

引用格式:周娜,王迪,吴巧生,等.中国稀有矿产资源全产品链供给风险演化与预警[J].资源科学,2025,45(7):1462-1475.
[Zhou N, Wang D, Wu Q S, et al. Evolution and early warning of supply risks across entire product chain of China's rare mineral resources[J]. Resources Science, 2025, 45(7): 1462-1475.] DOI: 10.18402/resci.2025.07.06

中国稀有矿产资源全产品链供给风险演化与预警

周娜¹,王迪²,吴巧生³,王强³,杨铖³,李静远³

(1. 中国地质大学(武汉)公共管理学院,武汉 430074;2. 湖北第二师范学院经济与管理学院,武汉 430205;3. 中国地质大学(武汉)经济管理学院,武汉 430078)

摘要:【目的】稀有矿产资源是支撑新能源和新材料等战略性新兴产业的关键原材料,其供给安全已成为全球主要国家资源风险治理的重要关切。识别和评估中国战略性新兴产业所需的稀有矿产资源全产品链风险演化特征,并对未来风险态势进行预警,以期为中国相关产业的资源安全布局提供科学依据。【方法】本文构建灾害、暴露和脆弱性的“风险三角”分析框架,界定稀有矿产资源供给风险在资源全产品链的形成机制。选取锂、铍、铌、钽和锆5种事关中国战略性新兴产业发展的稀有矿产资源,量化了2010—2020年上述资源从前端初级矿产品到终端产品的供给风险,并采用BGR-VW法对供给风险结果进行分级。进一步地,运用灰色预测模型对上述资源2025—2030年的供给风险进行预警。【结果】①锂和铍的供给风险相对较低,处于“宽松”水平;铌和钽的供给风险在研究期内保持“适度”水平,铌的风险均值和钽的风险波动均高于锂和铍;锆的供给风险均值最高,处于“紧张”态势,严重制约下游新材料产业的发展。②不同资源的供给风险来源具有异质性特征:锂的供给风险由灾害和脆弱性共同驱动;铍的供给风险主要受持续高位的灾害水平和暴露的相对宽幅波动影响;铌的供给风险来源于暴露;钽的供给风险由灾害和暴露共同驱动;锆的供给风险由暴露和脆弱性共同驱动。③预测2025—2030期间,锂、铌和钽供给风险相对较小,处于“宽松”等级,铍的供给风险则会从“宽松”上升到“紧张”等级,而锆的供给风险则一直维持在“紧张”等级。【结论】基于中国稀有矿产资源全产品链供给风险驱动因素与未来演化趋势,建议从优化“灾害-暴露-脆弱性”三角框架出发,有针对性地降低稀有矿产资源的供给风险,以期对战略性新兴产业的发展提供坚实的要素支撑,确保其平稳健康运行。

关键词:稀有矿产资源;战略性新兴产业;全产品链;供给风险;风险预警;中国

DOI: 10.18402/resci.2025.07.06

1 引言

历史上,资源冲突往往集中在化石燃料上^[1],未来的资源冲突将更多地围绕助推战略性新兴产业发展的非燃料矿产资源展开^[2]。例如,电动汽车所需的锂,以及高端装备制造所需的铌、钽、铍和锆等关键原材料,因其上游资源供给集中在少数国家(地区)且当前回收利用效率低^[3],已成为全球博弈的焦点。以稀有矿产资源为核心原材料的战略性

新兴产业,已经逐渐成为中国经济发展的新引擎,且在保增长、促转型和创新等方面正发挥重要作用^[4,5]。战略性新兴产业的蓬勃发展,对稀有矿产资源的需求也不断增加。国内外政府和产业界对稀有矿产资源供给稳定性的担忧已从金属矿产资源本身延伸到全产品链各环节^[6]。“全产品链”是指从上游矿产资源的开采、到中游的加工制造,再到下游的最终产品应用的完整过程。这一过程的每一

收稿日期:2024-07-02;修订日期:2024-11-20

基金项目:国家自然科学基金项目(72203211;72334001;71991482);湖北省自然科学基金项目(2024AFD391)

作者简介:周娜,女,湖北恩施人,副教授,研究方向为资源安全与治理。E-mail: nazhou@cug.edu.cn

通讯作者:王迪,女,湖北仙桃人,讲师,研究方向为战略性矿产风险。E-mail: hewangdi@hue.edu.cn

2025年7月

环节都可能影响资源供给的稳定性与可持续性,进而制约战略性新兴产业的发展。因此,科学合理地评估支撑中国战略性新兴产业所需的稀有矿产资源全产品链的供给风险,并分析其供给风险演化的关键驱动因素,对确保稀有矿产资源供给的稳定可控,保障战略性新兴产业的持续发展,进而维护国家资源安全,具有重要意义^[7,8]。

稀有矿产资源为代表的“三稀”矿产资源^①,已经成为新能源、新材料、节能环保和电子信息等战略性新兴产业的关键原材料。例如,锂享有“能源金属”等美誉,铍是导弹系统的核心材料,铌是航空合金的关键材料,钽则用于高端电子,锆是现代核电及新一代信息技术产业的关键材料^[15,16]。王登红等^[17]对“三稀”矿产资源的调查研究显示,除锆矿的储量优势外,中国在其他稀有矿产资源的资源禀赋、贸易结构和下游应用等领域不具备比较优势。新一代技术革命催生了战略性新兴产业的蓬勃发展,全球主要国家(地区)对这些“工业维生素”——稀有矿产资源的战略需求不断攀升,资源竞争与地

缘博弈日趋激烈^[12],由此进一步凸显了中国稀有矿产资源供给安全面临的风险和挑战。

现有针对稀有矿产资源供给风险评价的研究可分为两类:①在资源供给安全框架下对风险的定性或半定量评价^[18-26]。资源安全研究的一般过程是:界定资源安全的内涵,在此基础上遴选影响资源安全的常见风险指标,由此构建资源安全评价体系,以此量化安全水平^[18-20]。此过程中风险指标的选择原则是确保资源供给的稳定性^[18],涉及地质风险、技术风险、经济风险、地缘政治风险和社会监管风险等^[19],代表性研究如表1所示。如Zhou等^[20]从全球资源供给稳定性、国内资源经济安全性和优态共存性3个维度出发优选20个指标,构建了中国锂资源安全综合评价指标体系,结果显示2010年以来中国锂资源安全稳步向好,且识别出国内锂供应链安全是制约中国锂安全的短板。然而,在资源供给安全评价框架下,对关键矿产资源风险的量化往往依赖于对影响资源安全的风险指标进行静态或主观的判断,因此难以有效追踪风险因素、风险事件

表1 资源安全框架下常用风险指标

Table 1 Common risk indicators under resource security framework

维度	指标	文献[21]	文献[22]	文献[23]	文献[24]	文献[19]	文献[25]	文献[8]	文献[26]
地质风险	资源耗尽时间	√	-	-	√	-	-	-	-
	勘探程度	√	-	-	-	-	-	-	-
技术风险	开采能力	√	-	-	√	-	√	-	-
	资源可回收性	√	√	-	√	√	-	√	-
	资源可替代性	-	-	√	√	√	-	√	√
经济风险	需求增长水平	-	-	-	-	-	-	-	√
	副产品依存度	-	-	-	√	-	-	-	√
	产品价格波动水平	-	√	-	√	√	-	-	√
	市场均衡度	-	√	-	-	√	-	-	√
	矿业投资	-	-	-	-	-	-	√	-
地缘政治风险	库存	-	-	√	-	-	-	√	-
	全球供给集中度	-	-	-	√	√	√	√	√
	政府稳定程度	-	√	√	-	-	-	√	√
	净进口依存度	-	√	-	-	√	-	√	√
社会监管风险	世界治理指数	-	√	√	√	√	√	-	-
	政策感知指数	-	-	-	√	√	√	-	√
	人类发展指数	-	-	-	√	√	√	-	-

注:√表示是该研究使用的指标,-是未使用的指标。

① 国内学术界流行的稀有矿产资源分类方法有两种:一种以中国社会科学院杨丹辉团队的研究为代表,将稀有矿产资源界定为包括稀有轻金属、稀散金属、稀土金属、稀贵金属等6大类22种金属资源^[9-13]。另一种则根据2016年中国地质调查局发布的《中国“三稀”资源调查报告》,仅指锂、铍、铌、钽、锆、铪、钨和钽9种金属资源^[14]。本文采用第2种分类方法。

与风险损失之间的动态演变关系。②作为原材料关键性评价/矿种战略性遴选的重要组成,测算其供给风险^[9,11,27-29]。发达国家(地区)在原材料关键性评价或矿种战略性遴选时,常将供给风险作为重要维度^[27,28],衡量资源供给不足对经济发展和国家安全的不良影响。具体做法是:识别某一矿产资源/原材料对国民经济和国家安全的重要性,越重要的矿产资源/原材料由于供给不足产生的非期望后果越严重。在给定重要性前提下,矿产资源/原材料供给不足的问题转化为矿产资源/原材料的可获得性问题。李鹏飞等^[11]在 Graedel 等^[29]提出的原材料关键性分析框架基础上,构建了涵盖技术经济、社会政策和地缘政治3个维度共5个指标的评价体系,从资源国供给潜力与供给能力两个方面,利用加权平均法测算全球稀有矿产资源的供给风险指数。但该研究未涉及战略性新兴产业盈利能力及稀有矿产在其中的具体应用,主要聚焦于资源生产国供给能力,缺乏全产品周期视角,难以有效量化战略性新兴产业所需的稀有矿产资源供给风险。李鹏飞等^[9]则基于产业附加值预测,将稀有矿产按对不同战略性新兴产业的重要性分级,测算了供给受限的经济影响。上述过程由于缺少战略性新兴产业发展实际数据作支撑,导致评价结果的不确定性较大。此外,经由上述过程得到的经济影响和战略性评价均为静态结果,难以反映风险因素的动态变化导致的差异。

综上所述,现有供给安全框架下的风险量化过程,多是对某一时点的资源供给风险的静态量化,缺乏对风险演化的动态考量。传统风险框架认为风险是特定时间段内损失发生的可能性^[30,31],并强调灾害、暴露和脆弱性三要素的串联作用是风险产生的核心机制^[32-34]。已有研究由于偏重单一因素(如地质风险,地缘政治风险),未能全面整合灾害、暴露和脆弱性三要素,及其对战略性新兴产业所需的稀有矿产资源全产品链供给风险的作用与影响。因此,本文在传统“灾害-暴露-脆弱性”风险框架的基础上,基于稀有矿产资源全产品链数据,吸收现有研究的各项优势,提出了一种改进的“风险三角”模型,并系

统构建战略性新兴产业所需的稀有矿产资源供给风险评价指标体系。通过全面收集2010—2020年战略性新兴产业运行数据和稀有矿产资源全产品周期生产、消费与贸易数据,动态评价了稀有矿产资源供给风险,并利用灰色预测模型(GM(1,1))对未来供给风险趋势进行前瞻性预警。这一研究旨在为战略性新兴产业的资源安全布局和政策制定提供科学依据。

2 研究框架、方法与数据来源

2.1 风险评价框架

根据联合国减少灾害风险办公室(UNDRR)的定义,风险管理旨在通过改变灾害、暴露和脆弱性以减少由其造成的负面影响^[35],并由此形成“风险=灾害×暴露×脆弱性”的主流风险评估框架^[36]。借鉴 Nassar 等^[37]对美国制造业所需的矿产品的供给风险测度方法,文章将战略性新兴产业所需的稀有矿产资源供给风险(SR)定义为灾害、暴露和脆弱性的几何平均值,以显示三者的串联作用对风险的影响,如公式(1)所示^②。

$$SR = \sqrt{Haz \times Expo \times Vul} \quad (1)$$

式中:SR为中国战略性新兴产业所需的稀有矿产资源的供给风险;Haz、Expo和Vul分别为灾害、暴露和脆弱性。指标的定义和具体计算公式如下:

(1)灾害(Haz)。指中国对外国供给来源影响力不足而导致的潜在破坏性现象。可进一步拆解为2个部分:①中国稀有矿产资源进口来源过于集中;②中国在稀有矿产资源贸易中的影响力不强。借鉴 Li 等^[38]的研究,针对富含稀有矿产资源*i*的各个产品*m*,分别构建以国家为节点、以贸易关系为有向连边、以商品贸易额为权重的进口贸易网络。中介中心性用于描述一个节点是否位于网络中任意两点的最短路径之间,节点占据的这种位置越多,其中介中心性越高^[39]。因此,采用进口贸易集中度衡量中国进口来源的集中程度,用中国在贸易网络中的中介中心性评估贸易影响力。对于稀有矿产资源*i*,中国的进口贸易集中度越高,贸易影响力越小,受外国供给来源导致的潜在破坏性影响越大。

② 此处选择几何平均值,而非算术平均值,是因为该计算方式体现了三要素串联的逻辑,即风险的大小由三者共同决定。如果任一要素较低,整体风险值也会显著降低。相比之下,算术平均值更倾向于累加作用,可能会夸大其中某一因素的影响。例如,如果某一要素(如暴露)不存在,即使其他要素风险很高,整体风险也相对较低。算术平均值则无法体现这种对零值的敏感性,导致不合理的风险结果。

2025年7月

基于上述逻辑,采用式(2)-(4)量化灾害(Haz):

$$Haz_{i,t} = \sqrt{IC_{i,t} \times (1 - BC_{i,t})} \quad (2)$$

$$IC_{i,t} = \sum_m HHI_{m,t} \quad (3)$$

$$BC_{i,t} = \sum_m \sum_{(v,q)} \frac{D^c(v,q)}{D(v,q)} \quad (4)$$

式中: $Haz_{i,t}$ 为中国稀有矿产资源*i*在给定年份*t*因对外国供给来源影响不足导致的潜在破坏性现象; $IC_{i,t}$ 是中国战略性稀有矿产资源*i*于给定年份*t*在全产品链的进口贸易集中度。在计算时,分别计算含有稀有矿产资源*i*的产品*m*的进口赫芬达尔-赫希曼指数(HHI)^[40],再加总得到稀有矿产资源*i*的进口贸易集中度。 $BC_{i,t}$ 是指中国于给定年份*t*在稀有矿产资源*i*贸易网络模型的节点中介中心性。针对含有稀有矿产资源*i*的产品*m*的贸易网络, $D^c(v,q)$ 是两个国家*v*和*q*通过中国的最短路径数, $D(v,q)$ 是两个国家最短路径数。加总中国在每个产品*m*贸易网络的中介中心性,得到中国在稀有矿产资源*i*贸易网络的中介中心性。

(2)暴露($Expo$)。指中国战略性新兴产业对外国稀有矿产资源供给的依赖。在双边贸易中,中国战略性新兴产业对国外稀有矿产资源供给的依赖会增加暴露风险。本文采用全产品周期稀有矿产资源的净进口依赖度衡量中国稀有矿产资源供给风险的暴露($Expo$),如公式(5)所示:

$$Expo_{i,t} = \frac{NI_{i,t}}{AC_{i,t}} = \frac{NI_{i,t}}{DP_{i,t} + NI_{i,t}} \quad (5)$$

式中: $Expo_{i,t}$ 为中国稀有矿产资源*i*在给定年份*t*的净进口依赖度; $NI_{i,t}$ 和 $AC_{i,t}$ 分别表示全产品周期稀有矿产资源*i*第*t*年的净进口量和表观消费量。每一年全产品周期稀有矿产资源*i*的净进口量(NI)为进口量与出口量的差与库存量的和^[37]。根据中国现行原油储备管理体系,库存量一般分为国家储备和企业商业储备两个部分^[41]。中国在“十三五”规划纲要中明确提出要建立“产品、产能、产地储备相结合的国家战略资源能源储备体系”^[42],并在《全国矿产资源规划(2016—2020)》中强调,将锂等矿产资源上升至国家战略储备资源^[43]。然而目前没有公开数据可查国内稀有矿产资源储备(或库存)数据,因此本文假设为0,则净进口量简化为进口量与出口量之差。表观消费量(AC)以公式(6)计算:

$$AC_{i,t} = DP_{i,t} + NI_{i,t} \quad (6)$$

式中: $DP_{i,t}$ 为给定年份*t*稀有矿产资源*i*的国内产量。

特别地,对于特定的稀有矿产资源*i*,当中国为净出口国时(即进口量小于出口量), $NI < 0$,此时按公式(5)计算的 $Expo$ 为负数。为便于后续计算,文章将此情形下 $Expo$ 赋值为0。对含有稀有矿产资源*i*的*m*种产品,以转换系数统一为一类产品。

(3)脆弱性(Vul)。指中国战略性新兴产业承受外国稀有矿产资源供给中断的能力。已有研究证实,一个行业在给定商品上的支出与该行业盈利能力的比是评估该行业相对脆弱性的可行指标^[37]。面对稀有矿产资源外国供给来源中断灾害时,本文将暴露于灾害中的战略性新兴产业的相对脆弱性(IV)定义为该行业在给定稀有矿产资源上的支出与本行业的营业利润比。此外,由于不同战略性新兴产业对国民经济发展的贡献(EI)存在差异,对经济发展贡献更大的行业的权重更大。因此,最终采用公式(7)、(8)计算战略性新兴产业的脆弱性(Vul)。

$$Vul_{i,t} = IV_{i,j,t} \times EI_{j,t} = \sum_j \left(\frac{EXP_{i,j,t}}{OP_{j,t}} \times \frac{VA_{j,t}}{GDP_t} \right) \quad (7)$$

式中: $Vul_{i,t}$ 为中国稀有矿产资源*i*在给定年份*t*所属战略性新兴产业的脆弱性; $IV_{i,j,t}$ 是战略性新兴产业*j*于第*t*年在全产品周期稀有矿产资源*i*上的相对脆弱性; $EI_{j,t}$ 为第*t*年战略性新兴产业*j*的经济重要性; $EXP_{i,j,t}$ 为战略性新兴产业*j*于第*t*年在全产品周期稀有矿产资源*i*上的支出; $OP_{j,t}$ 是该行业在第*t*年的利润额; $VA_{j,t}$ 是行业*j*在第*t*年的附加值; GDP_t 为第*t*年的国内生产总值。

在实际计算过程中,变量 $OP_{j,t}$ 和 $EXP_{i,j,t}$ 均缺少直接的统计数据。经查,每一年中国各战略性新兴产业的产品销售率均大于95%,因此可采用营业收入代替销售收入指标来计算该产业的利润额。采用战略性新兴产业*j*的全产品周期稀有矿产资源消费份额($Consump_{i,j}$),乘以表观消费量($AC_{i,t}$)和平均资源价格($P_{i,t}$)可估算 $EXP_{i,j,t}$,如式(8):

$$EXP_{i,j,t} = Consump_{i,j} \times AC_{i,t} \times P_{i,t} \quad (8)$$

根据上述指标量化过程,最终确定了中国战略性新兴产业所需的稀有矿产资源供给风险评价框架,如表2所示。

表2 中国战略性新兴产业所需的稀有矿产资源供给风险评价指标体系

Table 2 Evaluation indicator system for supply risks of rare mineral resources required by China's strategic emerging industries

目标	维度	指标	指标量化
战略性新兴产业所需的稀有矿产资源供给风险评价	灾害	稀有矿产资源的进口贸易集中度	进口赫芬达尔-赫希曼指数
		稀有矿产资源贸易影响力	中介中心性
	暴露	稀有矿产资源全产品周期净进口依赖度	净进口量与表观消费量之比
		战略性新兴产业的相对脆弱性	指定产业在给定稀有矿产资源的支出与本产业的营业利润比
脆弱性	战略性新兴产业的经济重要性	战略性新兴产业对国民经济发展的贡献	

2.2 风险预测方法选择

常见的风险预警方法有灰色模型(GM)、时间序列模型、机器学习、贝叶斯网络模型等,其适用条件、优缺点见表3。与常用的预测模型相比,GM(1, 1)灰色预测模型由于运算过程简便,所需信息量少,因此对趋势性明显的小样本数据预测具有较大优势。因此本文选取灰色预测模型GM(1, 1)来预测供给风险。

灰色预测模型的原理是首先分析系统内各要素发展趋势间的相关程度,再对原始数据进行累减或者累加等处理。在把握数据变化规律的基础上,构建相应的微分方程并求解方程,便可得到预测模型。

2.3 数据来源与匹配

(1)评价对象选择。基于数据的可得性,选择锂、铍、铌、钽和锆5种稀有矿产资源作为研究对象。本文涵盖这些稀有矿产资源从上游矿产品,到中间产品再到下游最终产品应用的全产品周期,共涉及39种具体产品(图1)。为了便于计算,锂、铍、铌、钽和锆全产品周期的产量、进口量、出口量和消费量数据均已根据化学元素摩尔质量比转换为矿种净含量。

(2)战略性新兴产业中稀有矿产资源的应用与产业经营。基于现有文献及相关出版物,识别出5

种稀有矿产资源的典型消费场景及其消费份额,并进一步分析这些资源在战略性新兴产业中的应用。按照《国民经济行业分类》(GB/T4754),国民经济行业被划分为门类、大类、中类和小类。从1984年首次发布以来,该分类标准经历了1994、2002、2011和2017年的多次修订。然而,目前的国民经济行业分类体系难以直接区分新兴产业的类别^[50],同时国家尚未针对战略性新兴产业的发展规模发布专门的统计数据。为解决这一问题,首先从现行《国民经济行业分类》(GB/T4754-2017)中提取与5种稀有矿产资源相关的5位数行业代码,再对照历版GB/T4754,校正每一研究年份使用的5位数行业代码,以收集相关战略性新兴产业的利润总额和营业收入等数据。此外,将提取的5位数行业代码与《战略性新兴产业分类(2018)》^[51]中的3位数或4位数代码进行对应,从而进一步明确上述稀有矿产资源在战略性新兴产业中的应用。在此基础上,根据3位数或4位数代码,溯源特定稀有矿产资源在战略性新兴产业(代码第一层)中的具体材料类型(依据代码前两层整理而成),从而识别出稀有矿产资源在战略性新兴产业的典型消费场景。

(3)数据来源。本文使用的行业级运营数据来源于《中国经济普查年鉴》《中国工业年鉴》《中国电子信息产业统计年鉴》和EPS中国商品贸易数据

表3 常见风险预测模型的适用条件、优点与缺点

Table 3 Applicability conditions, advantages, and disadvantages of common risk prediction models

模型	适用条件	优点	缺点
GM模型	小样本数据、趋势平稳、数据波动较大 ^[44,45]	数据需求低,能处理不确定性	对复杂非线性关系的适配性较弱
时间序列模型(如ARIMA)	长期历史数据、稳定时间序列 ^[46]	对平稳时间序列适应性强	需要大量历史数据,对趋势性较弱的效果一般
机器学习模型(如支持向量机回归)	数据量大、关系复杂、非线性特性强	适合非线性预测,处理复杂关系能力强 ^[47,48]	计算复杂,需大量训练数据
贝叶斯网络模型	数据关系明确、样本量适中、需结合专家知识	能处理因果关系和不确定性 ^[49]	建模复杂,需大量先验知识

	锂 (11种)	铍 (2种)	铌 (7种)	钽 (11种)	锆 (8种)
产品名称	① 锂 ② 氢氧化锂 ③ 未名明锂的氧化物及氢氧化物 ④ 六氟磷酸锂 ⑤ 氯化锂 ⑥ 锂的碳酸盐 ⑦ 锰酸锂 ⑧ 锂镍钴锰氧化物 ⑨ 磷酸铁锂 ⑩ 锂的原电池及原电池组 ⑪ 锂离子蓄电池	① 未锻轧铍; 粉末 ② 锻轧铍及铍制品	① 水合钽铌原料 ② 其他铌、钽、钒矿砂及其精矿 ③ 一氧化铌 ④ 其他铌的氧化物及氢氧化铌 ⑤ 铌铁 ⑥ 未锻轧的铌; 废碎片; 粉末 ⑦ 锻轧的铌及其制品	① 水合钽铌原料 ② 其他铌、钽、钒矿砂及其精矿 ③ 钽粉 ④ 其他钽粉 ⑤ 其他未锻轧钽 ⑥ 钽废碎片 ⑦ 直径<0.5 mm的钽丝 ⑧ 直径≥0.5 mm的钽丝 ⑨ 其他锻轧钽及钽制品 ⑩ 片式钽电容器 ⑪ 其他钽电容器	① 锆矿砂及其精矿 ② 锆的氧化物及二氧化锆 ③ 锆的氟氧氯化物及氢氧基氯化物 ④ 碳酸锆 ⑤ 锆铜制精铜条、杆、型材及异型材 ⑥ 未锻轧锆 ⑦ 锆废碎片 ⑧ 锻轧锆及锆制品
海关代码	① 28051910 ② 28252010 ③ 28252090 ④ 28269020 ⑤ 28273910 ⑥ 28369100 ⑦ 28416910 ⑧ 28429030 ⑨ 28429040 ⑩ 85065000 ⑪ 85076000	① 81121200 ② 81121900	① 26159010 ② 26159090 ③ 28259041 ④ 28259049 ⑤ 72029300 ⑥ 81129240 ⑦ 81129940	① 26159010 ② 26159090 ③ 81032011 ④ 81032019 ⑤ 81032090 ⑥ 81033000 ⑦ 81039011 ⑧ 81039019 ⑨ 81039090 ⑩ 85322110 ⑪ 85322190	① 26151000 ② 28256000 ③ 28274910 ④ 28369950 ⑤ 74071010 ⑥ 81092000 ⑦ 81093000 ⑧ 81099000
转换系数	① 1.000 ② 0.165 ③ 0.165 ④ 0.046 ⑤ 0.164 ⑥ 0.188 ⑦ 0.055 ⑧ 0.011 ⑨ 0.044 ⑩ 0.150 ⑪ 0.150	① 1.000 ② 1.000	① 0.161 ② 0.161 ③ 0.853 ④ 0.350 ⑤ 0.650 ⑥ 1.000 ⑦ 1.000	① 0.283 ② 0.283 ③ 1.000 ④ 1.000 ⑤ 1.000 ⑥ 1.000 ⑦ 1.000 ⑧ 1.000 ⑨ 1.000 ⑩ 1.000 ⑪ 1.000	① 0.498 ② 0.400 ③ 0.541 ④ 0.662 ⑤ 0.012 ⑥ 1.000 ⑦ 1.000 ⑧ 1.000

图1 稀有矿产资源全产品链商品种类、海关代码及转换系数

Figure 1 Commodity types, customs codes, and conversion coefficients across entire product chain of rare mineral resources

库。稀有矿产资源全产品周期贸易数据来源于《中国海关统计年鉴》与联合国商品贸易数据库。鉴于数据可获得性的限制,风险评价指标所有数据覆盖2010—2020年。

3 结果与分析

3.1 中国战略性新兴产业所需的稀有矿产资源供给风险演化

(1) 灾害(Haz)

2010—2020年,5种稀有矿产资源灾害均值和标准差的变化趋势,可以发现铌和锆资源灾害值变化较小,而铍则有高灾害(均值大)和高波动(标准

差大)特征。研究期内,除钽资源灾害值呈现下降趋势,即从2010年的0.33降为2020年的0.21外,其他4种稀有矿产资源灾害得分在均值附近波动(图2)。铌、钽和锆的灾害平均水平较低,分别为0.23、0.18和0.29,低于其他2种稀有矿产资源。铍资源灾害值最大,研究期内均值高达0.77;其次是锂,均值为0.48。进一步分析5种稀有矿产灾害值波动范围,以11年灾害值标准差显示,铍(0.18)的波动最大,钽(0.12)和锂(0.09)次之,锆(0.08)和铌(0.06)较小。

(2) 暴露(Expo)

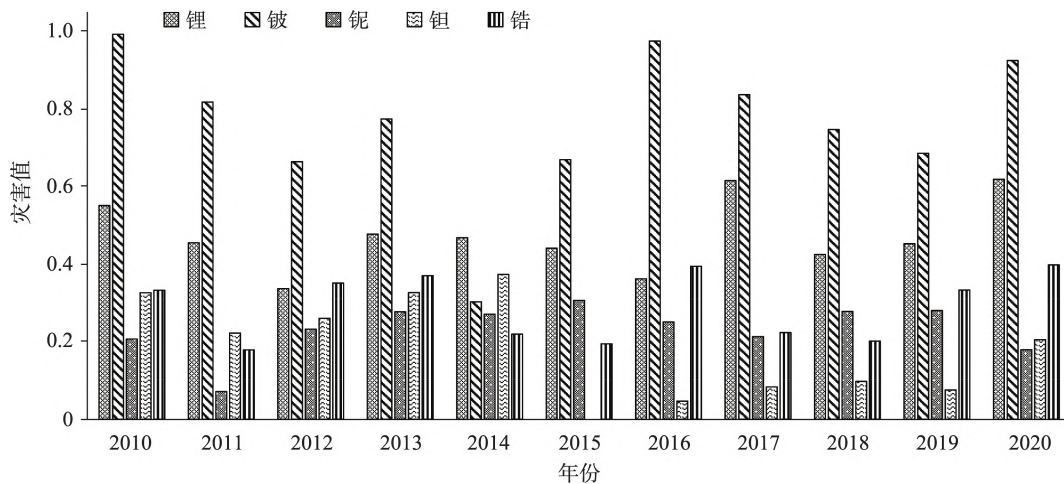


图2 2010—2020年中国稀有矿产资源的风险灾害

Figure 2 Risks-related disasters of rare mineral resources in China, 2010-2020

总体而言,2010—2020年,稀有矿产资源风险暴露值呈现出显著的结构分化特征,不同矿种的变化趋势明显。具体来看,锂和钽的风险暴露值整体呈下降趋势,其中锂的降幅最为显著(-0.17)(图3);铍和锆的风险暴露值则表现出上升趋势,且锆的增幅最大(0.18);铌在整个研究期间内风险暴露值始终维持在高位(1.00),未发生变化。从11年均值水平分析,铌的风险暴露均值最高(1.00),钽次之(0.98),锆位居第3(0.89),铍(0.13)和锂(0.02)的均值明显低于其他矿种。进一步考察风险暴露值的波动幅度,标准差结果显示,铌的波动最小(0.00),长期处于高风险暴露水平,其次依次为钽(0.02)、锂(0.05)和锆(0.07),铍的风险暴露波动幅度相对较大(0.18)。上述差异的形成机制主要与矿产资源的供需格局演变密切相关:铌和钽的风险暴露值长期

处于高位,主要归因于较高的净进口依赖度;锆的风险暴露值上升,主要受国内表观消费量持续增长及进口依赖程度较高的共同驱动;而自2014年以来,锂的风险暴露值呈现明显下降态势,主要原因在于中国已由锂资源全产品周期的净进口国转变为净出口国。

(3)脆弱性(Vul)

2010—2020年,以5种稀有矿产资源为原料的战略性新兴产业的相对脆弱性(IV)均呈上升趋势(图4),体现了由于中国战略性新兴产业规模的不断扩大,对特定稀有矿产资源需求的上涨使相关行业暴露于灾害的风险增加。但以铍、铌和钽为原材料的战略性新兴产业的相对脆弱性上涨幅度低于以锂为原材料的战略性新兴产业的相对脆弱性,且远低于以锆为原材料的战略性新兴产业的相对脆

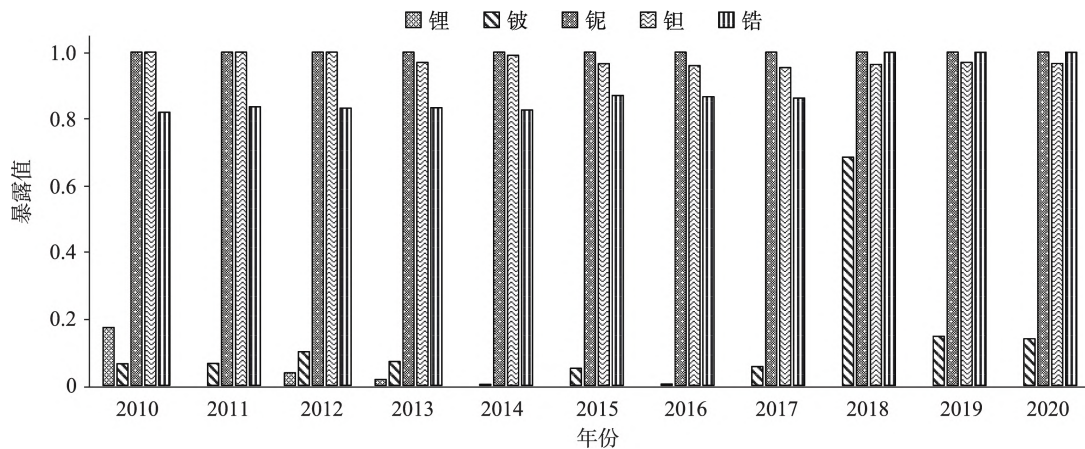


图3 2010—2020年中国稀有矿产资源的风险暴露

Figure 3 Risk exposure of rare mineral resources in China, 2010-2020

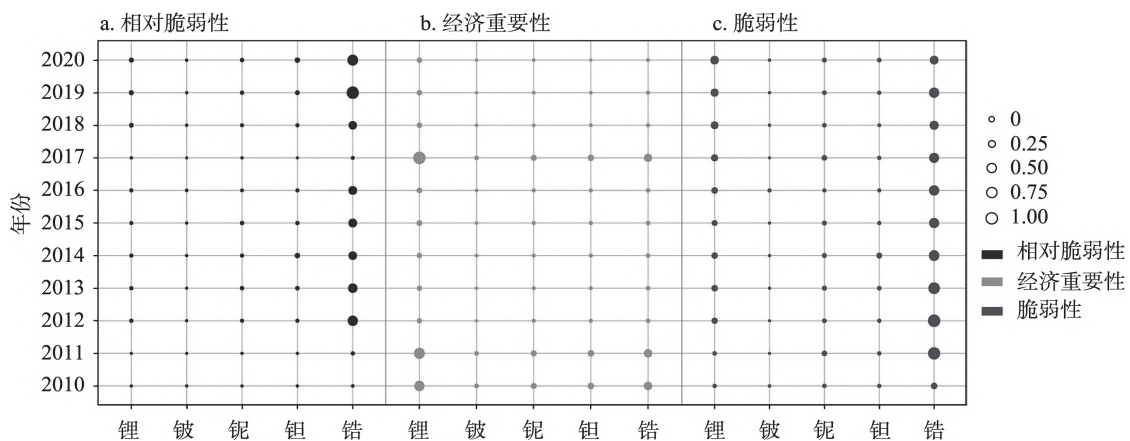


图4 2010—2020年中国稀有矿产资源的风险相对脆弱性、经济重要性和脆弱性

Figure 4 Relative vulnerability, economic importance, and vulnerability of rare mineral resources in China, 2010-2020

2025年7月

弱性。结合5种稀有矿产资源表观消费量的分析可以发现,由于锂的表观消费量相对较高,导致了以锂为原材料的战略性新兴产业,如锂离子电池制造,在锂资源上的支出较高。但由于上述战略性新兴产业年利润较高,远高于锂资源获取成本的增长,导致锂的相对脆弱性(IV)增幅有限。而对于锆资源,以其为原材料的电子专用材料制造产业获取资源的支出高,但产品所在的行业利润相对较小,导致其相对脆弱性(IV)增幅明显。

以锂为原材料的战略性新兴产业经济重要性(EI)远高于以其他稀有矿产资源为原材料的战略性新兴产业,也进一步证明了以锂为原材料的战略性新兴产业对GDP的贡献更高。随着大型锂离子电池(LIBs)的性能不断提高、产量持续增加以及价格的降低,使得依赖于LIBs的清洁能源应用得到了显著增长。较高的相对脆弱性和较高的经济重要性导致研究期内锂资源的脆弱性稳定增加;很高的相对脆弱性和相对较高的经济重要性使锆资源的脆弱性一直维持在较高水平,其他3种稀有矿产资源的脆弱性变化不大。

(4)供给风险(SR)

2010—2020年,不同稀有矿产资源的供给风险水平差异显著,锂和铍整体供给风险较低,而铈、钽和锆的供给风险相对较高,且波动特征各异。具体来看,锆在研究期内供给风险值一直处于较高位(图5),从2010年的0.31先增加到2012年的最高点为0.67,然后从最高点下降到2020年的0.52。相

反,锂在研究期间内供给风险一直处于较低位,且呈现下降趋势,从2010年的0.10降至2014年的为0。主要是由于从2014年起,中国已由锂资源全产品周期的净进口国转变为净出口国,其暴露值下降为0。铍、铈和钽在研究期内处于波动起伏。从均值水平分析,锆的风险灾害均值(0.52)最高,远远高于铈(0.19)、钽(0.13)、锂(0.03)和铍(0.03)。进一步分析5种稀有矿产供给风险值波动范围,研究期内供给风险值标准差显示,锆(0.10)和钽(0.07)的波动较大,锂居第3位(0.05),铈(0.03)和铍(0.02)较小。

采用BGR-VW方法^[52]对中国战略性新兴产业所需的稀有矿产资源供给风险值进行分级。根据2010—2020年内上述5种稀有矿产资源供给风险的历史波动数值的最大值和最小值确定区间的上下限,即[0, 1]。再将该区间划分为3个等级,即“宽松”“适度”和“紧张”,等级越高,风险越大。因此,根据研究期内稀有矿产资源的平均供给风险值可知,锂、铍、铈、钽、锆的供给风险分别是“宽松”“宽松”“适度”“适度”“紧张”。进一步地,本文基于5种稀有矿产资源在战略性新兴产业中的材料应用特征,系统刻画了稀有矿产资源供给风险在中国战略性新兴产业中的传导机制(图6)。图中显示,锂和铍的供给风险处于“宽松”区间;钽和铈供给风险处于“适度”状态,可能会影响以钽和铈为原材料的前沿新材料和金属材料制品的生产,从而制约新材料产业布局。锆的供给风险处于“紧张”状态,严重影响

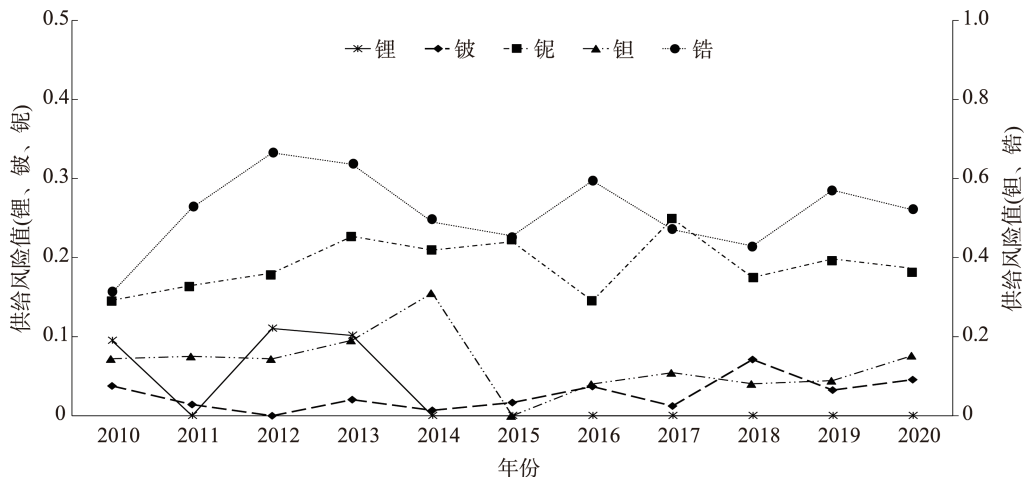


图5 2010—2020年中国稀有矿产资源供给风险

Figure 5 Supply risk of rare mineral resources in China, 2010-2020

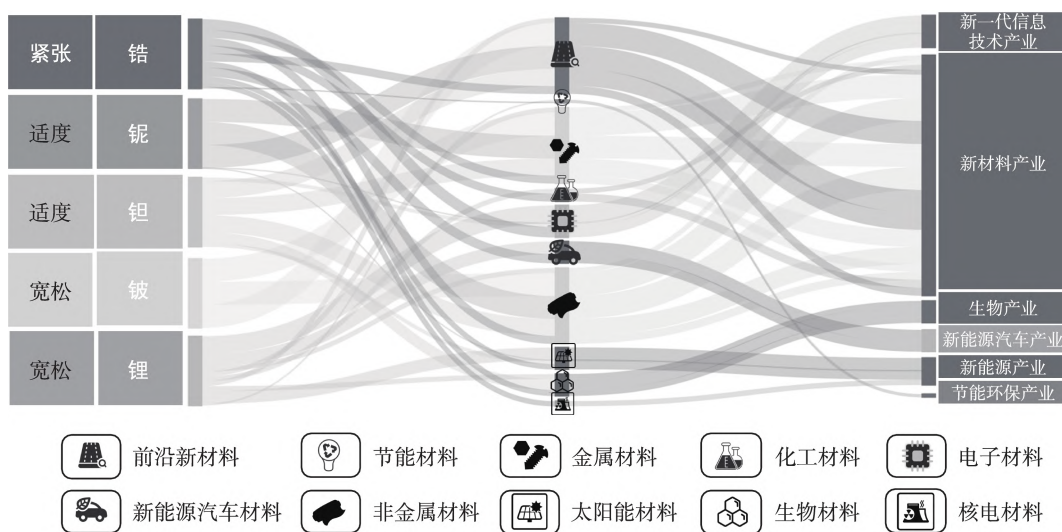


图6 稀有矿产资源供给风险在中国战略性新兴产业中的传导

Figure 6 Transmission of supply risk of rare mineral resources in China's strategic emerging industries

新材料产业的发展。

3.2 中国战略性新兴产业所需的稀有矿产资源供给风险预警

根据上述5种稀有矿产资源2010—2020年的供给风险评价结果,构建GM(1, 1)灰色预测模型,首先对2021—2024年进行回溯性预测以验证模型精度,再对2025—2030年进行前瞻性风险趋势预测与预警,如表4所示。

回溯预测结果显示,2021—2024年中国稀有矿产资源供给风险排序为:锆资源风险最高,钽资源风险次之,锂、铍和铌资源风险相对较低。这一结果与现实较为一致。2022年中国锆精矿进口依存度已上升至98.5%^[53],导致其风险暴露值极高,使以

锆为关键原材料的电子专用材料制造产业面临较高的资源获取成本,行业相对脆弱性显著增加。同期,钽资源对外依存度接近93%^[54],但由于钽在多个领域都具有可替代材料,因此其风险略低于锆。尽管铌资源的对外依存度依然较高,但随着下游战略性新兴产业的稳定发展,高温合金和电子产品对铌的需求未出现大幅增长或剧烈波动,供给风险相对较小。此外,铍的应用领域较为稳定,因此其风险水平较低。锂资源方面,自2014年起中国成为锂资源全产品周期的净出口国,这使其暴露水平降低,风险最小。

前瞻性预测结果显示,2025—2030年,锂和锆的供给风险变化小,分别维持在“宽松”和“紧张”等

表4 2021—2030年中国战略性新兴产业所需的稀有矿产资源供给风险

Table 4 Supply risk of rare mineral resources required by China's strategic emerging industries, 2021-2030

年份	锂	铍	铌	钽	锆
2021	○	○	○	●	●
2022	○	○	○	●	●
2023	○	○	○	●	●
2024	○	○	○	●	●
2025	○	○	○	○	●
2026	○	●	○	○	●
2027	○	●	○	○	●
2028	○	●	○	○	●
2029	○	●	○	○	●
2030	○	●	○	○	●

注:表格中○、●、●分别表示风险的“宽松”“适度”和“紧张”状态。

2025年7月

级。铍供给风险呈现增长趋势,表现为风险等级由2021年的“宽松”上升到2027年左右的“适度”,并于2029年开始呈现“紧张”状态。铌和钽的供给风险均由2020年的“适度”等级下降到2030年的“宽松”状态,且铌的供给风险下降更快。

4 讨论、结论与政策建议

4.1 讨论

本文整理了现有研究得出的锂、铍、铌、钽和锆供给风险(或安全)评价结果,讨论其与本文实证结果的异同,以此检验结果的有效性。对锂资源的研究,李鹏飞等^[9]从地质性、技术性、经济性因素、社会发展与监管政策因素、地缘政治因素3个方面对稀有矿产资源的供给风险进行评价,其结果显示锂的供给风险值较低。Zhou等^[20]指出锂资源安全状态在2010—2019年间呈上升趋势。上述研究与本文得出的锂供给风险较低且呈现下降趋势的结论一致。也有学者得出相反结论,如Yu等^[8]认为锂的供给风险呈上升趋势。这是由于Yu等^[8]将锂与其他战略性金属资源对比,包含铜、铁、铝等大宗金属资源,而不是仅与稀有矿产资源进行对比,造成结果较大差异。对铍资源的研究,陈子瞻等^[55]指出铍资源高度依赖外国进口,呈现高寡占型格局,支撑了铍供给风险受灾害驱动结论。但与其他4种稀有矿产资源相比,以铍为原材料的战略性新兴产业的经济重要性相对较小^[8],造成铍的供给风险相对较小。铌和钽的供给风险均值高于锂和铍^[11],主要是由于中国高度依赖全球铌和钽资源生产国巴西的资源供给^[56]。对锆资源的研究,尹传凯等^[57]指出全球锆矿趋于垄断,前三大资源国控制了全球大部分的产量和资源量,导致中国锆资源在研究期内供给风险极高。

由于未来技术市场份额和材料需求存在较大不确定性,战略性新兴产业对稀有矿产资源的需求变化可能呈现显著波动,并表现出非线性特征^[58,59]。灰色预测模型通过累加生成和平滑处理,将原始数据序列的非线性数据序列转化为近似线性的形式,从而在中短期内实现有效预测^[60]。因此该模型能够为供给风险提供有效预警,并为决策者提供可靠的风险评估支持。

4.2 结论

本文从战略性新兴产业发展需求出发,构建了

稀有矿产资源供给风险评价体系,选取2010—2030年为研究期,以全产品链为风险评价边界,对锂、铍、铌、钽和锆5种稀有矿产的供给风险演化及预警进行实证分析。主要结论如下:

(1)锂和铍的供给风险相对较小,风险等级处于“宽松”等级;铌的风险均值和钽的风险波动均高于锂和铍,但低于锆,供给风险处于“适度”水平;锆的供给风险均值高,且波动大,处于“紧张”态势,严重制约下游新材料产业的发展。

(2)锂的供给风险主要受灾害和脆弱性驱动,受暴露的影响较小。铍的供给风险主要来源于持续高位的灾害和暴露的相对宽幅波动影响。铌的供给风险来源于暴露。钽的供给风险则源于灾害的相对宽幅波动和暴露。锆的高供给风险则是暴露和脆弱性的共同作用。

(3)到2030年,锂、铌和钽的供给风险相对较小,铍和锆的供给风险则将处于“紧张”状态。

4.3 政策建议

基于“灾害-暴露-脆弱性”三角框架,结合稀有矿产资源供给风险的演化特征与2030年预测结果,应针对不同资源特征,采取差异化的政策组合,重点在降低灾害影响、减少暴露程度和提升抗脆弱能力3个方面系统发力,以实现风险治理的精准化与长期化。

(1)锂资源。锂的风险预测等级持续处于“宽松”水平,但仍需巩固全球供应链优势,防范潜在风险。一方面,应加强与澳大利亚、巴西、智利和阿根廷等主要锂资源国的战略合作,签署长期贸易协议,优化国际采购结构,降低进口集中度;另一方面,应加快国内锂回收利用和替代材料技术研发,提升资源利用效率,减少对海外供应的依赖。同时,建议建立企业-国家联合战略储备体系,并通过财政激励政策,推动下游高端电池产业提升盈利能力和风险抵御能力,增强整体产业链韧性。

(2)铌和钽资源。铌和钽的供给风险在未来呈下降趋势,风险等级降至“宽松”水平,说明多元供给与材料替代效果初步显现。应继续稳固与主要矿产国的长期合作关系,扩大贸易网络的国际影响力;同时,加大高端合金和电子应用领域的技术创新与产业升级投入,提升产业链附加值,从而进一步降低风险暴露与脆弱性。

(3) 铍资源。铍的供给风险预测仍处于“紧张”区间,需提前布局应对策略。应加快多元化进口渠道建设,拓展更多资源国家和地区,分散进口集中度;同时,推动国内外联合开展铍回收利用与替代材料技术示范工程,降低对单一材料的依赖。此外,可通过财政补贴、低息贷款等政策工具,支持下游产业的技术改造与转型升级,增强产业抗风险能力。

(4) 锆资源。锆的供给风险长期较高,是重点防范对象。应优先动用国家与企业的联合战略储备,保障军工、核电与高端电子等关键行业的用料安全;同步加快国内锆矿勘探、采选及深度加工能力建设,提升资源自给率,减少对进口的依赖。同时,应推动氧化锆回收利用及替代技术研发,提升下游产业附加值与盈利水平,切实增强产业链抗脆弱性。

参考文献(References):

- [1] 张希良,黄晓丹,张达,等. 碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J]. 管理世界, 2022, 38(1): 35-66. [Zhang X L, Huang X D, Zhang D, et al. Research on the pathway and policies for China's energy and economy transformation toward carbon neutrality[J]. Journal of Management World, 2022, 38(1): 35-66.]
- [2] 杨丹辉,高风平,刘思艺,等. 地缘政治与战略资源产业链重构:以关键稀土矿产与材料为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(5): 19-33. [Yang D H, Gao F P, Liu S Y, et al. Geopolitics and critical resource industrial chain restructuring: A study of rare earth minerals and materials[J]. China Population, Resources and Environment, 2024, 34(5): 19-33.]
- [3] 于宏源. 关键矿产的大国竞争分化、治理困境和中国选择[J]. 人民论坛·学术前沿, 2023, (15): 83-90. [Yu H Y. Critical minerals: Major power co-opetition, polarization, governance dilemma and the Chinese approach[J]. Frontiers, 2023, (15): 83-90.]
- [4] 邵留国,王子杨,蓝婷婷. 中国新能源汽车产业震荡的形成机制与对策[J]. 资源科学, 2022, 44(7): 1316-1330. [Shao L G, Wang Z Y, Lan T T. Formation mechanism and countermeasures of China's new energy vehicle industry shakeouts[J]. Resources Science, 2022, 44(7): 1316-1330.]
- [5] 孙涵,王箫箫,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.]
- [6] 陈从喜,张雅丽,孙春强,等. 战略性矿产概念和矿种目录的国际比较研究[J]. 中南大学学报(社会科学版), 2024, 30(1): 87-98. [Chen C X, Zhang Y L, Sun C Q, et al. International comparative study on the concept and list of strategic minerals[J]. Journal of Central South University (Social Sciences), 2024, 30(1): 87-98.]
- [7] 吴巧生,周娜,杨铖,等. 碳中和驱动下的战略性矿产资源全球治理[J]. 环境经济研究, 2024, 9(1): 130-148. [Wu Q S, Zhou N, Yang C, et al. Global governance of critical minerals driven by carbon neutrality[J]. Journal of Environmental Economic, 2024, 9(1): 130-148.]
- [8] 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.
- [9] 李鹏飞,杨丹辉,渠慎宁,等. 稀有矿产资源的战略性评估:基于战略性新兴产业发展的视角[J]. 中国工业经济, 2014, (7): 44-57. [Li P F, Yang D H, Qu S N, et al. A strategic assessment of rare minerals: Based on the perspective of strategic emerging industries development[J]. China Industrial Economics, 2014, (7): 44-57.]
- [10] 杨丹辉,渠慎宁,李鹏飞. 稀有矿产资源开发利用的环境影响分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(S3): 230-234. [Yang D H, Qu S N, Li P F. Analysis on environmental impact of rare mineral mining and utilization[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(S3): 230-234.]
- [11] 李鹏飞,杨丹辉,渠慎宁,等. 稀有矿产资源的全球供应风险分析:基于战略性新兴产业发展的视角[J]. 世界经济研究, 2015, (2): 96-104. [Li P F, Yang D H, Qu S N, et al. Analysis on global supply risk of rare minerals: From the perspective of strategic emerging industry development[J]. World Economy Studies, 2015, (2): 96-104.]
- [12] 杨丹辉. 资源安全、大国竞争与稀有矿产资源开发利用的国家战略[J]. 学习与探索, 2018, (7): 93-102, 176. [Yang D H. Resource security, competition among big powers and national strategy for the development and utilization of rare minerals[J]. Study & Exploration, 2018, (7): 93-102, 176.]
- [13] 李芳琴. 稀有矿产资源经济重要性评估[J]. 中国矿业, 2018, 27(11): 56-60, 70. [Li F Q. Economic importance assessment of rare minerals[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(11): 56-60, 70.]
- [14] 中国地质调查局. 中国“三稀”资源调查报[EB/OL]. (2016-11-01) [2024-01-02]. <https://www.cgs.gov.cn/ddzt/cgs100/bxcg/fwgi/201611/P020161128420027636437.pdf>. [China Geological Survey. Survey Report on China's "Three Rare" Resources[EB/OL]. (2016-11-01) [2024-01-02]. <https://www.cgs.gov.cn/ddzt/cgs100/bxcg/fwgi/201611/P020161128420027636437.pdf>.]
- [15] 王珏,冯宗宪. 基于间接进口成本的中国战略性矿产海外供应风险分析:以锆为例[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2022, 22(5): 70-87. [Wang J, Feng Z X. Overseas supply risk analysis of China's strategic mineral based on indirect import costs: A case study of zirconium[J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2022, 22(5): 70-87.]
- [16] 左芝鲤,成金华,詹成,等. 全球锂产业链贸易格局演化及脆弱性分析[J]. 资源科学, 2024, 46(1): 114-129. [Zuo Z L, Cheng J H, Zhan C, et al. Evolution and vulnerability analysis of the global

2025年7月

- trade pattern in the lithium industry chain[J]. *Resources Science*, 2024, 46(1): 114–129.]
- [17] 王登红, 刘善宝, 王成辉, 等. 我国三稀矿产找矿进展述评与新一轮找矿建议[J]. *中国地质调查*, 2023, 10(5): 1–8. [Wang D H, Liu S B, Wang C H, et al. Review on the progress of prospecting for three types of rare mineral resources in China and suggestions for the new round of prospecting[J]. *Geological Survey of China*, 2023, 10(5): 1–8.]
- [18] 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.]
- [19] 周娜, 吴巧生, 薛双娇. 新时代战略性矿产资源安全评价指标体系构建与实证[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(12): 55–65. [Zhou N, Wu Q S, Xue S J. A new security evaluation framework of strategical minerals in the new era[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(12): 55–65.]
- [20] Zhou N, Wu Q, Hu X, et al. Synthesized indicator for evaluating security of strategic minerals in China: A case study of lithium[J]. *Resources Policy*, 2020, DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101915.
- [21] Northey S A, Mudd G M, Werner T T. Unresolved complexity in assessments of mineral resource depletion and availability[J]. *Natural Resources Research*, 2018, 27(2): 241–255.
- [22] 刘全文, 沙景华, 闫晶晶, 等. 中国铬资源供应风险评价与对策研究[J]. *资源科学*, 2018, 40(3): 516–525. [Liu Q W, Sha J H, Yan J J, et al. Risk assessment and countermeasures of chromium resource supply in China[J]. *Resources Science*, 2018, 40(3): 516–525.]
- [23] Cimprich A, Bacg V, Helbig C, et al. Raw material criticality assessment as a complement to environmental life cycle assessment: Examining methods for product-level supply risk assessment[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2019, 23(5): 1226–1236.
- [24] 黄健柏, 孙芳. 中国稀有轻金属关键性动态评估: 以锂和铍为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(4): 879–888. [Huang J B, Sun F. Dynamic criticality assessment of rare light metals in China: Case study of lithium and beryllium[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(4): 879–888.]
- [25] 王昶, 孙晶, 左绿水, 等. 新能源汽车关键原材料全球供应风险评估[J]. *中国科技论坛*, 2018, 264(4): 83–93. [Wang C, Sun J, Zuo L S, et al. Evaluation of global supply risk of critical minerals for new energy vehicles[J]. *Forum on Science and Technology in China*, 2018, 264(4): 83–93.]
- [26] Helbig C, Bruckler M, Thorenz A, et al. An overview of indicator choice and normalization in raw material supply risk assessments [J]. *Resources*, 2021, 10(8): 79–79.
- [27] Graedel T E, Harper E M, Nassar N T, et al. On the materials basis of modern society[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(20): 6295–6300.
- [28] Hayes S M, McCullough E A. Critical minerals: A review of elemental trends in comprehensive criticality studies[J]. *Resources Policy*, 2018, 59: 192–199.
- [29] Graedel T E, Barr R, Chandler C, et al. Methodology of metal criticality determination[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2): 1063–1070.
- [30] Zuzak C, Mowrer M, Goodenough E, et al. The national risk index: Establishing a nationwide baseline for natural hazard risk in the US[J]. *Natural Hazards*, 2022, 114(2): 2331–2355.
- [31] Ye T, Liu W H, Wu J D, et al. Event-based probabilistic risk assessment of livestock snow disasters in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2019, 19(3): 697–713.
- [32] Kreibich H, Van L A F, Schroter K, et al. The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management[J]. *Nature*, 2022, 608(7921): 80–86.
- [33] Izaguirre C, Losasa I J, Camus P, et al. Climate change risk to global port operations[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(1): 14–20.
- [34] Field C B, Barros V, Stocker T F, et al. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [35] UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction). Terminology on Disaster Risk Reduction[EB/OL]. (2019–03–26) [2022–11–12]. <https://www.undrr.org/terminology>.
- [36] Jongman B, Winsemius H C, Aerts J C J H, et al. Declining vulnerability to river floods and the global benefits of adaptation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, DOI: 10.1073/pnas.1414439112.
- [37] Nassar N T, Brainard J, Guller A, et al. Evaluating the mineral commodity supply risk of the US manufacturing sector[J]. *Science Advances*, 2020, DOI: 10.1126/sciadv.aay8647.
- [38] Li B, Li H, Ren S, et al. Commodity supply risk assessment of China's copper industrial chain: The perspective of trade network [J]. *Resources Policy*, 2023, DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.103297.
- [39] 吴巧生, 周娜, 成金华, 等. 全产业链锂产品贸易格局演化与中国地位[J]. *中南大学学报(社会科学版)*, 2023, 29(3): 102–112. [Wu Q S, Zhou N, Cheng J H, et al. Evolution of lithium trade patterns in the entire supply chain for lithium products and the status of China[J]. *Journal of Central South University (Social Sciences)*, 2023, 29(3): 102–112.]
- [40] Bucciarelli P, Hache E, Mignon V. Evaluating criticality of strategic metals: Are the Herfindahl-Hirschman Index and usual concentration thresholds still relevant? [J]. *Energy Economics*, 2025, DOI: 10.1016/j.eneco.2025.108208.
- [41] 陶银球, 李杰. 稀有矿产资源战略储备制度: 域外比较与中国路径[J]. *太平洋学报*, 2025, 33(1): 69–80. [Tao Y J, Li J. Strategic reserve system of rare mineral resources: Extraterritorial comparison and China's approach[J]. *Pacific Journal*, 2025, 33(1): 69–80.]

- [42] 共产党员网. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[EB/OL]. (2016-03-17) [2022-11-12]. https://www.12371.cn/special/sswgh/wen/?ivk_sa=1024320u. [The Communist Party Member Network. The 13th Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China[EB/OL]. (2016-03-17) [2022-11-12]. https://www.12371.cn/special/sswgh/wen/?ivk_sa=1024320u.]
- [43] 中华人民共和国自然资源部. 全国矿产资源规划(2016-2020)[EB/OL]. (2016-11-15) [2022-11-12]. http://www.mnr.gov.cn/gk/ghjh/201811/t20181101_2324927.html. [Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. National Mineral Resources Planning (2016-2020)[EB/OL]. (2016-11-15) [2022-11-12]. http://www.mnr.gov.cn/gk/ghjh/201811/t20181101_2324927.html.]
- [44] Liu Y, Wang C, Wang H, et al. An integrated ecological security early-warning framework in the national nature reserve based on the gray model[J]. *Journal for Nature Conservation*, 2023, DOI: 10.1016/j.jnc.2023.126394.
- [45] Chen H, Yang Z, Peng C, et al. Regional energy forecasting and risk assessment for energy security: New evidence from the Yangtze River Delta region in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132235.
- [46] Valacchi G, Raffo J, Daly A, et al. Mining innovation and economic cycles: How commodity prices affect mining related patenting?[J]. *Mineral Economics*, 2023, 36(3): 437-461.
- [47] Li G M, Yu L Y, Zhang Y, et al. An integrated method with adaptive decomposition and machine learning for renewable energy power generation forecasting[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(14): 41937-41953.
- [48] Sun X Q, Xang P C, Cong K X. Research on early warning and control measures for arable land resource security[J]. *Land Use Policy*, 2023, DOI: 10.1016/j.landusepol.2023.106601.
- [49] Du W, Lao X Y, Tong Z J, et al. Early warning and scenario simulation of ecological security based on DPSIRM model and Bayesian network: A case study of east Liaohe River in Jilin Province, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136649.
- [50] 袁健红, 刘晶晶, 马永浩, 等. 战略性新兴产业分类方法及应用研究[J]. *中国科技论坛*, 2014, (8): 60-66. [Yuan J H, Liu J J, Ma Y H, et al. Classification of strategic emerging industries and empirical research[J]. *Forum on Science and Technology in China*, 2014, (8): 60-66.]
- [51] 国家统计局. 战略性新兴产业分类(2018)[EB/OL]. (2018-11-26) [2022-11-12]. http://www.stats.gov.cn/tjgz/tzgb/201811/t20181126_1635848.html. [National Bureau of Statistics. Classification of Strategic Emerging Industries (2018)[EB/OL]. (2018-11-26) [2022-11-12]. http://www.stats.gov.cn/tjgz/tzgb/201811/t20181126_1635848.html.]
- [52] Rosenau-Tormow 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.
- [53] 智研咨询. 2023年中国锆矿供需和进出口现状, 进口依存度提升, 国际价格上涨带动整体规模增长[EB/OL]. (2023-06-25) [2024-12-20]. <https://www.chyxx.com/industry/1147562.html>. [Zhiyan Consulting. 2023 China Zirconium Ore Supply and Demand, Import and Export Status: Rising Import Dependency and Overall Scale Growth Driven by International Price Increase[EB/OL]. (2023-06-25) [2024-12-20]. <https://www.chyxx.com/industry/1147562.html>.]
- [54] 中国矿业报. 中国钽行业走势分析与未来展望[EB/OL]. (2023-10-08) [2024-12-20]. <https://www.zgkyb.com/index/news/detail/id/https%25A%252F%252Fmp.zgkyb.com%252Fm%252Fnews%252F88485.html>. [China Mining News. Analysis of the Trends and Future Outlook of China's Tantalum Industry[EB/OL]. (2023-10-08) [2024-12-20]. <https://www.zgkyb.com/index/news/detail/id/https%25A%252F%252Fmp.zgkyb.com%252Fm%252Fnews%252F88485.html>.]
- [55] 陈子瞻, 郭冉启, 韩梅, 等. 中国铍资源供给风险分析[J]. *地球学报*, 2023, 44(2): 369-377. [Chen Z Z, Guo R Q, Han M, et al. Supply risk analysis of beryllium in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2023, 44(2): 369-377.]
- [56] 沈莽庭, 郭维民, 徐鸣, 等. 巴西铌钽矿典型矿床特征及其资源分布规律和找矿方向[J]. *矿床地质*, 2021, 40(3): 603-624. [Shen M T, Guo W M, Xu M, et al. Characteristics of typical niobium-tantalum deposits in Brazil and their resource distribution regularity and prospecting direction[J]. *Mineral Deposits*, 2021, 40(3): 603-624.]
- [57] 尹传凯, 王春连, 游超, 等. 中国锆矿资源特征、矿床类型、开发利用及找矿远景[J/OL]. *中国地质*, (2025-05-21) [2025-05-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20231106.1807.014.html>. [Yin C K, Wang C L, You C, et al. Zircon resource characteristics, deposit types, development utilization and prospecting prospects in China[J/OL]. *Geology of China*, (2025-05-21) [2025-05-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20231106.1807.014.html>.]
- [58] Calderon J L, Smith N M, Bazilian M D, et al. Critical mineral demand estimates for low-carbon technologies: What do they tell us and how can they evolve?[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, DOI: 10.1016/j.rser.2023.113938.
- [59] 马天宇, 赵鹏军, 张梦竹. 地缘政治风险对中国战略性矿产资源供应安全影响的研究进展与展望[J]. *资源科学*, 2024, 46(11): 2108-2123. [Ma T Y, Zhao P J, Zhang M Z. A review of research on geopolitical risks and security of China's critical mineral supply[J]. *Resources Science*, 2024, 46(11): 2108-2123.]
- [60] 司守奎, 孙玺菁. Python数学建模算法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2022. [Si S K, Sun X J. Python Mathematical Modeling Algorithms and Applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2022.]

Evolution and early warning of supply risks across entire product chain of China's rare mineral resources

ZHOU Na¹, WANG Di², WU Qiaosheng³, WANG Qiang³, YANG Cheng³, LI Jingyuan³

(1. School of Public Administration, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. School of Economics and Management, Hubei University of Education, Wuhan 430205, China; 3. School of Economics and Management, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China)

Abstract: [Objective] Rare mineral resources are critical raw materials supporting strategic emerging industries such as new energy and new materials, and their supply security has become a major concern in resource risk governance for major countries worldwide. This study aims to identify and evaluate the evolutionary characteristics of supply risks across the entire product chain of rare mineral resources required by China's strategic emerging industries, and to provide early warning of future risk trends, thereby providing a scientific basis for resource security planning in related Chinese industries. [Methods] A "risk triangle" analytical framework—comprising hazard, exposure, and vulnerability—was developed to elucidate the formation mechanisms of supply risks across the entire product chain of rare mineral resources. Five key resources critical to the development of China's strategic emerging industries—lithium (Li), beryllium (Be), niobium (Nb), tantalum (Ta), and zirconium (Zr)—were selected, and their supply risks from upstream primary mineral products to downstream end-use products from 2010 to 2020 were quantified and classified using the BGR-VW method. Furthermore, a GM(1, 1) grey prediction model was employed to provide early warning for supply risks of these resources from 2025 to 2030. [Results] (1) Li and Be exhibited relatively low supply risks ("relaxed" level). Nb and Ta maintained "moderate" risk levels throughout the study period, with Nb's average risk and Ta's risk volatility exceeding those of Li and Be. The average supply risk of Zr was high ("tight" level), imposing severe constraints on downstream new materials industries. (2) The sources of supply risk for different resources exhibited heterogeneous characteristics. Li's supply risk was jointly driven by hazard and vulnerability. Be's supply risk was primarily influenced by persistently high hazard levels and relatively wide fluctuations in exposure. Nb's risk arose predominantly from exposure. Ta's risk was driven by both hazard and exposure. Zr's risk was driven by exposure and vulnerability. (3) During 2025-2030, Li, Nb, and Ta were projected to maintain "relaxed" supply risk levels. The supply risk of Be would rise from "relaxed" to "tight" level, and the supply risk of Zr would remain at the "tight" level. [Conclusion] Based on the identified driving factors and future evolution trends of supply risks across China's entire rare mineral product chain, it is recommended to optimize the "hazard-exposure-vulnerability" triangle framework to selectively reduce supply risks of rare mineral resources. This approach aims to provide robust support for the development of strategic emerging industries and ensure their stable and healthy operation.

Key words: rare mineral resources; strategic emerging industries; entire product chain; supply risk; risk early warning; China