

引用格式: 孙涵, 王箫鳕, 杨小慧, 等. 中国战略性新兴产业关键金属供应风险评估[J]. 资源科学, 2024, 46(11): 2124–2136. [Sun H, Wang X X, Yang X H, et al. Assessment of key metals supply risk in China's strategic emerging industries[J]. Resources Science, 2024, 46(11): 2124–2136.] DOI: 10.18402/resci.2024.11.03

# 中国战略性新兴产业关键金属供应风险评估

孙 涵<sup>1,2</sup>, 王箫鳕<sup>1</sup>, 杨小慧<sup>1</sup>, 成金华<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)经济与管理学院, 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)

资源环境经济研究中心, 武汉 430074)

**摘要:**【目的】日益复杂动荡的国际环境加剧全球关键金属供应的不稳定性, 评估战略性新兴产业关键金属供应风险为国家资源安全、新兴产业稳定发展及外生风险防控提供了重要的借鉴参考。【方法】本文以中国6大类战略性新兴产业及其所需的29种关键金属矿产为研究对象, 从可获得性、依赖性、承受性3个维度出发, 构建战略性新兴产业关键金属供应风险评估体系, 分析2011—2020年不同关键金属的供应风险、受主要国家影响情况, 以及战略性新兴产业主要产品的受影响程度。【结果】①2011—2020年, 铂族金属、钨、铌的供应风险尤为突出, 镍、钴、锂等关键金属的供应风险伴随热点产业变化而变化, 后期逐渐升高; ②俄罗斯、澳大利亚、美国、加拿大、巴西影响中国10多种关键金属的供应风险, 而南非、智利和刚果(金)影响关键金属的数量相对较少, 但影响程度特别高; ③新材料、新能源、高端装备制造、新一代信息技术4大类战略性新兴产业相对脆弱, 特别是催化剂、永磁体、锂离子电池、航空航天设备、电子产品易受铂族金属、钨、钼、钴等关键金属的影响。④镓、锑、铟等一些总体影响较小的关键金属会对少数产品造成较大影响, 值得关注。【结论】随着关键金属全球供应不稳定性加剧, 加强进出口管控, 细化数据统计, 完善风控机制, 搭建预警平台, 强化技术创新, 革新资源利用体系, 对于防范化解外生风险, 保障资源安全和产业安全具有启示意义和实践价值。

**关键词:** 关键金属; 供应风险; 风险评估; 战略性新兴产业; 产业安全

DOI: 10.18402/resci.2024.11.03

## 1 引言

关键金属的安全供应直接决定了新能源、新一代信息技术和高端装备制造等战略性新兴产业的发展稳定, 受到各个国家(地区)的高度关注。特别是随着战略性新兴产业的快速发展, 关键金属的需求持续增加, 如太阳能电池、锂离子电池、航空航天装备的核心构件对锂、钴、镍、稀土金属等关键金属需求强劲<sup>[1-4]</sup>。然而, 受到资源禀赋、新冠肺炎疫情、地缘政治冲突和贸易保护等因素影响, 关键金属全球供应链不稳定性加剧, 呈现区域化、集团化的演变趋势, 供应风险越来越高, 未来甚至有中断的可能性<sup>[5-8]</sup>。中国战略性新兴产业在《“十四五”规划纲要》《中国制造2025》等政策的支持和激励下,

发展势头良好, 未来对关键金属的需求仍将居高不下, 供给和需求的矛盾持续存在。

随着国际形势发生深刻变化, “黑天鹅”事件频发, 关键金属竞争加剧, 全球关键金属供需不平衡矛盾突出。世界主要经济体纷纷制定策略应对关键金属供应挑战。美国、欧盟等国家(地区)相继发布了多项法案、战略计划, 构建矿产“同盟”, 试图控制资源流向, 强化资源控制权, 以保障本国(地区)战略性新兴产业关键金属资源的稳定供给<sup>[1,9-12]</sup>。2008年, 美国国家研究委员会<sup>[13]</sup>确定出铂族金属、稀土元素、钨、锰和铌对美国经济社会发展具有重要作用。在2018年, 美国地质调查局公布了包含35类矿产品的关键矿产清单; 2022年, 美国地质调查

收稿日期: 2023-10-08; 修订日期: 2024-05-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(71991482); 国家社会科学基金重大项目(21&ZD106)。

作者简介: 孙涵, 男, 湖北黄冈人, 博士, 教授, 研究方向为资源环境管理和能源资源安全战略。E-mail: sunhan2004@126.com

通讯作者: 王箫鳕, 男, 山东莱西人, 博士生, 研究方向为矿产资源管理。E-mail: wangxiaoxue@cug.edu.cn

2024年11月

局发布的关键矿产清单增加至50种。欧盟委员会在每4年更新一次关键原材料清单,种类从17种增加到34种。中国也高度重视关键金属的稳定、安全供应,一方面,2016年公布了包含24种关键金属的战略性矿产清单,开展新一轮找矿突破行动,积极推进增储上产;另一方面,矿企实施“走出去”战略,推进“一带一路”国际化矿山建设,增强外部供应能力。这些措施在一定程度上降低了关键金属的供应风险,提升了战略性新兴产业的安全发展能力,但中国关键金属缺口大,供给与需求的矛盾依然没有实质性改善,结构性短缺态势将长期存在。在此背景下,中国战略性新兴产业所需关键金属的供应风险有多大、影响战略性新兴产业的情况如何?成为亟需量化评估的关键问题。

关键金属供应风险评估需要建立起科学、系统的评价体系。首先需要识别影响供应风险的因素,然后根据影响因素确定评估方法和指标、搭建框架,最终构建出科学的评估体系。相关的研究可以追溯到2008年美国国家科学研究委员会<sup>[13]</sup>对美国现代社会的关键矿产分析,此后相关机构和学者不断进行深入探索。如欧盟委员会<sup>[14]</sup>从供应风险和脆弱性的二维框架来确定关键矿产清单,开展了大量关于清洁能源相关金属的供应风险研究。这些研究都侧重于考虑地质、政治和经济因素对矿产供应安全的影响,后续其他的学者在此基础上进行了拓展,如Rosenau-Tornow等<sup>[15]</sup>通过历史价格波动来评估矿产供应安全,主要考虑了市场因素;Graedel等<sup>[16]</sup>在欧盟委员会建立的二维分析框架的基础上,加入了生态环境维度,考虑了环境因素对矿产供应安全的影响;Nassar等<sup>[17]</sup>则将贸易关系作为第3个维度,评估了美国制造业52种矿产的供应安全。总的来说,目前的研究主要考虑地质、政治、经济、贸易、环境、技术、价格这7个因素对矿产供应风险的影响,其中国家风险、生产集中度、静态储量、可替换性、对外依存度、经济重要性、副产品依赖等指标较为常见<sup>[18-23]</sup>。目前,评价体系正不断丰富和完善,已从二维评价体系发展为三维、四维评价体系,最后通过构建复合指数或者矩阵来实现关键金属供应风险评估。

然而,现有研究普遍从国家的角度泛化地评估矿产供应风险,鲜有研究聚焦战略性新兴产业,特

别是研究不同战略性新兴产业及其产品的安全受不同关键金属的影响程度。目前,仅有Nassar等<sup>[17]</sup>和Marscheider-Weidemann等<sup>[24]</sup>从美国和德国制造业的角度出发,研究不同矿产供应安全对各类制造业的影响,中国相关研究存在不足。此外,在中国关键金属供应风险评价的研究中,鲜有学者考虑到意识形态差异的影响,衡量地缘政治因素不够充分,导致关键金属供应风险的评估可能存在偏差。

本文以中国6大类战略性新兴产业及其所需的29种关键金属矿产为研究对象,区别于从国家角度的“清单”研究,从战略性新兴产业的视角构建可获得性、依赖性、承受性3个维度的评估框架,详细分析2011—2020年不同关键金属的供应风险、不同战略性新兴产业及其重要产品受关键金属影响的情况。并且在评估框架中丰富了地缘政治这一关键要素的测算方式,引入了意识形态指标,改善了评估体系中地缘政治因素衡量不充分的问题。最后,为了减少数据源多样性造成的偏差,提高研究结果的可靠性,本文采用蒙特卡罗方法对研究结果的不确定性进行了分析。

## 2 研究范围和研究方法

### 2.1 研究范围

战略性新兴产业已然成为中国同欧美等发达经济体进行地缘经济竞争的最新前沿。根据战略性新兴产业的基本概念和我国不同历史阶段对战略性新兴产业的界定,本文将战略性新兴产业归纳整理为新能源产业、新材料产业、新一代信息技术产业、高端装备制造产业、生物产业、数字创意产业6大类。从不同研究学者<sup>[25-28]</sup>的研究成果中,分析得到本文研究的29种关键金属(表1)。

### 2.2 研究方法

从战略性新兴产业的视角去评估关键金属的供应风险,需要综合风险发生的可能性、风险的影响程度和承受风险的能力3个风险因素的聚合作用,本文借鉴了Graedel等<sup>[16]</sup>搭建的包含供应能力、经济脆弱性和生态环境3个风险因素的评估框架,该评估框架在欧盟关键矿产临界性评估中得到了很好的应用。在此基础上,本文认为关键金属的供应风险可以从关键金属可获得的能力(可获得性)、国家(地区)及战略性新兴产业对其依赖的程度(依赖性)、产业与环境在开发利用过程对其的负担能

表1 战略性新兴产业所利用的关键金属种类

Table 1 Key metals used by strategic emerging industries

产品	铂族金属	钪	铌	锆	钴	镍	钽	铈	稀土金属	钛	镍	钨	钼	钒	铁	钼	钨	锰	铈	铜	铷	铝	锌	碲	铟	铅	锡	镓
新能源产业	核工业产品		●	●		●				●	●			●							●							
	永磁体				●				●	●				●														
	太阳能电池			●		●								●				●		●				●		●		●
	锂离子电池				●			●	●		●							●					●			●		
	催化剂	●		●	●			●	●				●															●
新材料产业	超导材料			●										●					●						●			
	工业化学品					●		●		●				●		●	●						●	●		●	●	
	催化剂	●		●	●			●	●				●															
	先进陶瓷					●				●																		
	合金		●	●	●				●		●											●		●	●			
	钢铁			●											●	●	●	●										
	硬质材料				●	●												●										
	光学玻璃								●											●								
新一代信息技术产业	光电管			●																	●							●
	半导体			●																●								
	光纤			●										●														
	电子产品	●	●	●		●					●	●	●		●			●		●		●			●		●	
高端装备制造业	航空航天					●	●			●	●	●			●		●			●								
	压铸					●								●									●					
	合金			●	●					●											●		●	●				
	钢铁			●							●				●	●	●	●										
	硬质材料				●	●												●										
	仪表仪器	●						●			●																	
生物产业	生物医药产品	●		●												●		●	●									●
	工业化学品					●		●		●				●		●	●						●	●		●	●	
数字创意产业	电子产品	●	●			●	●				●		●					●		●		●			●		●	

注:该表展示了6大类战略性新兴产业的产品分类,以及各类产品需求的关键金属种类。

力或承受程度(承受性)3个方面进行研究,即构成可获得性、依赖性、承受性3个维度的中国战略性新兴产业关键金属供应风险评估体系(表2)。将3个维度进行几何平均(式(1)),可得到衡量中国战略性新兴产业关键金属供应风险的公式:

$$SR = \sqrt[3]{AV \cdot DE \cdot AF} \tag{1}$$

式中:SR为关键金属的供应风险评分;AV、DE、AF分别为关键金属的可获得性、依赖性和承受性3个维度的风险评分,具体解析如下:

(1)可获得性维度。解决了2个非常重要的问题:关键金属生产国(地区)是否有意愿向中国提供矿产?提供矿产资源给中国的能力如何?

“意愿”包括生产国(地区)与中国的意识形态

的接近程度和贸易关系。意识形态与中国对立的国家(地区),更加容易将中国作为“假想敌”或者“危险的国家”,更有可能将中国排除在关键金属“流通圈”之外。贸易关系的好坏也可以从侧面说明是否更愿意给中国供应关键金属。“能力”则受生产国(地区)的矿业政策、基础设施建设情况、劳动力情况,以及全球关键金属丰度等因素的影响。若是世界范围内,一种关键金属的丰度较低、储量少,可能影响生产国(地区)的矿业政策制定,进而影响勘探开发量。生产国(地区)的基础设施建设情况和劳动力情况则直接影响关键金属开发的能力。基础设施建设更好和劳动力更充足的国家(地区),其开发能力必然更高。因此,关键金属可获得性风



2024年11月

表2 关键金属供应风险评估体系

Table 2 Key metals supply risk assessment system

维度	一级指标	二级指标	指标解释	数据来源
可获得性 $AV$	供应意愿 $SW$	贸易关系 $TT$	一个国家与中国的进出口总值占该国 GDP 的份额,反映国外与中国之间的贸易关系	联合国商品贸易统计数据库 <a href="https://comtradeplus.un.org">https://comtradeplus.un.org</a>
		意识形态 $SV$	意识形态差异越大,引发激烈竞争的可能性也越大,可能导致针对性的外交政策和贸易政策等进行博弈	世界自由度报告 <a href="http://www.freedomhouse.org">www.freedomhouse.org</a>
	供应能力 $SA$	储产比 $R/P$	资源剩余可采储量与当年产量之比,来衡量世界矿产资源可供应潜力	美国地质调查局《矿产品摘要》(2010—2021)
		政策感知指数 $PPI$	一个国家的矿业领域相关政策(如矿业监管政策)影响着资本进入矿业领域的决心,稳定且积极的矿业政策有助于矿产资源的稳定供给	弗雷泽研究所政策感知报告 <a href="http://www.fraserinstitute.org">www.fraserinstitute.org</a>
		供应集中度 $HHI$	某些关键性矿产品如果集中分布在少数国家中,那么这些国家的政治环境、贸易政策或主要矿业公司发展战略一旦发生变化,那么会较大程度关键金属的供应	美国地质调查局《矿产品摘要》(2010—2021)
		金属回收率 $MR$	矿产资源在生产加工过程中伴随废水、废料而流失的部分,如果能够进行有效的回收,则回收利用率越高,可以供应的潜力越大	文献[16]中获得
依赖性 $DE$	经济重要性 $EI$	最终价值 $UA$	关键金属在战略性新兴产业中的应用而产生的最终价值越大,产业对其更加依赖	中国统计年鉴(2010—2021) <a href="http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/">http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/</a> 与文献[26]中获得
	对外依存度 $ED$	消费量 $MC$	对外依存度越高,依赖性越高	中国统计年鉴(2010—2021)
		净进口量 $NI$		<a href="http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/">http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/</a>
承受性 $AF$	价格承受度 $PT$	价格波动 $FP$	关键金属的价格增长幅度,幅度越大,可能会导致其相关的下游产业负担过重,承受能力越弱	伦敦金属交易所 <a href="http://www.lme.com">www.lme.com</a>
	环境承受度 $ET$	环境影响指数 $EI$	关键金属全生命周期的环境影响,影响越大,国家的承受能力越弱	文献[16]中获得

注:政策感知指数( $PPI$ )由弗雷泽研究所政策感知报告<sup>[29]</sup>获得,用以衡量政府实施的矿业监管政策对矿产勘探开发投资的影响,包括矿业监管政策的不确定性、政策解释的模糊性、监管法规的实施程度、环境保护水平、税收制度、土地所有制和劳工问题等。 $PPI$ 得分越高,表示政策对吸引矿产勘探开发投资越有利。

险需要综合考虑各个国家(地区)的供应能力和供应意愿,具体计算公式如下:

$$AV_{ij} = SA_{ij,c} \cdot SW_{j,c} \quad (2)$$

式中: $AV_{ij}$ 为关键金属 $i$ 在 $j$ 年可获得性维度的风险; $SA_{ij,c}$ 和 $SW_{j,c}$ 分别为 $c$ 国的关键金属 $i$ 在 $j$ 年供应能力和 $c$ 国在 $j$ 年对中国供应关键金属的意愿; $SW_{j,c}$ 和 $SA_{ij,c}$ 的计算方式见公式(3)(4)。

$$SW_{j,c} = TT_{j,c} \cdot SV_{j,c} \quad (3)$$

式中: $SW_{j,c}$ 为 $c$ 国在 $j$ 年对中国供应关键金属的意愿; $TT_{j,c}$ 为 $c$ 国在 $j$ 年与中国的贸易关系,用 $c$ 国在 $j$ 年对中国的进出口总值与 $c$ 国在 $j$ 年的GDP总值来衡量; $SV_{j,c}$ 为 $c$ 国在 $j$ 年的世界自由指数与中国的差值。

$$SA_{ij,c} = \left( \frac{R}{P} \right)_{ij} \cdot PPI_{j,c} \cdot HHI_{ij,c} \cdot MR_i \quad (4)$$

式中: $\left( \frac{R}{P} \right)_{ij}$ 为第 $i$ 种关键金属在 $j$ 年的储产比,由世

界第 $i$ 种关键金属的资源剩余可采储量与当年产量之比来计算; $PPI_{j,c}$ 为 $c$ 国在第 $j$ 年的政策感知指数; $HHI_{ij,c}$ 为 $c$ 国在 $j$ 年第 $i$ 种关键金属的世界生产份额的平方; $MR_i$ 为第 $i$ 种关键金属的回收利用率。

(2)依赖性维度。在产业链中,上游关键金属的供应瓶颈会直接影响或潜在威胁到整个产业链体系<sup>[30,31]</sup>,进而对产业和国家(地区)经济造成严重损害。一方面,若关键金属供应能够完全依赖国内,则不会导致相关中下游产业的崩溃;另一方面,若关键金属相关的中下游产业产出价值较低,则对国家(地区)经济的影响也较低。因此,本文计算了关键金属的对外依存度 $ED$ 和经济重要性 $EI$ ,以评估国家(地区)和产业对其的依赖性。需要注意的是,经济重要性的结果是根据《中国统计年鉴(2010—2021)》的工业增加值进行计算的,但由于统计年鉴中没有准确的战略性新兴产业统计分类,因此计

算的结果是近似的。具体计算公式如下:

$$DE_{ij} = EI_{ij} \cdot ED_{ij} \quad (5)$$

式中: $DE_{ij}$ 为关键金属*i*在*j*年依赖性维度的风险; $EI_{ij}$ 和 $ED_{ij}$ 分别为中国关键金属*i*在*j*年的经济重要性和对外依存度。 $EI_{ij}$ 和 $ED_{ij}$ 的计算方式见公式(6)、(7):

$$EI_{ij} = \sum \frac{S_i V_i}{GDP_j} \quad (6)$$

式中: $S_i$ 为关键金属应用于某产业的比例, $\sum S_i = 1$ ; $V_i$ 为关键金属*i*对应的产业的工业增加值。

$$ED_{ij} = \frac{NI_{ij}}{MC_{ij}} \quad (7)$$

式中: $MC_{ij}$ 为关键金属*i*在*j*年的消费量; $NI_{ij}$ 为关键金属*i*在*j*年的净进口量,由进口量减出口量得到。

(3)承受性维度。为了评估这个维度带来的影响,从国家(地区)和产业两个角度考虑。从国家(地区)角度看,一种矿产品在全生命周期的利用,会对环境造成一定的影响,包含对水、土壤、空气的污染,消费国(地区)会优先考虑替换对环境影响大的关键金属,生产国(地区)则会考虑对其开发利用的力度<sup>[26]</sup>。从产业角度看,上游关键金属的价格波动幅度过大,可能会导致其相关的中下游产业负担过重或遭受财务危机,对产业承受价格波动的能力提出要求<sup>[32]</sup>。因此,关键金属对环境造成的影响越小,价格波动幅度越小,国家和产业的负担成本越低;反之,负担成本越高,承受性风险越高。本文采取具体

计算公式如下:

$$AF_{ij} = PT_{ij} \cdot ET_{ij} \quad (8)$$

式中: $AF_{ij}$ 为关键金属*i*在*j*年的承受性风险; $PT_{ij}$ 为关键金属*i*在*j*年的价格相比*j*-1年的价格浮动比例,本文利用生产者价格指数(*PPI*)消除通货膨胀的影响; $ET_{ij}$ 为关键金属*i*在*j*年对环境的影响情况。

### 3 结果与分析

#### 3.1 可获得性维度风险分析

在2011—2020年大宗有色金属铜、铝、锌、铅及稀有金属铷、镓、铟、碲、稀土金属的评分较低,风险处于中等或较低状态(图1)。中国的铜、铝、锌、铅储量较高,并且开发强度居世界前列。并且中国的铜主要从秘鲁与智利进口,铝主要从几内亚与澳大利亚进口,锌主要从澳大利亚、秘鲁和南非进口,铅从主要俄罗斯、美国和土耳其进口,上述国家供应能力充足,对这些关键金属的供应意愿较高,因此风险较低。但在国际环境复杂变化的情况下,大国谋求制造业回流与资源型国家谋划产业链延伸至中下游的目标使得这些关键金属的可获得性风险不断增大。铷、镓、铟、碲、稀土金属也由于国内储量较高而可获得性风险较低,但铷、稀土金属对战略性新兴产业意义重大,10年里可获得性风险也在不断上升。其中,稀土金属在2011—2020年的可获得性风险有较小的波动,这是由于2010年中国突然减少稀土出口,然而2014年WTO判中国败诉,导致前后的供应可获得性风险出现差异。

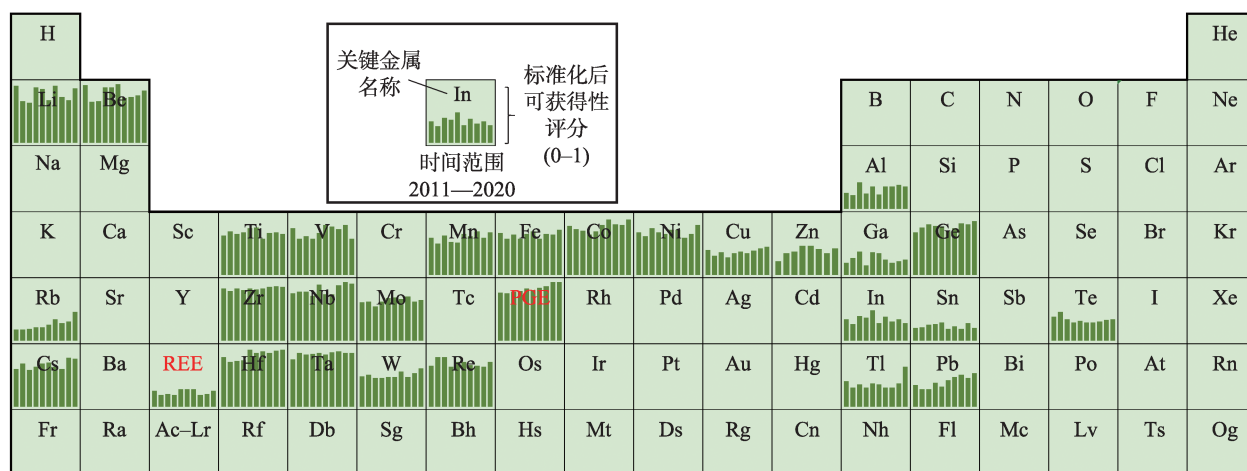


图1 2011—2020年关键金属的可获得性评分

Figure 1 Availability scores of key metals, 2011–2020

注:元素周期表元素格子中的柱状图从左至右为2011—2020年的风险分数评分,越高代表该维度风险越大。

2024年11月

大宗金属中的铁、锰和其他稀有金属的评分较高(图1)。中国虽然是铁、锰资源大国,但中国的钢铁消费量排世界第一,冶炼钢铁的主要原材料铁、锰需求旺盛。而国内铁矿石大部分品位较低,无法满足国内需求;锰矿则由于近些年中国进行环保整顿,导致大量小型矿企关闭,产量出现下滑。同时,铁、锰主要生产国澳大利亚供应意愿较低,南非港口通航能力受 COVID-19 大流行影响较大,因此 2019—2020 年铁、锰的供应可获得性风险不断增加。可获得性风险较高的稀有金属中,锂、钴、镍、铂族金属等关键金属的风险整体不断升高。其中,中国钴产量在 2016 年断崖式下跌,虽在 2019 年稍有好转,但依然处于无法满足新能源产业需求的状态,因此钴的可获得性风险先下降再升高。中国锂供应可获得性风险面临国外供应消极的挑战,虽然四川甲基卡锂矿(亚洲最大锂矿)与喜马拉雅雅琼嘉岗锂矿的勘探成果提升了国内供应能力,但加拿大、澳大利亚阻止中国相关企业对境外锂矿进行收购,同时向中国出口提取成本相对高的锂辉石,国外锂供应能力减弱。根据关键金属可获得性结果分析,关键金属供应风险高的源头是地缘政治风险和国内供应限制,开采、冶炼、加工的新技术开发及完善关键金属战略储备成为解决该问题的重要手段。

### 3.2 依赖性维度风险分析

由图 2 可知,2011—2020 年,锂、钛、钒、锰、钴、

镍、稀土金属、铌、钽 9 种关键金属的依赖性风险呈现出小幅波动的上升趋势,铝、锡呈现小幅波动的下降趋势,铍、镓整体上呈现先降后升的趋势,其他关键金属依赖性风险波动变化相对较大,没有呈现出明显的趋势。此外,除铝、碲、锡、锗 4 种关键金属外,其他关键金属在 2018—2020 年的依赖性风险存在最高点或次高点,或者依赖性风险在 3 年中逐渐上升,这可能与全球能源转型加快发展引发的全球矿产资源供需结构变化紧密相关。

铂族金属、钨、铌、钽、锆、钴、镍、铁、锰、稀土金属等具有明显的高的依赖性风险(图 2),这是由于中国近几年新能源产业、新一代信息技术产业与高端装备制造产业等的蓬勃发展与应用,铂族金属、钨、铌、钽、锆、钴、镍需求持续增加,并且因为国内供应能力的限制,其进口对外依存度一直处于高位,依赖性风险高。锗、锂、铁、锰、稀土金属的国内储量虽然在全球排名靠前,但依然具有较高的依赖性风险。其中,锂、铁受开采品位、冶炼技术的影响,国内的供应能力差,而且新能源汽车、高端装备制造产业对铁的需求保持在高位,因此未来依然依赖大量进口;锂、钴、镍、锰、铁等关键金属伴随着钴酸锂、磷酸铁锂、三元镍钴锰等锂离子电池的成熟应用,消费持续增加,对外依存度不断提高;锗、稀土金属在新能源产业、高端装备制造产业与新一代信息技术产业的大量应用,并且最终价值高,经济重要性大,依赖性风险也一直保持在高位。

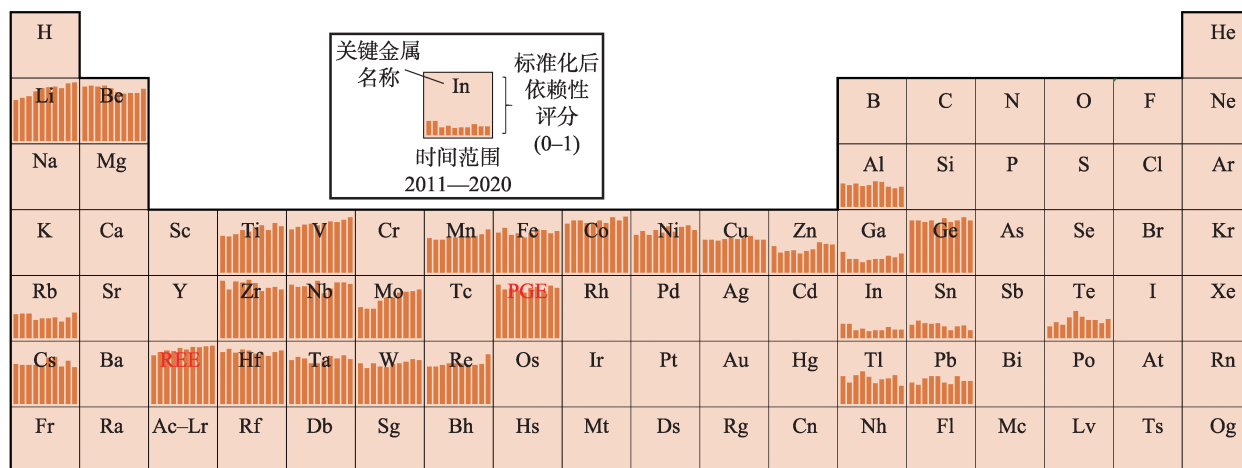


图 2 2011—2020 年关键金属的依赖性评分

Figure 2 Dependence scores of key metals, 2011–2020

注:元素周期表的小格子中从左至右为 2011—2020 年的风险分数评分,越高代表该维度风险越大。



### 3.3 承受性维度风险分析

2011—2020年,关键金属承受性风险趋势呈波浪形,其中锂、钒、钨、钼等关键金属承受性风险趋势的波浪形态波长较长、波高较小,相对其他金属变化更为平缓,呈现出小幅度的升降波动趋势(图3)。关键金属的价格总体呈现出波动上升的趋势,其所应用的产业承受风险也在不断加大。锂是一个很好的例子,2011—2020年,由全球能源革命引发的“锂”热潮,其价格在不断地攀升的同时,新能源汽车行业的承受能力在不断的下降,企业面临的压力越来越大,因此不得不与上游供应企业或是矿山企业直接签订长期购买合同,虽然这保障了上游的材料供应,但同时增加了企业的成本风险,如2023年锂价跳水导致相关企业苦不堪言。此外,中国是全球产业链的加工制造中心,在关键金属的冶炼加工领域和风电、太阳能等产品的核心构件制造领域具备成本优势,关键金属的价格波动会导致成本上升,优势逐渐缩小,产业的承受能力也将进一步下降。环境承受方面,发展中国家逐渐执行更加严格的环境标准(如中国的《关于进一步加强重金属污染防治的意见》),关键金属的开发利用也将面临更严格的环境承载力挑战,对稳定供应产生一定的消极影响。

### 3.4 供应风险分析

图4表示了2011—2020年关键金属供应风险变化情况,反映了这10年里中国战略性新兴产业关

键金属供应风险的变化趋势。可以发现:铂族金属、钨、钼、钨在2011—2020年明显具有高的供应风险,这4类元素的主要生产国集中在南非、澳大利亚、美国、巴西,世界生产份额占比较大。钴、钨、锂在2011—2014年呈现较高的供应风险,在2015—2020年呈现更高的供应风险,体现出受新能源汽车逐步推广应用的影响,锂离子电池需求上升,对关键金属的需求随之升高。铍、钽、稀土金属受中国高端装备制造产业和新一代信息技术产业等领域快速发展的影响,在10年里也具有高的供应风险。值得注意的是,钨、稀土金属作为全球较少的关键金属资源,中国的储量分别占世界的41%和80%,但是却具有较高的供应风险,这与它们在战略性新兴产业中的经济重要性紧密相关。

图5结果显示,2020年中国关键金属供应风险受不同国家的影响程度存在差异,主要受到来自美洲、非洲和大洋洲国家的影响,评估分数越高,表示造成的供应风险越大。从影响数量来看,俄罗斯、澳大利亚、美国、加拿大、巴西分别影响中国15种、14种、14种、11种、9种关键金属的供应风险。从影响程度来看,不同国家对关键金属的影响程度不同,俄罗斯虽然影响关键金属供应风险种类最多,但是影响程度并不重;而澳大利亚对钨和钨(95)、钽(87)的影响最高,美国对铍(96)的影响最高,加拿大对钨(86)的影响最高;巴西对钨(83)的影响最高。此外,还需要关注南非、智利和刚果(金)这3个

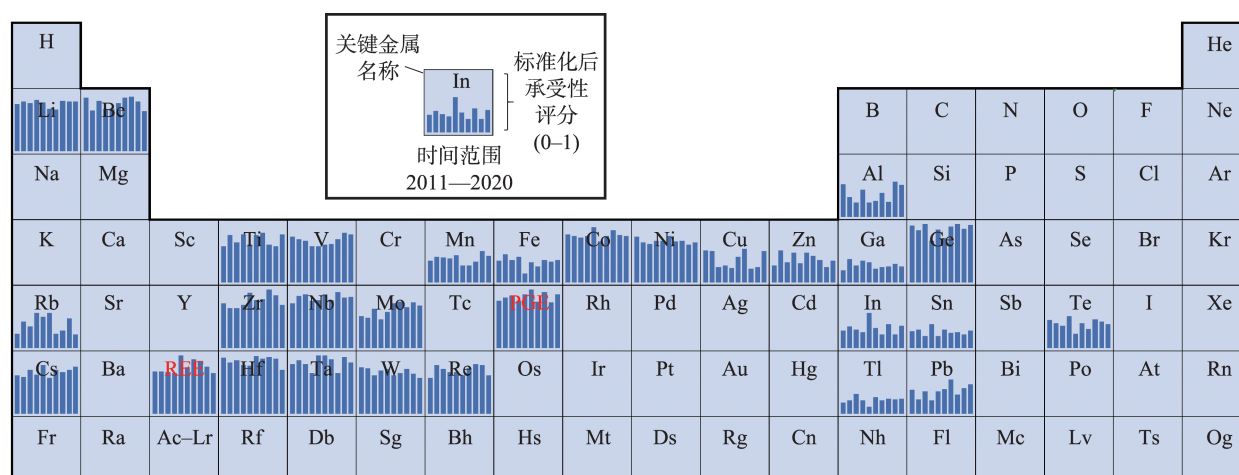


图3 2011—2020年关键金属的承受性评分

Figure 3 Affordability scores of key metals, 2011–2020

注:元素周期表的小格子中从左至右为2011—2020年的风险分数评分,越高代表该维度风险越大。

2024年11月

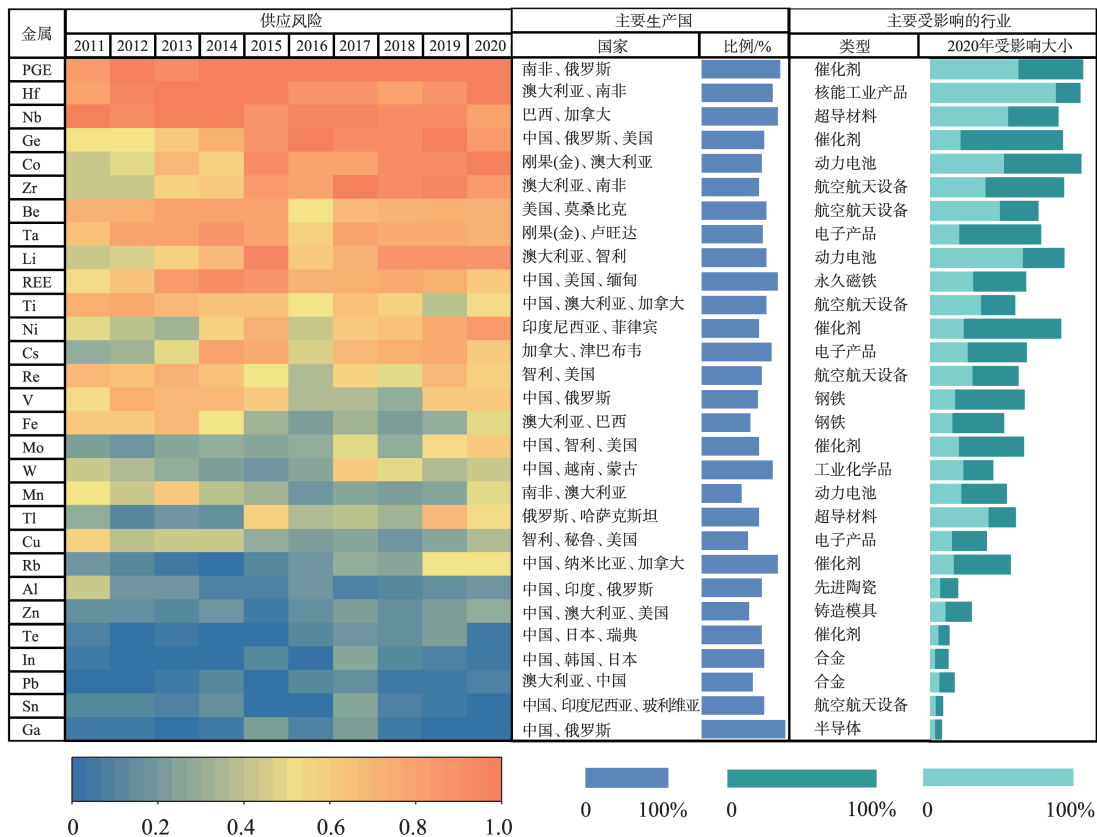


图4 2011—2020年关键金属供应风险热力图

Figure 4 Heat map of key metals supply risks, 2011–2020

注:第2列供应风险由低到高为蓝色到橙色;第3列给出了不同关键金属2011—2020年最主要的生产国及其所占世界总生产份额的比例,其生产份额显示在蓝色条中;第4列确定了各种关键金属影响最大的产品,并给出了2020年的供应风险,浅绿色条带为受影响最大的产品占比。

国家,虽然其影响中国关键金属供应风险的数量不多,但是南非对铂族金属(86)、钨(83)的影响过高,智利对铌(91)、锂(83)的影响过高,刚果(金)对钴(99)的影响最高。

图6和表3展示了2020年6大类战略性新兴产业及20种主要产品受不同关键金属供应风险的影响情况,评分越高说明受影响越大。图6中的数据显示,2020年20种主要产品受关键金属供应风险影响大的评分出现了明显的断层,评估分数为60分以下的数量很少,60分以上的数量多。本文按照20分的间隔将[80, 100]分定为影响的最高等级,[60, 80)分定为影响的次高等级。不同战略性新兴产业受到关键金属供应风险的影响存在差异,从受到最高等级和次高等级关键金属影响的数量来看,新材料、新能源、高端装备制造、新一代信息技术4大类战略性新兴产业比其他2大类受关键金属供应风险的影响程度更重。在新能源产业的主要产品中,永

磁体、催化剂、锂离子电池和太阳能电池最易受到铂族金属、钨、钼、锂供应风险的影响;新一代信息技术产业的主要产品中电子产品、光纤、半导体、光电管受钨、钼的影响大;新材料产业的主要产品中工业化学品受钨、钼的影响大;催化剂受铂族金属、钨的影响大;合金受钨影响大;硬质材料受钨的影响大。高端装备制造产业中的合金、航空航天装备、仪表仪器受钨、钼、钨、钨、钨的影响大;生物产业的主要产品受钨、钼的影响大;数字创意产业主要产品受钨、钼的影响大。由此可见,关键金属的风险评估不能一概而论,要聚焦到产业本身进行针对性研究,否则可能产生偏差。

#### 4 不确定性分析

由于数据的来源广泛,包括已发表论文中的数据、政府与非政府机构发布的数据和估算数据,在准确度、可靠度、完整度等方面存在一定的偏差,因此需要对各项维度进行不确定性分析,以提高结果



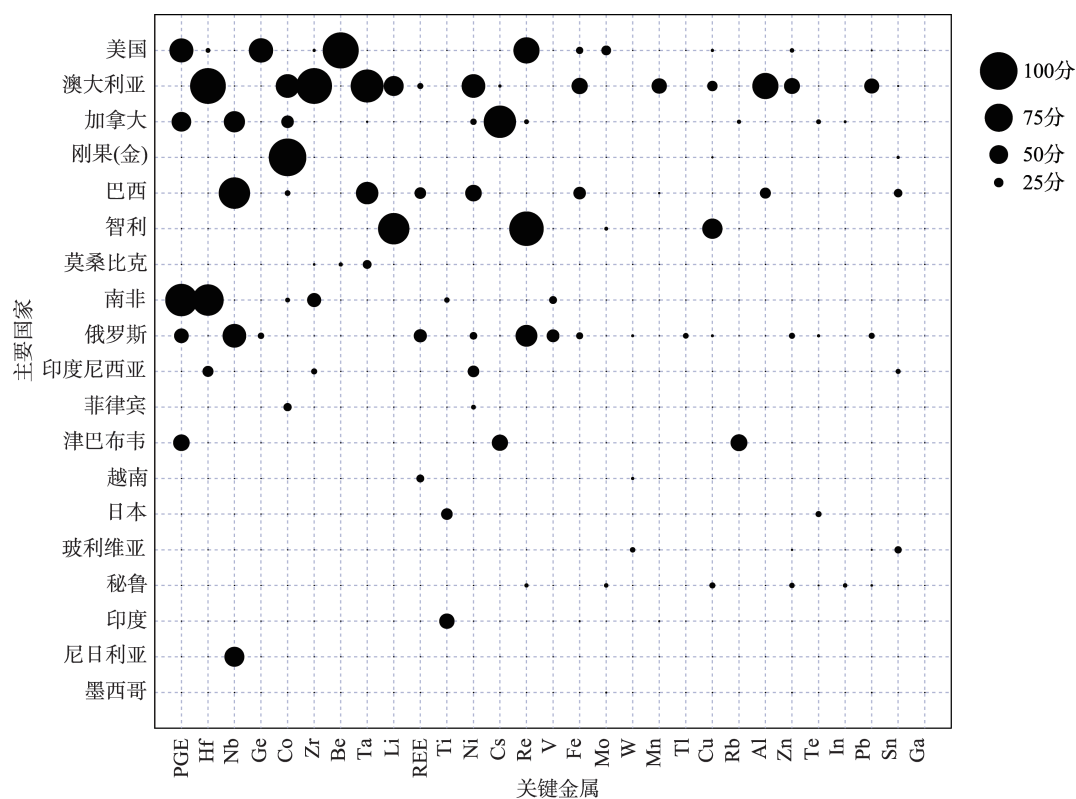


图5 2020年主要国家影响关键金属供应风险情况

Figure 5 Key countries affecting key metals supply risks in 2020

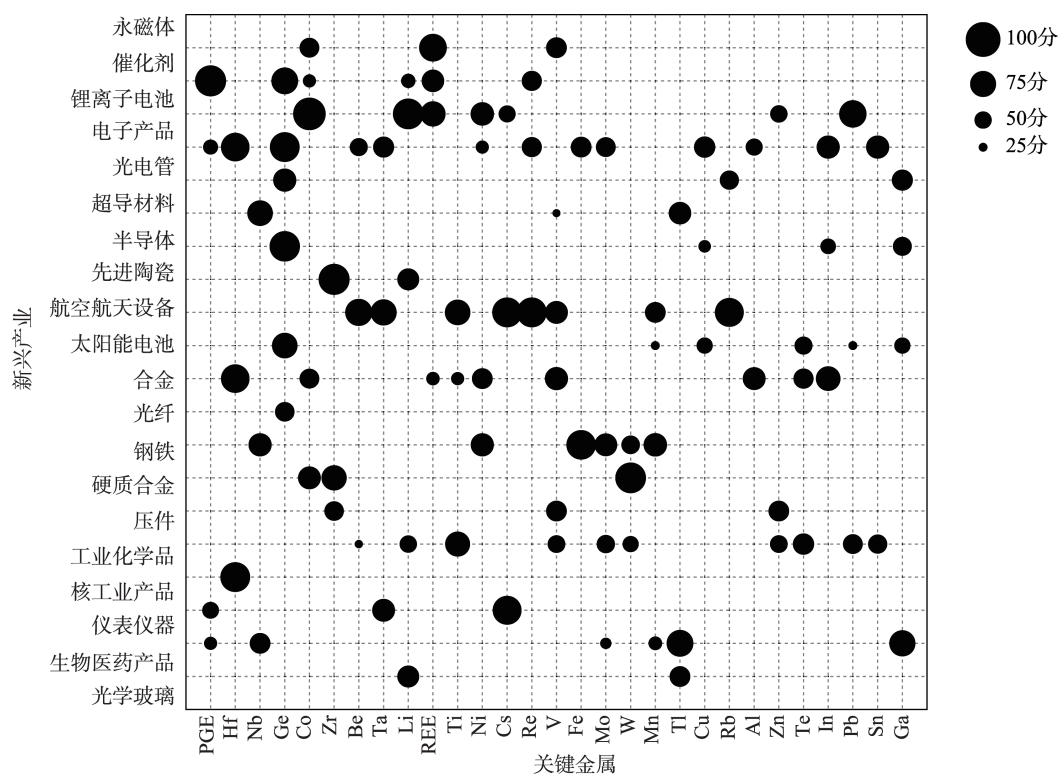


图6 2020年关键金属对战略性新兴产业20种主要产品影响程度

Figure 6 The impact of key metals on 20 major products of strategic emerging industries in 2020

表3 2020年关键金属影响战略性新兴产业情况

Table 3 The impact of key metals on strategic emerging industries in 2020		
战略性新兴产业	[80, 100]分	[60, 80)分
新能源产业	铂族金属、锗、钴、锂、稀土金属、铅	镍、铌、钒
新一代信息技术产业	锗、钨	钽、铈、铁、钼、铜、锡、镓
新材料产业	铂族金属、钨、锗、钼、铁、钨	铈、钴、锂、稀土金属、镍、铈、钼、锰、铈、铝、碲、铜、铅
高端装备制造产业	钨、铍、铈、铈、铁、钨、钨	钴、钨、钽、钨、镍、钒、钼、锰、铝、锌、碲、铜
生物产业	铈	铈、钨、碲、钨、镓
数字创意产业	钨、锗	钽、铈、铁、钼、铜、锡

的稳健性。

本文借鉴 Graedel 等<sup>[16]</sup>和 Nassar 等<sup>[17]</sup>提出的不确定性分析思路:第一步,设置可靠性、完整性、相关性、精度和准确性 5 个维度,根据二级指标的数据来源、精度、准确程度等分为 3 个等级,每个等级设置不同的误差倍数,得到二级指标的误差倍数,进而得到可获得性、依赖性、承受性 3 个维度的误差倍数。第二步,分别计算出可获得性、依赖性、承受性维度的基准标准差。鉴于各种稀有金属的各项数据差异较大,采用对数化处理得到平稳的基准标准差。第三步,将可获得性、依赖性、承受性 3 个维度的误差倍数与其基准标准差相乘,计算出各种关键金属修正后的标准差。

在上述数据处理的基础上,进行蒙特卡洛模拟,测算结果的不确定性。假定可获得性、依赖性、承受性维度的数据均服从对数正态分布,95% 置信区间,通过 5000 次迭代测算结果的变化范围。

图 7 为 2020 年新能源产业所需部分关键金属的不确定性分析结果,包含稀土金属、铂族金属、锂、钴、镍。可获得性维度的不确定性大于依赖性和承受性维度,出现这一结果的原因是,可获得性维度的指标种类多,来源主要有多项政府、非政府机构发布的报告,在搜集和研究的过程中,部分指标数据未被完整的考虑到,而依赖性和承受性维度的数据来源被多篇论文使用,其可靠性和准确性更高。比较图中关键金属的不确定性分析结果,发现 5 种关键金属的“不确定性分布云”基本没有出现其中一朵“云”大面积覆盖另一朵“云”的情况。根据蒙特卡洛模拟的原理,出现这样的情况可以认为,在考虑了数据源来源、精度、准确度不一的情况,本文对中国战略性新兴产业关键金属风险评估的结果依然成立。

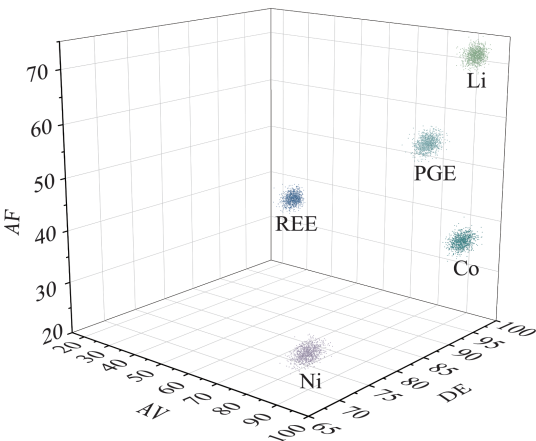


图7 2020年稀土金属、铂族金属、锂、钴、镍供应风险不确定性分布图

Figure 7 Supply risk uncertainty distribution of REE, PGE, Li, Co, and Ni in 2020

5 结论与政策建议

5.1 结论

本文通过搭建风险评估框架对中国 2011—2020 年关键金属的供应风险进行评估,分析了不同战略性新兴产业及其产品的安全受不同关键金属的影响程度,以及不同国家对中国的影响。具体如下:

(1)关键金属在战略性新兴产业中一直处于重要地位,在 2011—2020 年供应风险处于高风险的水平,如铂族金属、钨、铈、钨在这 10 年中供应风险非常高,铍、钽、稀土金属则具有较高的供应风险;随着热点产业、技术发展的变化,部分关键金属成为战略性新兴产业的核心需求,供应风险出现转折,如钴、钨、锂在 2011—2014 年供应风险相对较低,在 2015—2020 年供应风险持续升高;其他关键金属在战略性新兴产业中处于需求的边缘地位,在 10 年中供应风险呈现小范围的波动特征。

(2)澳大利亚、俄罗斯、巴西、美国、刚果(金)、智利、加拿大等国对中国战略性新兴产业关键金属影响程度高。这些国家是关键金属的主要生产国或主要需求国,即战略性新兴产业产业链供应链的重要节点国家。主要生产国中,由于资源禀赋的不同,南非、刚果(金)对少数关键金属的供应风险影响特别高,澳大利亚、俄罗斯、巴西则影响10多种关键金属。主要需求国中,澳大利亚、俄罗斯和美国影响了10多种关键金属种类,并且与中国存在竞争关系,其供应意愿也相对较低。

(3)2011—2020年6大类战略性新兴产业安全受铂族金属、钨、钼等关键金属供应的影响较大。其中,新材料、新能源、高端装备制造、新一代信息技术4大类战略性新兴产业受关键金属供应影响较大,特别是催化剂、永磁体、锂离子电池、航空航天设备、电子产品最易受铂族金属、钨、钼、钴等关键金属的影响。此外,一些总体影响较小的关键金属会对少数产品造成大的影响,如镓对生物医药产品、半导体、光电管的影响较大,铅对锂离子电池的影响较大,铷对航空航天设备的影响较大,铽对生物医药、超导材料、光学玻璃的影响较大等等。

## 5.2 政策建议

在大国博弈愈发激烈的背景下,关键金属的供应与管理显得尤为重要。为应对潜在的供应风险,必须建立健全的进出口管控机制,细化相关数据的调查统计,同时强化风控机制与预警平台,推动基础科学与材料科学的创新研究。这一系列措施将为中国关键金属供应和战略性新兴产业的发展提供强有力的支持与保障。

(1)健全关键金属进出口管控机制,细化相关数据的调查统计。从整体上,应对铂族金属、钨、钼、钴、钨、钼、锂、铍、钽、稀土金属等10种可能长期处于高供应风险并对战略性新兴产业发展影响大的关键金属实行严格的红线管控制度;从细节上,也要对镓、铷、铅、铽等对少数重要产品影响大的关键金属实行严格的红线管控制度。此外,还应通过委托、合作等方式,授权大型矿企对关键金属的进出口情况与国内不同产业利用情况进行调查统计,摸清家底,利于关键金属的流通管理。

(2)建立和完善关键金属风控机制,搭建预警平台。关键金属的供需情况是影响供应风险的重

要标志,应及时收集澳大利亚、俄罗斯、巴西、美国、刚果(金)、智利、加拿大等对中国关键金属供应影响突出的国家的自然灾害、矿业政策、贸易政策等信息,及时识别可能发生的风险。同时,从战略性新兴产业的角度建立关键金属与战略性新兴产业的耦合系统,搭建产业链、供应链风险预警平台,识别大国博弈背景下各类突发风险的挑战。

(3)强化基础科学及材料科学的创新研究,掌握前沿技术、材料最新发展动态。热点产业、技术发展的变化能够改变关键金属的利用体系,因此要持续推进“政产学研”合作,搭建高校、科研院所与企业的沟通桥梁,加强前沿技术突破,围绕替代金属、降低污染等方向进行创新,可以减少其他国家供应中断造成的威胁。

(4)加强国内开发与国外供应保障力度。关键金属是不可再生资源,针对供应风险高的关键金属,一要加大勘探投入,加强勘探力度,在可开发条件下降低开采成本、提升矿山产能;二要颁布关键金属回收激励政策,通过建立相应的个人回收机制和企业回收激励政策来推动关键金属的国内循环;三要推动共建“一带一路”高质量发展、加快推进矿企走出去战略,培养并输送矿产国际管理人才,提升中国话语权和治理能力。

## 参考文献(References):

- [1] 王安建,王春辉.国际动荡局势对我国能源资源安全的挑战与应对策略[J].中国科学院院刊,2023,38(1):72-80.[Wang A J, Wang C H. Challenges of international turmoil situation to China's energy resource security and coping strategies[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 72-80.]
- [2] 吴巧生,周娜,成金华.战略性关键矿产资源供给安全研究综述与展望[J].资源科学,2020,42(8):1439-1451.[Wu Q S, Zhou N, Cheng J H. A review and prospects of the supply security of strategic key minerals[J]. Resources Science, 2019, 42(8): 1439-1451.]
- [3] 王安建,高蕊蕊.中国能源与重要矿产资源需求展望[J].中国科学院院刊,2020,35(3):338-344.[Wang A J, Gao X R. China's energy and important mineral resources demand perspective[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2019, 35(3): 338-344.]
- [4] IEA. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions[R/OL]. (2021-05) [2024-05-07]. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.
- [5] IEA. World Energy Outlook 2021[R/OL]. (2021-10-11) [2024-05-07]. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3->



2024年11月

- 4fd9-acae-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf
- [6] 王永中. 资源国关键矿产博弈的新动向及可能影响[J]. 人民论坛, 2022, (15): 90-95. [Wang Y Z. New trends and potential impacts of the game of key mineral resources in resource countries [J]. People's Tribune, 2022, (15): 90-95.]
  - [7] Christoph H, Dieuwertje S, Alessandra H. Selecting and prioritizing material resources by criticality assessments[J]. One Earth, 2021, 4(3): 339-345.
  - [8] Li J S, Peng K, Wang P, et al. Critical rare-earth elements mismatch global wind-power ambitions[J]. One Earth, 2020, 3(1): 116-125.
  - [9] 陈伟强, 汪鹏, 钟维琼. 支撑“双碳”目标的关键金属供应挑战与保障对策[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(11): 1577-1585. [Chen W Q, Wang P, Zong W Q. Challenges and security strategies of China's critical metals supply for carbon neutrality pledge[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(11): 1577-1585.]
  - [10] 赵荣, 汪鹏, 王路, 等. 美国关键矿产战略的演化特征及启示[J]. 科技导报, 2022, 40(8): 91-103. [Zhao S, Wang P, Wang L, et al. Evolution of the US strategy for critical minerals strategy and the implications[J]. Science and Technology Review, 2022, 40(8): 91-103.]
  - [11] 解孟璇, 刘大海, 王春娟. 美国稀土资源需求及其战略政策推进与布局分析[J]. 中国软科学, 2021, (S1): 36-45. [Xie M X, Liu D H, Wang C J. Analysis of U.S. rare earth resources demand and strategic layout[J]. China Soft Science, 2021, (S1): 36-45.]
  - [12] 安海忠, 李华姣. 战略性矿产资源全产业链理论和研究前沿[J]. 资源与产业, 2022, 24(1): 8-14. [An H Z, Li H J. Theory and research advances in whole industrial chain of strategic mineral resources[J]. Resources & Industries, 2022, 24(1): 8-14.]
  - [13] National Research Council. Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy[R]. Washington, DC: The National Academies Press, 2008.
  - [14] European Commission. Critical Raw Materials for the EU[R/OL]. (2010-07-30) [2024-05-07]. [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/documents/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/documents/index_en.htm).
  - [15] Rosenau-Tornow D, Buchholz P, Riemann A, et al. Assessing the long-term supply risks for mineral raw materials: A combined evaluation of past and future trends[J]. Resources Policy, 2009, 34(4): 161-175.
  - [16] Graedel T E, Barr R, Chandler C, et al. Methodology of metal criticality determination[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(2): 1063-1070.
  - [17] Nassar N T, Brainard J, Gulley A, et al. Evaluating the mineral commodity supply risk of the US manufacturing sector[J]. Science Advances, 2020, DOI: 10.1126/sciadv.aay8647.
  - [18] Srivastava N. Trade in critical minerals: Revisiting the legal regime in times of energy transition[J]. Resources Policy, 2023, DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.103491.
  - [19] Liu S, Liu W, Tan Q Y, et al. The impact of China's import ban on global copper scrap flow network and the domestic copper sustainability[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105525.
  - [20] Ryter J, Fu X K, Bhuwalka K, et al. Emission impacts of China's solid waste import ban and COVID-19 in the copper supply chain[J]. Nature Communications, 2021, DOI: 10.1038/s41467-021-23874-7.
  - [21] Carvalho V M, Nirei M, Saito Y, et al. Supply chain disruptions: Evidence from the great east Japan earthquake[J]. Quarterly Journal of Economics, 2021, DOI: 10.1093/qje/qjaa044.
  - [22] Cheng S X, Shu C, Jin M L, et al. Balancing resources and sustainability: Analyzing the impact of mineral resources utilization on green growth[J]. Resources Policy, 2023, DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.104143.
  - [23] Daly A, Humphreys D, Raffo J D, et al. Global Challenges for Innovation in Mining Industries[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
  - [24] Marscheider-Weidemann F, Langkau S, Eberling E, et al. Raw Materials for Emerging Technologies 2021[M]. Berlin: DERA Rohstoffinformationen, 2021.
  - [25] Christmann P, Lefebvre G. Trends in global mineral and metal criticality: The need for technological foresight[J]. Mineral Economics, 2022, DOI: 10.1007/s13563-022-00323-5.
  - [26] Yan W Y, Wang Z L, Cao H B, et al. Criticality assessment of metal resources in China[J]. IScience, 2021, DOI: 10.1016/j.isci.2021.102524.
  - [27] 鞠建华, 张照志, 潘昭帅, 等. 我国战略性新兴产业矿产厘定与“十四五”需求分析[J]. 中国矿业, 2022, 31(9): 1-11. [Ju J H, Zhang Z Z, Pan Z S, et al. Determination of mineral resources in China's strategic emerging industries and demand analysis of the 14th Five-Year Plan[J]. China Mining Industry, 2022, 31(9): 1-11.]
  - [28] 成金华, 易佳慧, 吴巧生. 碳中和, 战略性新兴产业发展与关键矿产管理[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 135-142. [Cheng J H, Yi J H, Wu Q S. Carbon neutrality, strategic emerging industry development and critical mineral management [J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(9): 135-142.]
  - [29] Fraser Institute. Fraser Institute Annual Survey of Mining Companies 2020[R/OL]. (2021-02-23) [2024-05-07]. <https://www.fraserinstitute.org/sites/default/files/annual-survey-of-mining-companies-2020.pdf>.
  - [30] 韩世通, 李华姣. 矿产资源供应风险研究进展和前沿[J]. 资源科学, 2023, 45(9): 1723-1745. [Han S T, Li H J. Research progress and frontiers of mineral resources supply risk[J]. Resources Science, 2023, 45(9): 1723-1745.]
  - [31] 张宇祺, 李华姣, 安海忠, 等. 产业链视角下关键矿产资源可供性研究进展[J]. 资源科学, 2024, 46(4): 671-686. [Zhang Y Q, Li H J, An H Z, et al. Progress and frontiers of critical mineral resource availability research based on the perspective of industry chain[J]. Resources Science, 2024, 46(4): 671-686.]
  - [32] Yu S W, Duan H R, Cheng J H. An evaluation of the supply risk for China's strategic metallic mineral resources[J]. Resources Policy, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101891.

## Assessment of key metals supply risk in China's strategic emerging industries

SUN Han<sup>1,2</sup>, WANG Xiaoxue<sup>1</sup>, YANG Xiaohui<sup>1</sup>, CHENG Jinhua<sup>1,2</sup>

(1. School of Economics and Management, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. Research Center of Resources and Environmental Economics, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** **[Objective]** The increasingly complex and volatile international environment aggravates the instability of the global key metal supply chain. Assessing the key metal supply risks of strategic emerging industries provides an important reference for national resource security, the stable development of emerging industries and the prevention and control of exogenous risks. **[Methods]** This study took six major strategic emerging industries in China and 29 key metal minerals required as the research object, constructed a key metal supply risk assessment system for strategic emerging industries from three dimensions of availability, dependence, and affordability, and analyzed the supply risks of different key metals and their impact by major countries during 2011–2020, as well as the extent to which major products of strategic emerging industries are affected. **[Results]** (1) From 2011 to 2020, the supply risk of platinum group metals, hafnium and niobium is particularly prominent, and the supply risk of key metals such as nickel, cobalt, zirconium and lithium changes with the change of hot industries, and gradually increases in the later period; (2) Russia, Australia, the United States, Canada, Brazil affect the supply risk of more than 10 key metals in China, while South Africa, Chile and the Democratic Republic of the Congo (DRC) affect the number of key metals is relatively small, but the impact is particularly high; (3) New materials, new energy, high-end equipment manufacturing, new generation of information technology four categories of strategic emerging industries are relatively vulnerable, especially catalysts, permanent magnets, lithium-ion batteries, aerospace equipment, electronic products are vulnerable to platinum group metals, hafnium, germanium, cobalt and other key metals. (4) Gallium, lead, rubidium, thallium and other key metals with small overall impact will have a greater impact on a few products, which is worth paying attention to. **[Conclusion]** With the increasing instability of the global supply chain of key metals, strengthening import and export control, refining data statistics, improving risk control mechanisms, building early warning platforms, strengthening technological innovation, and innovating resource utilization systems have enlightening significance and practical value for preventing and resolving exogenous risks and ensuring resource security and industrial security.

**Key words:** key metals; supply risk; risk assessment; strategic emerging industries; industrial safety