

引用格式:周美静,王甫园,邵留国.中国境外国家(地区)稀土供应链韧性评估:以钕铁硼永磁体为例[J].资源科学,2023,45(9):1746-1760.[Zhou M J, Wang F Y, Shao L G. Resilience evaluation of the rare earth supply chain in countries (regions) outside China: A case study of NdFeB permanent magnet[J]. Resources Science, 2023, 45(9): 1746-1760.] DOI: 10.18402/resci.2023.09.04

中国境外国家(地区)稀土供应链韧性评估 ——以钕铁硼永磁体为例

周美静^{1,2},王甫园^{3,4},邵留国^{5,6}

(1. 北京石油化工学院人文社科学院,北京 102617;2. 北京市安全生产工程技术研究院,北京 102617;3. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101;4. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室,北京 100101;5. 中南大学商学院,长沙 410083;6. 中南大学金属资源战略研究院,长沙 410083)

摘要:【目的】稀土是广泛应用于国防军工、清洁能源技术等战略性行业的关键矿产。中美经贸摩擦和新冠肺炎疫情的爆发加速了全球稀土供应链重构进程,使得中国稀土产业的全球供应链地位受到挑战。在此背景下,本文旨在基于供应链韧性视角探究境外国家(地区)稀土供应链韧性的演变过程和趋势,并据此提出中国的应对策略。【方法】本文构建了一套稀土供应链韧性评估指标体系,包括敏捷性、稳健性和依赖度3个维度;并以钕铁硼永磁体为例,综合运用事件序列分析、半结构化访谈、网络仿真等方法评估了境外国家(地区)的稀土供应链韧性。【结果】①“稀土危机”之后,境外国家(地区)的稀土供应链敏捷性得到较大幅度提升,包括稀土新矿开采量增加、回收率提升、替代量和重稀土应用量减少等;②境外国家(地区)的稀土供应链稳健性整体上出现下降,境外国家(地区)对中国稀土产品的进口依赖度呈现从中上游往下游转移的趋势;③总体而言,虽然中国出口仍然是影响境外国家(地区)的稀土供应链稳健性的关键因素,但是其影响力度有下降的趋势。【结论】中国应当在持续推动稀土技术自主创新的基础上,通过深度嵌入全球稀土供应链网络等方式参与全球稀土供应链治理。同时,中国应当模拟境外国家(地区)与中国稀土供应链脱钩的可能情景,尽早制定国际博弈与合作方案。

关键词:供应链韧性;稀土;钕铁硼永磁体;中国

DOI: 10.18402/resci.2023.09.04

1 引言

稀土被称为“工业的维生素”“现代化的氧气”和“新材料之母”。碳达峰和碳中和目标的设定推动全球各国能源使用由化石能源向清洁能源转变。作为风力涡轮机、新能源汽车等清洁能源技术的原材料,稀土因此成为全球各国激烈争夺的关键矿产^[1-5]。中国目前虽然是全球最大的稀土储量国、生产国和出口国,但中国稀土供应链并不具备全球垄断优势。全球稀土供应链在2010年“稀土危机”

期间表现出较强韧性^[6],且在“稀土危机”之后有所强化。近些年,中国稀土的全球市场份额持续下降,全球稀土矿储量和产量均呈现出多元化分布趋势^[7]。美国等西方国家高度重视稀土供应安全^[8-11],正在试图整合全球资源,构建独立于中国的稀土产业联盟和完整的稀土供应链,以此与中国形成抗衡^[12],为全方位压制中国崛起增添筹码。如果这一目标实现,不仅将严重威胁中国在全球稀土供应链中的地位,削弱中国与全球高技术产业链供应链

收稿日期:2023-04-18;修订日期:2023-07-20

基金项目:中国博士后科学基金第73批面上资助项目(2023M730310);北京市博士后科研活动经费资助项目(23000031002);国家社会科学基金重大项目(22&ZD098)。

作者简介:周美静,女,湖南衡山人,博士后,研究方向为资源与环境经济学、旅游地理。E-mail: 0620221002@bupt.edu.cn

通讯作者:王甫园,男,湖南新化人,副研究员,研究方向为区域发展。E-mail: wangfy@igsnnr.ac.cn

2023年9月

的国际联系,还将使中国在中美博弈中失去一个有效的制衡筹码。在此背景下,中国亟需科学评估境外国家(地区)的稀土供应链韧性,并据此制定有效的应对措施。

韧性最初是物理学韧性力学里的概念,指物体因外力发生形变后,在大小和形状方面恢复原样的属性。韧性概念已被广泛应用于组织、社交、经济、工程等多个领域。其中,供应链韧性被界定为供应链系统面对扰动保持正常运转,并从扰动中快速复原的能力^[13]。供应链韧性包括企业层面的供应链韧性和产业层面的供应链韧性,前者侧重于单个企业,后者涵盖一个国家(地区)的产业链条。企业供应链韧性评估包括定性和定量两类方法,定性方法有概念框架性研究和基于专家评估的半定量指数,定量评估包括一般性测量(概率方法和确定性方法)和结构化模型。但是,定量评估供应链韧性的文献较少,主要通过估算有韧性和无韧性时的产量差异^[14]、遭遇扰动后系统指标的变化^[15],以及扰动期间的损失^[16]等方法进行评估。另有学者运用贝叶斯网络模型模拟了供应链中断的概率分布及其引发的涟漪效应^[17]。Sprecher等^[18]提出了材料供应链韧性(Material Supply Chain Resilience)概念,并指出抵抗性、快速性和灵活性是韧性的三大内核,其中,抵抗性是指系统能够承受各种类型的干扰而不会遭受不可接受的功能损失,快速性是指系统被干扰后在短时间内快速恢复的能力,灵活性是指系统通过在不同(替代)子系统之间进行切换来满足扰动下的供应需求。Sprecher等^[6]聚焦供应链韧性的恢复速度(快速性),从响应时间、响应速度和最大响应速度3个方面量化了开采新矿、回收、替代、储备等供应链韧性机制对恢复稀土供应链韧性的作用。

现有研究对供应链韧性进行了探究,但还存在以下3个方面的不足:①已有成果主要从企业尺度对供应链韧性进行了理论分析和实证检验,缺乏产业层面的供应链韧性探索;②已有稀土供应链韧性研究着重剖析了全球稀土供应链的恢复速度,但缺乏对供应链稳健性等维度的定量测度,不能全面揭露稀土供应链韧性的内涵;③已有文献主要以2010年“稀土危机”为分析案例,缺乏对中美经贸摩擦、新冠肺炎疫情、全球供应链重构等新背景下的稀土供应链韧性的动态剖析,难以给中国稀土管理政策

制定提供准确的参考。此外,稀土永磁体是稀土元素(以氧化物计)消费量最大和应用价值最高的稀土功能材料,其在2019年的消费量占比和 market value 占比分别为29%和79%^[19]。中国是全球最大的稀土永磁体制造商,2018年的产量占到全球总产量的85%^[20]。稀土永磁体主要包括钕铁硼永磁体和钐铁硼永磁体,其中,钕铁硼永磁体主要在军工业当中少量使用,2017年的全球产量仅占稀土永磁体总产量的1.3%^[21],而钐铁硼永磁体在电动汽车、风力涡轮机等清洁能源技术的高性能电机中有重要用途。鉴于其重要价值和中国较高的市场份额,钐铁硼永磁体成为境外国家(地区)稀土供应链韧性提升的主要对象。美国2021年的“供应链100天审查”和“232”调查均针对钐铁硼永磁体展开。基于以上分析,本文拟构建产业层面的供应链韧性评估方案,并以钐铁硼永磁体为例,从多个维度全面评估“稀土危机”以来境外国家(地区)稀土供应链韧性的演变历程,为提升中国稀土供应链的全球竞争优势和大国博弈制衡能力提供理论参考。

2 评估方案

2.1 评估指标体系

本文基于供应链韧性的核心构成,选取敏捷性、稳健性、进口依赖度3个维度对稀土供应链韧性进行评估。其中,敏捷性反映稀土供应链从供应扰动或中断中恢复的速度和效果,稳健性反映稀土供应链抵抗供应扰动或中断的能力,依赖度则指中国境外国家(地区)转换稀土供应渠道的能力。由于目前没有研究针对稀土供应链韧性制定系统的评估指标体系,本文首先借鉴Sprecher等^[6]和Mancheri等^[22]的研究成果,结合钐铁硼永磁体供应链特征,将稀土供应链韧性机制分为开采新矿、新增稀土分离产量、新增稀土冶炼产量、新增钐铁硼永磁体产量、回收、替代、重稀土减量化使用、储备8种,并分别从响应时间、响应速度和最大响应速度3个方面评估中国境外国家(地区)稀土供应链的敏捷性。其次,借鉴彭澎等^[23]的研究,采用网络破碎度指标计算删除中国节点以后,稀土国际贸易网络稳健性的变化;参考Wang等^[24]和Sun等^[25]的研究,采用级联失效模型(Cascade Failure Model)仿真删除中国节点以后全球稀土贸易网络的雪崩规模,以此反映境外国家(地区)稀土供应链的稳健性。最后,借鉴经济

学的进口依赖度概念,采用境外国家(地区)对中国稀土产品的进口依赖度衡量境外国家(地区)转换稀土供应渠道的能力,进而反映境外国家(地区)稀土供应链对中国的依赖度。

2.2 评估方法

2.2.1 事件序列分析

事件序列分析(Event Sequence Analysis, ESA)是一种对社会过程进行纵向研究的实证方法,它能更好地把握系统的时间维度,以确定事件随着时间推移的发展情况。境外国家(地区)在“稀土危机”以后便实施了系列稀土供应链韧性提升策略。然而,由于缺乏规范、系统的数据,传统的分析方法难以准确量化各种措施的效果。ESA方法通过定性追踪事件发展序列来克服数据的局限性。本文通过二手资料搜集、实地调研和访谈获取境外国家(地区)稀土供应链事件的纵向数据,按照稀土供应链韧性机制,将事件进行分组编码,并基于叙事分析方法对事件进行分析。

2.2.2 半结构化访谈

半结构化访谈是基于粗线条提纲展开的非正式访谈,注重通过适当的提问和引导去探索 and 发现访谈对象对某个问题的观点。本文拟通过半结构化访谈获取境外国家(地区)稀土供应链敏捷性的评估数据和资料,具体目的为2个:①对搜索的境外国家(地区)稀土供应链韧性事件资料进行确认和补充;②明确稀土技术进展的细节和参数,包括回收、替代、重稀土减量化使用等。因此,本文邀请稀土行业管理者对境外国家(地区)稀土供应链韧性事件进行详细描述,同时通过访谈稀土领域的技术专家和学者,获得他们对于稀土技术进展的看法。具体而言,首先,基于已有文献和访谈目的初步制定中英文版本的访谈提纲;其次,分别邀请2名境内和2名境外国家(地区)的教授对提纲提出修改意见和建议;再次,分别邀请5名境内和5名境外国家(地区)的教授进行预访谈,根据访谈过程、访谈效果,以及被访谈者的意见对访谈提纲进行二次修改,形成最终的访谈提纲;最后,运用最终版本的访谈提纲,本文研究团队于2021年10—12月期间,对中国的4名稀土企业高管、6名科研院所专家、1名协会管理人员、1名政府官员进行访谈,对境外国家(地区)的4名稀土企业高管、6名科研院所专家、1

名协会管理人员、1名政府官员进行访谈。

2.2.3 网络仿真

本文运用Python编程软件对稀土化合物(HS2846)、稀土金属及合金(HS280530)、金属永磁体(HS850511)的全球贸易网络发起蓄意攻击,以检验删除中国节点及其连接的边之后,网络破碎度的变化,从而在贸易结构层面反映境外国家(地区)稀土供应链稳健性。此外,本文使用级联失效模型,模拟当删除中国节点产生的冲击量超过贸易国家(地区)最大承受量之后,全球稀土贸易危机的传播过程和网络雪崩规模,从而在贸易量层面检验境外国家(地区)稀土供应链稳健性。在一个贸易网络中,级联失效过程模型如图1所示。贸易国家(地区) i 失效后(图1b),成为危机传染的起点,它对其他国家(地区)的贸易量均减少 α 比例,贸易国家(地区) k 和 j 的进口量相应减少 α 比例;当减少量 Δe_k 超过 k 的最大承载比例 β ,贸易国家(地区) k 将失效(图1c),成为新一轮危机传播的源头,它对其他国家(地区)的出口也减少 α 比例;当 i 和 k 对 j 出口减少的累积量超过 j 的最大承载比例 β ,贸易国家(地区) j 将失效(图1d),成为危机传播的源头;危机传染将持续进行,直到网络中不再出现新的失效国家(地区),传染结束后的失效国家(地区)数量即为网络雪崩规模(Avalanche Size)。雪崩规模能够反映传染源国家(地区)的危机影响力度,也可以在贸易关系层面上揭示贸易网络的稳健性。鉴于本文旨在探讨中国境外国家(地区)的稀土供应链韧性,级联失效比例 α 设置为100%, β 则分别设置为 α 的1/2、1/4和1/8,即50%、25%和12.5%。

2.3 评估标准

借鉴已有研究成果,本文界定每个评估指标的计算公式及评估标准。其中,响应时间、响应速度、最大响应速度的公式参考Sprecher等^[6]的研究,网络破碎度的公式参考彭澎等^[23]的研究,雪崩规模的公式借鉴Wang等^[24]和Sun等^[25]的研究,稀土进口依赖度的公式基于进口依赖度的公式进行改写。

响应时间为每种措施从开始实行到最终起到实效的时间,如开采稀土新矿从投资勘探到实际产出的时间。响应时间以年为单位,时间越长,表示韧性越小(式(1))。

$$RT = T_1 - T_0 \quad (1)$$

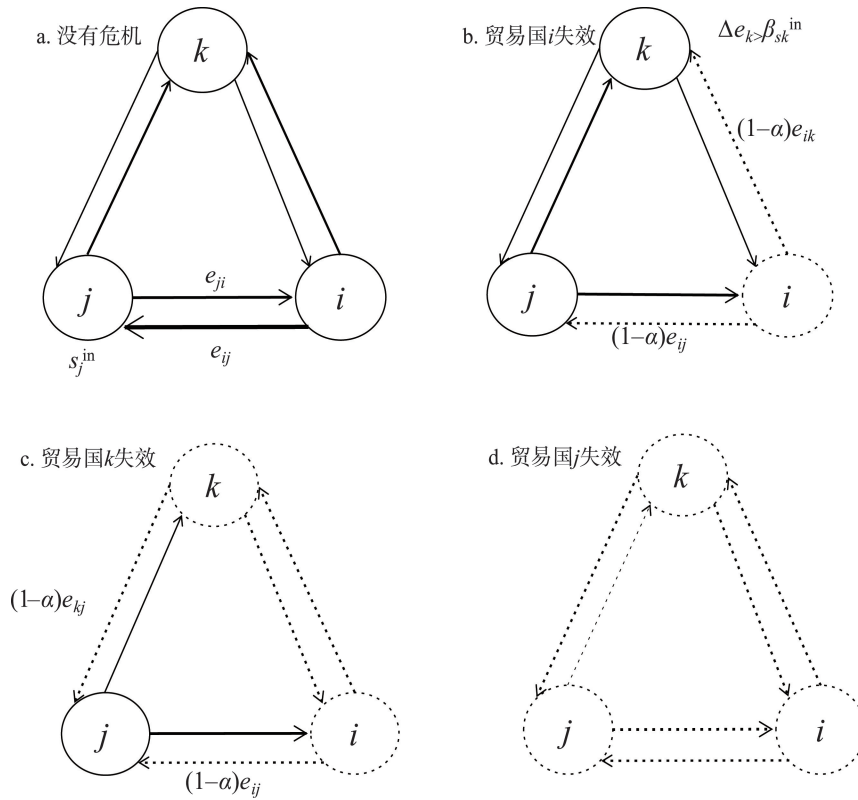


图1 贸易网络级联失效过程模型

Figure 1 Cascading failure process model of trade network

注:当一个贸易国家(地区)因遭受危机传染而失效,其外框变成虚线。线条的粗细代表贸易量的大小。资料来源:参考文献[25]。

式中: RT 为响应时间; T_1 为措施最终起作用的时间点; T_0 为措施开始实行的时间点。

响应速度为每种措施对恢复/提升供应链韧性的作用大小,以每年市场总量的占比为单位,占比越大,韧性越大(式(2))。

$$RS = \frac{Q_e}{Q} \quad (2)$$

式中: RS 为响应速度; Q_e 为措施 e 贡献的生产量; Q 为每年市场总产量。

最大响应速度则是响应速度可以达到的最大值,以市场总量的占比为单位,数值越大,韧性越大(式(3))。

$$MM = \frac{M_e}{Q} \quad (3)$$

式中: MM 为最大响应速度; M_e 为措施 e 可以贡献的最大生产量。

网络破碎度为网络中最大连通子图的节点数量与网络节点数量的比值(式(4))。

$$S = \frac{n_s}{n} \quad (4)$$

式中: S 为网络破碎程度; n_s 为最大连通子图的节点数量; n 为网络节点数量。

雪崩规模 $A(q)$ 为失效贸易国家(地区)的数量总和(式(5))。

$$A(q) = \sum_{0}^q a_q \quad (5)$$

式中: a 为失效贸易国家(地区); q 为失效贸易国家(地区)的编号。

进口依赖度是一个国家(地区)进口总额与国民生产总值的比值。本文借鉴进口依赖度的概念和计算方式,用从中国进口的稀土产品金额除以稀土产品进口总额计算境外国家(地区)对中国稀土产品的进口依赖度(简称稀土进口依赖度)(式(6))。

$$Ed = \frac{V_C}{V_T} \quad (6)$$

式中: Ed 为稀土进口依赖度; V_C 为境外国家(地区)从中国进口的稀土产品金额; V_T 为境外国家(地区)的稀土进口总额。

中国境外国家(地区)稀土供应链韧性的评估标准如表1所示,其中敏捷性的响应时间越短、速

表1 中国境外国家(地区)稀土供应链韧性评估标准

Table 1 Evaluation criteria for rare earth supply chain resilience outside China

评估维度	评估指标	评估标准
敏捷性	响应时间(RT)	时间越短,韧性越大
	响应速度(RS)	速度越大,韧性越大
	最大响应速度(MM)	速度越大,韧性越大
稳健性	网络破碎度(S)	变化越小,韧性越大
	网络雪崩规模($A(q)$)	规模越小,韧性越大
依赖度	稀土进口依赖度(Ed)	数值越小,韧性越大

度越大,表明韧性越大;稳健性的网络破碎度变化越小、网络雪崩规模越小,表示韧性越大;稀土进口依赖度越小,则韧性越大。

2.4 数据来源与处理

中国于2005年开始实施稀土出口限制措施,于2010年与日本发生外交摩擦,引发“稀土危机”。因此,本文数据分析时间为2004—2019年,主要通过对比2009和2019年的评估结果来刻画境外国家(地区)稀土供应链韧性的时变特征,并借助2004—2009年的变化辅助剖析“稀土危机”前的变化趋势。然而,由于只有稀土矿储量、稀土矿产量、稀土国际贸易有连续的时间统计数据,稀土分离冶炼产品产量、钕铁硼永磁体产量、稀土回收、稀土替代、重稀土减量化使用、重稀土储备等只能通过文献回顾、专家访谈等方式获取部分时间点数据。因此,在时间序列数据缺失的情况下,本文选取靠近3个时间点的数据进行供应链敏捷性评估。

本文供应链敏捷性的评估数据来源于3种渠道:①通过企业官网、会议报告、国际稀土行业协会(REIA)和罗斯基尔(Roskill)的新闻报道获取稀土供应链韧性关键事件的时间、主体和详细过程;②联系参考文献[6]的作者,通过学术交流补充和修正已有数据;③通过访谈全球稀土供应链的关键知情人对数据和资料进行补充。供应链稳健性和稀土进口依赖度评估所用的稀土化合物、稀土金属及合金、金属永磁体的国际贸易数据来源于UN Comtrade^[26]。由于非法走私的存在,稀土出口数据往往小于稀土进口数据,不能真实地反应稀土国际贸易情况。因此,本文采用稀土进口数据进行计算。此外,中重稀土价值远大于轻稀土价值,加上稀土贸易量数据缺失较多,本文运用稀土贸易额数据进行

实证分析。

3 结果与分析

3.1 境外国家(地区)稀土供应链敏捷性的评估结果

依据评估指标体系,本文参考基于8种稀土供应链韧性机制(开采新矿、新增稀土分离产量、新增稀土冶炼产量、新增钕铁硼永磁体产量、回收、替代、重稀土减量化使用、储备)呈现境外国家(地区)稀土供应链敏捷性的评估结果。

(1) 开采新矿

一个以矿物为基础的战略和关键材料项目开发时间最少需要花费10年^[27],最长需要约13年^[6],与笔者对德国联邦地球科学与自然资源研究所(BGR)研究人员的访谈结果相同。事件序列分析结果表明,澳大利亚韦尔德山(Mt Weld)从完成可行性研究到产出精矿,历时6年2个月,总时间可能需要超过10年。中国境外国家(地区)稀土矿产量在2004年时为全球总量的7%,2009年为3%,2019年为40%^[28]，“稀土危机”以来响应速度提升了37%，最大响应速度取决于稀土矿储量的上限和境外产能。

(2) 新增稀土分离产量

事件序列分析结果指出,境外国家(地区)最大的稀土分离厂——马来西亚关丹的莱纳斯先进材料厂(Lynas Advance Material Plant)从选址到投产需5~7年。对稀土企业高管的访谈得知,拥有成熟技术的境外国家(地区)企业新建一家稀土分离厂并投产需2~3年,总响应时间取决于资金可用性和环境许可证获取时间。“稀土危机”后,随着境外国家(地区)稀土分离技术的进步,其响应时间有所减少。2020年境外国家(地区)稀土分离产量占比为15%,最大响应速度取决于境外国家(地区)产能。

(3) 新增稀土冶炼产量

稀土金属及合金主要在中国、日本、英国、越南等国家生产^[29]。与分离厂一样,稀土冶炼厂从开工建设到投产需要2~3年的时间,总响应时间主要取决于资金可用性和环境许可获取时间。随着境外国家(地区)技术的进步与成熟,冶炼环节的响应时间也有所缩短。2019年境外国家(地区)稀土金属及合金的产量占比10%。中国稀土集团高管在访谈中也表示:“中国稀土金属及合金的产量占比一直稳定在80%~90%之间”。

2023年9月

(4)新增钕铁硼永磁体产量

钕铁硼永磁体制造企业集中分布于中国、日本和德国等地。为了保障钕铁硼永磁体的供应安全,美国^[30]、加拿大^[31]等国开始新建制造工厂。访谈结果显示,境外国家(地区)新建钕铁硼永磁体制造厂并实现投产需要1~2年。随着制造工艺的成熟和供应流程的优化,钕铁硼永磁体环节的响应时间将有所缩短。2001和2020年,中国境外国家(地区)烧结钕铁硼永磁体产量的占比分别为54.20%和12.08%,粘结钕铁硼产量占比分别为67%和20%,热压/热变形钕铁硼产量占比分别为0%和3.23%^[21,32]。由此可知,境外国家(地区)钕铁硼永磁体响应速度呈下降趋势,最大响应速度也取决于境外国家(地区)产能。

(5)回收

稀土消费前回收与生产同时进行,响应时间为即时。“稀土危机”期间,稀土消费后回收一共需花费7~18年时间^[6]。随着境外国家(地区)回收技术的进步^[33,34],钕铁硼永磁体回收响应时间有缩短的趋势。“稀土危机”期间,境外国家(地区)稀土消费前回收占到总产量的11%~22%^[6],目前镨和钕的回收量约占到市场总量的28%^[35],响应速度提升了6%~17%。国际稀土行业协会(REIA)2021年的研讨会讨论得出,稀土消费后复合回收率大约为3%,比“稀土危机”期间提升了约2%。消费前回收的最大响应速度取决于钕铁硼永磁体产能,消费后回收的最大响应速度则取决于终端产品报废量及回收率。

(6)替代

“稀土危机”期间,稀土替代的响应时间为数月~5年之间^[6]。“稀土危机”期间,所有替代方式对镨、钕、镝、铽的替代量已占到所有应用量的10%,上限为20%~50%^[6]。2019年钕基磁体产量已达到中国烧结钕铁硼永磁体产量的26.47%左右^[36,37]。但是,低性能磁体只能应用于低端产业中,在新能源汽车、风力涡轮机等产业中很难应用,高性能钕铁硼永磁体中镨、钕、镝、铽被替代的比例依然维持在20%~50%之间。

(7)重稀土减量化使用

重稀土减量化使用主要通过晶界扩散技术或

者工艺优化减少镝、铽等重稀土元素在钕铁硼永磁体中的使用量。“稀土危机”期间,晶界扩散技术的总响应时间为3~8年^[6]。目前,晶界扩散技术研发和应用均发展成熟,可以立即投入使用。截至2012年,晶界扩散技术可以让钕铁硼永磁体中镝或铽的含量减少50%左右^[38]。“稀土危机”期间,晶界扩散技术减少的镝用量占市场总量的15%^[6]。2020年,应用晶界扩散技术生产的高性能钕铁硼永磁体占金力永磁公司高性能钕铁硼永磁体总产量的58.73%^[39]。通过访谈得知,钕铁硼永磁体中镝或铽的含量减少幅度可高达75%~80%。因此,按照金力永磁的生产比例,目前晶界扩散技术最多可减少镝或铽应用总量的44%~47%。

(8)储备

“稀土危机”期间,日本汽车公司的稀土库存可以使用6~12个月,欧洲公司的库存仅能使用2~5周^[6]。此后,日本、美国等国家(地区)进一步加强了稀土原材料的储备意识。随着中国南方中重稀土停产、稀土非法生产和走私打击力度的加大以及稀土价格的上涨,境外国家(地区)稀土储备空间压缩。储备的最大响应速度取决于储备规模。

3.2 境外国家(地区)稀土供应链依赖度的评估结果

本文通过剖析境外所有国家(地区)对中国稀土产品的进口依赖度,以及主要国家(地区)对中国稀土产品的进口依赖度,得出境外国家(地区)稀土供应链依赖度的评估结果。

(1)境外所有国家(地区)对中国稀土产品的进口依赖度

2009—2019年,境外所有国家(地区)对中国稀土金属及合金、稀土化合物的进口依赖度分别降低了46%、1%,金属永磁体提升7%(图2)。这说明,“稀土危机”以来,境外国家(地区)对中国稀土冶炼分离产品的进口依赖出现降低,但是对金属永磁体的进口依赖小幅增加,依赖环节有从中上游向下游转移的趋势。

(2)主要国家(地区)对中国稀土产品的进口依赖度

选取3种稀土产品共有的、历年数据完整的15个国家(地区)分析境外主要国家(地区)对中国稀土产品的进口依赖情况(图3)。结果显示,15个国

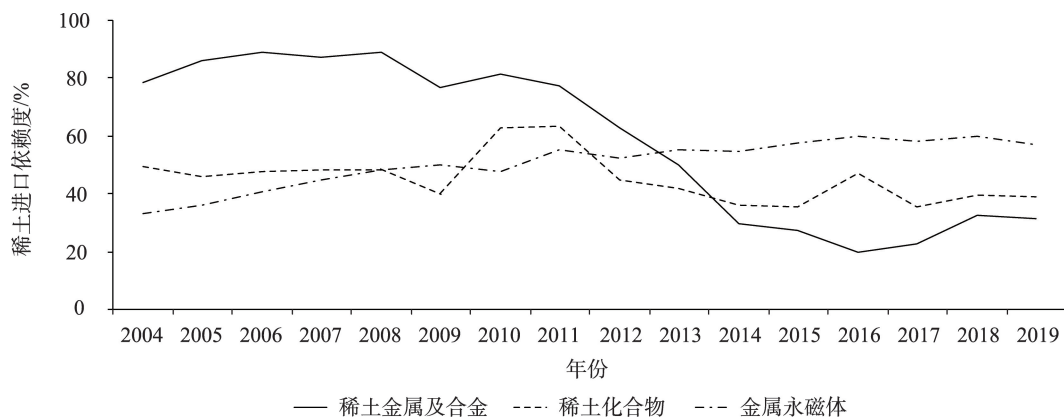
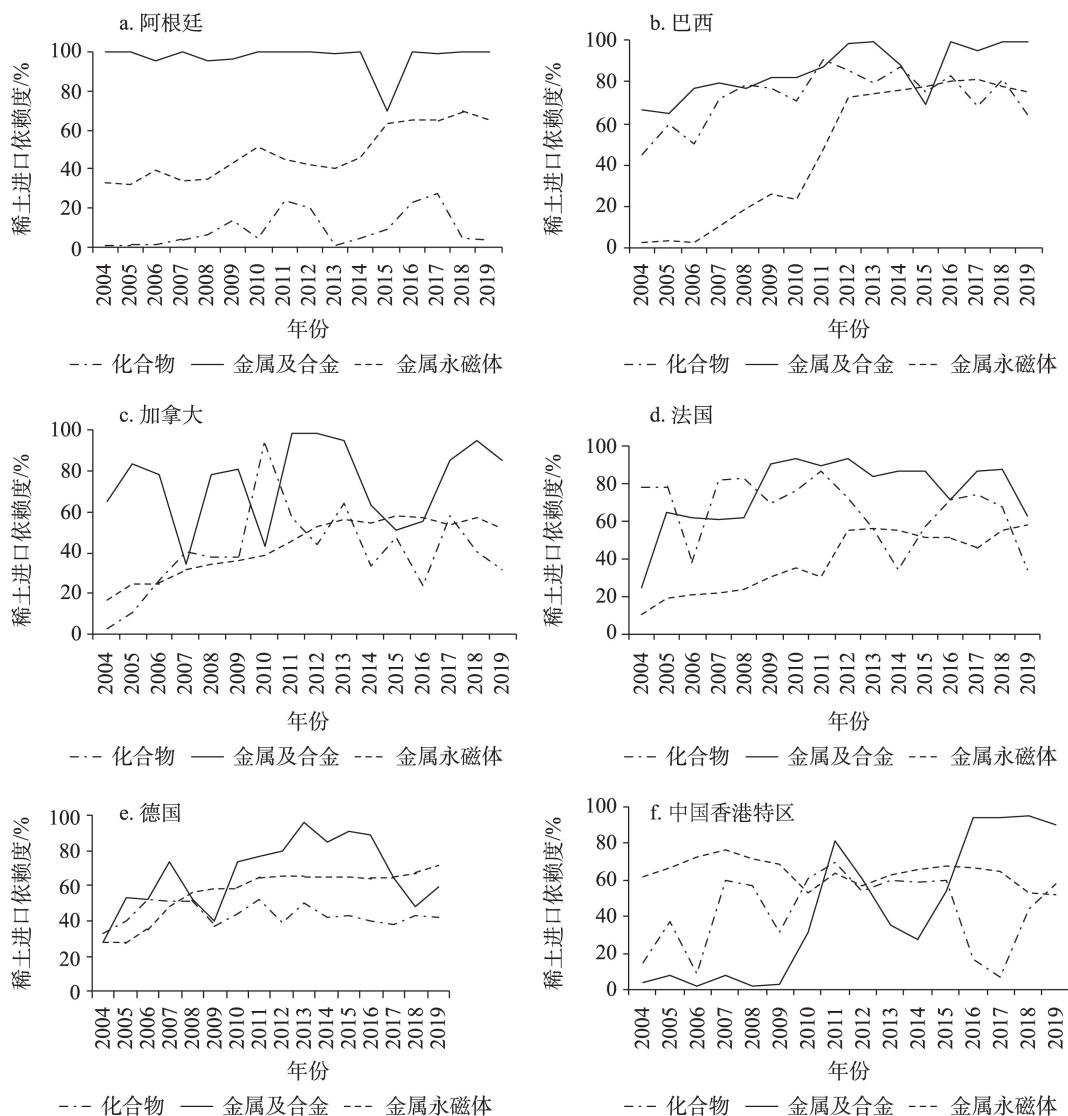


图2 2004—2019年境外所有国家(地区)对中国稀土产品的进口依赖度

Figure 2 Import dependence of all overseas countries (regions) on China's rare earth products, 2004-2019

数据来源:根据文献[26]中的数据计算而得。



续图3

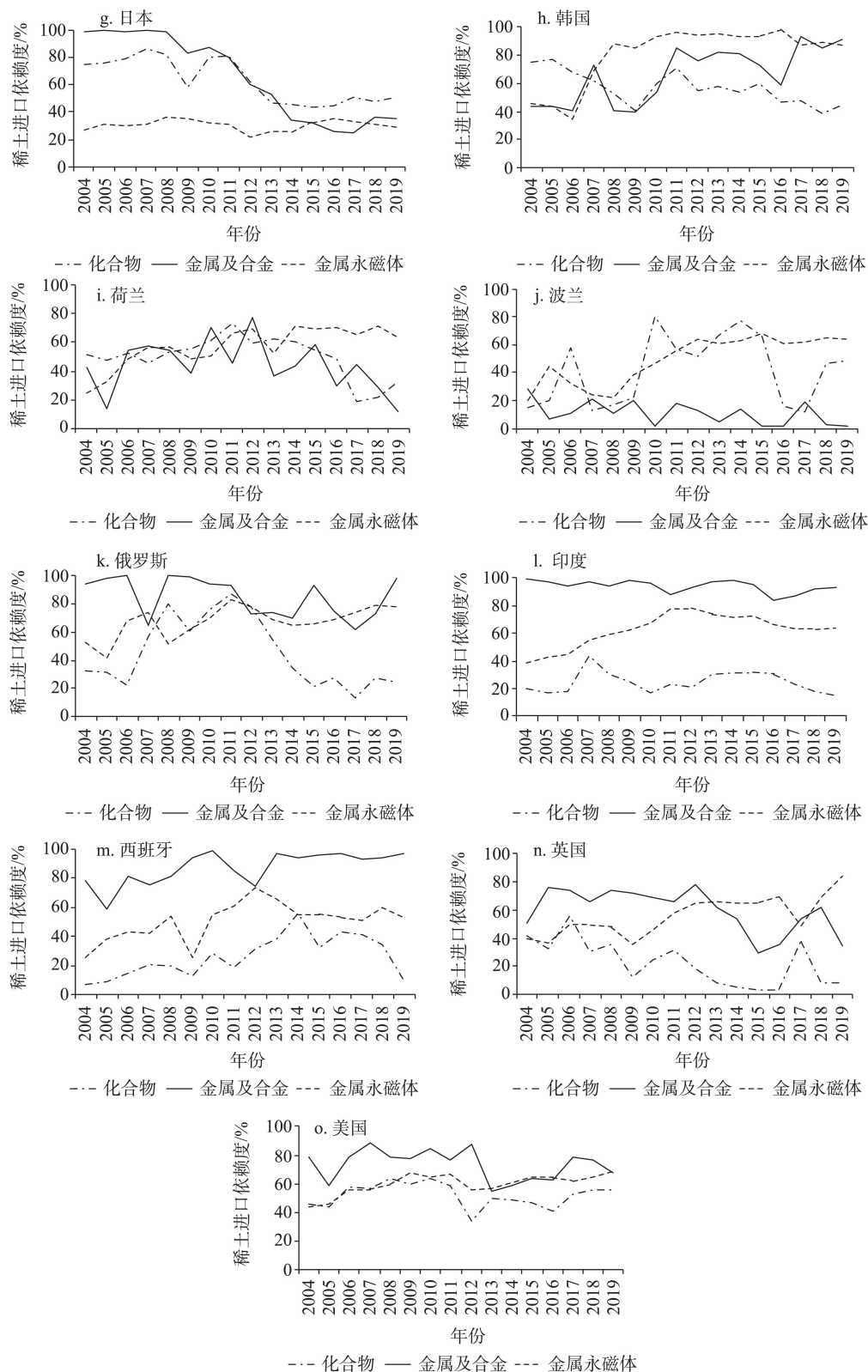


图3 2004—2019年主要国家(地区)对中国稀土产品的进口依赖度

Figure 3 Import dependence of major countries (regions) on China's rare earth products, 2004-2019

数据来源:根据文献[26]中的数据计算而得。

家(地区)对中国稀土产品的进口依赖度均有较大波动。受“稀土危机”的影响,境外15个国家(地区)在2010—2012年期间的稀土进口依赖度均有不同幅度的上升,尔后出现下降;相比于稀土化合物、稀土金属及合金,15个国家(地区)金属永磁体的进口依赖度的变化相对比较平稳,且整体呈现上升趋势。

进一步对比15个国家(地区)2009年和2019年的稀土进口依赖度的变化情况(图4),发现相比于2009年,2019年有11个国家(地区)的稀土化合物进口依赖度出现下降,8个国家(地区)的稀土金属及合金的进口依赖度减少,1个国家和1个地区的金属永磁体的进口依赖度降低。这说明,和整体情况一样,境外主要国家(地区)对中国稀土产品的进口依赖也有从中上游转移到下游的趋势。其中,中国香港特区对中国金属及合金的进口依赖度增加最多,达87.1%,韩国次之,为51.4%;中国香港特区和波兰对中国稀土化合物的进口依赖出现较为明显的增长,分别为26.5%和26.6%。中国香港特区通常作为中国与其他国家(地区)进行贸易的中介地区,其对中国稀土产品进口依赖度的上升反映了中国与香港特区经贸联系的加强。从图4可以看出,韩国对中国稀土金属及合金的进口依赖度近年来呈现明显上升趋势,且近几年均维持在较高水平。进一步通过联合国贸易数据库的数据考察韩国近年来稀土金属及合金的进口来源国,发现其从

美国、日本等国进口量的下降导致对中国进口依赖度的增加。接着,考察美国和日本对中国稀土金属及合金的进口依赖度变化,发现近年来,美国虽然直接从中国进口的稀土金属及合金出现下降,但通过中国香港特区间接从中国进口的量却有所提升;日本从中国进口的稀土金属及合金减少,从越南和泰国的进口增加。由此可见,稀土国际贸易是一个环环相扣的复杂网络,需要进行系统解构和分析。

3.3 境外国家(地区)稀土供应链稳健性的评估结果

本文运用网络破碎度和网络雪崩规模考察中国对境外国家(地区)稀土贸易网络稳健性的影响,从而得出境外国家(地区)稀土供应链稳健性的评估结果。

3.3.1 境外国家(地区)稀土贸易网络的破碎度

(1) 稀土化合物

根据网络破碎度(S)的定义,若删除某节点及其相连的边之后,网络中最大连通子图的节点减少数量等于1,表明此节点处于最大连通子图中,但不对其其他节点间的连接产生影响;若节点减少数量大于1,则说明此节点不但处于最大连通子图中,且影响其他节点间的连接,删除它对网络稳健性破坏较大;节点减少数量越多,说明被删除节点对网络稳健性的影响越大。表2展示了删除中国节点及其相连的边之后, S 的变化量及节点减少的数量。在所有年份,删除中国及其边之后,节点减少数量均大于等于1,说明中国始终处于网络最大连通子图当中;除

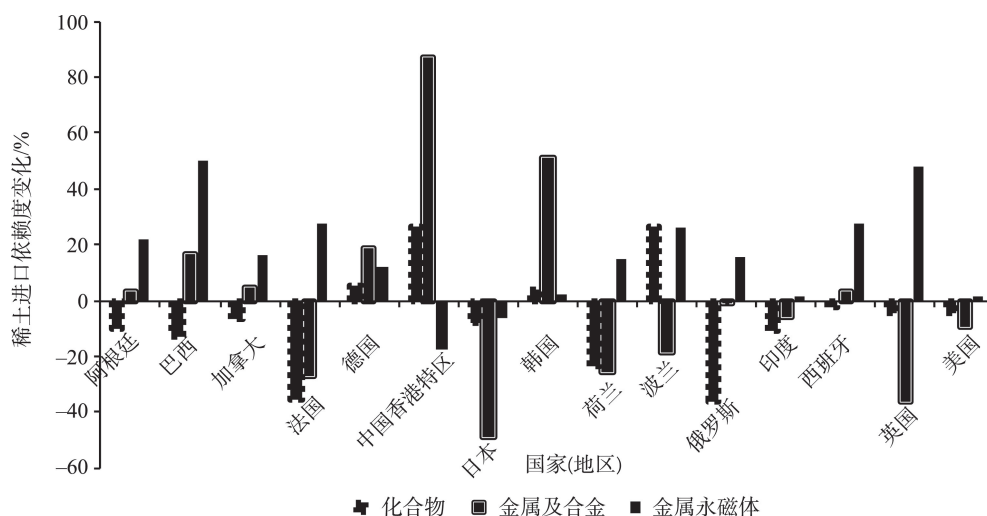


图4 相比2009年主要国家(地区)2019年的稀土进口依赖度变化

Figure 4 Changes in rare earth import dependence of major countries (regions) in 2019 compared with 2009

2023年9月

表2 删除中国后全球稀土化合物贸易网络破碎度的变化

Table 2 Changes in the degree of fragmentation of the global rare earth compound trade network after excluding China

年份	原始节点数量	S变化量	节点减少数量
2004	130	0.02308	3
2005	132	0.01515	2
2006	133	0.01504	2
2007	137	0.00730	1
2008	144	0.01389	2
2009	139	0.01439	2
2010	147	0.02041	3
2011	141	0.01418	2
2012	143	0.02797	4
2013	138	0.01449	2
2014	132	0.02273	3
2015	135	0.02222	3
2016	130	0.01538	2
2017	132	0.01515	2
2018	124	0.01613	2
2019	117	0.0349	4

2007年外,节点减少数量为2~4之间,说明中国对网络稳健性有一定的影响,但影响幅度不是很大。此外,对比不同年份节点减少数量的变化可以看出,2010年以来,节点减少数量有增有减,变化幅度不大;2019年的节点减少数量为4,比2010年增加1个,S变化量也有所增加,说明“稀土危机”以后,中国对全球稀土化合物贸易网络稳健性的影响没有减弱。

(2) 稀土金属及合金

2004—2019年,删除中国及其边之后,节点减少数量均大于等于1,说明中国始终处于网络最大连通子图当中;除2007年外,节点减少数量位于2~8之间,说明中国对网络稳健性有较大影响,不同年份波动较大(表3)。2019年的节点减少数量为4,比2010年增加1个,但比2011年减少2个,S变化量也呈同方向变化,说明“稀土危机”以后,中国对全球稀土化合物贸易网络稳健性的影响先增强后减弱,最终变化幅度不大。

(3) 金属永磁体

2004—2019年,删除中国及其边之后,节点减少数量均大于等于1,说明中国始终处于网络最大连通子图当中(表4)。与稀土化合物、稀土金属及合金不同的是,节点减少数量在9个年份为1,说明

表3 删除中国后全球稀土金属及合金贸易网络

破碎度的变化

Table 3 Changes in the degree of fragmentation of the global rare earth metals and alloys trade network after excluding China

年份	原始节点数量	S变化量	节点减少数量
2004	80	0.02500	2
2005	91	0.04396	4
2006	85	0.03529	3
2007	89	0.01124	1
2008	83	0.02410	2
2009	89	0.08989	8
2010	90	0.03333	3
2011	84	0.07143	6
2012	92	0.03261	3
2013	89	0.05618	5
2014	87	0.03448	3
2015	91	0.03297	3
2016	83	0.02410	2
2017	85	0.04706	4
2018	76	0.02632	2
2019	76	0.05263	4

表4 删除中国后全球金属永磁体贸易网络破碎度的变化

Table 4 Changes in the degree of fragmentation of the global metal permanent magnet trade network after excluding China

年份	原始节点数量	S变化量	节点减少数量
2004	165	0.00606	1
2005	165	0.00606	1
2006	168	0.00595	1
2007	175	0.00571	1
2008	173	0.00578	1
2009	177	0.00565	1
2010	176	0.01705	3
2011	177	0.01130	2
2012	177	0.00565	1
2013	174	0.01149	2
2014	174	0.01149	2
2015	178	0.01685	3
2016	174	0.00575	1
2017	176	0.00568	1
2018	176	0.01136	2
2019	163	0.03067	5

中国在大部分年份对网络稳健性影响有限。2010年之后,节点减少数量在大多数年份位于1~3之间,2019年上升为5,S变化量也增加较多,说明“稀土危机”以后,中国对全球稀土化合物贸易网络稳健性

的影响整体上变化不大,2019年增加较为明显。

3.3.2 境外国家(地区)稀土贸易网络的雪崩规模

本文运用级联失效模型模拟删除中国以后,全球稀土化合物、稀土金属及合金、金属永磁体贸易网络的雪崩规模。为了消除历年网络节点规模的影响,本文还计算了雪崩规模占网络节点规模的比例,即雪崩比例。首先,由图5-7可看出,雪崩规模和雪崩比例的变化轨迹高度相似,说明网络节点规模对级联失效过程的影响不大。其次, $\alpha/\beta=8$ 和 $\alpha/\beta=4$ 的情景下,雪崩规模和比例较为接近,而 $\alpha/\beta=2$

情景下的雪崩规模和比例显著下降,表明承载比例在12.5%和25%的情况下,贸易国家(地区)抵御失效的能力是相近的。此外,由于全球稀土价格自2010—2012年期间成数倍增长,而雪崩规模和比例是基于贸易额计算得出,本文主要以2009为时间节点,对比“稀土危机”前后的雪崩情况。

图5显示,2009—2019年, $\alpha/\beta=8$ 时,全球稀土化合物贸易网络的雪崩规模由128下降到101,雪崩比例由92.1%下降到86.3%; $\alpha/\beta=4$ 时,雪崩规模由118减少到100,雪崩比例由84.9%上升至85.5%; $\alpha/\beta=2$

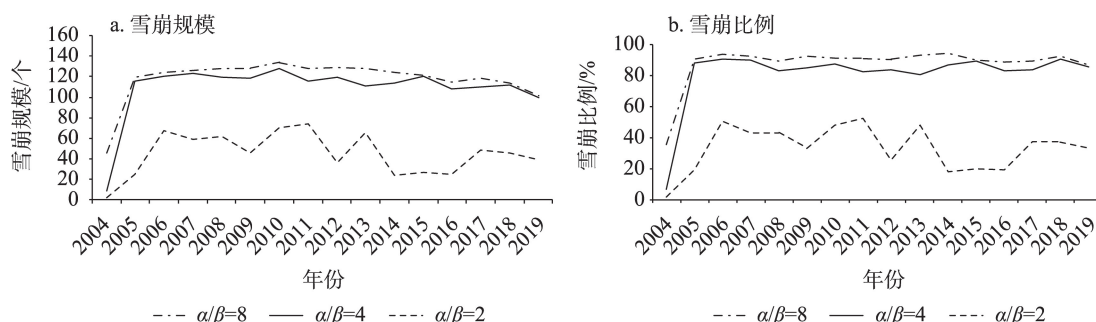


图5 2004—2019年全球稀土化合物贸易网络的雪崩规模和雪崩比例

Figure 5 Avalanche size and proportion of the global rare earth compound trade network, 2004-2019

注: $\alpha/\beta=8$ 、 $\alpha/\beta=4$ 和 $\alpha/\beta=2$ 分别表示贸易国家(地区)的最大承载比例为出口减少比例(100%)的1/8、1/4和1/2,即12.5%、25%和50%。下同。

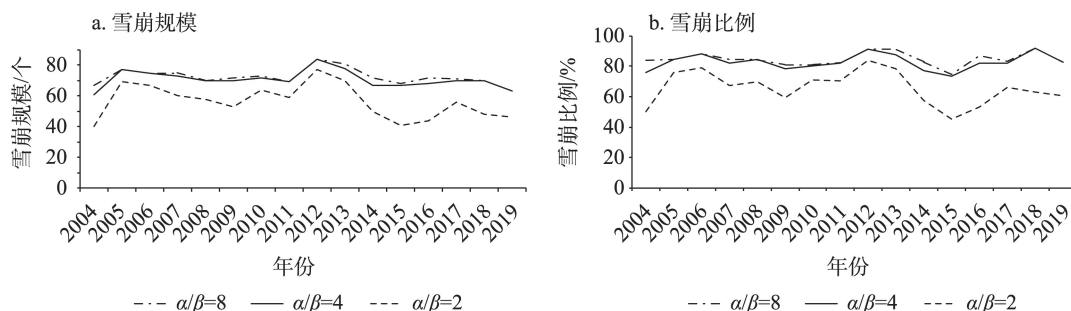


图6 2004—2019年全球稀土金属及合金贸易网络的雪崩规模和雪崩比例

Figure 6 Avalanche size and proportion of the global rare earth metals and alloys trade network, 2004-2019

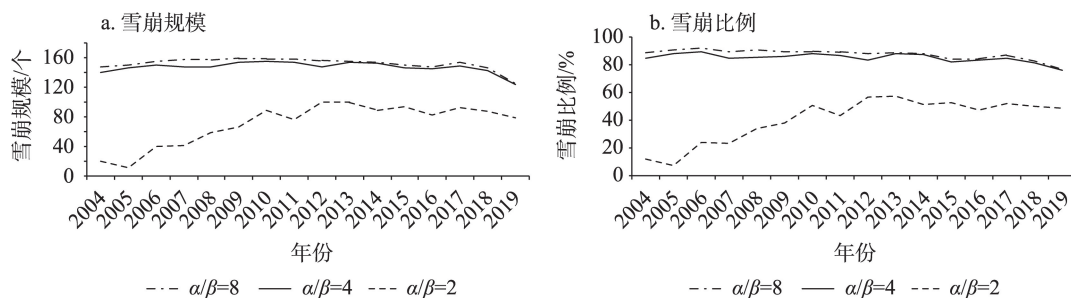


图7 2004—2019年全球金属永磁体贸易网络的雪崩规模和雪崩比例

Figure 7 Avalanche size and proportion of the global metal permanent magnet trade network, 2004-2019

2023年9月

时,雪崩规模从46减少到39,雪崩比例由33.1%提升到33.3%。这说明,从雪崩比例来看,“稀土危机”之后,境外国家(地区)稀土化合物低承载力情景下的贸易网络稳健性得到提升,但中高承载力情景下的贸易网络稳健性有所下降。

图6显示,2009—2019年, $\alpha/\beta=8$ 时,全球稀土金属及合金贸易网络的雪崩规模由72下降到63,雪崩比例由80.9%提升到82.9%; $\alpha/\beta=4$ 时,雪崩规模由70减少到63,雪崩比例由78.7%上升至82.9%; $\alpha/\beta=2$ 时,雪崩规模从53减少到46,雪崩比例由59.6%提升到60.5%。这说明,从雪崩比例来看,“稀土危机”之后,中国境外国家(地区)稀土金属及合金贸易网络的稳健性有所下降,中国出口的影响力得到提升。

图7显示,2009—2019年, $\alpha/\beta=8$ 时,全球金属永磁体贸易网络的雪崩规模由159下降到125,雪崩比例由89.8%降低到76.7%; $\alpha/\beta=4$ 时,雪崩规模由153减少到124,雪崩比例由86.4%下降至76.1%; $\alpha/\beta=2$ 时,雪崩规模从67增加到79,雪崩比例由37.9%提升到48.5%。这说明,从雪崩比例来看,“稀土危机”之后,中国境外国家(地区)稀土金属及合金贸易网络的稳健性在中低承载力情景下有明显提升,但在高承载力情景下显著下降。

4 结论与政策建议

4.1 结论

本文构建了境外国家(地区)稀土供应链韧性评估指标体系,并以钕铁硼永磁体为例,运用事件序列分析、半结构化访谈、网络仿真等方法对境外国家(地区)稀土供应链韧性进行评估,得出了境外国家(地区)稀土供应链韧性的表现及其时变特征。具体结论如下:

(1)稀土供应链韧性可从敏捷性、依赖度和稳健性3个方面进行评估,敏捷性用8种稀土供应链韧性机制的响应时间、响应速度和最大响应速度进行衡量,依赖度由境外国家(地区)对中国稀土产品的进口依赖度进行反映,稳健性则用网络破碎度和网络雪崩规模进行评价。评估结果显示,“稀土危机”之后,境外国家(地区)稀土供应链敏捷性得到较大幅度提升,包括大部分机制的响应时间缩短,一半以上机制的响应速度增加,重稀土减量化使用

的最大响应速度明显提高等。这说明境外国家(地区)稀土供应链韧性有提升的可能,未来境外国家(地区)可能可以更快地应对供应链扰动或中断事件。

(2)不论从所有国家(地区),还是从重点国家(地区)来看,“稀土危机”之后,境外国家(地区)对中国稀土产品的进口依赖均有从中上游向下游转移的趋势,具体表现为境外国家(地区)对中国稀土化合物、稀土金属及合金的进口依赖出现下降,但是对金属永磁体的进口依赖有所提升。此结论表明虽然依赖环节出现变化,但境外国家(地区)对中国稀土产品的进口依赖关系尚未出现实质性改变。

(3)“稀土危机”之后,在大部分仿真情景下,删除中国出口均导致全球稀土贸易网络的雪崩规模和雪崩比例增加,意味着中国出口对全球稀土贸易网络稳健性的影响力度更大,即境外国家(地区)稀土贸易网络稳健性下降。因此,短期内,境外国家(地区)还离不开中国稀土的供给,其稀土自主供应的代价将比较高昂。

4.2 政策建议

基于研究结果,本文针对中国稀土产业发展提出以下政策建议:

(1)短期内,中国应当注重推进稀土供应链包容性全球化。在境外国家(地区)稀土生产份额上升、全球稀土资源布局趋于多元化的背景下,境外国家(地区)的资源开发和技术进步将推动境外国家(地区)稀土供应链韧性加速提升。因此,中国亟需推动稀土供应链融入包容性全球化的进程,为稀土产业下游技术突破争取时间。例如,鼓励和支持企业“走出去”、利用中国技术和经验优势嵌入稀土的全球生产网络,积极倡导构建国际稀土产业联盟等。

(2)长期内,中国应当不断提升自主创新水平,增强稀土全供应链竞争优势。中国出口是短期内影响境外国家(地区)稀土供应链稳健性的关键因素,但是技术创新与突破才是稀土产业可持续竞争力的根本保障。因此,中国亟需激发稀土企业的研发积极性,构建起政府引导、市场主导、多方参与的政产学研用创新合作网络,从而提升中国稀土产业自主创新水平,破除稀土产业在全球稀土价值链中

的“低端锁定”。同时,根据“底线安全”原则,中国应当打造基于次一代技术的国内完整稀土产业链,并努力在前沿技术的局部领域,形成能够有效应对美国高新技术封锁的“杀手锏”。

(3)中国应当模拟境外国家(地区)与中国稀土供应链脱钩的可能情景,尽早制定国际博弈与合作方案。虽然境外国家(地区)稀土供应链韧性尚未出现实质性提升,但境外国家(地区)稀土供应链中上游的敏捷性已有一定提高,且美国、日本、加拿大、澳大利亚等国在稀土产业链各环节布局了不少开采和生产项目。一旦美国等国家(地区)主导形成完整的钕铁硼永磁体供应链,并联合其他国家(地区)形成独立于中国的稀土产业联盟,不但会让中国丢失在全球稀土产业中的主导地位,还会以此来围堵中国稀土供应链和其他相关供应链,使中国的比较优势难以得到充分发挥。因此,中国稀土管理部门需要根据境外国家(地区)对中国稀土供应链的依赖环节、依赖程度及可替代程度,梳理境外国家(地区)实现与中国稀土供应链脱钩的可能途径、策略、时间及成本,尽早制定国际博弈与合作方案。

参考文献(References):

- [1] 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, 2020, 42(8): 1439-1451.]
- [2] 祝孔超,赵媛,姚亚兵,等. 全球稀土进口竞争格局分析及潜在贸易联系预测[J]. 资源科学, 2022, 44(1): 70-84. [Zhu K C, Zhao Y, Yao Y B, et al. Global rare earth import competition pattern and prediction for potential trade links[J]. Resources Science, 2022, 44(1): 70-84.]
- [3] 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.]
- [4] 谭雪萍,耿涌,肖诗荏,等. 2011-2020年中国镧资源动态物质流分析[J]. 资源科学, 2023, 45(2): 344-360. [Tan X P, Geng Y, Xiao S J, et al. Dynamic material flow analysis of lutetium resources in China during 2011-2020[J]. Resources Science, 2023, 45(2): 344-360.]
- [5] 王昶,刘雅琳,耿红军,等. 基于P-TRM的中国稀土产业技术创新的政策演化路径研究[J]. 中南大学学报(社会科学版), 2023, 29(3): 89-101. [Wang C, Liu Y L, Geng H J, et al. Research on policy evolution path of technological innovation in China's rare earth industry based on Policy-Technology Roadmap [J]. Journal of Central South University (Social Science), 2023, 29(3): 89-101.]
- [6] Sprecher B, Daigo I, Spekkink W, et al. Novel indicators for the quantification of resilience in critical material supply chains, with a 2010 rare earth crisis case study[J]. Environmental Science and Technology, 2017, DOI: 10.1021/acs.est.6b05751.
- [7] 周美静,黄健柏,邵留国,等. 中国稀土政策演进逻辑与优化调整方向[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1527-1539. [Zhou M J, Huang J B, Shao L G, et al. Change and adjustment direction of China's rare earth policy[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1527-1539.]
- [8] Fortier S M, Nassar N T, Lederer G W, et al. Draft Critical Mineral List: Summary of Methodology and Background Information: U.S. Geological Survey Technical Input Document in Response to Secretarial Order No. 3359: U.S. Geological Survey Open-File Report 2018-1021[R/OL]. (2018-02-16) [2022-09-15]. <https://doi.org/10.3133/ofr20181021>.
- [9] Gully A L, Nassar N T, Xun S. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4111-4115.
- [10] Nassar N T, Brainard J, Gully A, et al. Evaluating the mineral commodity supply risk of the U.S. manufacturing sector[J]. Science Advances, 2020, DOI: 10.1126/sciadv.aay8647.
- [11] 葛建平,刘佳琦. 关键矿产战略国际比较: 历史演进与工具选择[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1464-1476. [Ge J P, Liu J Q. International comparison of critical mineral strategies: Historical evolution and tool selection[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1464-1476.]
- [12] 吴一丁,彭子龙,赖丹,等. 稀土产业链全球格局现状、趋势预判及应对战略研究[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(2): 255-264. [Wu Y D, Peng Z L, Lai D, et al. Exploring international rare earth industry landscape changes and China's strategic responses[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(2): 255-264.]
- [13] Barroso A, Machado V H, Machado V C. Supply Chain Resilience Using the Mapping Approach[M]. Rijeka: InTech Open Book Chapter, 2011.
- [14] Walker B, Pearson L, Harris M, et al. Incorporating resilience in the assessment of inclusive wealth: An example from South East Australia[J]. Environmental and Resource Economics, 2010, 45(2): 183-202.
- [15] Milman A, Short A. Incorporating resilience into sustainability indicators: An example for the urban water sector[J]. Global Environ-

2023年9月

- mental Change, 2008, 18(4): 758–767.
- [16] Moosavi J, Hosseini S. Simulation-based assessment of supply chain resilience with consideration of recovery strategies in the COVID-19 pandemic context[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, DOI: 10.1016/j.cie.2021.107593.
- [17] Hosseini S, Ivanov D. Bayesian networks for supply chain risk, resilience and ripple effect analysis: A literature review[J]. Expert Systems with Applications, 2020, DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113649.
- [18] Sprecher B, Daigo I, Murakami S, et al. Framework for resilience in material supply chains, with a case study from the 2010 rare earth crisis[J]. Environmental Science and Technology, 2015, DOI: 10.1021/acs.est.5b00206.
- [19] Blengini G A, Latunussa C E L, Eynard U, et al. Study on the EU's List of Critical Raw Materials: Final Report (2020)[R]. Luxembourg: European Commission, 2020.
- [20] Roskill. Rare Earths: Outlook to 2029[M]. London: Roskill Information Services Ltd, 2019.
- [21] 胡伯平, 饶晓雷, 钮粤, 等. 稀土永磁材料的技术进步和产业发展[J]. 中国材料进展, 2018, 37(9): 653–661. [Hu B P, Rao X L, Nu E, et al. Technology progress and industry development of rare-earth permanent magnets[J]. Materials China, 2018, 37(9): 653–661.]
- [22] Mancheri N A, Sprecher B, Deetman S, et al. Resilience in the tantalum supply chain[J]. Resources Conservation and Recycling, 2018, 129: 56–69.
- [23] 彭澎, 程诗奋, 刘希亮, 等. 全球海洋运输网络健壮性评估[J]. 地理学报, 2017, 72(12): 2241–2251. [Peng P, Cheng S F, Liu X L, et al. The robustness evaluation of global maritime transportation networks[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(12): 2241–2251.]
- [24] Wang X X, Li H J, Yao H J, et al. Simulation analysis of the spread of a supply crisis based on the global natural graphite trade network[J]. Resources Policy, 2018, 59: 200–209.
- [25] Sun X Q, Shi Q, Hao X Q. Supply crisis propagation in the global cobalt trade network[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.106035.
- [26] UN Comtrade Database. Trade Data of Rare Earths[DB/OL]. (2021–12–31) [2022–12–03]. <https://comtrade.un.org/data/>.
- [27] Kingsnorth D. IMCOA–Rare Earths: Reducing Our Dependence upon China[C]. Beijing: Metal 100Pages Rare Earths Conference, 2011.
- [28] Gambogi J. Rare Earths Statistics and Information[DB/OL]. (2021–12–31) [2022–12–03]. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/rare-earthsstatistics-and-information>.
- [29] Sullivan J, Deese B. Building Resilient Supply Chains, Revitalizing American Manufacturing, and Fostering Broad-Based Growth, 100–Day Reviews under Executive Order 14017[R/OL]. (2021–06) [2022–07–01]. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/06/100-day-supplychain-review-report.pdf>.
- [30] Andrews G, Sullivan S. Search Minerals and USA Rare Earth Enter into Technical Collaboration Framework Agreement[N/OL]. (2020–11–10) [2022–08–10]. <https://finance.yahoo.com/news/search-minerals-usa-rare-earth-100000523.html>.
- [31] Mugerma K, Thompson N. Geomega Signs LOI with Everwin Magnetics[N/OL]. (2021–02–04) [2022–07–10]. <https://www.globenewswire.com/newsrelease/2021/02/04/2169751/0/en/Geomega-Signs-LOI-with-EverwinMagnetics.html>.
- [32] 国家新材料产业发展专家咨询委员会. 中国新材料产业发展年度报告(2020)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2020. [National New Materials Industry Development Expert Advisory Committee. The Annual Report of China's New Materials Industry Development (2020) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2020.]
- [33] Mann N. Hydrogen Processing of Magnetic Scrap[R]. REIA Webinar on Rare Earth Elements in a Sustainable Circular Economy, 2020.
- [34] Ansorge L. Magnet Recycling: Rethinking Scrap Collection and Separation[R]. REIA Webinar on Rare Earth Elements in a Sustainable Circular Economy, 2020.
- [35] 王政. 迎接稀土的新时代[N/OL]. (2021–07–08) [2022–08–14]. <https://mp.weixin.qq.com/s/nrOTaxiPt0hcbx9-yHSipA>. [Wang Z. A New Era of Rare Earth[N/OL]. (2021–07–08) [2022–08–14]. <https://mp.weixin.qq.com/s/nrOTaxiPt0hcbx9-yHSipA>.]
- [36] 中国稀土行业协会. 我国钕磁体产业发展情况说明[R]. 北京: 中国稀土行业协会, 2021. [Association of China Rare Earth Industry. Description of Cerium Magnet Industry Development in China[R]. Beijing: Association Of China Rare Earth Industry, 2021.]
- [37] 陈占恒. 稀土产业、市场与供求分析[R]. 包头: 第十二届中国包头·稀土产业国际论坛报告集, 2020. [Chen Z H. Analysis of Rare Earth Industry, Market and Supply and Demand[R]. Baotou: Report Collection of the 12th China Baotou·Rare Earth Industry International Forum, 2020.]
- [38] Constantinides S. The Important Role of Dysprosium in Modern Permanent Magnets[R/OL]. (2015–09–01) [2022–09–01]. <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/10/Important-Role-of-Dysprosium-in-Modern-Permanent-Magnets-150906.pdf>.
- [39] 金力永磁. 2021年年度报告[R/OL]. (2022–04–06) [2022–09–21]. <http://www.jlimg.com.cn/uploads/soft/20220411/1649658506497705.pdf>. [Jin Li Permanent Magnet. Annual Report 2021 [R/OL]. (2022–04–06) [2022–09–21]. <http://www.jlimg.com.cn/uploads/soft/20220411/1649658506497705.pdf>.]

Resilience evaluation of the rare earth supply chain in countries (regions) outside China: A case study of NdFeB permanent magnet

ZHOU Meijing^{1,2}, WANG Fuyuan^{3,4}, SHAO Liuguo^{5,6}

(1. College of Humanities and Social Sciences, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China; 2. Beijing Academy of Safety Engineering and Technology, Beijing 102617, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 4. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, CAS, Beijing 100101, China; 5. School of Business, Central South University, Changsha 410083, China; 6. Institute of Metal Resources Strategy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: [Objective] Rare earths are widely used in strategic industries such as national defense and military industry, and clean energy technology. The Sino-US economic and trade frictions and the outbreak of the Covid-19 pandemic have accelerated the restructuring of the global rare earth supply chain, which has challenged the status of China's rare earth industry in the global supply chain. In this context, based on the perspective of supply chain resilience, this study aimed to explore the evolutionary process of rare earth supply chain resilience in overseas countries (regions), and put forward China's countermeasures accordingly. [Methods] This study constructed an evaluation indicator system of rare earth supply chain resilience, including three dimensions of agility, robustness, and dependence. Taking NdFeB permanent magnet as an example, the resilience of rare earth supply chain in overseas countries (regions) was evaluated by using event sequence analysis, semi-structured interviews, and network simulation. [Results] (1) After the "rare earth crisis", the agility of rare earth supply chain in overseas countries (regions) has been greatly improved, including the increase of new rare earth mining, the improvement of recovery rate, the increase of replacement amount, and the reduced use of heavy rare earth elements. (2) The resilience of the rare earth supply chain in overseas countries (regions) has declined on the whole. The import dependence of overseas countries (regions) on China's rare earth products showed a trend of transferring from the upstream to the downstream. (3) In general, although China's exports are still the key factor that affects the resilience of rare earth supply chain in overseas countries (regions), its influence tends to decline. [Conclusion] On the basis of continuing to promote independent innovation in rare earth technology, China should participate in global rare earth supply chain governance by deeply embedding in the global rare earth supply chain network. At the same time, China should simulate the possible scenario of overseas countries (regions) decoupling from China's rare earth supply chain, and prepare international game and cooperation plan as soon as possible.

Key words: supply chain resilience; rare earth; NdFeB permanent magnet; China