生正向波动。同时,在战略性新兴产业不断发展对伴生金属的需求不断增长的背景下,政府可以以铜价作为基准,考虑载体金属对于伴生金属的产量约束效应,制定稳健的伴生金属供应保障策略。

投资者在进行投资组合和对冲管理时,需要考虑载体金属、伴生金属市场之间的价格溢出效应,从而根据载体金属、伴生金属市场的关联性做出投资组合策略。具体来说,在针对金属市场进行价格预测和投资决策时,投资者应同时掌握载体金属、伴生金属的价格信息,选择具有动态相关性的模型

来观察载体金属与伴生金属的价格波动与溢出效应, 进而做出投资决定, 降低投资风险。从长期来看, 铜-镍的协同变动效应较强, 不适合作为投资组合, 投资者可以投资关联度较低的铜-黄金金属组合来降低风险。

市场监管者要加强对载体金属与伴生金属市场行情的监测, 建立预警机制。由于铜、镍之间的关联性更强, 在所有组合中, 铜-镍金属对的双向溢出效应最大, 因此市场监管者要着重关注铜-镍金属对的市场波动。

### 参考文献:

- [1] 宋慧玲, 王智源, 周思源. 大国竞争背景下伴生能源金属可持续供给研究综述[J]. 中南大学学报(社会科学版), 2024, 30(1): 99-111.
- [2] 宋慧玲, 王昶, 左绿水. 碳中和背景下清洁能源技术关键伴生金属可供性约束研究回顾与展望[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(3): 38-48.
- [3] SHAO L G, HU W Q, YANG D H. The price relationship between main-byproduct metals from a multiscale nonlinear Granger causality perspective[J]. Resources Policy, 2020, 69: 101846.
- [4] NASSAR N T, GRAEDEL T E, HARPER E M. By-product metals are technologically essential but have problematic supply[J]. Science Advances, 2015, 1(3): e1400180.
- [5] GRAEDEL T E, HARPER E M, NASSAR N T, et al. Criticality of metals and metalloids[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(14): 4257-4262.
- [6] CAMPBELL G A. The role of co-products in stabilizing the metal mining industry[J]. Resources Policy, 1985, 11(4): 267-274.
- [7] KESLER S E, CHRYSSOULIS S L, SIMON G. Gold in porphyry copper deposits: Its abundance and fate[J]. Ore Geology Reviews, 2002, 21(1/2): 103-124.
- [8] 姚春亮, 陆建军, 郭维民, 等. 斑岩铜矿若干问题的最新研究进展[J]. 矿床地质, 2007, 26(2): 221-229.
- [9] 吴练荣, 吴维虎, 董桥峰, 等. 云南普朗斑岩型铜矿伴生元素金、银、钼的赋存状态与分布规律[J]. 中国钼业, 2021, 45(5): 11-17.
- [10] AFFLERBACH P, FRIDGEN G, KELLER R, et al. The by-product effect on metal markets: New insights to the price behavior of minor metals[J]. Resources Policy, 2014, 42: 35-44.
- [11] 李文渊. 中国岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿理论创新和找矿突破[J]. 地质力学学报, 2022, 28(5): 793-820.
- [12] 秦克章, 丁奎首, 许英霞, 等. 东天山图拉尔根、白石泉铜镍钴矿床钴、镍赋存状态及原岩含矿性研究[J]. 矿床地质, 2007, 26(1): 1-14.
- [13] XIARCHOS I M, FLETCHER J J. Price and volatility transmission between primary and scrap metal markets[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2009, 53(12): 664-673.
- [14] LIEN D, YANG L. Intraday return and volatility spill-over across international copper futures markets[J]. International Journal of Managerial Finance, 2009, 5(1): 135-149.
- [15] TODOROVA N, WORTHINGTON A, SOUČEK M. Realized volatility spillovers in the non-ferrous metal futures market[J]. Resources Policy, 2014, 39: 21-31.
- [16] 闻岳春, 王婕, 程天笑. 国内股市与国际股市、大宗商品市场的溢出效应研究[J]. 国际金融研究, 2015(8): 31-43.
- [17] CINER C, LUCEY B, YAROVAYA L. Spillovers, integration and causality in LME non-ferrous metal markets[J]. Journal of Commodity Markets, 2020, 17: 100079.
- [18] NAUMOV A V, GRINBERG E E. Several peculiarities in the analysis of the markets of rare and scattered metals after 2004[J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2009, 50(1): 61-68.
- [19] FIZAINE F. Byproduct production of minor metals: Threat or opportunity for the development of clean technologies? the PV sector as an illustration[J]. Resources Policy, 2013, 38(3): 373-383.
- [20] AFFLERBACH P, FRIDGEN G, KELLER R, et al. The by-product effect on metal markets: New insights to the price behavior of minor metals[J]. Resources Policy, 2014, 42: 35-44.
- [21] SHAMMUGAM S, RATHGEBER A, SCHLEGL T. Causality between metal prices: Is joint consumption a more important

- determinant than joint production of main and by-product metals?[J]. *Resources Policy*, 2019, 61: 49–66.
- [22] REDLINGER M, EGGERT R. Volatility of by-product metal and mineral prices[J]. *Resources Policy*, 2016, 47: 69–77.
- [23] SHAMMUGAM S, RATHGEBER A, SCHLEGL T. Causality between metal prices: Is joint consumption a more important determinant than joint production of main and by-product metals[J]. *Resources Policy*, 2019, 61: 49–66.
- [24] XUE H G, XU C X, LI S P, et al. Var method and its empirical research in financial risk management[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2009, 53(12): 664–673.
- [25] FERNÁNDEZ-MACHO J. Wavelet multiple correlation and cross-correlation: A multiscale analysis of eurozone stock markets[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2012, 391(4): 1097–1104.
- [26] BHATIA V, DAS D, KUMAR S B. Hedging effectiveness of precious metals across frequencies: Evidence from wavelet based dynamic conditional correlation analysis[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2020, 541: 123631.
- [27] MENSI W, REHMAN M U, AL-YAHYAEE K H. Time-frequency co-movements between oil prices and interest rates: Evidence from a wavelet-based approach[J]. *The North American Journal of Economics and Finance*, 2020, 51: 100836.

## Multi-time scale study on the spillover effects of copper and its byproduct metals market

WU Qiaosheng, WANG Yuli, BI Zhiwei

(School of Economics and Management, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Critical metals constitute the critical raw materials of strategic emerging industries, and their importance is increasingly prominent. Most critical metal minerals often exist in the associated state, and the output is constrained by host metals, so studying the price impact relationship between carrier metals and byproduct metals is particularly important for resolving the risks caused by price fluctuations. The present study, by adopting multiple wavelet and Diebold Yilmaz spillover index, investigates into the market association and spillover effect between carrier metal copper and its associated metals nickel, tin and gold. Multivariate wavelet results show that the copper-nickel correlation is stronger in short-term time scales and the copper-tin correlation is stronger in long-term time scales, and that there is a strong common motion between copper-tin metal pairs at different time scales. The DY spillover results show that there is a bidirectional spillover effect between the copper and associated metal market in all time scales, and that copper is the largest contributor to the associated metal market risk in the associated metal market and is the most vulnerable to the impact of copper and the associated metal and the diversification portfolio is poor.

**Key words:** host metal; byproduct metal; multivariate wavelet; spillovers

[编辑: 郑伟]