http://www.resourcesindustries.net.cn zycy@cugb.edu.cn

产业链视角下关键矿产资源供应风险影响因素及评价方法综述

张和馨，吴三忙

（中国地质大学（北京）经济管理学院，北京 100083）

摘 要：在全球能源转型与地缘格局重塑的背景下，关键矿产供应风险问题正日益凸显。本文从全产业链视角出发，构建含有上游（勘探开采）、中游（冶炼加工与运输）、下游（制造与应用）以及回收（循环利用）4 个环节的分析框架，并据此明确关键矿产供应链的内涵。通过对国内外文献进行系统性梳理，识别出资源、市场、技术、地缘与社会 5 类风险因素。评价方法部分，本文系统梳理了矿产资源供应风险评价方法的演变路径，涉及静态综合法、多准则决策法、动态与网络法及机器学习方法，比较各方法的建模思路及其适用范围。研究对关键矿产供应风险的理论基础、影响因素、评价方法加以梳理，为关键矿产供应风险评估与相关政策研究提供借鉴。

关键词：关键矿产；供应风险；产业链；影响因素；评价方法

中图分类号：F205 **文献标识码**：A **文章编号**：1673－2464（2026）03－0013－10

Review of Risk Factors and Evaluation of Critical Minerals Supply Chain from Perspective of Industrial Chain

ZHANG Hexin, WU Sanmang

(*School of Economics and Management*, *China University of Geosciences*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Under the global energy transformation and geopolitical pattern reconstruction, supply of critical minerals is emerging as a risk. This paper, viewing from perspective of whole industrial chain, establishes a framework composed of upstream (exploration & mining), middle stream (processing and transportation), and downstream (manufacturing and application), and recycling (renewable use), and determines the contents of supply chain of critical minerals. Based on the global references, five categories of risks have been identified as resources, markets, technologies, geopolitics and society. This paper studies the evolutionary path of risk evaluation of minerals supply, including static comprehensive method, multiple principles decision, dynamic and network and machine learning, with their model construction and applied ranges compared. This paper provides references for risks evaluation and policies of critical minerals supply from theoretical basis, factors and evaluation.

收稿日期：2025－10－21；**修订日期**：2025－11－03；**责任编辑**：段丽萍。

网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/11.5426.TD.20260104.1540.004 **DOI**：10.13776/j.cnki.resourcesindustries.20260104.002

基金项目：地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项（2024ZD1002001）。

第一作者简介：张和馨，硕士生，主要从事资源环境经济研究。E-mail：zhanghexin2002@163.com

通信作者简介：吴三忙，博士、教授，主要从事区域经济、资源环境经济研究。E-mail：wusanmang@sina.com

引用格式：张和馨，吴三忙，2026. 产业链视角下关键矿产资源供应风险影响因素及评价方法综述[J]. 资源与产业，28(3)：13－22.

ZHANG Hexin, *WU Sanmang*, 2026. *Review of risk factors and evaluation of critical minerals supply chain from perspective of industrial chain*[J]. *Resources & Industries*, 28(3): 13－22.

Key words: critical minerals; supply risks; industrial chain; factors; evaluation

0 引言

矿产资源作为现代工业和高新技术产业的战略性基础资源，其供应安全直接关系到国家经济安全和产业链稳定。近年来，国际贸易格局深刻调整，矿产资源供应链的不确定性显著上升。这一变化使得矿产资源供应风险逐渐成为学术界与政策层面共同关注的核心议题。目前，中国面临资源需求强劲、国内资源供给严重不足、约 2/3 以上的战略性矿产资源储量在全球处于劣势、短缺矿产对外依存度高等问题（王佳佳等，2023）。加之中国境外资源供应的风险冲击，导致中国矿产资源安全形势严峻、供应链体系脆弱。近年来，地缘政治紧张局势频发（马天宇等，2024a）、资源民族主义抬头（窦世权等，2025）以及气候变化（杜力普等，2025）等多重因素叠加，进一步加剧了矿产资源来源的不稳定性、资源价格的敏感性和资源运输的脆弱性（Watari et al.，2020）。

鉴于矿产资源供应风险的多元性和复杂性，构建系统的风险影响因素分类框架成为学界研究的热点和难点。基于此，本文尝试在前人研究的基础上，从产业链视角出发，系统梳理关键矿产供应风险的影响因素与评价方法，旨在为供应风险的全面评估提供新的框架，为后续的风险预警与政策制定提供理论支撑。

1 矿产资源供应风险的定义

矿产资源供应风险的核心是多种因素导致资源可供性失衡，即资源供给、经济可获得性与制度约束，无法匹配社会经济发展的动态需求。这种失衡常体现为价格大幅波动、供应中断或资源利用效率降低（王安建等，2020；Achzet et al.，2013）。传统可供性研究大多聚焦地质储量禀赋与经济可采性的静态评估，如 Hubbert 峰值理论。关键矿产有“细、伴、精”的地质特征和战略属性，它的供应风险本质更需要综合考察供应链不同环节的影响因素，找出各环节在风险形成中的传导路径（成金华等，2022；Schrijvers et al.，2020）。从产业链视角出发，安海忠等（2022）提出全球资源流动应涵盖“贸易—生产—循环”全网络；张宇祺等（2024）进一步构建“勘探开采—冶炼加工（运输）生产—行业使用—回收循环利用”四环节模型，强调回收环节在缓解资源稀缺性方面的作用。

基于上述学术共识，我们明确了关键矿产供应链的定义，它是从矿产资源的勘探与开采（上游）、经过冶炼加工与运输（中游）、到产品制造与应用（下游）、再到回收与循环利用（回收）等环节，形成的涵盖资源流动与价值传递的完整链条。上游环节包含从识别矿产赋存状态到资源开采的全过程，它的供应安全核心是资源可采储量，这一指标受多个因素限制。拿中国锂资源来说，它的储量仅占全球总量的 7%，资源禀赋差异很明显（毛景文等，2019），还有深层锂矿探测精度不足的技术难题，并且硬岩锂矿开采成本普遍高于盐湖提锂（李建武等，2023；Flexer et al.，2018）。中游环节存在供应风险链条中的技术约束和运输风险，直接决定原矿能否顺利转化为可用资源。中国稀土冶炼产能虽占全球的 90%，但高端钕铁硼专利被日美垄断，形成了技术壁垒（杨丹辉等，2024）；新冠疫情期间钴运输成本大幅上升，暴露了物流韧性的不足（朱永光，2021）。下游环节涉及材料应用到终端消费的转化过程，新能源汽车产业快速扩张，让锂需求在近 5 年内增长约 3 倍（孙涵等，2025）；芯片制造所需的高纯锗目前没有替代方案（吴巧生等，2020）。循环利用环节包含从废弃物回收到再生资源入链的再生系统，它的供应潜力由二次资源贡献率决定。

2 产业链视角下关键矿产供应风险影响因素分析

除了对供应风险内涵的讨论，学者们进一步从产业链各环节出发，识别了影响关键矿产供应风险的主要因素。本文从资源、市场、技术、地缘、社会 5 个维度进行梳理（表 1），并结合上游—中游—下游—回收 4 个环节展开分析。

2.1 上游环节供应风险影响因素分析

上游环节的供应风险来自多个因素。其中，资源禀赋差异和地缘因素决定供给的物理基础，市场

表 1　矿产资源供应风险的主要影响因素

Table 1　Key factors influencing mineral resource supply risk

风险类型	上游环节（勘探开采）	中游环节（冶炼加工与运输）	下游环节（产品制造与应用）	回收环节（循环利用）
资源风险	储量禀赋差异、勘探潜力不足			
市场风险	开采成本上升、原矿价格波动、投资不确定性	中间品价格波动、市场替代性弱	需求波动、消费结构变化	
技术风险	勘探与开采技术进步	冶炼与加工技术		回收技术成熟度
地缘风险	资源分布集中度、资源民族主义、进口依赖	运输通道安全	贸易结构依赖、制度与政策壁垒	绿色贸易壁垒
社会风险	环境规制与政策趋严、社区冲突与社会运动	政策环境、社会突发事件	绿色消费偏好	政策协调不足、公众环境意识

环境与技术条件影响资源转化效率，而制度与社会约束则塑造供给的外部环境。

资源分布不均构成上游风险的根本成因。研究表明，矿产的自然储量与其经济重要性直接相关，稀缺资源更容易引发全球供应链脆弱性问题（Graedel et al.，2012，2015）。当矿种储量高度集中时，往往会产生更明显的系统性风险（Tilton et al.，2016）。中国多数关键矿产资源存在先天不足与地理分布失衡问题，很大程度上影响了资源储备规模与供给水平（李建武等，2023）。而锂、镍等战略矿产的勘探发现，则有助于改善上游供给紧张局面（王登红等，2024）。

经济波动同样构成上游风险的重要来源。对铜锂钴镍等矿产的对比研究表明，开采成本增加与价格持续走低往往会引发矿山减产甚至停产，导致阶段性供应短缺（成金华等，2025）。价格剧烈震荡使国际资本采取审慎态度，资金流向的改变直接延缓资源开发进程（张佳等，2025）。全球关键矿产竞争持续激化促使企业普遍不得不削减勘探投入，这种趋势加剧了上游供给体系的不稳定（唐金荣等，2025）。

技术条件是将地下资源转化为实际产能的关键途径。无人机航磁测量和三维地质成像技术提升了对复杂地形区的勘探精度，为发现新矿床提供技术支持（Walter et al.，2020）。绿色开发、智能采矿与高效利用已经变成矿业可持续发展的基本要求，为提升关键矿产开采效率、控制环境成本指明新的发展路径（陈从喜，2025）。低成本开采工艺能提高资源回收率并减少开采损耗（安文杰等，2022）。运用系统动力学模型对锂产业技术创新进行的模拟显示，开采与冶炼技术的进步都能显著增强资源供给能力。技术创新正为缓解上游供应风险贡献重要力量。

地缘政治和制度因素加剧了矿产资源供给体系的不确定性。矿产储量的地理集中度使供应链更容易受到国际政治冲突影响（Zhang et al.，2022）。资源民族主义推动主要产矿国加强出口管制和战略储备，增加了全球资源流动和贸易格局的不稳定性（窦世权等，2025）。对比中欧相关政策发现，环保标准提升与碳排放限制共同推高了矿业开发门槛，使部分矿产资源失去开采价值（杜力普等，2025）。社区矛盾与社会运动同样构成矿产开发中的潜在风险（刘江山，2024）。地质条件、经济限制、技术水平和政策环境的相互交织，共同形成了上游供应风险的来源。

2.2　中游环节供应风险影响因素分析

比起上游的资源禀赋限制，中游环节在产业链中更具有传导与放大作用。它承担着将初级矿石转化为中间产品的核心任务，并且连接着资源供给与终端需求。这个环节的稳定性既会受到上游供给波动的冲击，也会被技术瓶颈、运输通道的不安全性以及制度约束等因素制约。所以中游环节通常被看作是关键矿产产业链中系统性风险最集中的部分。

中游企业长期承受着成本上升与需求变化的双重压力。上游能源价格只要出现波动，冶炼企业的生产成本就会增加，利润空间就会不断被压缩。当新能源产业处于扩张期的时候，原料价格的剧烈波动通常会让冶炼环节成为产业链的脆弱点（徐德义等，2020）。在这一过程中，出口管制与市场替代性不足，还会进一步放大中间品价格的不稳定性（Bown，2023）。

中游的冶炼与提纯环节，普遍具有高能耗、设备依赖度强和连续化生产的特征，所以技术瓶颈和能效约束会直接影响供给稳定性。Watari et al.（2020）认为，就是因为这些特征，冶炼环节成为供应链中最容易放大外部冲击的环节。技术进步能够提升冶炼环节的产能稳定性，并且可以通过优化能耗、提高资源利用效率，增强中游供给的可持续性（孙涵等，2023，2025）。技术创新是提高中游供给能力的核心驱动力。

运输网络的安全性是保持中游稳定运行的重要条件。现有研究表明，运输瓶颈和国际冲突会通过多条路径传导来削弱中游的稳定性（Sun，2022）。马天宇等（2024b）发现，当地缘政治紧张或公共事件冲击时，海运运输的不确定性可能导致中间品供给中断，并且引发剧烈的价格波动。拿具体矿种来说，我国虽然在稀土供应链中占据核心地位，但在钴的中游加工环节控制力较弱，跨国运输节点一旦受阻，风险会沿着供应链快速放大（周晓阳等，2025）。构建多元化运输通道与增强通道韧性，已成为防控中游风险的关键方式。

环保与碳减排要求越来越严格，冶炼加工的合规成本也在持续上升。欧盟碳边境调节机制（carbon border adjustment mechanism，CBAM）把铜、铝等产品纳入约束范围，直接抬高了冶炼企业的运行成本（Shkola et al.，2024）。同时，一些国家强化盟友合作，进而改变中间品贸易的稳定结构（赵行姝等，2025）。除了制度约束，社会扰动也会放大运行风险。朱永光（2021）发现，冶炼企业高度依赖连续化生产，社会抗议或劳工罢工等事件往往导致长时间停工，形成突发性供给风险。中游环节在关键矿产供应链中处于风险传导的核心位置，它的稳定性不仅取决于技术与运输条件，还受到制度环境和市场结构的共同约束。

2.3 下游供应风险影响因素分析

下游环节是关键矿产价值实现的终端，它的供应风险主要受市场、地缘与社会 3 方面的影响。下游环节和上游的资源约束型风险、中游的结构性风险不一样，它具有政策敏感性与消费导向特征。这个环节的稳定性不仅会影响终端市场的供需平衡，还会决定整个产业链的资源配置效率。

下游风险的根源是需求端的不确定性与结构集中。Achzet et al.（2013）曾指出，供给风险不仅来自资源稀缺，还受需求集中与替代性不足的共同作用。以新能源产业为例，它的快速扩张让锂、钴等关键矿产需求高度集中在电池制造与储能领域，对政策导向和技术路线变化十分敏感，所以当新能源补贴政策退坡或技术路线更替时，需求收缩会沿着产业链逆向传导，引发价格与产能的双重波动（杨丹辉，2025）。能源转型政策的预期会强化价格与产能的周期性起伏，让企业产能扩张与收缩呈现阶段性放大。终端市场结构的变化还会重塑锂产品的贸易格局与价格形成机制，进而抬升库存与资金压力（王永中等，2023；吴巧生等，2023）。需求集中与政策导向的叠加影响，让下游环节成为供应风险从市场端向制度端传导的起点。

除了市场结构风险，地缘与制度因素进一步改变下游格局。全球网络呈现明显的“核心—边缘”结构时，制造端对少数供给节点的依赖度上升，地缘摩擦会削弱下游弹性（Hou et al.，2018）。于宏源（2025）以美澳锂业合作为例说明，制度联盟会增强资源输出国在高端制造环节的议价能力，让其他国家的下游企业受到市场准入限制。碳足迹核算和回收比例标准的不同，也会形成制度壁垒，使低碳合规地区吸引制造环节聚集，改变全球产业链的地理分布（李昕蕾等，2023）。

社会偏好的改变持续影响着下游的供应风险。全球绿色转型速度加快，消费结构正明显转向更环保的产品。企业在管理供应链时，必须更加重视公众对可持续发展的期待。Sonderegger et al.（2020）指出，社会大众的可接受性与可持续性已逐渐成为资源利用评价体系中的重要指标。忽视这一趋势，企业在国际竞争中会处于劣势。如欧洲消费者大多愿意为通过“负责任采矿保证倡议”（the initiative for responsible mining assurance，IRMA）认证的电池产品支付更高价格，这种绿色偏好促使企业在采购和制造环节加强环境合规与可追溯管理（黄健柏等，2020）。

2.4 回收环节风险影响因素分析

回收环节是关键矿产供应链的末端，也是减少资源依赖、提升系统可持续性的重要支撑。该环节的风险主要体现在技术瓶颈、经济回收效率不高、政策体系不健全和国际合作机制不稳定等方面。与

前 3 个环节相比，回收环节的风险更有滞后性与外溢性，它的不确定性直接影响整个产业链的闭环稳定性。

回收技术的成熟程度直接决定再生资源的供给潜力，也是循环体系稳定运行的首要因素。孙涵等（2025）运用系统动力学模型模拟锂资源全产业链的技术发展，结果显示二次回收技术能明显提升资源供给潜力，再生锂占比于 2036 年后快速增长。这说明技术进步已成为影响回收供给能力的关键因素。我国回收体系还面临工艺复杂、能耗高和回收率低等问题，无法大规模利用。技术创新虽然能提升供给潜力，但若缺少制度激励与产业协同，它的作用往往难以持续。

全球对关键矿产的竞争日益激烈，与“去中国化”趋势共同增加了再生资源贸易的不确定性。唐金荣等（2025）指出部分发达国家通过提高绿色贸易壁垒和严格实施产地溯源标准，扰乱了关键矿产的跨境流通。这些政策虽以促进可持续供应为名，但其外溢效应却波及再生资源领域，提高了我国回收产品的合规成本与政策风险。与此同时，西方国家构建的关键矿产供应链联盟和“安全圈”正强化区域控制，盛莹婕等（2024）研究发现这导致全球供应链呈现阵营化格局。此类地缘竞争压缩了循环经济合作空间，增加了再生资源利用的不确定性。

社会环境与制度设计同样对回收环节的风险形成产生影响，我国虽然在资源回收规模上积累了一定基础，但还未建立起一套完整的全过程管理体系。由于缺乏有效的激励措施，再加上法规执行力度不足，市场机制难以充分实现其作用（朱清等，2024）。从国际的角度看，民众对关键矿产环境影响的关注度正逐步提高。美国的调研数据显示，大多数人更支持通过回收利用来取代污染严重的新矿开采（Fikru et al.，2024）。这种社会认知和环保意识的提升在促进绿色产业进步的同时，也对企业的回收处理能力提出了更严格的标准。可以说，制度支持和社会认可度的不足，正制约着当前回收体系的可持续发展。

3　矿产资源供应风险评价方法的演进与适用性分析

对矿产资源供应风险的研究方法，已从早期的静态评估逐渐发展到动态系统模拟，并进一步转向智能预测。这一演变过程表明，学术界对风险成因的认识在不断深化，同时也更加关注供应链本身的复杂动态特性。本文将现有研究成果划分为 4 种主要类型：静态综合法、多准则决策法、动态与网络法以及机器学习方法，并通过比较来探讨各自的适用场景。

3.1　静态综合法

早期矿产资源供应风险研究多采用静态综合评价方法，通过建立指标体系实现测度。典型方法包括信息熵法、层次分析法（AHP）与逼近理想解排序法（TOPSIS）。信息熵理论为客观赋权提供了数学依据（Shannon，1948），AHP 方法则借助判断矩阵实现专家经验的量化（Saaty，1987）。Hwang et al.（1981）提出的 TOPSIS 方法则基于最优与最劣解距离实现综合排序。它本质上属于多准则决策体系，但在矿产资源供应风险研究中，常与熵权法、AHP 等结合用于综合排序，所以在应用层面把它归入静态综合评价范畴。此类模型具有结构清晰、数据需求低、计算简便的优点，长期以来在矿产资源安全评价中得到广泛应用。

国内学者对这些方法进行了进一步发展。严筱等（2016）和查淼琳等（2023）在 PSR 框架下建立了统一的分析系统，该系统充分考虑了资源禀赋、市场波动和政策干预等因素。屈金芝等（2022）采用熵权 – TOPSIS 模型测度了中国钛资源供应安全程度，证明这种多指标综合评价方法具有实际应用价值。静态综合法的优势在于其清晰的逻辑结构和简便的操作流程，特别适合数据基础较好、时间跨度有限的研究场景。但是该方法无法有效呈现系统内部的动态相互作用，也难以准确反映供应风险随时间演变的规律。

3.2　多准则决策法

针对静态综合法在权重设定和不确定性处理方面的局限性，学者们引入了多准则决策分析方法来综合权衡各类复杂要素。该方法能够在多指标评价体系中协调主客观赋权方式，从而提升评估结论的可靠性。Figueira et al.（2005）、Jasiński et al.（2018）系统综述了多准则决策在矿产资源风险领域的应用实践，他们的研究证实该方法在协调多种

维度和构建不确定性模型方面具有显著优势。

国内研究继续将多准则决策法运用于关键矿产供应风险领域。兰振宇等（2024）提出应根据具体矿产特性选择分析方法，从而避免指标体系过度复杂和权重分配失准。成金华等（2025）通过融合 SMAA－TRI 方法与 ARIMA 预测模型，构建了新能源关键矿产的动态预警机制，显著提升了评估结果的稳定性。多准则决策法能统筹主客观赋权需求，协同处理地质、经济、政策与技术等多元信息，特别适用于复杂环境下的风险等级排序与决策辅助。但该方法建模流程相对烦琐，且高度依赖专家判读与数据一致性。

3.3 动态与网络法

供应链系统日益复杂，学术研究重点已由静态评估转向动态模拟及网络分析范畴，以探索风险随时间推移和在系统结构中的传播方式。系统动力学模型借助描述各要素彼此间的相互影响关系，模拟供应链面对外部冲击时的调整情形，把风险在不同环节间的传输与反馈机制呈现出来，复杂网络方法把贸易关系看成是由节点与连边组成的架构，从整体层面刻画系统的脆弱性以及韧性特性。

Lim-Camacho et al.（2017）的研究表明，供应链的结构越复杂，系统抵御外部干扰能力就越强。Hou et al.（2018）采用复杂网络方法对全球稀土贸易结构特征进行分析，说明网络结构和供应风险紧密相连。张梓滔（2023）、吴巧生等（2023）从产业链视角出发研究了锂资源贸易格局动态变化，发现产业结构依赖程度跟供应韧性之间存在内在关联。张亿军等（2025）把地缘政治风险指数添加进网络分析，阐释了外部冲击同结构依赖之间的相互作用。这些研究体现出，动态模拟和网络分析可捕捉传统静态方法难以反映的系统反馈机制及非线性关系。

除了借助系统结构分析，部分研究利用生命周期分析和物质流分析评估资源利用效率及环境影响。生命周期分析依靠追踪产品从开采到回收的全流程，量化每个阶段的能源消耗和环境影响。物质流分析是以物质平衡原理为基础，刻画资源在经济体系中的流入、流出、积累与再利用路径。现有研究证明，这种全过程视角有助于发现资源流动中存在的环境问题和回收上的障碍（Sonderegger et al.，2020；刘悠洋，2024）。一些学者引入综合性生命周期评估框架，把资源的重要程度与可循环特性放在一起分析（Hackenhaar et al.，2024）。这些进展说明，供应风险研究正从静态评价转变为关注全生命周期与资源循环的系统性分析。

3.4 机器学习方法

当前大数据和人工智能技术快速发展，学术界开始运用机器学习来识别和预测矿产资源供应风险。这种方法能处理多个变量间的复杂非线性关系，自动识别风险因素并进行动态预测，为传统定量研究开辟了新途径。相比静态模型和系统模拟，机器学习更注重从数据本身发现规律，特别适合分析变量多、相互作用复杂的供应链系统。

在各类算法中，贝叶斯网络运用条件概率模拟地缘冲突或市场波动中的风险传播路径。该方法能够量化不确定性并找出供应链的关键节点（Hosseini et al.，2020）。人工神经网络及 BP 神经网络具有识别非线性规律和预测趋势的能力。成金华等（2023）通过结合 STRI 指标与 BP 神经网络实现了风险等级的自动评估。郑明贵等（2024）将 GM（1，1）模型与 BP 神经网络相结合，构建了中国碳酸锂经济安全的动态预警系统，提升了对风险转折点的识别精度。支持向量机、集成学习与深度学习在风险分类和多因素预测方面也显示出应用潜力。这些算法能在有限数据条件下发现规律，并通过持续调整参数提高对短期波动的捕捉能力。机器学习拓展了供应风险研究的建模维度。相较于传统统计模型，机器学习具有更好的自适应能力和非线性特征捕捉能力，能在地缘环境、市场状况和政策导向快速变化时保持预测稳定性，为风险预警和识别工作提供新的技术方案。

3.5 方法比较

为系统比较不同方法在理论基础、建模逻辑及适用场景上的差异，本文在表 2 的基础上对各类方法的核心特征与适用性进行归纳分析。

矿产资源供应风险评价方法持续演进，现已构建起从静态评估到动态模拟再到智能预测的完整研究体系。静态综合法依托固定指标体系刻画风险整体水平，适用于数据基础完善的研究场景，但其缺陷在于难以捕捉动态演变过程。多准则决策法通过

表 2　矿产资源供应风险评价方法的比较

Table 2　Comparison of methods for evaluating mineral resource supply risk

方法类别	核心特征	主要优势	局限性	典型应用场景
静态综合法（如熵权法、AHP、TOPSIS）	基于固定指标体系的综合加权评价	模型结构清晰、参数要求低，结果具备较高可比性	无法刻画时序变化，对权重设定敏感	静态风险评价、国家或矿种间供应安全横向比较
多准则决策法（如MCDA、SMAA）	综合考虑多维指标及其不确定性	兼顾主客观赋权，结果稳健	模型复杂、依赖专家判断	供应风险排序、情景决策分析、指标权重优化
动态与网络法（如ARIMA、系统动力学、复杂网络、LCA、MFA）	利用时序建模与网络拓扑揭示风险传导与反馈机制	能刻画风险传播路径，适合动态与结构化分析	数据与参数需求高、模型构建复杂	供应链韧性与结构依赖研究、生命周期与物质流分析
机器学习方法（如贝叶斯网络、SVM、深度学习）	基于概率推理与算法学习，实现非线性识别与动态预测	能处理不确定性与高维动态数据，预测性能强	对数据质量与样本规模依赖高，解释性不足	地缘冲击传播模拟、价格波动预测、关键矿产供应预警、风险等级识别

主客观权重的协调配比增强了模型稳健性，更适用于多指标综合评估与多情景分析需求。

系统动力学与复杂网络模型通过模拟风险在供应链中的传递过程分析系统的适应能力和演变过程。生命周期分析和物质流分析将环境约束与资源循环纳入评估框架，将经济系统与生态系统进行综合考量。这些方法共同拓展了风险研究在时间和结构维度上的分析深度。

机器学习凭借其处理多变量和非线性问题的能力，已成为供应风险研究的重要工具。它能从复杂数据中识别风险规律并预测趋势变化。但是，这类方法的决策过程缺乏透明度，模型结果受训练数据特征影响显著。所以，在需要明确因果机制的政策制定和原理分析场景中，机器学习仍存在应用局限性。

在后续研究中应当注重不同分析方法的融合应用。通过整合静态模型、动态仿真与机器学习技术，加强多源数据综合利用和算法透明度建设，可以构建更完善的关键矿产供应风险监测预警系统。这种综合性研究路径能够为相关政策制定提供更坚实的科学支撑。

4　研究展望

当前，关键矿产供应风险研究虽在理论框架、指标体系与方法体系方面取得较大进展，但在理论深化、方法创新与数据支撑方面仍存在不足。未来的研究可从以下几个方面进一步拓展。

1）在理论层面，深入探究资源、技术和制度等因素怎样相互影响，从复杂系统与地缘政治经济学角度去观察，可以揭示风险在各层面之间的传递方式以及影响机制。这种视角有助于更深刻地理解全球供应链本身存在的弱点。

2）在研究方法上，现在大部分分析仍旧采用单一指标或静态模型，未来开展研究时需要构建多层网络和投入产出模型，以此衡量从开采、加工、制造到回收各个阶段之间的风险传递和相互作用，能够把系统动力学、灰色预测及贝叶斯网络等技术组合起来运用，对风险扩散过程进行模拟，构建动态预警体系，采用机器学习与深度学习等智能算法，将提高对复杂非线性关系的识别及预测水平。

3）在政策与数据结合方面，各国在资源保障、贸易限制与环保标准方面的分歧日渐明显，制度上的差异已经成为影响供应安全的关键要素，后续研究可强化跨国政策对比，着重分析国际合作机制怎样缓解资源保护主义并增强供应链的韧性，同时得关注政策实施跟数据支持之间的联动关系，借助区块链、知识图谱以及人工智能等技术，可对矿产勘探、加工、贸易和回收的全过程实施动态监测。

5　总结

本文从全产业链视角回顾关键矿产供应风险的主要研究进展情况，覆盖了从上游勘探到回收再利用的 4 个环节，又梳理了资源、市场、技术、地缘以及社会 5 类风险的来源以及传导机理，关键矿产供应风险显示出明显的多元及传导性质，不但受资源禀赋与经济条件的牵制，也受技术水平、贸易结构、政策制度以及社会环境等多种因素的共同影响。

从方法体系角度，学术界开始慢慢从以静态综合测度为主要形式，转到多准则决策与系统模拟的研究方向上来，不同方法在数据需求、建模的难易程度以及解释能力的表现上各有长处，对比早期主要借助静态指标的研究，学者们更聚焦于供应风险的系统性与动态性分析。

本文采用全产业链加上多维风险框架，整理了关键矿产供应风险研究的主要脉络，为供应安全的系统评估构建了理论基础。未来研究可以进一步拓展跨尺度的风险演化分析，进而在动态预警与制度协同治理方面深入挖掘，为增强我国关键矿产供应链的韧性提供实证依据与决策引导。

参考文献

安海忠，李华姣，2022. 战略性矿产资源全产业链理论和研究前沿[J]. 资源与产业，24(1)：8-14.〔AN H Z，LI H J，2022. Theory and research advances in whole industrial chain of strategic mineral resources[J]. Resources & Industries，24(1)：8-14.〕

安文杰，姚维信，武拴军，等，2022. 龙首矿西二采区矿体低成本开采技术研究[J]. 矿业研究与开发，42(7)：1-6.〔AN W J，YAO W X，WU S J，et al.，2022. Study on low-cost mining technology of ore body in west No. 2 mining area of Longshou mine[J]. Mining Research and Development，42(7)：1-6.〕

陈从喜，2025. 战略性矿产资源开发利用研究进展与展望[J]. 中国矿业，34(2)：4-19，1.〔CHEN C X，2025. Progress and prospects in the development and utilization of strategic mineral resources[J]. China Mining Magazine，34(2)：4-19，1.〕

成金华，朱永光，徐德义，等，2022. 战略性关键矿产可供性评价方法研究现状及展望[J]. 中国地质大学学报(社会科学版)，22(4)：38-49.〔CHENG J H，ZHU Y G，XU D Y，et al.，2022. Research status and prospect of strategic critical minerals availability evaluation methods[J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition)，22(4)：38-49.〕

成金华，帅竞，赵雨佳，等，2023. 关键矿产供应风险评估与预测：以铜资源为例[J]. 资源科学，45(9)：1778-1788.〔CHENG J H，SHUAI J，ZHAO Y J，et al.，2023. Risk assessment and prediction of critical mineral resources supply for China：A case of copper[J]. Resources Science，45(9)：1778-1788.〕

成金华，周文潇，沈鹏程，等，2025. 中国新能源关键矿产资源供应安全评价与预警：以铜、锂、钴、镍为例[J]. 华中师范大学学报(自然科学版)，59(4)：611-623.〔CHENG J H，ZHOU W X，SHEN P C，et al.，2025. Evaluation and early-warning of critical mineral resource supply security for China's new energy sector：Cases of copper，lithium，cobalt，and nickel[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)，59(4)：611-623.〕

窦世权，徐德义，成金华，等，2025. 关键矿产资源政治：缘起、演进及影响[J]. 国际经济评论(6)：90-108.〔DOU S Q，XU D Y，CHENG J H，et al.，2025. The resource politics of critical minerals：Origins，evolution and impacts[J]. International Economic Review (6)：90-108.〕

杜力普，刘立涛，代涛，等，2025. 气候与地缘政治变化背景下中欧战略性矿产资源政策演变研究[J]. 中国矿业，34(2)：57-69，1.〔DU L P，LIU L T，DAI T，et al.，2025. Evolution of China-EU strategic mineral resource policies amid climate and geopolitical changes[J]. China Mining Magazine，34(2)：57-69，1.〕

黄健柏，孙芳，宋益，2020. 清洁能源技术关键金属供应风险评估[J]. 资源科学，42(8)：1477-1488.〔HUANG J B，SUN F，SONG Y，2020. Supply risk assessment of critical metals in clean energy technology[J]. Resources Science，42(8)：1477-1488.〕

兰振宇，谢国林，刘泽群，2024. 战略性矿产资源安全评价方法研究分析[J]. 中国矿业，33(S1)：16-20.〔LAN Z Y，XIE G L，LIU Z Q，2024. Analysis of safety assessment and supply risk of strategic mineral resources[J]. China Mining Magazine，33(S1)：16-20.〕

李建武，李天骄，贾宏翔，等，2023. 中国战略性关键矿产目录厘定[J]. 地球学报，44(2)：261-270.〔LI J W，LI T J，JIA H X，et al.，2023. Determination of China's strategic and critical minerals list[J]. Acta Geoscientica Sinica，44(2)：261-270.〕

李昕蕾，刘倩如，2023. 全球清洁能源转型中关键矿产的大国博弈及中国应对[J]. 当代世界社会主义问题(4)：127-141，164-165.〔LI X L，LIU Q R，2023. Great power games of critical minerals in the global clean energy transition and China's response[J]. Issues of Contemporary World Socialism(4)：127-141，164-165.〕

刘江山，2024. 关键矿产资源供应链安全问题对策研究[J]. 中国矿业，33(S1)：21-24，35.〔LIU J S，2024. Study on countermeasures for ensuring the security of the supply chain of key mineral resources[J]. China Mining Magazine，33(S1)：21-24，35.〕

刘悠洋，2024. 中国芯片产业关键矿产供应风险评价与预警研究[D]. 广州：广东外语外贸大学.〔LIU Y Y，2024. Risk evaluation and early warning study on the supply of key mineral for China's chip industry[D]. Guangzhou：Guangdong University of Foreign Studies.〕

毛景文，杨宗喜，谢桂青，等，2019. 关键矿产：国际动向与思考[J]. 矿床地质，38(4)：689-698.〔MAO J W，YANG Z X，XIE G Q，et al.，2019. Critical minerals：International trends and thinking[J]. Mineral Deposits，38(4)：689-698.〕

马天宇，赵鹏军，张梦竹，2024a. 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，46(11)：2108-2123.〔MA T Y，ZHAO P J，ZHANG M Z，2024. A review of research on the geopolitical risks and security of China's critical mineral supply[J]. Resources Science，46(11)：2108-2123.〕

马天宇，赵鹏军，2024b. 海运地缘政治风险与中国资源安全：影响与应对[J]. 地域研究与开发，43(6)：16-23.〔MA T Y，ZHAO P J，2024. Geopolitical risks in global shipping and China's resource security：Influences and Countermeasure[J]. Areal Research and Development，43(6)：16-23.〕

屈金芝，张艳松，张艳，等，2022. 基于熵权法 TOPSIS 模型中国钛资源供应安全评价[J]. 资源与产业，24(1)：26-36.〔QU J Z，

ZHANG Y S, ZHANG Y, et al., 2022. Supply security of China's titanium resource based on entropy TOPSIS model[J]. Resources & Industries, 24(1): 26-36.〕

盛莹婕, 孙晓蕾, 姬强, 等, 2024. 战略性关键矿产的全球竞争:地缘博弈态势与我国战略对冲机制[J]. 中国能源, 46(12): 58-67.〔SHENG Y J, SUN X L, JI Q, et al., 2024. Global rivalries over strategic critical minerals: geopolitical competition and China's strategic hedging approaches[J]. Energy of China, 46(12): 58-67.〕

孙涵, 孟正豪, 成金华, 2023. 技术进步对关键矿产供应影响的实证研究:以镍为例[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 57(1): 13-23.〔SUN H, MENG Z H, CHENG J H, 2023. Empirical study on the impact of technological progress on the supply of key minerals: Taking nickel as a case[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 57(1): 13-23.〕

孙涵, 陈璐, 成金华, 等, 2025. 技术创新对关键矿产资源可供性的动态影响仿真模拟: 以锂资源为例[J]. 中南大学学报(社会科学版), 31(4): 113-127.〔SUN H, CHEN L, CHENG J H, et al., 2025. Simulation of dynamic impact of technological innovation on the sustainable supply of key minerals: A case study of lithium[J]. Journal of Central South University (Social Science), 31(4): 113-127.〕

唐金荣, 王春辉, 张福良, 等, 2025. 全球新一轮关键矿产竞争的动力、趋势与中国应对[J]. 中国矿业, 34(5): 1-8.〔TANG J R, WANG C H, ZHANG F L, et al., 2025. Global competition for critical minerals: Motivation, new trends and China's response[J]. China Mining Magazine, 34(5): 1-8.〕

王安建, 高芯蕊, 2020. 中国能源与重要矿产资源需求展望[J]. 中国科学院院刊, 35(3): 338-344.〔WANG A J, GAO X R, 2020. China's energy and important mineral resources demand perspective[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 35(3): 338-344.〕

王登红, 代鸿章, 刘善宝, 等, 2024. 中国战略性关键矿产勘查开发进展与新一轮找矿的建议[J]. 科技导报, 42(5): 7-25.〔WANG D H, DAI H Z, LIU S B, et al., 2024. Progress in strategic critical minerals exploration and production and proposals for a new round of prospecting in China[J]. Science & Technology Review, 42(5): 7-25.〕

王佳佳, 王峰, 刘丽, 2023. 基于文献计量分析的矿产资源安全研究综述[J]. 资源科学, 45(4): 683-693.〔WANG J J, WANG F, LIU L, 2023. A review of mineral resource security research based on bibliometric analysis[J]. Resources Science, 45(4): 683-693.〕

王永中, 万军, 陈震, 2023. 能源转型背景下关键矿产博弈与中国供应安全[J]. 国际经济评论(6): 147-176, 8.〔WANG Y Z, WAN J, CHEN Z, 2023. Geopolitical game and China's supply security in critical minerals amid energy restructuring[J]. International Economic Review(6): 147-176,8.〕

吴巧生, 周娜, 成金华, 2020. 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, 42(8): 1439-1451.〔WU Q S, ZHOU N, CHENG J H, 2020. A review and prospects of the supply security of strategic key minerals[J]. Resources Science, 42(8): 1439-1451.〕

吴巧生, 周娜, 成金华, 等, 2023. 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), 29(3): 102-112.〔WU Q S, ZHOU N, CHENG J H, et al., 2023. 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 Science), 29(3): 102-112.〕

徐德义, 朱永光, 2020. 能源转型过程中关键矿产资源安全回顾与展望[J]. 资源与产业, 22(4): 1-11.〔XU D Y, ZHU Y G, 2020. Review and outlook of key minerals security during energy transformation[J]. Resources & Industries, 22(4): 1-11.〕

严筱, 陈莲芳, 严良, 等, 2016. 基于 PSR 模型的我国重要矿产资源安全评价[J]. 中国矿业, 25(1): 43-49.〔YAN X, CHEN L F, YAN L, et al., 2016. Evaluation of major mineral resources' security in China based on PSR mode[J]. China Mining Magazine, 25(1): 43-49.〕

杨丹辉, 高风平, 刘思艺, 等, 2024. 地缘政治与战略资源产业链重构: 以关键稀土矿产和材料为例[J]. 中国人口·资源与环境, 34(5): 19-33.〔YANG D H, GAO F P, LIU S Y, et al., 2024. Geopolitics and critical resource industrial chain restructuring: A study of rare earth minerals and materials[J]. China Population, Resources and Environment, 34(5): 19-33.〕

杨丹辉, 2025. 战略性关键矿产全球供求格局演变与中国应对[J]. 经济纵横(3): 14-30.〔YANG D H, 2025. Evolution of global supply and demand pattern of strategic key minerals and China's response[J]. Economic Review Journal (3): 14-30.〕

于宏源, 2025. 大国竞争背景下美澳锂业伙伴关系的进展及其影响[J]. 太平洋学报, 33(5): 61-74.〔YU H Y, 2025. In the belly of power competition: Progress and implications of the U. S. -Australia lithium parternership[J]. Pacific Journal, 33(5): 61-74.〕

查森琳, 王有远, 卢瑞辰, 2023. 基于 PSR 模型的我国萤石矿产资源安全评价[J]. 能源研究与管理, 15(3): 13-17, 31.〔ZHA M L, WANG Y Y, LU R C, 2023. Safety evaluation of fluorite mineral resources in China based on PSR model[J]. Energy Research and Management, 15(3): 13-17,31.〕

张佳, 谭秋凡, 2025. 美国对非洲关键矿产政策及其影响[J]. 国际论坛, 27(3): 20-37, 155-156.〔ZHANG J, TAN Q F, 2025. U. S. policy toward African critical minerals and its implications[J]. International Forum, 27(3): 20-37,155-156.〕

张亿军, 白文博, 宋益, 等, 2025. 地缘政治风险对锂资源贸易网络韧性的影响: 基于复杂网络和面板回归分析[J]. 资源科学, 47(7): 1517-1532.〔ZHANG Y J, BAI W B, SONG Y, et al., 2025. Impact of geopolitical risks on resilience of lithium resource trade network: Based on complex network and panel regression analysis[J]. Resources Science, 47(7): 1517-1532.〕

张宇祺, 李华姣, 安海忠, 等, 2024. 产业链视角下关键矿产资源可供性研究进展[J]. 资源科学, 46(4): 671-686.〔ZHANG Y Q, LI H J, AN H Z, et al., 2024. Progress and frontiers of critical mineral resource availability research based on the perspective of industrial chain[J]. Resources Science, 46(4): 671-686.〕

张梓滔, 2023. 锂资源国际贸易格局演变及影响因素研究[D]. 长沙: 中南大学.〔ZHANG Z T, 2023. Study on international trade pattern evolution and influence factors of lithium[D]. Changsha: Central South University.〕

赵行姝, 袁征, 2025. 加拿大关键矿产的对外策略及内在动因[J]. 太平洋学报, 33(1): 54-68.〔ZHAO X S, YUAN Z, 2025. Canada's international strategy on critical minerals: Performance and motivations[J]. Pacific Journal, 33(1): 54-68.〕

郑明贵, 刘丽珍, 陶思敏, 等, 2024. 中国碳酸锂经济安全预警研究[J]. 盐湖研究, 32(2): 117-126.〔ZHENG M G, LIU L Z, TAO S M, et al., 2024. Economic security warning of lithium carbonate in China[J]. Journal of Salt Lake Research, 32(2): 117-126.〕

周晓阳, 徐衍爽, 李泽煜, 等, 2025. 战略性关键矿产资源贸易网络韧性:自然和政治双重情境下的全产业链分析[J]. 系统工程理论与实践. (2025-06-13)[2025-10-10]. https://link.cnki.net/urlid/11.2267.n.20250611.1839.006.〔ZHOU X Y, XU Y S, LI Z Y, et al., 2025. Strategic key minerals trade network resilience: Whole industry chain based analysis under nature and politics situation[J]. Systems Engineering—Theory & Practice. (2025-06-13)[2025-10-10]. https://link.cnki.net/urlid/11.2267.n.20250611.1839.006.〕

朱清, 朱海碧, 邹谢华, 2024. 全球战略性矿产产业链供应链分析[J]. 中国国土资源经济, 37(7): 4-13, 28.〔ZHU Q, ZHU H B, ZOU X H, 2024. Analysis of global strategic mineral industry chain and supply Chain[J]. Natural Resource Economics of China, 37(7): 4-13,28.〕

朱永光, 2021. 战略性关键矿产可供性影响因素及其作用机制研究[D]. 武汉:中国地质大学.〔ZHU Y G, 2021. Influencing factors and theoretical mechanism of strategic critical mineral resources availability[D]. Wuhan: China University of Geosciences.〕

ACHZET B, HELBIG C, 2013. How to evaluate raw material supply risks: An overview[J]. Resources Policy, 38(4): 435-447.

BOWN C P, 2023. Industrial policy for electric vehicle supply chains and the US-EU fight over the inflation reduction act:Peterson Institute for International Economics Working Paper[R]. Washington: Peterson Institute for International Economics.

FIGUEIRA J, GRECO S, EHRGOTT M, 2005. Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys[M]. Berlin: Springer-Verlag.

FIKRU M G, KOPPERA S, 2024. Public perceptions of mineral criticality and preferences for energy transition strategies in the United States[J]. Communications Earth & Environment, 5(1): 1-11.

FLEXER V, BASPINEIRO C F, GALLI C I, 2018. Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing[J]. Science of the Total Environment, 639(1): 1188-1204.

GRAEDEL T E, BARR R, CHANDLER C, et al., 2012. Methodology of metal criticality determination[J]. Environmental Science & Technology, 46(2): 1063-1070.

GRAEDEL T E, HARPER E M, NASSAR N T, et al., 2015. Criticality of metals and metalloids[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112(14): 4257-4262.

HACKENHAAR I C, MORAGA G, THOMASSEN G, et al., 2024. A comprehensive framework covering life cycle sustainability assessment, resource circularity and criticality[J]. Sustainable Production and Consumption, 45: 509-524.

HOSSEINI S, IVANOV D, 2020. Bayesian networks for supply chain risk, resilience and ripple effect analysis: A literature review[J]. Expert Systems with Applications, 161: 113649.

HOU W Y, LIU H F, WANG H, et al., 2018. Structure and patterns of the international rare earths trade: A complex network analysis[J]. Resources Policy, 55: 133-142.

HWANG C L, YOON K, 1981. Multiple attribute decision making[M]. Berlin: Springer-Verlag.

JASIÑSKI D, CINELLI M, DIAS L C, et al., 2018. Assessing supply risks for non-fossil mineral resources via multi-criteria decision analysis[J]. Resources Policy, 58: 150-158.

LIM-CAMACHO L, PLAGÁNYI É E, CRIMP S, et al., 2017. Complex resource supply chains display higher resilience to simulated climate shocks[J]. Global Environmental Change Part A(Human & Policy Dimensions), 46: 126-138.

SAATY R W, 1987. The analytic hierarchy process: What it is and how it is used[J]. Mathematical Modelling, 9(3/4/5): 161-176.

SCHRIJVERS D, HOOL A, BLENGINI G A, et al., 2020. A review of methods and data to determine raw material criticality[J]. Resources, Conservation and Recycling, 155: 104617.

SHANNON C E, 1948. A mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal, 27(4): 623-656.

SHKOLA V, BAKIN M, 2024. The EU's carbon border adjustment mechanism: Economic and legal issues: Proceedings of the XV international scientific-practical conference "legal science and state-building in Ukraine in the context of integration processes", Sumy, Ukraine, May 24, 2024[C]. Sumy: SF KhNUVS.

SONDEREGGER T, BERGER M, ALVARENGA R, et al., 2020. Mineral resources in life cycle impact assessment: Part I: A critical review of existing methods[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 25(4): 784-797.

SUN X Q, 2022. Supply chain risks of critical metals: Sources, propagation, and responses[J]. Frontiers in Energy Research, 10: 957884.

TILTON J E, GUZMÁN J I, 2016. Mineral economics and policy[M]. London: Routledge.

WALTER C, BRAUN A, FOTOPOULOS G, 2020. High-resolution unmanned aerial vehicle aeromagnetic surveys for mineral exploration targets[J]. Geophysical Prospecting, 68(1): 334-349.

WATARI T, NANSAI K, NAKAJIMA K, 2020. Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements[J]. Resources, Conservation and Recycling, 155: 104669.

ZHANG L G, CHEN Z Y, YANG C Y, et al., 2022. Global supply risk assessment of the metals used in clean energy technologies[J]. Journal of Cleaner Production, 331: 129602.