

# 关键金属价格波动、绿色激励与 新能源企业创新

刘 阳 肖淇泳 韩立岩 秦 萍

(中国人民大学应用经济学院,北京 100872;北京航空航天大学经济管理学院,北京 100191;  
北京雁栖湖应用数学研究院,北京 101408)

**摘 要:**关键金属作为新能源行业的重要投入要素,战略地位日益凸显。本文基于2007—2022年中国七大新能源行业上市公司数据,探究关键金属价格波动对新能源企业创新的影响。研究表明,关键金属价格波动显著抑制新能源企业整体专利申请量,但对新能源专利的负向影响弱于传统能源专利,且该波动会促使企业增加关键金属节约型专利的申请量。机制分析发现,关键金属价格波动通过金融摩擦效应和预防性储蓄效应抑制企业研发投入,而绿色激励政策能有效缓解新能源创新活动所受的负向冲击,企业竞争效应则驱动关键金属节约型创新。进一步分析表明,随着新能源行业渗透率的提升、企业能源转型程度的加深和产业链的延伸,关键金属价格波动对新能源企业创新的影响更为显著。本文研究表明,需确保关键金属供应链安全,加强企业价格风险管理,通过绿色创新提升绿色融资能力,推动实现新能源发展战略。

**关键词:**新能源关键金属;企业创新;能源转型;环境规制;绿色金融

**JEL 分类号:**L72, O31, Q55 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-7246(2025)06-0152-19

## 一、引 言

技术进步,尤其是以新能源技术为核心的创新,是实现碳中和目标的关键途径,也是

收稿日期:2024-10-21

作者简介:刘 阳,管理学博士,副教授,中国人民大学应用经济学院,E-mail:lyang0822@ruc.edu.cn.

肖淇泳,博士研究生,中国人民大学应用经济学院,E-mail:xiaoqy@ruc.edu.cn.

韩立岩,理学博士,教授,北京航空航天大学经济管理学院、北京雁栖湖应用数学研究院,  
E-mail:hanly@buaa.edu.cn.

秦 萍(通讯作者),经济学博士,教授,中国人民大学应用经济学院,E-mail:pingqin@ruc.edu.cn.

\* 本文感谢国家自然科学基金项目(72101254、72473013)的资助。感谢匿名审稿人的宝贵意见,文责自负。

发展新质生产力的重要一环。随着新能源技术的不断突破和广泛应用,中国在全球新能源产业竞争中已占据领先地位,孕育出一批国际新能源装备制造巨头。要推动中国新能源技术持续创新和进一步发展,需营造良好的商业生态和创新生态,为新能源创新提供持续稳定的收益预期。与传统能源相比,光伏、风力涡轮机、核反应堆、新能源汽车等新能源技术对关键金属材料的依赖程度显著提高(Sovacool et al., 2020),而关键金属生产加工存在的区域高度集中和交付周期长等特点使得其价格面临高波动风险(IEA, 2021),给新能源企业所处的商业生态带来不确定性。关键金属价格波动如何影响新能源企业创新活动?这种波动能否引导企业通过技术创新减少对关键金属资源的依赖?对上述问题的解答,不仅是政策制定者和商业运营者关注的焦点,也是研究如何推动中国实现低碳能源转型和迈向高质量发展的题中应有之义。

目前已有大量文献关注关键金属供给对新能源产业发展的制约。新能源技术对铜、钴、镍、锂等关键金属的严重依赖,带来了不可持续和不可负担两大严峻挑战(Sovacool et al., 2020)。一方面,新能源转型难以获得足够的资源要素支撑,其对关键金属需求的增长远远超过了目前的采矿能力(IEA, 2021)。另一方面,关键金属的供给制约促使其价格急剧上涨和剧烈波动,产生了“绿色通胀”问题,阻碍全球新能源技术的推广与应用(Wang et al., 2023)。更为严峻的是,近年来新能源技术学习效应和规模效应的边际收益迅速递减,使得关键金属价格逐渐成为其成本变动的决定性因素(Bajolle et al., 2022)。尽管已经有文献探讨了关键金属对新能源产业的重要性,但鲜有文献从微观企业层面进行研究。然而,企业一方面作为关键金属价格波动的直接冲击对象,另一方面作为技术创新的重要主体,从企业视角可以更精确刻画新能源关键金属的微观影响。

还有一些文献重点探讨了要素成本对企业创新的影响。诱导技术创新理论提出要素相对价格变化将会诱导技术创新向节约相对昂贵的要素改变。Popp(2002)、Hassler et al.(2021)发现化石燃料价格的上涨会推动节能技术进步,以节约昂贵的化石燃料要素。此外,作为化石燃料的替代品,清洁能源技术在化石燃料价格上升时会表现出更强的竞争力(Aghion et al., 2016)。在能源转型背景下,关键金属成为新的核心生产要素投入,在新能源技术中被大量使用。关键金属价格的大幅涨跌均可能导致企业经营决策变化,进而影响企业的创新行为。

本文从新能源行业的要素投入角度出发,基于2007—2022年中国水能、核能、风能、太阳能、生物质能与垃圾焚烧发电、地热能、新能源汽车七大新能源行业上市公司的专利申请微观数据,深入分析了关键金属价格波动这一重要因素对新能源企业创新的影响。此外,鉴于中国新能源企业中有相当一部分是由传统能源企业或非能源类企业逐渐转型而来(Lin and Wang, 2023),本文进一步分析了关键金属价格波动对企业不同类型创新的差异化影响。研究发现,关键金属价格波动显著负向作用于新能源企业的专利申请量,而与传统能源专利相比,新能源专利受到的影响较小且不显著。更值得关注的是,关键金属价格波动增加会推动企业研发关键金属节约型专利。进一步地,本文探讨了潜在的影响机制,发现融资约束效应和预防性储蓄效应是解释创新“动力”问题的关键,这两者在关

键金属价格波动的冲击下导致企业研发投入的减少。而政府与市场的作用则揭示了创新“方向”问题的答案:一方面,政府环境规制、绿色金融发展、新能源补贴政策等绿色激励手段的调节作用有效缓解了关键金属价格波动对新能源创新的负向冲击;另一方面,企业竞争效应促使企业在面临关键金属价格波动上升时进行更多的关键金属节约型创新,以减少对成本波动的风险敞口,获得竞争优势。

本研究的边际贡献主要体现在以下三个方面:首先,本文从新能源行业重要生产要素——关键金属的角度,对现有新能源创新影响因素的研究进行了拓展<sup>1</sup>。与传统化石能源系统依赖原油、煤炭等大宗商品不同,新能源系统依赖于关键金属原材料的投入。关键金属作为新能源设备的主要成本构成,其价格波动对新能源企业的创新活动具有显著影响。本文基于 A 股新能源上市公司的专利数据和笔者构建的关键金属价格波动指数,深入探讨了这一问题,为新能源创新影响因素的研究领域增添了新的视角和数据支撑。其次,本文拓展了关键金属在新能源行业重要性认识的边界。现有研究多聚焦于关键金属资源对新能源行业发展的宏观制约作用,而对企业微观行为的影响关注不足。本研究将研究焦点转向企业微观层面,发现关键金属价格波动负向作用于新能源企业创新,而绿色激励手段能够缓解对新能源创新的负向影响,企业竞争效应则会促使企业进行更多的关键金属节约型创新,阐释了关键金属价格波动对不同能源类型创新活动影响差异的微观机制。最后,本文为政府和新能源企业在推动新能源产业发展和制定经营策略方面提供了启示。研究发现,随着新能源行业渗透率的提高,关键金属价格波动的影响逐渐增强;对于具有高能源转型程度和处于产业链中下游的企业,关键金属价格波动的冲击效应更为突出。这一结论为中国新能源关键金属供给保障措施和相关衍生品创新政策、新能源企业原材料价格风险管理措施的制定与实施提供了实践指导。

本文其他部分组织如下:第二部分是理论分析与假说提出,第三部分是研究策略,第四部分是实证分析结果,第五部分是机制检验与分组分析,第六部分是结论与政策建议。

## 二、理论分析与假说提出

本文从创新动力和创新方向两个维度探讨关键金属价格波动对新能源企业创新的影响。首先,关键金属材料作为新能源商业生态的核心要素,其价格剧烈波动可能冲击企业经营,进而影响企业的创新动力。其次,新能源行业作为典型的绿色产业和新兴产业,其商业生态受到政府政策和市场竞争的复杂影响(余东华和吕逸楠,2015;孙传旺等,2022),这些因素可能会改变关键金属价格波动冲击的方向,导致不同能源类型、不同金属节约水平的创新受到差异化影响。

<sup>1</sup> 大量文献探讨了影响新能源技术创新的重要因素,包括产业政策(周亚虹等,2015;孙传旺等,2022)、环境规制(Acemoglu et al.,2012)、碳税价格(Aghion et al.,2016)、风险投资(齐绍洲等,2017)等。

### (一) 关键金属价格波动与新能源企业创新“动力”

企业研发往往需要经历一个漫长的过程,极易受到各种不确定性因素的影响,面临较高的失败风险。关键金属是新能源企业的重要成本项,关键金属价格波动率提高会增加企业面临的不确定性。基于实物期权理论(Bernanke, 1983),关键金属价格波动率的增加,会使得新能源企业等待新信息的价值增加,此时企业会选择延缓或者减少当前的支出,减少企业的创新投入和创新产出(Bhattacharya et al., 2017)。从企业管理层的角度,关键金属价格波动率的增高会增加企业管理层对未来企业成本利润走势和市场规模走势判断的难度,因而会更倾向于减少创新投资。基于上述分析,本文提出:

假说 1: 关键金属价格波动会抑制新能源企业创新。

关键金属价格波动可能通过金融摩擦效应带来的融资约束增加而抑制企业创新。新能源产业具有高风险,存在研发创新资金不足的问题(齐绍洲等, 2017)。资金是企业进行创新的基础性资源,企业的研发投入数量和强度与其现金流之间呈正相关(Himmelberg and Petersen, 1994)。当不确定性增加时,企业发展前景不明朗,金融中介为了规避风险,往往会更加惜贷,或者要求企业支付更多贷款利息与违约金,加剧企业的融资约束。关键金属价格波动率的增加会推高新能源企业成本和利润的波动率,使得企业未来现金流的贴现率提高,推高了企业的融资成本。在融资约束增加的影响下,企业的研发投入减少,进而减少了创新产出。基于此,本文提出:

假说 2a: 关键金属价格波动通过金融摩擦效应抑制新能源企业创新。

关键金属价格波动也有可能通过增加企业预防性的现金持有而抑制企业创新。企业持有现金是为了应对环境不确定性而产生的防御性决策。受融资约束影响的企业会降低投资规模以节省内源资金并提高现金持有水平(Han and Qiu, 2007)。在不确定性升高的情况下,企业使用现金的机会成本上升,通常会通过预留超出平均水平的现金的办法来应对,从而降低了用于研发创新的资金(Hsu et al., 2022)。当关键金属价格波动率提高时,新能源企业管理层会更为谨慎,增加预防性的现金持有,从而减少了企业可用于研发的支出,并减少了创新成果。由此,本文提出:

假说 2b: 关键金属价格波动通过预防性储蓄效应抑制新能源企业创新。

### (二) 关键金属价格波动、绿色激励与新能源企业创新“方向”

处于转型过程中的新能源企业,需要在不同类型的业务之间进行创新资源的分配,关键金属价格波动冲击不仅可能影响新能源企业的创新总投入,还有可能影响其创新的偏向性。为解决污染与能源安全问题,中国采取多项环境规制政策促进清洁能源发展,其可能会非对称地改变技术创新的方向和强度(戴永安和张潇, 2023)。环境规制政策有助于缓解清洁技术发展早期的投资激励不足问题,推动研发资源更多向清洁能源技术倾斜(Acemoglu et al., 2012)。关键金属价格波动率提高虽然会减少新能源企业的研发投入,但当存在高强度政府环境规制时,进行新能源创新拥有更高的激励,企业会对创新资源进行重新配置,尽量减少对新能源创新的负向影响。基于以上分析,本文提出:

假说 3a: 环境规制能够起到调节作用,缓解关键金属价格波动对新能源创新的负向

影响。

解决环境问题和碳排放问题的另一个重要手段是发展绿色金融。绿色金融的核心作用在于将环境污染的负外部性内部化,引导金融资源更多流向清洁能源等领域(Fan et al., 2021)。绿色金融一方面可以降低清洁环保企业的融资门槛,增加这些企业进行绿色创新的意愿;另一方面会增加高耗能高污染企业的融资成本,促使这些企业重新审视并优化内部资源配置,增加更多的绿色技术创新(王馨和王营, 2021)。关键金属价格波动冲击通过融资约束抑制新能源企业的创新投入,然而企业进行新能源专利创新可以获得绿色金融政策的支持,降低融资成本,从而缓解关键金属价格波动带来的负向影响。基于以上分析,本文提出:

假说 3b:绿色金融能够起到调节作用,缓解关键金属价格波动对新能源创新的负向影响。

此外,在新兴产业发展初期,由于技术研发的不确定性和市场竞争的不成熟性,企业很难仅凭市场力量快速发展,因此政府常会通过产业政策措施减轻市场失灵带来的影响(Kalouptsidi, 2018)。为支持新能源行业发展,中国提供了大量新能源政策补贴,以缩小新能源相对于传统能源的成本劣势。新能源补贴政策通过扩大市场需求、缓解融资约束、传递利好信号等途径,有效推动了新能源技术的创新、应用和扩散(祝继高等, 2015)。当关键金属价格波动上升时,新能源补贴政策作为一种直接补充企业资金的手段,能够有效缓解企业开展新能源业务面临的融资约束,并通过利好信号指引企业继续坚持新能源创新,减少关键金属价格波动对新能源创新的负向影响。基于以上分析,本文提出:

假说 3c:新能源补贴能够起到调节作用,缓解关键金属价格波动对新能源创新的负向影响。

### (三)关键金属价格波动、企业竞争与新能源企业创新“方向”

由于广阔市场前景和强力政策支持,大量企业涌入新能源行业,出现“潮涌现象”,并产生激烈市场竞争(余东华和吕逸楠, 2015;周亚虹等, 2015)。在高强度竞争环境中,通过技术创新来降本增效是新能源企业获得市场势力和超额利润的重要手段。Bloom (2014)指出,当不确定性增加潜在回报规模时,企业可能更愿意增加技术创新,以期在未来市场中占据更大份额。特别是当“赢者通吃”效应明显时,不确定性对创新的激励作用会超过不确定性对创新的负面影响(刘波等, 2017)。在高强度市场竞争中,关键金属价格波动给新能源企业运营带来挑战,但同时也可能会倒逼企业增加创新,尤其是那些能够节约新能源关键金属使用的创新,包括减少新能源设备中关键金属使用量、回收利用关键金属、延长设备使用寿命等(Duffner et al., 2021)。关键金属节约型创新能够帮助新能源企业减少对原材料价格波动的风险敞口,增强产品在市场中的竞争力,从而获取更大市场份额和超额利润。基于以上分析,本文提出:

假说 4:企业竞争效应能够起到调节作用,在相对竞争性强的行业,关键金属价格波动上升会推动新能源企业增加更多关键金属节约型创新。

### 三、研究策略

#### (一) 样本选取

本文的研究对象为2007—2022年沪深A股市场中水能、核能、风能、太阳能、生物质能与垃圾焚烧发电、地热能、新能源汽车等7个领域的新能源上市公司。本文综合运用指数成分和年报文本方法选取新能源企业样本。首先,基于中证行业指数和Wind概念股指数,选取7个新能源领域对应的代表企业;其次,考虑到企业存在由传统业务向新能源业务转型的现象,本文根据企业年报“管理层讨论与分析”章节最早出现对应新能源领域词语的时间<sup>1</sup>,判断企业进入该领域的年份。本文删除了ST类公司,只保留样本期内进行过专利申请的公司样本,并剔除上市或进入新能源领域不足三年的企业,最终得到的研究样本包含2007—2022年310家上市公司、3153个“上市公司—年份”观测值。

#### (二) 模型设定

2009年《可再生能源法》修订降低了企业进入新能源行业的门槛,大量传统能源和非能源行业企业向新能源转型(Lin and Wang, 2023),这使得中国新能源企业的创新活动同时包括多种类型。本文采用专利申请数量衡量企业的创新产出,并区分了新能源专利、传统能源专利、关键金属节约型专利。专利申请数是非负值计数变量,存在高度右偏分布和零附近大量取值集中的现象,因此本文选择使用负二项回归模型,并采用最大似然法进行估计。具体模型设定如下:

$$E [Inno_{i,t+p} | x_{it}] = \exp[\beta_0 + \beta_1 metalpv_{it} + \mu X_{it} + \lambda_i + trend_t + \varepsilon_{it}] \quad (1)$$

其中, $i$ 表示企业, $t$ 表示样本当期年份, $p$ 表示 $t$ 年之后的未来 $p$ 期。 $Inno_{i,t}$ 代表企业 $i$ 在 $t$ 年的创新产出,考虑到从创新决策到创新产出需要一定时间,因此使用未来一期和二期的创新产出作为被解释变量。 $x_{it}$ 是等号右边出现的所有解释变量。 $metalpv_{it}$ 是企业 $i$ 对应的关键金属在 $t$ 年的价格波动指数<sup>2</sup>。为了方便地解释回归结果,本文将各新能源领域的关键金属价格波动指数进行了Z-Score标准化处理。系数 $\beta_1$ 衡量的是对被解释变量数值的期望的影响,当关键金属价格波动指数增长1个标准差时,未来 $p$ 期企业创新增加 $e^{\beta_1} - 1$ 倍。

$X_{it}$ 是一系列控制变量,包含企业、行业、宏观三个维度。在企业维度,选取企业规模( $size$ ,资产总额的自然对数)、企业年龄( $age$ ,成立年限加1的自然对数)、财务杠杆( $lev$ ,负债总额与资产总额之比)、固定资产占比( $fasset$ ,固定资产净额与资产总额之比)、资产收益率( $roa$ ,净利润与资产总额之比)、成长能力( $growth$ ,营业收入同比增长率)、股权集中度( $holderr1$ ,第一大股东持股比例)、市场势力( $market$ ,营业收入与营业

1 因篇幅所限,具体使用新能源词典未报告,参见附录。

2 部分企业在同一年涉及多个新能源行业,本文将涉及的新能源行业的关键金属价格波动指数取平均,作为该企业对应的关键金属价格波动指数。

成本之比的自然对数)、政府创新补助(*subsidy*, 政府创新补助与营业收入之比)作为控制变量,并引入企业固定效应 $\lambda_i$ 。在行业维度,控制企业*i*所处新能源领域的规模增速(*scalegrowth*, 例如风电装机容量同比增长率)和占比增速(*propgrowth*, 例如风电装机容量在总装机容量中占比的同比增长率),以控制不同新能源领域景气程度的影响。在宏观维度<sup>1</sup>,加入经济增长(*gdp*, GDP 同比增长率)和货币政策(*m2*, M2 同比增长率)作为控制变量。此外,本文还在模型中加入了时间趋势项 $trend_t$ ,用于控制创新产出的时间趋势。 $\varepsilon_{it}$ 是随机扰动项。

### (三)数据说明

#### 1. 企业创新

本文采用专利申请数量(*patent*, 发明专利和实用新型专利的申请数量之和)衡量企业创新产出。此外,本文根据专利摘要中是否出现新能源领域关键词或者传统能源领域关键词<sup>2</sup>,识别并计算新能源专利申请数量(*cleanp*)和传统能源专利申请数量(*tradp*)。进一步地,本文基于新兴的大语言模型方法识别并计算关键金属节约型专利申请数量(*savep*)。由于节约新能源关键金属是属于专利的功效或者目的,简单使用专利摘要关键词或者 IPC 分类号都难以进行识别。此外,新能源行业涉及的产业链条广、技术能力复杂,人工分类时难以清晰理解专利的技术特点和应用场景,无法提供标注数据集。近些年快速发展的 ChatGPT 等一系列大语言模型具有更强大的知识库和逻辑推理能力,能够在零样本的情况下处理复杂任务,包括识别关键金属节约型专利。本文使用 qwen-plus 模型,对样本上市公司的专利摘要文本进行逐个推理分析,基于专利技术特点和应用场景,识别出能够帮助企业节约新能源相关产品金属使用的专利<sup>3</sup>。本文还要求在输出答案时给出判断依据,用于对识别结果进行验证。

#### 2. 关键金属价格波动指数

不同新能源领域使用的关键金属资源存在差别,有必要针对每个新能源行业分别计算关键金属价格及其波动。首先,本文根据 Watari et al. (2019)提供的不同新能源领域的

1 由于不同新能源领域的关键金属价格波动指数存在较强的相关性(7个新能源行业关键金属价格波动指数两两之间相关系数的均值为0.84),如果加入年份固定效应,会吸收掉关键金属价格波动大部分的影响,因此本文并未加入年份固定效应。为控制宏观因素的影响,本文加入宏观变量和时间趋势项。

2 因篇幅所限,具体使用新能源词典和传统能源词典未报告,参见附录。

3 用于识别关键金属节约型专利的提示词具体如下:“请根据专利摘要文本,准确识别那些能够帮助企业节约新能源相关产品金属使用的专利,例如能够减少关键金属的使用、用储量更丰富价格更低廉的金属替换储量更稀缺价格更昂贵的金属、在生产过程中对废料金属进行回收利用、通过延长新能源设备使用寿命从而节约关键金属使用、将废旧新能源设备进行回收利用,以及其他可以帮助企业节约新能源相关产品金属使用的专利。你需要结合知识库信息,仔细分析每个专利摘要中的技术特点和应用场景,确保分类的准确性。你需要识别的专利摘要文本为: { 输入的专利摘要文本 }。你需要进行的输出包括:1. 分类结果(1表示能够节约新能源相关产品金属使用,0表示不能节约新能源相关产品金属使用)。2. 简要说明分类依据。输出格式为:1. 分类结果:1 或者 0;2. 分类依据:文本。除了上述两点,你不需要再作出其他回复。”

关键金属使用密度数据,确定不同新能源领域使用的各种关键金属占比,以此作为价格权重<sup>1</sup>;其次,从 Wind 数据库获取各种关键金属的月度平均价格;最后,使用对应新能源领域关键金属使用占比作为权重,结合关键金属月度平均价格数据,加权计算该新能源领域使用关键金属的价格指数,从而生成 2007 年 1 月至 2022 年 12 月 7 个新能源领域的关键金属价格指数  $metalprice_{j,t,m}$ ,具体计算公式如下:

$$metalprice_{j,t,m} = \frac{\sum_{h=1}^{n} intensity_{j,h} \times price_{h,t,m}}{\sum_{h=1}^{n} intensity_{j,h} \times price_{h,2007,1}} \times 100 \quad (2)$$

$intensity_{j,h}$  代表关键金属  $h$  在新能源领域  $j$  中的使用占比。 $price_{h,t,m}$  代表关键金属  $h$  在  $t$  年  $m$  月的价格。本文将关键金属价格的基期设定为 2007 年 1 月,基期值设定为 100。

进一步地,本文借鉴 Hsu et al. (2022) 的方法,使用关键金属价格月度收益率的标准差生成年度的关键金属价格波动指数  $metalpvol_{j,t}$ ,具体计算公式如下:

$$metalpvol_{j,t} = \text{Std. Dev.} [\ln(metalprice_{j,t,m}) - \ln(metalprice_{j,t,m-1})] \quad (3)$$

经过上述计算,得到 2007—2022 年 7 个新能源领域关键金属价格波动指数。最后,本文将各新能源领域的关键金属价格波动指数进行了 Z-Score 标准化处理。

### 3. 数据来源

上市公司的专利数据来自中国国家知识产权局的专利数据库,上市公司年报文本数据来自巨潮资讯网和上市公司官网,不同新能源领域的关键金属使用密度数据来自 Watari et al. (2019),金属价格数据来自 Wind 数据库<sup>2</sup>,公司财务数据来自 CSMAR 数据库,新能源行业特征数据和宏观经济数据来自 Wind 数据库和中经网数据库。为消除极端值的影响,对本文使用到的企业连续型变量进行双侧 0.1% 的缩尾处理<sup>3</sup>。

## 四、实证分析结果

### (一) 关键金属价格波动对新能源企业创新的影响

表 1 报告了基准回归结果。第(1)列的被解释变量为未来一期的企业专利申请数量, $metalpvol$  系数为  $-0.08$ ,在 1% 水平上显著,表明关键金属价格波动对企业专利申请数量存在显著负向影响,关键金属价格波动指数每提高一个标准差,企业未来一期申请的专利数量平均降低约 8.12% ( $e^{-0.0847} - 1$ )。第(2)列的被解释变量为未来二期的企业专利申请数量, $metalpvol$  系数为  $-0.02$ ,关键金属价格波动的负向影响明显减弱且不再显著。第(3)~(4)列展示了关键金属价格波动对新能源专利申请量的影响, $metalpvol$  的系数均不显著。第(5)~(6)列展示了关键金属价格波动对传统能源专利申请量的影响,

1 本文并未将铁纳入关键金属的范畴,铁在包括新能源行业内的各行业都得到了广泛使用,如果将铁纳入,可能会给结果带来较大偏误。

2 因篇幅所限,7 个新能源领域的关键金属使用密度和不同关键金属对应价格标的数据未报告,参见附录。

3 因篇幅所限,数据描述性统计未报告,参见附录。

*metalpvol* 的系数均显著为负,且系数值较大。关键金属价格波动提高显著降低企业传统能源专利申请数量,但并未显著影响新能源专利申请数量。进一步地,本文检验关键金属价格波动对关键金属节约型创新的影响,结果如表 1 第(7)~(8)列所示,未来二期 *metalpvol* 系数显著为正。关键金属价格波动对企业关键金属节约型创新存在滞后的正向影响,关键金属价格波动上升推动企业增加关键金属节约型创新。

表 1 基准回归结果:关键金属价格波动对新能源企业创新的影响

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	<i>F. patent</i>	<i>F2. patent</i>	<i>F. cleanp</i>	<i>F2. cleanp</i>	<i>F. tradp</i>	<i>F2. tradp</i>	<i>F. savep</i>	<i>F2. savep</i>
<i>metalpvol</i>	-0.0847*** (-2.6682)	-0.0242 (-0.7442)	-0.0489 (-1.1937)	0.0476 (1.1210)	-0.1145** (-2.1083)	-0.1485*** (-2.5857)	-0.0358 (-0.7446)	0.1232** (2.5696)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是
时间趋势项	是	是	是	是	是	是	是	是
企业固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
Wald chi2	373.3729	254.3896	294.4490	224.4701	183.0900	139.8518	157.2308	141.2054
样本量	2823	2476	2526	2192	2152	1887	2208	1934

注: \*、\*\*和\*\*\*分别表示 10%、5% 和 1% 的显著性水平,括号内为 *z* 值。

## (二) 内生性问题

本文基准回归可能存在遗漏变量、反向因果等内生性问题。例如,新能源企业通过创新增加新能源产品的竞争力和销量,从而增加对关键金属需求。需求变化和金属生产的周期错配,导致该行业所需金属的价格波动提高(IEA, 2021)。为解决内生性问题,本文使用对应新能源行业几乎不使用的基本金属价格波动率和关键金属主要供给国的地缘政治风险作为工具变量。

第一个工具变量为每个新能源行业使用占比小于 1% 的 LME(伦敦金属交易所)基本金属价格波动率的第一主成分<sup>1</sup>。随着金属交易的金融衍生品市场发展,金属的金融属性逐渐增强,不同金属之间价格的联系也越发增强。在全球金属的定价中,伦敦金属交易所发挥了主导作用,LME 基本金属价格波动对新能源关键金属价格波动存在明显溢出效应(Bastianin et al., 2023)。此外,某新能源行业几乎不使用的关键金属价格波动不太会对该行业造成直接冲击,而只能通过影响该新能源行业使用的主要关键金属的价格波动,从而影响该新能源行业企业的创新行为。第二个工具变量为除中国之外的关键金属主要供给国的地缘政治风险指数的第一主成分<sup>2</sup>。新能源关键金属具有稀缺性和地理分布不均衡性,少数核心国家掌握全球关键金属大部分供给能力(杨宇等, 2022)。不管是供给

1 水能领域为镍和锡;核能领域为铝和锌;太阳能领域为铜、镍、铅和锡;风能领域为铝和锡;生物质能和垃圾焚烧发电领域为镍和锡;地热能领域为铝、铅、锡和锌;新能源汽车领域为铝、锡和锌。

2 包括阿根廷、澳大利亚、巴西、加拿大、智利、印度尼西亚、菲律宾、俄罗斯、南非(IRENA, 2023)。国家地缘政治风险指数来自 Caldara and Iacoviello(2022)。

国本身的地缘政治紧张局势,还是国与国之间的地缘政治冲突,都有可能造成关键金属供应链的供给波动甚至中断(IRENA,2023),引起价格波动。此外,关键金属主要供给国在中国新能源企业出口中的占比较少,其地缘政治风险不会通过市场需求影响中国新能源企业行为。工具变量估计结果与基准回归结果一致,表明结果具备稳健性<sup>1</sup>。

### (三)稳健性检验

本文进一步进行下述稳健性检验,以确保结果可靠性<sup>2</sup>。(1)模型设定的再检验:采用OLS回归进行稳健性分析,被解释变量为专利申请数量加1并取自然对数。(2)新能源行业范围的再确定:目前在国际惯例中对于将水能和核能认定为常规能源还是新能源存在争议,本文对样本涉及的新能源行业范围进行再确定,不再包含水能和核能。(3)专利能源类型的再识别:基于IPC分类号识别新能源专利和传统能源专利,其中新能源专利基于2010年世界知识产权组织(WIPO)发布的“国际专利分类绿色清单”中的可替代能源、交通运输类、核能类专利的IPC分类号,传统能源专利基于Noailly and Smeets(2015)和Aghion et al.(2016)提供的IPC分类号。(4)关键金属价格波动的再度量:进一步采用三种方法对关键金属价格波动进行重新度量,包括使用GARCH(1,1)方法计算波动率、在计算关键金属价格波动时进一步纳入铁、使用CRB金属指数波动率。经过上述一系列检验,本文结果依旧是稳健的。

## 五、机制检验与分组分析

### (一)机制检验

#### 1. 关键金属价格波动下的创新投入减少

根据理论分析,关键金属价格波动增高主要通过金融摩擦效应和预防性储蓄效应减少企业用于创新的资源,抑制企业的创新投入与创新产出。

如果金融摩擦效应存在,新能源企业在面临关键金属价格波动时会面临更低的融资额度或更高的融资成本。本文将融资额度的来源划分为银行贷款(*bankfin*,短期借款和长期借款之和的自然对数)、债券融资(*bondfin*,应付债券的自然对数)、商业信用(*bussfin*,应付账款、应付票据和预收账款之和的自然对数),最后将上述三种方式得到的融资加总为总融资(*totalfin*,银行贷款、债券融资、商业信用之和的自然对数)。此外,本文使用利息支出与短期借款和长期借款之和的比值衡量债务融资成本(*fincost*)。结果如表2第(1)~(5)列所示。虽然关键金属价格波动对总融资的影响并不显著,但会对不同融资渠道融资额产生差异性影响。关键金属价格波动的上升显著减少了企业的债券融资和商业信用,为弥补融资缺口,企业显著增加了银行贷款。此外,关键金属价格波动显著增加了企业面临的债务融资成本。

1 因篇幅所限,参见附录。

2 因篇幅所限,参见附录。

如果预防性储蓄效应存在,企业管理层在面临关键金属价格波动提高时会更加谨慎,增加预防性的现金持有,以应对关键金属价格波动带来的经营风险。本文首先检验关键金属价格波动对企业盈利波动(*roavol*,先将企业年度 ROA 减去行业平均值,再计算样本所在期及前两年和后两年经调整后 ROA 的标准差)的影响。结果如表 2 第(6)列所示,关键金属价格波动上升会显著增加企业的盈利波动,这使得企业面临更大的经营风险。进一步地,本文使用现金持有比例(企业货币资金和交易性金融资产之和与资产总计之比)来衡量企业的现金持有水平 *cashhold*,并在表 2 第(7)列报告了预防性储蓄效应的检验结果。关键金属价格波动对现金持有水平存在显著的正向影响,证实了预防性储蓄效应的存在。

表 2 机制检验:关键金属价格波动下的创新投入减少

变量	金融摩擦效应					预防性储蓄效应	
	总融资	银行贷款	债券融资	商业信用	融资成本	盈利波动	现金持有
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	<i>totalfin</i>	<i>bankfin</i>	<i>bondfin</i>	<i>bussfin</i>	<i>fincost</i>	<i>roavol</i>	<i>cashhold</i>
<i>metalpvol</i>	0.0019 (0.3460)	0.1700* (1.7729)	-0.8114*** (-4.0076)	-0.0239*** (-2.6520)	0.0030** (2.4084)	0.0022** (2.1244)	0.0050** (2.4979)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是
时间趋势项	是	是	是	是	是	是	是
企业固定效应	是	是	是	是	是	是	是
样本量	3153	3153	3153	3153	3153	2200	3153
调整后 R <sup>2</sup>	0.9848	0.5721	0.4521	0.9587	0.1660	0.5553	0.5875

注: \*、\*\*和\*\*\*分别表示 10%、5%和 1%的显著性水平,括号内为 *t* 值。

## 2. 绿色激励手段的调节作用

本文的基准回归结果发现,关键金属价格波动会显著减少传统能源创新,而对新能源创新影响较小且不显著。基于本文的理论分析,更强的环境规制、更高的绿色金融发展水平、更高的新能源补贴水平会缓解关键金属价格波动对企业新能源创新的负向影响。

环境规制强度指标的构造参考陈诗一和陈登科(2018),使用企业所在省份的省级政府工作报告中的环境相关词频占比作为代理变量。本文将每年面临环境规制强度最高的前一半企业样本认定为高环境规制强度样本,变量 *regustrong* 取值为 1,另一半样本则取值为 0。表 3 第(1)列展示了当被解释变量为新能源专利申请数量时,环境规制对关键金属价格波动的调节作用。*metalpvol* 对未来一期企业新能源专利申请数量的影响系数显著为负,说明当环境规制较弱时,关键金属价格波动会显著减少企业新能源创新。*metalpvol* × *regustrong* 的系数显著为正,且回归系数明显大于关键金属价格波动的直接效应,表明高强度的环境规制可以有效扭转关键金属价格波动对新能源创新的负向冲击,呈现明显的调节作用。

绿色金融发展水平指标的构造参考王艳丽等(2021),采用企业所在省份的环保项目信贷总额与该省信贷总额的比值衡量。本文将每年对应绿色金融发展水平最高的前半企业样本认定为高绿色金融发展水平样本,变量  $gfinhigh$  取值为 1,另一半样本则取值为 0。表 3 第(3)列展示了当被解释变量为新能源专利申请数量时,绿色金融对关键金属价格波动的调节作用。 $metalpvol$  对未来一期企业新能源专利申请数量的影响系数显著为负,而  $metalpvol \times gfinhigh$  的系数显著为正,且回归系数大小与关键金属价格波动对新能源专利申请数量的直接影响相近,说明绿色金融发展有效缓解了关键金属价格波动对新能源创新的负向影响。

本文进一步考虑了新能源补贴的调节作用,使用新能源上网电价衡量新能源电力相关企业接受的新能源补贴<sup>1</sup>,使用单辆纯电动汽车中央补贴最高额衡量新能源汽车行业企业接受的新能源补贴。为使不同新能源行业之间的补贴可比,本文将上述新能源补贴进行 Z-Score 标准化处理,并最终得到新能源企业接受的新能源补贴变量  $policy$ 。表 3 第(5)列加入关键金属价格波动与新能源补贴的交互项,发现新能源补贴有效缓解了关键金属价格波动对新能源创新的负向冲击。

此外,表 3 第(2)列、第(4)列、第(6)列展示了当被解释变量为传统能源专利申请数量时,不同绿色激励手段的调节作用。交互项的系数都不显著,政府环境规制、绿色金融发展和新能源补贴政策均不能缓解关键金属价格波动对传统能源创新的负向影响。

表 3 机制检验:绿色激励手段的调节作用

变量	政府环境规制		绿色金融发展		新能源补贴	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	<i>F. cleanp</i>	<i>F. tradp</i>	<i>F. cleanp</i>	<i>F. tradp</i>	<i>F. cleanp</i>	<i>F. tradp</i>
<i>metalpvol</i>	-0.1146**	-0.1381*	-0.1166**	-0.1409*	-0.0410	-0.0815
	(-2.1922)	(-1.9174)	(-2.0235)	(-1.8189)	(-0.9154)	(-1.3153)
<i>metalpvol</i> × <i>regustrong</i>	0.1531**	0.0499				
	(2.0808)	(0.5229)				
<i>regustrong</i>	0.0085	-0.0107				
	(0.1512)	(-0.1454)				
<i>metalpvol</i> × <i>gfinhigh</i>			0.1303*	0.0482		
			(1.7343)	(0.4859)		
<i>gfinhigh</i>			-0.0672	0.0439		
			(-0.9680)	(0.5022)		
<i>metalpvol</i> × <i>policy</i>					0.0914*	-0.0154
					(1.7285)	(-0.2014)

<sup>1</sup> 包括水能、核能、风能、太阳能行业企业。由于数据缺失,本部分分析不包括生物质能与垃圾焚烧发电、地热能行业企业。

续表

变量	政府环境规制		绿色金融发展		新能源补贴	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	<i>F. cleanp</i>	<i>F. tradp</i>	<i>F. cleanp</i>	<i>F. tradp</i>	<i>F. cleanp</i>	<i>F. tradp</i>
<i>policy</i>					0.1180 *	0.0610
					(1.9570)	(0.7520)
控制变量	是	是	是	是	是	是
时间趋势项	是	是	是	是	是	是
企业固定效应	是	是	是	是	是	是
Wald chi2	300.6168	183.3910	301.5807	183.2968	302.4222	178.6046
样本量	2526	2152	2526	2152	2351	1963

注：\*、\*\*和\*\*\*分别表示 10%、5% 和 1% 的显著性水平，括号内为 z 值。

### 3. 企业竞争效应下的新能源企业关键金属节约型创新

本文基准回归发现关键金属价格波动上升会显著增加企业未来第二年的关键金属节约型创新。基于本文理论分析,企业竞争效应会推动新能源企业在面临关键金属价格波动上升时增加关键金属节约型创新,以减少对成本变动的风险敞口,获得竞争优势。

本文研究样本包括七个新能源行业。其中水能和核能发展时间更长,已经进入行业成熟期,属于传统新能源行业,且这两个行业政府主导的力量更强,面临市场竞争水平较弱。其余五个新能源行业属于新兴新能源行业,仍处于行业成长期,且这些行业进入门槛相对较低,竞争也更强。表 4 第(1)~(2)列展示了关键金属价格波动分别对传统新能源企业和新兴新能源企业关键金属节约型专利申请量的影响。关键金属价格波动上升会显著促进新兴新能源企业进行更多的关键金属节约型创新,而对传统能源企业的关键金属节约型创新并不存在显著影响。

进一步地,本文使用企业竞争对手数量衡量市场竞争,将竞争对手数量最多的前半样本认定为高竞争环境样本,其余样本认定为低竞争环境样本。表 4 第(3)~(4)列展示了关键金属价格波动分别对低竞争环境样本和高竞争环境样本关键金属节约型专利申请量的影响。与低竞争环境样本相比,高竞争环境样本的关键金属节约型创新受到关键金属价格波动的正向影响更大。上述分析表明,企业竞争效应有效促进新能源企业关键金属节约型创新,面临高强度市场竞争的企业更有动力在关键金属价格波动上升时增加关键金属节约型创新,降本增效以赢得市场竞争。

表 4 机制检验:企业竞争效应下的新能源企业关键金属节约型创新

变量	传统新能源	新兴新能源	低竞争环境	高竞争环境
	(1)	(2)	(3)	(4)
	<i>F2. savep</i>	<i>F2. savep</i>	<i>F2. savep</i>	<i>F2. savep</i>
<i>metalpvol</i>	0.0695	0.1296 **	0.1167 *	0.3483 ***
	(0.5911)	(2.5049)	(1.8292)	(2.9907)

变量	续表			
	传统新能源	新兴新能源	低竞争环境	高竞争环境
	(1)	(2)	(3)	(4)
	<i>F2. savep</i>	<i>F2. savep</i>	<i>F2. savep</i>	<i>F2. savep</i>
控制变量	是	是	是	是
时间趋势项	是	是	是	是
企业固定效应	是	是	是	是
Wald chi2	56.4034	161.6943	45.3820	78.7015
样本量	468	1460	1009	769

注：\*、\*\*和\*\*\*分别表示10%、5%和1%的显著性水平，括号内为z值。

### (二) 基于行业渗透率与企业能源转型程度的分组分析

中国正处于快速的能源转型进程中,新能源渗透率迅速提高,新能源企业的转型程度也在不断加深。为检验行业渗透率的调节作用,本文在基准回归中纳入关键金属价格波动(*metalpvol*)和高新能源行业渗透率(*prophigh*)的交互项,其中*prophigh*代表对应新能源行业渗透率(例如风电装机容量在总装机容量中占比)最高的前一半样本。结果如表5第(1)~(2)列所示,*metalpvol* × *prophigh*对新能源企业专利申请量的影响系数显著为负。随着新能源行业渗透率的提高,关键金属价格波动对新能源企业创新行为呈现越来越强的影响。

本文进一步检验企业能源转型程度的调节作用,在基准回归中纳入关键金属价格波动(*metalpvol*)和高企业能源转型程度(*freqhigh*)的交互项,其中*freqhigh*代表能源转型程度最高的前一半样本。能源转型程度使用企业年报“管理层讨论与分析”部分中新能源关键词的占比作为间接衡量。结果如表5第(3)~(4)列所示,*metalpvol* × *freqhigh*对新能源企业专利申请数量同样展现出显著的负向影响。当企业越来越转向新能源业务时,关键金属价格波动对新能源企业创新的影响会不断增强。随着未来新能源的进一步发展,须更重视关键金属价格波动的不利影响。

### (三) 基于企业产业链位置的分组分析

对于位于产业链上中下游不同位置的新能源企业,关键金属价格波动可能存在不同的影响。相比于产业链中下游的企业,位于产业链上游的企业可能拥有更强的成本传导能力,从而更少会受到关键金属价格波动的影响。本文参考IEA(2021),根据新能源行业的特性,使用人工阅读企业年报的方法,将样本中的企业划分为上中下游企业。表5第(5)~(7)列分别展示了关键金属价格波动对上中下游新能源企业专利申请数量的影响,结果表明,相比于上游新能源企业,中下游新能源企业的创新产出受到关键金属价格波动的影响更大。

表 5 分组分析

变量	行业渗透率		企业能源转型程度		企业产业链位置		
	(1)	(2)	(3)	(4)	上游 (5)	中游 (6)	下游 (7)
	<i>F. patent</i>	<i>F2. patent</i>	<i>F. patent</i>	<i>F2. patent</i>	<i>F. patent</i>	<i>F. patent</i>	<i>F. patent</i>
<i>metalpvol</i>	-0.0268 (-0.6788)	0.0273 (0.6778)	-0.0499 (-1.3339)	0.0252 (0.6777)	-0.0220 (-0.3902)	-0.0791* (-1.7458)	-0.1130* (-1.8302)
<i>metalpvol</i> × <i>prophigh</i>	-0.1290** (-2.2027)	-0.1179** (-2.0255)					
<i>prophigh</i>	-0.0861** (-1.9847)	-0.0740 (-1.3948)					
<i>metalpvol</i> × <i>freqhigh</i>			-0.1024* (-1.6581)	-0.1596** (-2.5064)			
<i>freqhigh</i>			-0.1739*** (-3.2762)	-0.1858*** (-3.2605)			
控制变量	是	是	是	是	是	是	是
时间趋势项	是	是	是	是	是	是	是
企业固定效应	是	是	是	是	是	是	是
Wald chi2	379.5063	259.9543	385.0952	267.1136	76.8708	163.1834	233.2434
样本量	2823	2476	2823	2476	584	1270	969

注：\*、\*\*和\*\*\*分别表示 10%、5% 和 1% 的显著性水平，括号内为 z 值。

## 六、结论与政策建议

新能源技术创新是推动能源产业转型升级、保障“双碳目标”实现的重要举措，然而，作为重要成本项，关键金属价格波动对新能源企业的技术创新水平有着显著影响。本文从能源转型的视角出发，构建了新能源行业特有关键金属价格波动指数，深入剖析了关键金属价格波动对企业创新水平的影响及其作用机制。主要发现如下：第一，关键金属价格波动对新能源企业的专利申请量产生了显著的负向影响；然而与传统能源专利相比，新能源专利受到影响较小；值得关注的是，关键金属价格波动上升还驱动企业进行更多的关键金属节约型创新。第二，关键金属价格波动的上升通过金融摩擦效应和预防性储蓄效应减少了企业的研发投入；然而，政府环境规制、绿色金融发展、新能源补贴政策等绿色激励手段则发挥了显著的调节作用，有效缓解了关键金属价格波动对新能源创新的负向冲击；此外，企业竞争效应促使企业在面临关键金属价格波动上升时进行更多的关键金属节约型创新，以减少企业对关键金属要素价格的风险敞口，获得竞争优势。第三，进一步分析发现，随着新能源行业渗透率的提高和企业能源转型程度的加深，关键金属价格波动对新能源企业创新的影响逐步加剧，且中下游企业更容易受到成本波动的影响。

本文研究成果为应对关键金属价格波动对新能源企业技术创新的影响提供了实践指导,对于实现碳达峰、碳中和战略,以及推动新质生产力发展具有一定政策参考意义。第一,积极提升对关键金属资源的全球控制力,对于供给风险大、对外依存度高的关键金属资源建立战略金属储备清单,联合关键金属主要供给国构建互惠互利和互为安全的供应链联盟。同时,大力发展循环经济,设立关键金属回收强制标准,增强资源节约技术对新能源安全的支撑作用,减少对关键金属资源的依赖。第二,应加快推动金属期货等衍生品市场创新,推出新能源金属期货,在国际金属市场上掌握主动权和话语权,为中国新能源企业提供有效的套期保值和风险对冲工具,更好地服务实体经济的创新活动。第三,新能源企业应主动管理可能面临的关键金属价格波动风险,特别是对于新能源转型程度更高和位于产业链中下游的企业,要通过使用金属衍生品进行套期保值或与供应链企业签订长协价格合同等方式来管理关键金属价格波动风险,加强企业的抗风险能力。第四,积极推进金融市场制度改革,推动金融机构做好金融“五篇大文章”,发展更多绿色信贷、绿色债券、绿色基金等绿色金融产品,为新能源企业提供更多融资渠道和便利,降低新能源企业融资成本,促进企业的创新和发展。新能源企业则持续以绿色创新加强绿色融资能力,积极响应国家高端化、智能化、绿色化发展的号召。第五,随着新能源市场的成熟和产品竞争力的提高,绿色激励政策需从“政府输血”向“市场造血”转变,减少对新能源企业的直接补贴,通过碳配额交易、绿证交易、绿色金融等市场化工具,实现“减排成本企业化、绿色收益市场化”的良性循环。

## 参考文献

- [1] 陈诗一和陈登科,2018,《雾霾污染、政府治理与经济高质量发展》,《经济研究》第2期,第20~34页。
- [2] 戴永安和张潇,2023,《环境政策的空间溢出与城市能源偏向型技术进步》,《世界经济》第5期,第119~151页。
- [3] 刘波、李志生和王泓力,2017,《现金流不确定性与企业创新》,《经济研究》第3期,第166~180页。
- [4] 齐绍洲、张倩和王班班,2017,《新能源企业创新的市场化激励——基于风险投资和企业专利数据的研究》,《中国工业经济》第12期,第95~112页。
- [5] 孙传旺、占妍泓和林伯强,2022,《新能源企业增值税政策的规模效应与创新效应》,《经济研究》第9期,第46~64页。
- [6] 王馨和王营,2021,《绿色信贷政策增进绿色创新研究》,《管理世界》第6期,第173~188页。
- [7] 王艳丽、类晓东和龙如银,2021,《绿色信贷政策提高了企业的投资效率吗?——基于重污染企业金融资源配置的视角》,《中国人口·资源与环境》第1期,第123~133页。
- [8] 杨宇、夏四友和钱肖颖,2022,《能源转型的地缘政治研究》,《地理学报》第8期,第2050~2066页。
- [9] 余东华和吕逸楠,2015,《政府不当干预与战略性新兴产业产能过剩——以中国光伏产业为例》,《中国工业经济》第10期,第53~68页。
- [10] 周亚虹、蒲余路和陈诗一,2015,《政府扶持与新型产业发展——以新能源为例》,《经济研究》第6期,第147~161页。
- [11] 祝继高、韩非池和陆正飞,2015,《产业政策、银行关联与企业债务融资——基于A股上市公司的实证研究》,《金融研究》第3期,第176~191页。
- [12] Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyn and D. Hemous, 2012, “The Environment and Directed Technical Change”,

- American Economic Review*, 102(1), pp. 131 ~ 166.
- [13] Aghion, P., A. Dechezleprêtre, D. Hemous, R. Martin and J. Van Reenen, 2016, “Carbon Taxes, Path Dependency, and Directed Technical Change: Evidence from the Auto Industry”, *Journal of Political Economy*, 124(1), pp. 1 ~ 51.
- [14] Bajolle, H., M. Lagadic and N. Louvet, 2022, “The Future of Lithium – ion Batteries: Exploring Expert Conceptions, Market Trends, and Price Scenarios”, *Energy Research & Social Science*, 93, 102850.
- [15] Bastianin, A., C. Casoli and M. Galeotti, 2023, “The Connectedness of Energy Transition Metals”, *Energy Economics*, 128, 107183.
- [16] Bernanke, B. S., 1983, “Irreversibility, Uncertainty, and Cyclical Investment”, *The Quarterly Journal of Economics*, 98(1), pp. 85 ~ 106.
- [17] Bhattacharya, U., P. H. Hsu, X. Tian and Y. Xu, 2017, “What Affects Innovation More: Policy or Policy Uncertainty?”, *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 52(5), pp. 1869 ~ 1901.
- [18] Bloom, N., 2014, “Fluctuations in Uncertainty”, *Journal of Economic Perspectives*, 28(2), pp. 153 ~ 176.
- [19] Caldara D., M. Iacoviello, 2022, “Measuring Geopolitical Risk”, *American Economic Review*, 112(4), pp. 1194 ~ 1225.
- [20] Duffner, F., N. Kronmeyer, J. Tübke, J. Leker, M. Winter and R. Schmuch, 2021, “Post – lithium – ion Battery Cell Production and Its Compatibility with Lithium – ion Cell Production Infrastructure”, *Nature Energy*, 6(2), pp. 123 ~ 134.
- [21] Fan, H., Y. Peng, H. Wang and Z. Xu, 2021, “Greening Through Finance?”, *Journal of Development Economics*, 152, 102683.
- [22] Han, S. and J. Qiu, 2007, “Corporate Precautionary Cash Holdings”, *Journal of Corporate Finance*, 13(1), pp. 43 ~ 57.
- [23] Hassler, J., P. Krusell and C. Olovsson, 2021, “Directed Technical Change as A Response to Natural Resource Scarcity”, *Journal of Political Economy*, 129(11), pp. 3039 ~ 3072.
- [24] Himmelberg, C. P. and B. C. Petersen, 1994, “R&D and Internal Finance: A Panel Study of Small Firms in High – tech Industries”, *The Review of Economics and Statistics*, 76, pp. 38 ~ 51.
- [25] Hsu, P. H., M. P. Taylor, Z. Wang and Q. Xu, 2022, “Currency Volatility and Global Technological Innovation”, *Journal of International Economics*, 137, 103607.
- [26] IEA (International Energy Agency), 2021, “The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions”.
- [27] IRENA (International Renewable Energy Agency), 2023, “Geopolitics of the Energy Transition: Critical Materials”.
- [28] Kalouptsi, M., 2018, “Detection and Impact of Industrial Subsidies: The Case of Chinese Shipbuilding”, *The Review of Economic Studies*, 85(2), pp. 1111 ~ 1158.
- [29] Lin, B. and S. Wang, 2023, “The Performance of Specialized and Oriented Diversified Firms: A Comparative Analysis from the Targeted Expansion of Renewable Energy Business of Listed Companies”, *International Review of Financial Analysis*, 89, 102742.
- [30] Noailly, J. and R. Smeets, 2015, “Directing Technical Change from Fossil – fuel to Renewable Energy Innovation: An Application Using Firm – level Patent Data”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 72, pp. 15 ~ 37.
- [31] Popp, D., 2002, “Induced Innovation and Energy Prices”, *American Economic Review*, 92(1), pp. 160 ~ 180.
- [32] Sovacool, B. K., S. H. Ali, M. Bazilian, B. Radley, B. Nemery, J. Okatz and D. Mulvaney, 2020, “Sustainable Minerals and Metals for a Low – carbon Future”, *Science*, 367(6473), pp. 30 ~ 33.
- [33] Wang, H., K. Feng, P. Wang, Y. Yang, L. Sun, F. Yang, W. Q. Chen, Y. Zhang and J. Li, 2023, “China’s Electric Vehicle and Climate Ambitions Jeopardized by Surging Critical Material Prices”, *Nature Communications*, 14(1), 1246.

- [34] Watari, T., B. C. McLellan, D. Giurco, E. Dominish, E. Yamasue and K. Nansai, 2019, “Total Material Requirement for the Global Energy Transition to 2050: A Focus on Transport and Electricity”, *Resources, Conservation and Recycling*, 148, pp. 91 ~ 103.

## Critical Metal Price Volatility, Green Incentives and Innovation of New Energy Enterprises

LIU Yang XIAO Qiyong HAN Liyan QIN Ping

(School of Applied Economics, Renmin University of China,  
School of Economics and Management, Beihang University,  
Beijing Institute of Mathematical Sciences and Applications)

**Summary:** With the continuous breakthroughs and widespread application of new energy technologies, China has occupied a leading position in the global new energy industry competition, giving birth to a number of international giants in new energy equipment manufacturing. To promote the continuous innovation and further development of China's new energy technologies, fostering a favorable business and innovation ecosystem is crucial, ensuring stable and sustained returns for new energy innovation. Unlike traditional energy, new energy technologies such as photovoltaics, wind turbines, nuclear reactors, and new energy vehicles are highly reliant on critical metal materials. The geographically concentrated production and processing of critical metals, coupled with long delivery cycles, have caused significant price volatility, introducing uncertainty into the business ecosystem of new energy enterprises. This study examines how critical metal price volatility influences the innovation activities of new energy enterprises, aiming to provide practical insights for advancing China's low-carbon energy transition and high-quality development.

Starting from the input of factors in the new energy industry, this study uses patent application microdata from listed companies across seven Chinese new energy sectors—hydropower, nuclear energy, wind energy, solar energy, biomass and waste-incineration power generation, geothermal energy, and new energy vehicles—spanning the period 2007-2022. The study delves into how critical metal price volatility impacts new energy enterprise innovation. Using negative binomial regression, the analysis defines innovation output as the dependent variable, measured by patent applications. By combining keyword identification with large language models on patent abstracts, the study distinguishes new energy patents, traditional energy patents, and resource-saving patents related to critical metals. The core explanatory variable is critical metal price volatility. First, a monthly critical metal price index for each new energy sector is derived through weighted calculations based on metal usage density. Then, the annual standard deviation of monthly price returns constructs the critical metal price volatility index.

This study shows that critical metal price volatility significantly negatively affects new energy enterprises' patent applications. Compared with traditional energy patents, new energy patents are less affected and the impact is not significant. Notably, increased critical metal price volatility can motivate enterprises to develop resource-saving patents related to critical metals. Further exploration into the potential mechanisms at play

uncovers two key aspects. On the one hand, the financing constraint effect and the precautionary saving effect are identified as the primary factors that lead to a reduction in enterprises' R&D investment in the face of critical metal price volatility. On the other hand, the roles of the government and the market provide insights into the direction of innovation. Government green incentives like environmental regulations, green finance development and new energy subsidies ease the negative impact of price volatility on new - energy - related patents. Meanwhile, enterprise competition prompts more resource - saving patents related to critical metals to reduce cost - fluctuation exposure and gain market advantages. Heterogeneous analysis reveals that as the new energy industry penetration rate rises, the impact of critical metal price volatility strengthens. Enterprises with high energy transition degrees and those in midstream and downstream of the industrial chain are more affected by such price volatility.

The research findings have significant policy implications. First, China should enhance its global influence over critical metal resources and vigorously pursue circular economy development to strengthen the supporting role of resource - saving technologies in new energy security. Second, the government needs to accelerate the innovation of metal futures and other derivative product markets. Third, new energy enterprises should actively manage the risks of critical metal price volatility by using metal derivatives for hedging or entering into long - term supply contracts with upstream and downstream enterprises. Fourth, the government should actively promote financial market system reforms and develop a greater variety of green financial products.

The marginal contributions of this study are mainly reflected in three aspects. First, this paper extends the research on factors influencing new energy innovation by focusing on critical metals, an important input factor in the new energy industry, adding a new perspective and data support. Second, the study broadens the boundary of the understanding of critical metals' importance in the new energy industry. Existing studies mostly focus on the macro - level constraints of critical metal resources on new energy development, while pay insufficient attention to their micro - level impacts on enterprises. This study shifts the focus to the micro - level of enterprises, elucidating the micro mechanisms of how critical metal price volatility differently affects innovation activities across energy types. Finally, this paper provides insights for both the government and new energy enterprises in promoting new energy industry development and formulating business strategies.

**Keywords:** Critical Metals for New Energy, Corporate Innovation, Energy Transition, Environmental Regulations, Green Finance

**JEL Classification:** L72, O31, Q55

(责任编辑:林梦瑶)(校对:ZL)