

引用格式: 张宇祺, 李华姣, 安海忠, 等. 产业链视角下关键矿产资源可供性研究进展[J]. 资源科学, 2024, 46(4): 671-686.  
[Zhang Y Q, Li H J, An H Z, et al. Progress and frontiers of critical mineral resource availability research based on the perspective of industrial chain[J]. Resources Science, 2024, 46(4): 671-686.] DOI: 10.18402/resci.2024.04.02

# 产业链视角下关键矿产资源可供性研究进展

张宇祺<sup>1,2</sup>, 李华姣<sup>1,2</sup>, 安海忠<sup>1,2</sup>, 王安建<sup>3,4</sup>

(1. 中国地质大学(北京)经济管理学院, 北京 100083; 2. 自然资源部资源环境承载力评价重点实验室, 北京 100083; 3. 中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心, 北京 100037; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:**随着全球经济的不断发展和人类对资源需求的不断增长, 矿产资源的战略性地位愈发凸显, 矿产资源的竞争已不局限于原生矿产, 而是涉及到整个产业链。本文从产业链视角出发, 将关键矿产资源产业链边界界定为“勘探开采—冶炼加工(运输)生产—行业使用—回收循环利用”的全产业链环节, 分别从产业链各环节定义关键矿产资源可供性, 强调产业链不同环节的关键作用。在现有的矿产资源可供性研究方法基础上, 识别出20种矿产资源可供性影响因素, 将其归纳为地质因素、经济因素、技术因素、地缘因素、规制因素和社会因素等6个方面, 并界定其直接影响的产业链环节, 从不同环节构建产业链视角下关键矿产资源可供性指标体系。在系统梳理过程中, 发现产业链视角下的关键矿产资源可供性研究在其内涵、二次供给、多环节耦合和模型开发利用方面仍有不足, 并提出了4个主要前沿方向: ①产业链视角下关键矿产资源可供性新内涵; ②资源挑战背景下一次资源与二次资源可供性新关系; ③关键矿产资源全产业链多环节可供性耦合关系; ④关键矿产资源全产业链可供性数据库与研究模型。

**关键词:** 关键矿产; 可供性; 全产业链; 供给安全; 影响因素; 研究综述

DOI: 10.18402/resci.2024.04.02

## 1 引言

21世纪以来, “关键矿产”一词在各种报告、政策文件和媒体中频繁出现。美国、欧盟、加拿大、日本等国家和经济体相继发布或更新了关键矿产目录, 以应对技术进步、地缘风险、环保需求和经济战略的挑战。中国也于2016年发布了《全球矿产资源规划(2016—2020年)》, 将24种矿产资源列入战略性矿产名录。关键矿产的重要性不仅仅局限于满足基本需求, 还拓展到了经济繁荣、科技进步和国家安全的方方面面。因此, 保障矿产资源的可供性, 确保其在国家战略发展中的安全稳定供给, 对于国家的长期发展至关重要。

国际能源署(IEA)强调, 世界正从传统的化石燃

料密集型能源系统向矿产密集型能源系统转变<sup>[1]</sup>。绿色化和数字化双重转型必然会带来新兴产业崛起和关键矿产资源需求的增长, 矿产资源的可供性将成为一个重要议题, 主要国家(经济体)之间在矿产资源布局上的博弈将成为新的焦点和挑战。近年来, 中、美、欧等国家或地区在矿产资源领域的长期竞争形势已趋显著, 美国和欧盟等西方发达经济体调整了战略部署和竞争布局, 意在限制中国在全球矿产资源市场中的关键地位和影响力。2018年美国开启了第一轮对华加征关税, 之后美国进行多轮加税, 涉及航空航天、汽车制造、新能源与新材料等领域, 限制中国矿产品出口市场<sup>[2]</sup>。2022年美国总统拜登签署了《2022年通胀削减法案》<sup>[3]</sup>, 通过施

收稿日期: 2023-11-07; 修订日期: 2024-01-25

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(71991481); 国家自然科学基金面上项目(72173119)。

作者简介: 张宇祺, 女, 山东枣庄人, 博士生, 研究方向为系统模拟与优化决策。E-mail: 1845516120@qq.com

通讯作者: 李华姣, 女, 山东烟台人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为资源环境经济与复杂管理。E-mail: babyproud@126.com

加贸易保护性措施,加大国内生产以及与其他国家(不包括中国)的关键矿产合作,意在降低从中国进口关键矿产和相关产品。同年签署了《芯片与科学法案》<sup>[4]</sup>,特别设置了限制中国芯片技术和企业发展的内容,扩大了对中国公司芯片制造设备的禁令范围。虽然中国部分矿产的储量相对丰富,如稀土金属、钨、锡、钼、锑等居世界前列,但从国内矿产资源的储量来看,中国只有少部分矿产储量具备明显优势,大部分矿产资源家底薄弱<sup>[5]</sup>,如新能源矿产锂、钴和镍严重依赖进口<sup>[6]</sup>,极易受到地缘风险和大国经济博弈等外部因素冲击,存在矿产资源产业链被阻断的风险。

矿产资源需求快速增长和经济全球化背景下,关键矿产资源的可供性问题已经引发了广泛关注。为应对各种不稳定不确定性的因素的增加及国际经济政治格局的变化,更好地理解关键矿产资源面临的挑战及其对产业链各环节的影响,亟需采用一种系统性的视角来进行研究,将注意力从单纯关注矿产资源本身的可供性,转向上游供给到下游消费端及循环利用各环节的可供性。因此,从产业链视角科学评估关键矿产资源的可供性是当前亟待解决的科学问题。本文旨在从产业链的角度出发,探讨关键矿产资源勘探开采、冶炼加工(运输)生产、行业使用、回收循环利用各环节的可持续供应问题。

## 2 矿产资源可供性的定义

长期以来,经济学家和地质学家一直密切关注矿产资源可供性问题,并提出了相关理论和方法。传统的经济理论认为资源是有限的,其价格会随着经济的增长而上升<sup>[7]</sup>。然而,实际历史数据显示,随着开采量的增加,矿产资源价格反而下降<sup>[8]</sup>,这种趋势与市场经济中不可再生资源的传统定义相悖。尽管已有研究证实,资源消耗会导致矿石品味的下降从而影响开采成本<sup>[9]</sup>;但随着技术的不断进步,可以提高资源开采效率并抵消资源稀缺性的部分影响<sup>[10]</sup>。因此,在地壳中存在有限矿产资源的情况下,社会能够利用的地质资源比例最终由技术、经济关系和不断变化的市场条件所决定<sup>[11]</sup>。

目前学者们将矿产资源可供性解释为可开发的资源储量和资源产量,随着技术、经济关系和市

场条件的变化而变化<sup>[12-14]</sup>。矿产资源可供储量(Available Reserves)是指在当前技术和经济条件下,已知矿床中可以经济有效地开采和提取的矿产资源量。基于对矿床的勘探和评估得出的数据,考虑了开采技术、成本效益、环境要求等因素。矿产资源可供产量(Available Production)是指在一定时间范围内,可供储量中预计可以实际开采和生产的矿产资源量。然而,对于矿产资源的可供性定义不应仅限于地质学层面的储量和产量,还需综合考虑资源在供应链中的流动和交付过程,即围绕核心企业,从原材料采购到转换为中间产品与成品再销售给用户等方面<sup>[15]</sup>。这些功能上彼此关联的企业所创造的价值被串联形成价值链<sup>[16]</sup>。将多个企业的供应链连接在一起,依据上下游逻辑关系和时空布局关系构建特定行业的生产与服务体系,就形成了该行业的产业链<sup>[17]</sup>。产业链包括了供应链和价值链,前者确保生产和交付环节协调运作,后者强调各环节价值创造及增值过程。因此,本文将矿产资源的可供性放在产业链这一更广泛的框架下进行研究。

矿产资源全产业链包括矿产资源勘探、开采和洗选等矿业项目阶段,冶炼(或提炼)、加工和生产等矿产品生产阶段,产业嵌入和行业使用阶段以及回收循环利用阶段等4个阶段<sup>[18]</sup>。产业链上游阶段始于地下或地表的资源勘探开采,将获得的初级原材料传递给中游。中游通过冶炼、加工和生产形成矿产品,传递给下游进行行业使用。部分经使用后的矿产品通过回收循环利用获得二次资源,并重新进入中游阶段(图1)。也有部分金属在回收循环利用阶段(再制造)和下游行业使用阶段的流入流出是双向的,例如,对于废弃锂离子电池来说,可以根据其是否具备电动汽车必要的功率和能量要求进行再制造和再利用,并重新应用于相同的汽车应用或固定储能设备等<sup>[19,20]</sup>。

基于上述矿产资源产业链边界界定,本文将矿产资源产业链上游可供性定义为确保在勘探和开采过程中,资源能够满足中下游产业链各个环节原料需求的能力;中游可供性定义为确保在冶炼、加工(运输)和生产过程以及应用回收废物时,矿产品供应能够满足下游行业使用的能力;下游可供性定义为确保在行业应用环节能够持续稳定运作,以满

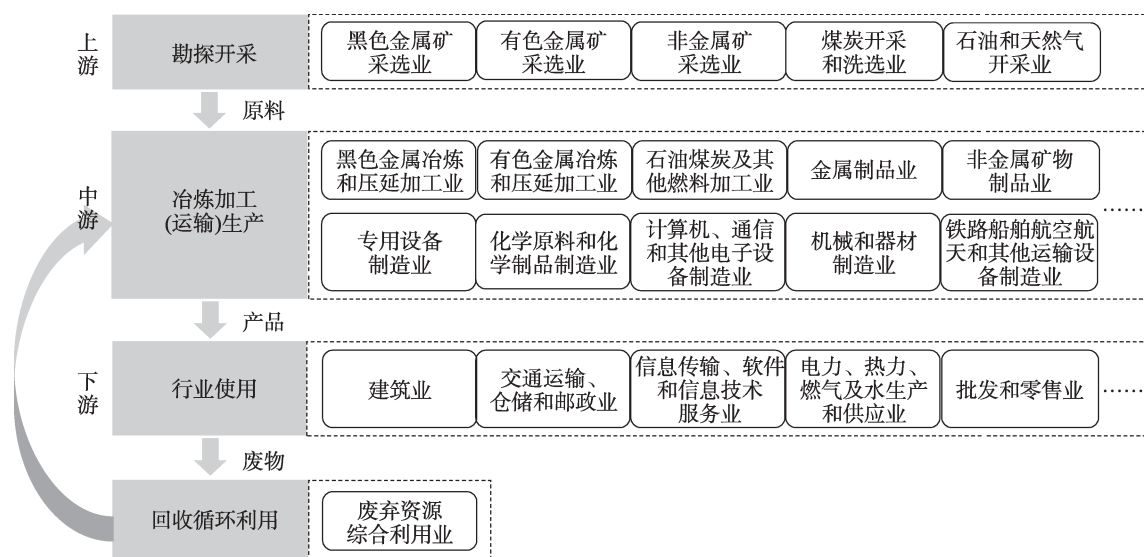


图1 产业链视角下关键矿产资源可供性流程图

Figure 1 Critical mineral resource availability process from the industrial chain perspective

注:图中所涉及的与矿产业相关的行业来自中国《国民经济行业分类》(GB/T 4754—2017)。

足市场需求的能力;回收循环利用环节的可供性定义为确保资源利用后产生的废物能够有效地被回收并转化为二次资源,再次注入产业链中游的能力。产业链视角下矿产资源可供性的新定义强调不同环节的关键作用和多环节的协同作用,对于实现矿产资源稳定供应和满足市场需求至关重要。

### 3 关键矿产资源可供性研究进展

#### 3.1 关键矿产资源可供性研究维度

目前矿产资源可供性的研究维度,主要针对技术进步下的矿产资源可供性、新能源革命下的矿产资源可供性、可持续发展下的矿产资源可供性等展开研究,主要进展如下:

##### (1) 技术进步下的矿产资源可供性

为提高矿产资源可供性,技术进步发挥着关键作用。一方面,先进的勘探开采技术为地下矿藏的准确定位提供了强大的工具,创新的提取加工技术能够改善资源开采效率、减少浪费,并提高矿石的品位,从而最大化资源的利用。例如,美国通过完善水力压裂技术,使非常规天然气产业迅速发展,在不到10年时间内页岩气产量增长12倍,并实现了能源独立<sup>[21]</sup>;中国利用生物冶金技术开发铀矿资源,使铀的浸出率高达96%<sup>[22]</sup>,显著提升了铀的利用率。另一方面,随着人工智能技术的发展,机器学习

已初步应用于岩性识别和测井处理等领域<sup>[23,24]</sup>,并在智能生产装备和自动化处理等方向具有巨大潜力<sup>[25]</sup>。此外,回收利用技术的进步有助于最大程度优化矿产资源利用并减缓对其需求依赖。例如,Al<sup>3+</sup>等<sup>[26]</sup>指出金属回收技术有助于维持矿物的可持续供应,并通过对一整套数据和需求预测的分析,制定了全球矿产供应的可行性策略;Fishman等<sup>[27]</sup>对加强海上风电设备建设所需的钕材料进行研究,指出开发回收技术可以更好地满足海上涡轮机对钕材料的需求。

##### (2) 新能源革命下的矿产资源可供性

在全球能源危机加剧和环境问题日益严重的背景下,全球主要经济体纷纷推动“新能源革命”。新能源的兴起引发了对矿产资源的新需求和重新配置,对矿产资源的可供性产生了重要影响;同时,矿产资源的丰富程度也直接影响了新能源产业的发展。例如,稀土元素在风能和电动汽车的永磁电机中扮演着关键角色,其供应一直以来受到全球的关注<sup>[28-32]</sup>。锂、钴和镍作为制造电池的关键原材料,在电动汽车和可再生能源存储系统中应用广泛,其需求量在不断增加,如何实现更好的供需平衡成为学者关注的焦点<sup>[33-40]</sup>。铜资源在实现向可再生能源系统的过渡以及电气输送和电动汽车的部署中发

挥着重要的作用<sup>[41]</sup>,Hertwich等<sup>[42]</sup>预计,到2050年建设世界能源系统时铜使用量将达到2020年产量的两倍。铀作为当今所有核裂变反应堆燃料的主要原材料,被用于生产低碳电力、处理热能和氢气,有研究预测到2040年,铀的累计供给缺口将达到约680000 Mt<sup>[43]</sup>。世界各国为实现碳减排目标并满足日益增长的能源需求,推动新能源革命势在必行,因此确保关键矿产可供性至关重要。

### (3)可持续发展下的矿产资源可供性

为了减轻对有限矿产资源的过度依赖,并促进更可持续的资源管理,矿产供应链的各主体愈发认识到资源替代和重复利用/回收关键资源等可持续做法对于减轻矿产资源依赖的重要性。①矿产资源替代,主要指能源替代和材料替代。能源替代,例如太阳能和风能替代煤、石油等化石燃料的火力发电<sup>[44-46]</sup>。材料替代,例如:在永磁材料方面,研究人员正致力于开发可替代稀土元素的新型材料与技术<sup>[47-49]</sup>,以减少对稀土的需求;在电池材料方面,由于钴的供应受限,部分学者探索了无钴磷酸铁锂(LFP)电池技术,Wang等<sup>[50]</sup>研究发现,使用无钴LFP电池的电动汽车市场份额将远大于使用镍钴锰电池的电动汽车市场份额。②除资源替代外,实施关键资源的重复利用和回收有助于最大程度地延长矿产资源的生命周期,减少对原材料的需求,同时减少废弃物的产生<sup>[51,52]</sup>。例如Bouzon等<sup>[53]</sup>通过识别和分析巴西矿产回收利用的各种障碍,重点探讨了采矿和矿产行业原材料废弃产品的回收问题;West<sup>[54]</sup>评估了全球可开采资源的未来可供性,强调合理利用与回收循环利用的重要性,并指出若不能更好地了解金属可能的回收和再循环率,则无法有效地为金属可供性政策提供信息。

## 3.2 关键矿产资源可供性研究方法

### 3.2.1 原材料视角下矿产资源可供性研究方法

储采比是矿产资源上游可供性分析中的一个重要指标,反映矿产资源的利用程度和开采年限<sup>[55,56]</sup>。然而,现代的矿产资源可供性分析早已不仅仅依赖储采比值,峰值模型在可供性分析中的应用就是一个重要的进展,这种模型通常用于估算某一矿产资源产量的峰值以及峰值产量达到的时间点,其中最广泛应用的是Hubbert模型。

Hubbert模型是一种经典的预测石油和天然气等非可再生能源产量的数学模型,它由美国地质学家Hubbert在20世纪50年代提出。该模型基于资源开采曲线形状和相关数学函数对已知开采数据进行分析,以预测产量峰值和趋势。1962年,Hubbert利用实际数据拟合Logistic曲线的方法,提出可以用于预测累积产量和最终可采储量的模型。此后,无论在学术界还是工业界,该模型在能源领域均得到广泛的应用,而且围绕该模型取得了大量的创新成果,如从单峰值模型到循环多峰值模型等<sup>[57]</sup>。随着相关研究的深入,Hubbert模型被不断修正和完善,如Michaelides<sup>[58]</sup>对Hubbert模型和Logistic曲线的对称导数进行了批判性研究,并根据全球石油和天然气数据提出了一个能源生命周期预测模型;Harris等<sup>[59]</sup>使用四参数多周期逻辑增长曲线建模方法,评估了美国能源生产来源满足估计需求的能力,预测其环境和技术挑战;Calvo等<sup>[60]</sup>强调影响Hubbert模型可靠性的因素,并获得了47种矿物商品的最大生产峰值;Xu等<sup>[61]</sup>联合多个Logistic分布提出了一种研究共(伴)生矿产的Copula-Hubbert模型,并将其应用于预测全球锌和铜的产量,提高了预测精度。

峰值模型通常专注于矿产资源的产量峰值,而忽略了资源开发所带来的机会成本,作为一种替代方法,许多矿产经济学家建议采用累积可供性曲线(Cumulative Availability Curve,简称CAC曲线)来评估长期可供性<sup>[62-65]</sup>。CAC曲线是评估未来几十年长期资源可供性的工具,表示不可再生资源的生产成本与总产量(或累积产量)之比,可用于评估矿产耗竭情况以及实际价格、实际开采成本和边际储量价值的趋势。CAC曲线的建立依赖于当前的数据和假设,不考虑未来可能的技术突破、新发现、政策变化等因素<sup>[66]</sup>。因此,在CAC曲线中,需求决定了开采可用矿物资源的速度。也有文献回顾了峰值模型和CAC曲线两种评估矿产可供性的方法,并提出了修正的累积可供性曲线,同时纳入了经济和地质储量的不确定性<sup>[67]</sup>。

### 3.2.2 全产业链视角下矿产资源可供性研究方法

通过多主体复杂网络模型可以模拟矿产资源供应链中各主体(如勘探公司、开发商、政府监管机

2024年4月

构等)的行为及其相互影响,从而分析矿产资源长期的供给能力。对不同个体的决策行为和资源开发策略进行模拟,可以评估资源开发效果和可持续性。对不同个体之间的合作竞争关系进行模拟,可以帮助识别可能的供应风险,降低不确定性。例如,Riddle等<sup>[68]</sup>运用基于Agent的动态模拟模型GC-Mat,捕捉全球稀土供应链的相关系统复杂性,评估了关键材料市场的能力;通过该模型,分析了稀土市场现状及未来趋势,包括需求预测、供应预测和价格预测等。2020年,Riddle等<sup>[69]</sup>进一步使用GC-Mat代理模型研究不同类型的区域供应中断可能对稀有金属市场动态可供性产生的影响,如暂时的生产损失、产能关闭和供应转移。

系统动力学是一种广泛应用于矿产资源可供性研究的建模方法,旨在定量研究和模拟动态系统中各个组成部分之间的相互作用和反馈机制。通过考虑资源供需关系、生产能力、市场需求等因素的相互影响,系统动力学可以模拟矿产资源开发和利用过程。通过建立资源开发和利用的动态模型还可以综合考虑矿产资源开发对环境的影响,并模拟环境系统和资源系统之间的相互作用。如Sverdrup等<sup>[70]</sup>和Verhoef等<sup>[71]</sup>运用系统动力学构建矿产资源全产业链流通模型以预测矿产资源长期供给形势;Nguyen等<sup>[72]</sup>利用反映钴、铜和镍共同生产以及回收特性的动态系统动力学模型,结合供应、需求、价格和产能扩张之间的反馈,估计了2020—2040年不同电动汽车增长情景下这3种金属的全球产量;Severson等<sup>[73]</sup>开发了一个系统动力学模型来模拟稀土和钴供应链之间的相互作用,分析了与电动汽车(EV)、其部件(EV电池、稀土牵引电机)及其原材料(钴、稀土)相关的供应链约束。

生命周期评估(Life Cycle Assessment, LCA)是一种广泛应用于矿产资源可供性研究的方法<sup>[74]</sup>。它是一种系统性的评估方法,考虑矿产资源的采矿、加工、运输等环节,评估资源消耗、能源利用和碳排放等环境影响。此外,该方法还可以比较不同资源开发和利用方式之间的环境和资源影响。例如Gemechu等<sup>[75]</sup>将LCA的范围扩大到生命周期可持续性评估(LCSA),将地缘政治供应风险(GeoPol-Risk)的评估纳入LCSA框架的方法,重点评估7个

主要发达经济体和5个最相关新兴国家进口14种资源时所面临的地缘政治供应风险;Schneider等<sup>[76]</sup>从经济角度评估资源供应能力,使用资源稀缺性潜力(ESP)信息补充现有的LCA模型,识别与资源使用相关的潜在供应风险;Drielsma等<sup>[77]</sup>评价了目前生命周期影响评估(LCIA)在矿产资源消耗潜力方面的工作,并回顾了LCIA使用中涉及的矿石品位、价格和经济可供性。

### 3.2.3 现有矿产资源可供性研究方法评述

上述方法在评估矿产资源的可供性研究方面提供了不同的视角和工具,有助于决策者制定可持续发展的矿产开发和利用策略,但也存在着一定的局限性。Hubbert模型的使用大多仍局限在预测产量和可采储量,未能充分考虑未来可能的技术进步和资源发现(替代资源)以及价格和市场因素。同样地,CAC曲线建立依赖于当前的数据和假设,虽有研究纳入经济和地质储量的不确定性进行修正,但其主要关注矿产资源上游的生产和供应,忽略了与资源开采相关的环境和社会问题,如环境影响和法规变化等。多主体建模、系统动力学和生命周期评估虽然将矿产资源的供应纳入整个产业链进行分析,但受到数据可用性和模型假设的限制,可能无法考虑所有可能的因素和间接效应,如技术进步、资源替代、回收率、回收效率、生产结构变动、需求价格弹性、勘探活动等对于增加资源储量的影响。

## 4 产业链视角下关键矿产资源可供性指标体系构建

要系统性地对关键矿产资源产业链可供性进行分析,需将“勘探开采、冶炼加工(运输)生产、行业使用、回收循环利用”全产业链各个环节面临的影响因素都纳入研究框架中。本文基于矿产资源全产业链定义和矿产资源可供性研究进展综述,梳理了国内外学者有关矿产资源可供性研究中涉及的影响因素,从产业链视角进行可供性指标体系构建。通过识别这些影响因素,得到表1的结果。

将这20个因素归纳为地质因素、经济因素、技术因素、地缘因素、规制因素和社会因素6个方面,并界定其直接影响环节,构建不同环节的产业链可供性指标体系(图2)。接下来,本文将对不同环节的指标体系进行详细阐述。

表1 矿产资源可供性影响因素

Table1 Factors influencing mineral resource availability

序号	影响因素	作者/机构
1	储量	United States Geological Survey <sup>[78]</sup> 、中华人民共和国自然资源部 <sup>[79]</sup> 、Goovaerts <sup>[80]</sup> 、Moon等 <sup>[81]</sup> 、Rossi等 <sup>[82]</sup>
2	地质勘探	Benson等 <sup>[83]</sup>
3	价格波动	Baars等 <sup>[84]</sup> 、Greim等 <sup>[85]</sup> 、Elshkaki等 <sup>[86,87]</sup> 和Wang等 <sup>[50]</sup> 、Wang等 <sup>[88]</sup>
4	矿产资源开采成本	陈毓川等 <sup>[89]</sup>
5	矿业投资	Cordano等 <sup>[90]</sup> 、Cosi <sup>[91]</sup>
6	市场可替代性	Graedel等 <sup>[92]</sup> 、Severson等 <sup>[73]</sup>
7	市场均衡	Rosenau-Tornow等 <sup>[93]</sup>
8	未来市场容量	Schipper等 <sup>[94]</sup> 、陈甲斌 <sup>[95]</sup>
9	国际贸易	Zhu等 <sup>[96]</sup> 、Jin等 <sup>[97]</sup>
10	勘探、开采、提取、加工、生产技术	陈凡 <sup>[98]</sup> 、安文杰等 <sup>[99]</sup> 、Okada <sup>[100]</sup> 、罗振中等 <sup>[101]</sup>
11	联产水平(综合利用)	Nassar等 <sup>[102]</sup> 、Gulley等 <sup>[103]</sup>
12	回收提取技术	Graedel等 <sup>[104]</sup> 、Nicolli等 <sup>[105]</sup>
13	全球供给集中度	Zhang等 <sup>[106]</sup> 、李华姣等 <sup>[107]</sup> 、许明等 <sup>[108]</sup>
14	对外依存度	Sievers等 <sup>[109]</sup> 、刘舒飞等 <sup>[110]</sup> 、Tang等 <sup>[111]</sup> 、安海忠等 <sup>[112]</sup>
15	资源保护	刘克强等 <sup>[113]</sup>
16	环境标准	Daly等 <sup>[114]</sup> 、Cheng等 <sup>[115]</sup>
17	产业发展政策	Yi等 <sup>[116]</sup> 、Barteková等 <sup>[117]</sup> 、Iloeje等 <sup>[118]</sup> 、Tiess <sup>[119]</sup> 、Wagner等 <sup>[120]</sup> 、van Oorschot等 <sup>[121]</sup> 、Srivastava <sup>[122]</sup>
18	贸易壁垒	Tan等 <sup>[123]</sup> 、Chen等 <sup>[124]</sup> 、Sun等 <sup>[125]</sup> 、Liu等 <sup>[126]</sup> 、Ryter等 <sup>[127]</sup>
19	消费需求	Honeycut等 <sup>[128]</sup> 、王安建等 <sup>[129]</sup> 、文博杰等 <sup>[130]</sup>
20	社会突发事件	Alycia等 <sup>[131]</sup> 、Johnston等 <sup>[132]</sup> 、Carvalho等 <sup>[133]</sup>

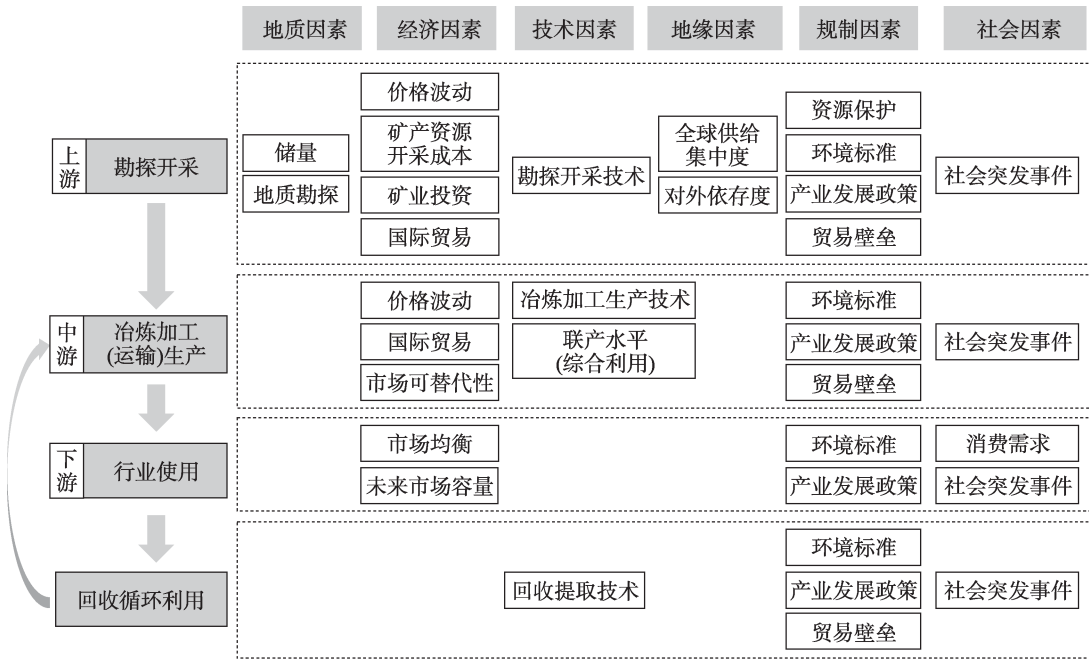


图2 产业链视角下矿产资源可供性指标体系

Figure 2 Mineral resource availability indicator system from the perspective of industrial chain

2024年4月

#### 4.1 上游可供性指标体系构建

与其他行业相比,采矿项目通常需要较长的交付时间,这一特征加强了不确定性的影响。在这些不确定因素中,勘探开采环节作为采矿周期的门户,承担着最多的可供性影响因素。矿产资源开采在本质上是不可持续的,其储量直接决定了矿产资源产业链上游的可供性,资源储量越大,越能稳定地满足市场需求,并降低因资源短缺导致的供应中断风险。部分学者对矿产资源储量进行了科学评估<sup>[80-82]</sup>,探讨了基本原理和地质储量的估算方法等相关问题。地质勘探是寻找新矿床或扩展已知矿床的关键过程,这直接增加了矿产资源产业链上游的可供性。2023年,有学者发现在内华达州和俄勒冈州边界附近的一座死火山内,蕴藏了数千万t锂矿<sup>[83]</sup>,如果探明蕴藏量,预估将会超过玻利维亚的盐滩(2300万t),成为全球最大的锂矿,这一发现可能会重塑全球锂供应的动态情况。

经济影响因素中,原矿价格波动、开采成本、矿业投资和原矿国际贸易直接影响产业链上游可供性。最近,动力电池关键材料(如锂、钴、镍和锰)的价格飙升<sup>[69-72]</sup>引起人们对电动汽车在未来竞争力的广泛关注,如Wang等<sup>[50]</sup>的研究表明,关键材料的价格飙升将危及电动汽车的普及率。上游可供性分析的经济因素还需考虑矿产资源的勘探开采成本,因为在正常流通市场中没有人会愿意以低于成本价格去开采矿山。但不开采并不意味着该矿山不可采、其矿产品不可利用,只是其无法作为商品体现其价值<sup>[89]</sup>。此外,市场往往根据短期回报而非长期稀缺性计划进行投资决策,如Cordano等<sup>[90]</sup>利用文献调查和实证分析探索了矿业勘探投资的主要驱动因素,分析矿业领域的投资情况,有助于识别产业链上游可供性风险。原矿的国际贸易可以解决全球资源分布不均的问题,通过影响原材料的交易来影响矿产产业链上游的可供性。如Zhu等<sup>[96]</sup>构建了原矿产品及其贸易国家(地区)的双模网络,并识别出国际贸易的“主导者”和对全球贸易参与国(地区)综合重要性最高的矿产,这有助于帮助不同资源禀赋的国家(地区)降低贸易风险。

技术因素中的勘探开采技术直接影响产业链上游的可供性。由于很难选择开采地点和不可预

测的自然条件变化<sup>[100]</sup>,可能导致勘探开采技术的研究成本增加,其结果直接影响后续开采的决策。中国目前主要使用露天开采技术、地下开采技术和联合开采技术进行矿产资源开采。未来趋向于向智能开采技术、数字开采技术和无废开采技术等绿色、环保、高效、低成本的开采技术发展<sup>[98]</sup>。安文杰等<sup>[99]</sup>探索了低成本分段崩落采矿技术与工艺,该技术可有效控制矿石损失率与贫化率,并显著提高经济效益。

原材料生产国的地缘稳定性同样影响着矿产资源的可供性。受资源禀赋的直接影响,目前原材料供应的特点往往是国家(经济体)和公司层面的生产高度集中,这意味着采矿活动仅限于少数几个国家(经济体)。例如,智利是世界上最大的锂生产国之一,中国作为全球最大的锂消费国,依赖于从智利进口锂以满足需求;如果来自智利的进口中断,将直接影响中国提炼锂和生产锂产品的能力。Zhang等<sup>[106]</sup>通过赫芬达尔-赫希曼指数(HHI)计算关键原材料全球供给集中度,并将其纳入供应风险评估中,发现高度敏感的市场供应增加了供应风险。对外依存度作为矿产资源安全研究的重要指标之一,是矿产资源可供性的一个重要的战略考量。Sievers等<sup>[109]</sup>根据外贸数据和欧盟生产数据(进口依赖=净进口/(净进口+欧盟产量))计算出32种非能源原材料的进口依存度,以评估矿产资源供应风险。

矿产资源的可供性还受到法律法规和政府政策等规制因素的影响。除资源保护措施直接影响上游的可供性<sup>[113]</sup>,环境标准、产业发展政策和贸易壁垒均因各种政策、法规、措施和条款的侧重环节不同而直接影响到产业链的不同环节。严格的环境标准要求采矿公司在开采阶段采取更环保的方式。Daly等<sup>[114]</sup>使用31个国家的面板数据集,探讨了采矿业生产率与环境监管之间的关系,并评估了环境法规对采矿业清洁技术创新的影响;Cheng等<sup>[115]</sup>通过自回归分布滞后方法考察了中亚地区矿产资源利用增加对绿色增长产生的负面影响。在产业发展政策方面,中国已经实施了多种政策来保护不可再生资源,在上游领域包括资源税政策、配额政策、资源合作政策等。其中,可以灵活应对可能的

短期或长期供应风险的政策为实施资源配额。Yi等<sup>[116]</sup>采用广义综合控制方法,从资源数量的角度讨论生产配额政策对关键矿产可持续供应能力的影响,认为生产配额政策能够调节供应、支持行业发展、稳定关键矿产的市场秩序。在产业链的上游阶段,贸易壁垒主要体现在关键原材料的进出口限制或者加征高额关税方面,例如印尼于2020年禁止镍矿石出口,并于2022年停止铝土矿出口,然而中国进口的镍和铝分别有9%和17%来自印尼<sup>[134]</sup>,这种高依赖性会导致中国关键原材料的供给不确定性风险上升。

社会因素中社会突发事件分为自然灾害、人为灾害、公共卫生事件和社会经济危机等,可能直接对上游的勘探开采环节产生影响,导致停工停产和产能损失。以新冠疫情时期为例,部分国家或地区采取紧急措施推迟采矿业的复工复产时间,这一政策有效遏制了疫情的传播,但也造成了采矿业的产能萎缩。标普全球市场情报就曾报道,全球受影响采矿项目的总收入估计将超过88.3亿美元<sup>[131]</sup>。此外,采矿业由于复杂的作业环境、人为因素和监管和管理不力等也容易导致事故发生,进而影响上游供应。

#### 4.2 中游可供性指标体系构建

矿产产业链中游阶段作为核心环节,通常承担着生产、加工和转化过程所带来的可供性影响因素。经济因素中的中间产品和最终产品价格波动以及国际贸易、市场可替代性直接影响了中游的可供性。例如,Wang等<sup>[88]</sup>研究了锂的中游产品价格泡沫行为和传导效应,发现锂辉石、碳酸锂和氢氧化锂的价格存在多个泡沫盛衰周期。这种市场性价格波动性使锂产业链参与者必须对市场变化保持警惕,以应对价格波动所带来的供应风险。同时,随着中国锂产品在国际市场上的影响力不断上升,其国际贸易也变得愈发重要和密集。Jin等<sup>[97]</sup>采用攻击模型揭示了中国锂产业链的贸易网络弹性,认为中国中游产品在出口领域的影响力在不断上升。市场可替代性表示矿产资源在其主要用途被替代的潜力<sup>[92]</sup>,例如为实现国际能源署设定的电动汽车销量预测,电动汽车制造商需要尽可能多地使用非钴电池<sup>[73]</sup>。

技术因素中的冶炼加工生产技术<sup>[86]</sup>和联产水平直接影响产业链中游的可供性。联产开发可以提高资源的综合利用率,有助于降低提取成本并减少对单一矿产的依赖,提高供应的稳定性和可持续性<sup>[102,103]</sup>。地缘因素中的全球供给集中度对于单独的中游产品研究较少,大多从产业链的视角进行分析。李华姣等<sup>[107]</sup>使用全球供给集中度指数衡量国家出口结构分布指数,对钨产业链产品的寡占优势、中介控制优势、出口结构等方面进行分析,得出中国在中游的钨产品出口渠道多样性方面仍具有较大的优势。许明等<sup>[108]</sup>使用比较优势指数从产业内部以及产业链各环节等视角,定量测算了中国稀有矿产资源产业的供给集中度与国际竞争力。对外依存度也主要从产业链的视角进行研究,包括锂<sup>[110]</sup>、钨<sup>[111]</sup>及其他一些战略性关键矿产资源<sup>[112]</sup>。

针对矿产产业链中游环节的产业发展政策和环境标准要求,中游企业应采用更高效的生产技术,并确保其生产过程和产品符合国家环境标准。2022年,工信部等四部门发布了《有色金属冶炼行业节能降碳改造升级实施指南》,提出到2025年要通过实施节能降碳技术改造,铜、铝、铅、锌等重点产品能效水平进一步提升。在产业链的中游阶段,贸易壁垒主要体现在进口关税的增加、生产技术的限制等导致的中国企业在高科技领域难以进入国际市场。《美国白宫供应链百日审查报告》认为,中国在金属矿产供应链的强大地位主要源于加工和制造,而不是原材料优势。拜登在2022年8月9日签署了《芯片与科学法案》,这一法案特别设置了限制中国芯片技术和企业发展的内容,直接影响到矿产产业链中游企业,使其面临技术、市场和生产方面的挑战。与上游类似,矿产产业链中游也会受到社会突发事件导致的产业链中断的影响。

#### 4.3 下游行业使用环节可供性指标体系构建

行业使用环节的可供性影响因素包括经济因素、规制因素和社会因素。经济因素中市场均衡和未来市场容量直接影响下游行业使用环节的可供性。当市场供需基本匹配时,资源可供性相对稳定<sup>[93]</sup>。关注未来市场容量,可以评估未来需求的增长潜力<sup>[94]</sup>。有关行业使用环节的环境标准和产业发展政策,中国2016年发布了《国务院关于钢铁行业

2024年4月

化解过剩产能实现脱困发展的意见》,从环保、能耗、质量、安全、技术等角度,对钢铁产业化解过剩产能进行了全面部署。社会因素中消费需求的变化可能受到消费认知、经济发展、科技进步等因素的影响。例如,随着消费者对“金属里程”(与“食物里程”类似,通过增加本地产品的消费来降低运输的环境成本<sup>[128]</sup>)概念的认识不断提高,将改变消费者需求并影响矿产资源下游消费端的可供性。

#### 4.4 回收循环利用环节可供性指标体系构建

经行业使用的矿产品通过回收循环利用获得二次资源,回收和再利用废弃物需要相应的技术和工艺支持,技术的可行性包括废弃物的处理和分离方法、再加工工艺以及相关设备的可用性和成熟度等<sup>[104]</sup>。規制因素中的环境标准、产业发展政策、贸易壁垒以及社会因素中的社会突发事件直接影响回收循环利用环节的可供性。许多国家和地区积极采用了多种能源转型和可持续供应资源政策。例如,美国实施资源回收计划,通过增加关键矿产相关的研发投入来促进关键材料的回收和再利用<sup>[117,118]</sup>;世界范围内都在追求城市矿山的量化回收<sup>[119-121]</sup>;日本于20世纪90年代初制定的回收指南促进企业采取更多自愿举措。回收循环利用环节的贸易壁垒是指阻碍或限制废物、回收材料或再生材料跨境流通与贸易的各种措施或条款。近年来,中国政府加大了对洋垃圾走私的监管力度,并颁布了进口垃圾禁令<sup>[123-125]</sup>,特别是废铜进口相关禁令,对中国铜资源乃至世界铜贸易产生重大影响<sup>[126,127]</sup>。

以上有关影响因素的产业环节分类均考虑最直接影响环节,实际上各影响因素会通过最初受影响环节传递到产业链各生产阶段。例如,矿产资源的价格波动在产业链上游直接影响资源的开采策略,产业链中游和下游制造商在接收到原材料价格波动信号后则会调整生产策略。此外,各影响因素还会通过影响其他因素,间接影响可供性。例如,矿产资源开采技术的进步在直接提升可供性的同时,也会降低地质条件对可供性的制约,进而显著影响开采成本和矿产资源开发带来的环境影响。而环境约束带来的开发困难也可以被技术进步和经济发展克服;規制因素对回收循环利用环节的影响不仅局限于影响再利用流程,更重要的是通过国

际贸易对可供性产生了影响。一些国家对从其他国家进口的再生资源设置了特殊要求或者限制,进而影响到全球资源的流通和再利用方式。

## 5 产业链视角下关键矿产资源可供性研究前沿

通过上述文献梳理和分析发现,产业链视角下的关键矿产资源可供性研究在其内涵、二次供给、多环节可供性耦合、模型开发利用方面仍待深入研究。关键矿产资源在整个产业链上的稳定供给与国家产业安全息息相关,本文对现有文献总结归纳,提出了以下研究前沿:

### (1) 产业链视角下关键矿产资源可供性新内涵

关键矿产资源在高新技术产业、新能源等领域的应用日益凸显。全球范围内国家间对于这些资源的合作与竞争关系变得更加复杂。与此同时,国内资源保障、产业升级、绿色发展等要求也驱动着矿产资源产业链各环节产品供需结构调整。传统的矿产资源可供性内涵局限于可供资源储量和可供资源产量的单一定义,多关注于上游资源的供给,对于矿产资源在产业链中的转化和利用情况关注较少。为应对关键矿产资源需求增加和矿产产业链各种不稳定不确定性因素的增加,提升产业链的竞争力和可持续供给能力,深入探讨产业链视角下的关键矿产资源可供性内涵是有必要的。因此,要综合考虑矿产“勘探开采—冶炼加工(运输)生产—行业使用—回收循环利用”全产业链环节,关注矿产资源在整个生命周期中的流动和变化,提出产业链视角下关键矿产资源可供性新内涵。

### (2) 资源挑战背景下一次资源与二次资源可供性关系新构建

随着全球人口和经济的持续增长,矿产资源的需求呈指数级增长,这导致了对有限资源的过度开采和利用,加剧了资源枯竭和环境问题。在这一背景下,二次资源的循环利用成为缓解资源供给有限性问题的关键策略,越来越多的学者将资源的二次回收水平作为关键的矿产资源可供性影响因素考虑在内。然而,目前针对二次资源可供性的研究着重考虑的是先进技术提高资源回收、循环和再利用

效率,缺少对回收循环利用环节可供性影响的系统、量化评估。除此之外,二次资源可供性也会受到来自产业链各环节从政治形势到国家规制等多维度的影响。一次资源与二次资源可供性的这种双向的影响存在着较大的信息不对称性和滞后性。综上,为构建一次资源与二次资源可供性的耦合关系,亟需进一步对资源挑战背景下矿产资源产业链回收循环利用环节面临着哪些风险进行剖析。同时推动数字化技术在资源回收循环利用领域的应用,建立实时监测和反馈系统,以追踪回收过程的各个环节。

### (3)关键矿产资源全产业链多环节可供性耦合关系

矿产资源从开采到加工再到产品应用和回收再利用,涉及的多个环节和参与者相互影响、相互依赖,一个环节的变化可能引起整个产业链上下游环节的反馈。因此应改变传统研究中仅关注上游矿石阶段供应的局限,关注上游资源开采与中游加工生产之间的关联,中游产品加工制造与下游行业应用之间的关联,以及回收循环利用环节对中游原材料供给和产品再制造的影响。了解各个环节的主要参与方、关键节点和相互之间的关系,分析多主体间的矿产资源直接和隐含流动。为解决各环节信息透明度问题,可以利用物联网技术,追踪产品的生产和流通过程,实现数据实时采集、传输和分析。

### (4)关键矿产资源全产业链可供性数据库与研究模型构建

目前对于能源和钢铁不同尺度相关数据相对比较完整,研究也比较全面,然而对于其他金属矿产和非金属矿产的产业链数据库构建仍存在一些挑战和不足。矿产资源产业链各环节的数据往往由不同机构、企业或国家(地区)提供,存在着碎片化和分散的情况,导致数据难以统一和整合。其次,部分环节的数据透明度相对较低,以及数据库更新速度较慢,无法准确、及时反映产业链各环节的动态变化。因此,要构建可扩展、可积累、可共享的关键矿产资源全产业链可供性数据库,首先要综合利用文献、专业数据库、统计报告、行业报告、遥感技术、实际调研等搜集关键矿产资源储量、产量、

生产效率、价格、回收量和回收利用率等现实结构化数据,以及生产技术、环境法规、政策、发明创新等非结构化数据。其次,对数据进行标准化处理,这可能涉及到数据类型的转换、单位的标准化等。最后,利用数据库管理系统(DBMS)或者大数据平台,建设一个一体化的数据库,涵盖从上游矿业权、勘查开发,到中游冶炼、加工和生产,再到下游行业应用及终端回收、循环利用全过程,确保各环节的数据能够关联起来。同时要制定明确的数据共享策略,激励各方共享数据,并建立实时更新机制,通过自动化或半自动化的方式保障数据库中的数据及时更新。

目前矿产资源全产业链可供性的研究方法主要聚焦于多主体建模、系统动力学以及生命周期评估等。也有学者将这些方法结合使用,提供更全面、跨学科的视角。例如结合生命周期评估和系统动力学,可以更好地评估矿产资源产业链的环境影响,并考虑社会和治理方面的因素。结合系统动力学和多主体建模可以更好地考虑多个参与者之间的互动和反馈效应。但以上方法受到数据可用性和模型假设等方面的限制,可能无法考虑所有可能的因素和间接效应。因此,综合评估关键矿产资源全产业链可供性的模型构建,要在利用关键矿产资源全产业链可供性数据库的基础上,充分解释历史尺度的矿产资源可供性演变及其决定性因素,客观、全面地考虑多个方面,避免单一因素或特定环节的偏见影响分析结果。尽可能全面地考虑产业链各环节可供性影响因素,如价格波动、市场需求变化、矿业投资、国际贸易、技术变革、政策法规演变、环境与可持续性。同时要结合最新的技术,如人工智能、机器学习等,以提升模型在时间尺度上的模拟和预测能力。在采用这些技术时,还需要注意验证模型假设的合理性,并保持对模型输出的可解释性。最后要实行跨学科合作,促进地质学、经济学、环境科学等领域的专业知识融合,不断改进和优化模型,以更好地反映实际情况。

### 参考文献(References):

- [1] IEA. World Energy Outlook 2021[R/OL]. (2021-10-11) [2023-12-10]. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3->

2024年4月

- 4fd9-acae-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf.
- [2] 葛顺奇, 李三川, 罗伟. 贸易脱钩、关税冲击与外商撤资[J]. 国际贸易问题, 2024, (3): 50-68. [Ge S Q, Li S C, Luo W. Trade decoupling, tariff shock, and FDI withdrawal[J]. Journal of International Trade, 2024, (3): 50-68.]
- [3] U.S. Department of the Treasury. Inflation Reduction Act of 2022 [EB/OL]. (2022-08-16)[2024-03-22]. <https://home.treasury.gov/policy-issues/inflation-reduction-act>.
- [4] Taylor M. The US chips and science act of 2022[J]. MRS Bulletin, 2023, 48(9): 874-879.
- [5] 刘晓慧. 多维度保障矿产资源安全[N]. 中国矿业报, 2023-05-31(1). [Liu X H. Multidimensional Guarantee of Mineral Resource Security[N]. China Mining Daily, 2023-05-31(1).]
- [6] 王安建, 王春辉. 国际动荡局势对我国能源资源安全的挑战与应对策略[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 72-80. [Wang A J, Wang C H. Challenges of international turmoil situation to China's energy resource security and coping strategies[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 72-80.]
- [7] Zhu Y G, Xu D Y, Ali S H, et al. A hybrid assessment model for mineral resource availability potentials[J]. Resources Policy, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102283.
- [8] Reynolds D B. The mineral economy: How prices and costs can falsely signal decreasing scarcity?[J]. Ecological Economics, 1999, 31(1): 155-166.
- [9] Nordhaus W D. Resources as a constraint on growth[J]. The American Economic Review, 1974, 64(2): 22-26.
- [10] Dahmus J B. Can efficiency improvements reduce resource consumption? A historical analysis of ten activities[J]. Journal of Industrial Ecology, 2014, 18(6): 883-897.
- [11] Northey S A, Mudd G M, Werner T. Unresolved complexity in assessments of mineral resource depletion and availability[J]. Natural Resources Research, 2018, DOI: 10.1007/s11053-017-9352-5.
- [12] 鹿爱莉, 谢承祥. 我国矿产资源可供性分析工作现状与建议[J]. 中国矿业, 2009, 18(5): 7-10. [Lu A L, Xie C X. Existing problem of mineral availability analysis work and suggestion in China [J]. China Mining Magazine, 2009, 18(5): 7-10.]
- [13] 李裕伟. 矿产资源可供性分析的原理与方法[J]. 中国国土资源经济, 2015, 28(2): 8-13. [Li Y W. The principle and methodology of mineral availability analysis[J]. Natural Resource Economics of China, 2015, 28(2): 8-13.]
- [14] 成金华, 朱永光, 徐德义, 等. 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), 2022, 22(4): 38-49. [Cheng J H, Zhu Y G, Xu D Y, et al. Research status and prospect of strategic critical minerals availability evaluation methods[J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2022, 22(4): 38-49.]
- [15] 艾伦·哈里森, 雷姆科·范赫克. 物流管理与战略: 通过供应链竞争[M]. 任建标, 杜娟, 译. 北京: 中国人民大学出版社, 2010. [Harrison A, Hoek R V. Logistics Management and Strategy[M]. Ren J B, Du J, Trans. Beijing: China Renmin University Press, 2010.]
- [16] Michael P. Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance[M]. New York: Free Press, 1985.
- [17] 刘贵富. 产业链的基本内涵研究[J]. 工业技术经济, 2007, (8): 92-96. [Liu G F. Research on the basic connotation of industrial chain[J]. Journal of Industrial Technology & Economy, 2007, (8): 92-96.]
- [18] Segura-Salazar J, Tavares L M. Sustainability in the minerals industry: Seeking a consensus on its meaning[J]. Sustainability, 2018, DOI: 10.3390/su10051429.
- [19] Derausseau M, Gully B H, Taylor C D, et al. Repurposing used electric car batteries: A review of options[J]. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 2017, 69(9): 1575-1582.
- [20] Koroma M S, Costa D, Philippot M, et al. Life cycle assessment of battery electric vehicles: Implications of future electricity mix and different battery end-of-life management[J]. Science of the Total Environment, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154859.
- [21] Wang Q, Chen X, Jha A N, et al. Natural gas from shale formation: The evolution, evidences and challenges of shale gas revolution in United States[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 30: 1-28.
- [22] 邱冠周, 刘学端. 用生物技术的钥匙开启矿产资源利用的大门[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1848-1858. [Qiu G J, Liu X R. Biotech key to unlock mineral resources value[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1848-1858.]
- [23] 匡立春, 刘合, 任义丽, 等. 人工智能在石油勘探开发领域的应用现状与发展趋势[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 1-11. [Kuang L C, Liu H, Ren Y L, et al. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 1-11.]
- [24] 李宁, 徐彬森, 武宏亮, 等. 人工智能在测井地层评价中的应用现状及前景[J]. 石油学报, 2021, 42(4): 508-522. [Li N, Xu B S, Wu H L, et al. Application status and prospects of artificial intelligence in well logging and formation evaluation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(4): 508-522.]
- [25] Kuang L C, Liu H, Ren Y L, et al. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 1-14.
- [26] Ali S, Giurco D, Arndt N, et al. Mineral supply for sustainable development requires resource governance[J]. Nature, 2017, 543(7645): 367-372.
- [27] Fishman T, Graedel T E. Impact of the establishment of US offshore wind power on neodymium flows[J]. Nature Sustainability, 2019, DOI: 10.1038/s41893-019-0252-z.
- [28] Vekasi, K. Securing Supply Chain Resiliency for Critical Rare Earth Metals[A]. Kalantzakos S. Critical Minerals, the Climate Cri-

- sis and the Teh Imperium[M]. Berlin: Springer, 2023.
- [29] Nuttall M. Greenland and the geopolitics of critical minerals[J]. *One Earth*, 2021, 4(12): 1674–1675.
- [30] Ilankoon I M S K, Dushyantha N P, Mancheri N, et al. Constraints to rare earth elements supply diversification: Evidence from an industry survey[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129932.
- [31] Gao C X, Xu Y F, Geng Y, et al. Uncovering terbium metabolism in China: A dynamic material flow analysis[J]. *Resources Policy*, 2022, DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.103017.
- [32] 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.]
- [33] Guo H Y, Elshkaki A, Xiao X. Dynamic analysis of future nickel demand, supply, and associated materials, energy, water, and carbon emissions in China[J]. *Resources Policy*, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102432.
- [34] Rachidi N R, Nwaila G T, Zhang S E, et al. Assessing cobalt supply sustainability through production forecasting and implications for green energy policies[J]. *Resources Policy*, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102423.
- [35] Xu C J, Steubing B, Hu M M, et al. Future greenhouse gas emissions of automotive lithium-ion battery cell production[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106606.
- [36] Tabelin C B, Dallas J A, Casanova S, et al. Towards a low-carbon society: A review of lithium resource availability, challenges and innovations in mining, extraction and recycling, and future perspectives[J]. *Minerals Engineering*, 2021, DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106743.
- [37] Vikström H, Davidsson S K, Höök M. Lithium availability and future production outlooks[J]. *Applied Energy*, 2013, 110(1): 252–266.
- [38] Tarabay B, Milovanoff A, Abdul-Manan A F N, et al. New cathodes now, recycling later: Dynamic scenarios to reduce battery material use and greenhouse gas emissions from US light-duty electric vehicle fleet[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107028.
- [39] Yao P F, Zhang X H, Wang Z L, et al. The role of nickel recycling from nickel-bearing batteries on alleviating demand-supply gap in China's industry of new energy vehicles[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105612.
- [40] 徐大兴, 代涛, 刘立涛, 等. 2000–2020年日本钴物质流演变特征[J]. *资源科学*, 2023, 45(11): 2264–2275. [Xu D X, Dai T, Liu L T, et al. Evolution of cobalt material flow in Japan from 2000 to 2020[J]. *Resources Science*, 2023, 45(11): 2264–2275.]
- [41] 安紫瑶, 闫晶晶, 安海忠, 等. 中国新能源汽车中铜资源循环利用策略有效性评估[J]. *资源科学*, 2022, 44(12): 2440–2455. [An Z Y, Yan J J, An H Z, et al. Effectiveness evaluation of copper resource recycling strategies for China's new energy vehicles[J]. *Resources Science*, 2022, 44(12): 2440–2455.]
- [42] Hertwich E G, Gibon T, Bouman E A, et al. Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, DOI: 10.1073/pnas.1312753111.
- [43] Grandi T D. The Global Uranium Market in 3 Charts[R/OL]. (2023–12–08)[2024–01–12]. <https://www.visualcapitalist.com/sp/the-global-uranium-market-in-3-charts/>.
- [44] Yang Y, Xu Y. Does wind and solar power substitute thermal power? Evidence from China[J]. *Letters in Spatial and Resource Sciences*, 2022, DOI: 10.1007/s12076-021-00297-y.
- [45] Zhang S, Chen W Y. Assessing the energy transition in China towards carbon neutrality with a probabilistic framework[J]. *Nature Communications*, 2022, DOI: 10.1038/s41467-021-27671-0.
- [46] Hillman S, Sprick R S, Pearce D, et al. Why do sulfone-containing polymer photocatalysts work so well for sacrificial hydrogen evolution from water? [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2022, DOI: 10.1021/jacs.2c07103.
- [47] Ma L F, Quan W, Fan J K, et al. High magnetic energy product in isotropic nanocomposite powders with high percent of soft phase towards ultrastrong magnets[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 144: 161–167.
- [48] Li S, Ma L F, Fan J K, et al. High energy product of isotropic bulk Sm-Co/α-Fe (Co) nanocomposite magnet with multiple hard phases and nanoscale grains[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, DOI: 10.1016/j.jmst.2021.01.083.
- [49] Wang P, Yang Y Y, Heidrich O, et al. Regional rare-earth element supply and demand balanced with circular economy strategies[J]. *Nature Geoscience*, 2024, DOI: 10.1038/s41561-023-01350-9.
- [50] Wang H T, Feng K S, Wang P, et al. China's electric vehicle and climate ambitions jeopardized by surging critical material prices [J]. *Nature Communications*, 2023, DOI: 10.1038/s41467-023-36957-4.
- [51] Yoo E, Lee U, Kelly J C, et al. Life-cycle analysis of battery metal recycling with lithium recovery from a spent lithium-ion battery [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107040.
- [52] Tarabay B, Milovanoff A, Abdul-Manan A F, et al. New cathodes now, recycling later: Dynamic scenarios to reduce battery material use and greenhouse gas emissions from US light-duty electric vehicle fleet[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107028.
- [53] Bouzon M, Govindan K, Rodriguez C M T. Reducing the extraction

2024年4月

- of minerals: Reverse logistics in the machinery manufacturing industry sector in Brazil using ISM approach[J]. *Resources Policy*, 2015, 46: 27–36.
- [54] West J. Extractable global resources and the future availability of metal stocks: “Known Unknowns” for the foreseeable future[J]. *Resources Policy*, 2020, DOI: 10.1016/j.resourpol.2019.101574.
- [55] Flawn P T. *Mineral Resources: Geology, Engineering, Economics, Politics, Law*[M]. Chicago: Rand McNally, 1966.
- [56] Iledare O O, Pulsipher A. The state of the global E&P industry: Is the world running out of oil?[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1999, 51(11): 44–48.
- [57] Wang J Z, Jiang H Y, Zhou Q P, et al. China’s natural gas production and consumption analysis based on the multicycle Hubbert model and rolling Grey model[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 1149–1167.
- [58] Michaelides E E. A new model for the lifetime of fossil fuel resources[J]. *Natural Resources Research*, 2017, DOI: 10.1007/s11053-016-9307-2.
- [59] Harris T, Devkota J P, Khanna V, et al. Logistic growth curve modeling of US energy production and consumption[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 96: 46–57.
- [60] Calvo G, Valero A, Valero A. Assessing maximum production peak and resource availability of non-fuel mineral resources: Analyzing the influence of extractable global resources[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2017, 125(7): 208–217.
- [61] Xu D Y, Zhu Y G. A copula-hubbert model for Co (By)-product minerals[J]. *Natural Resources Research*, 2020, DOI: 10.1007/s11053-020-09643-1.
- [62] Dou S H, Xu D Y, Hang L. Evaluation the feasibility of using ecosystem costs to control environmental losses at mining sites[J]. *The Extractive Industries and Society*, 2022, DOI: 10.1016/j.exis.2022.101050.
- [63] Tilton J E, Crowson P C F, Deyoung Jr J H, et al. Public policy and future mineral supplies[J]. *Resources Policy*, 2018, 57: 55–60.
- [64] Tilton J E, Lagos G. Assessing the long-run availability of copper[J]. *Resources Policy*, 2007, 32(1): 19–23.
- [65] Yaksic A, Tilton J E. Using the cumulative availability curve to assess the threat of mineral depletion: The case of lithium[J]. *Resources Policy*, 2009, 34(4): 185–194.
- [66] Tilton J E. *On Borrowed Time: Assessing the Threat of Mineral Depletion*[M]. London: Routledge, 2010.
- [67] Castillo E, Eggert R. Reconciling diverging views on mineral depletion: A modified cumulative availability curve applied to copper resources[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104896.
- [68] Riddle M, Macal C M, Conzelmann G, et al. Global critical materials markets: An agent-based modeling approach[J]. *Resources Policy*, 2015, 45: 307–321.
- [69] Riddle M E, Tatara E, Olson C, et al. Agent-based modeling of supply disruptions in the global rare earths market[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105193.
- [70] Sverdrup H U, Ragnarsdottir K V, Koca D. On modelling the global copper mining rates, market supply, copper price and the end of copper reserves[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2014, 87: 158–174.
- [71] Verhoef E, Dijkema G P J, Reuter M A. Process knowledge, system dynamics, and metal ecology[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2004, 8(1): 23–43.
- [72] Nguyen R T, Eggert R G, Severson M H, et al. Global electrification of vehicles and intertwined material supply chains of cobalt, copper and nickel[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105198.
- [73] Severson M H, Nguyen R T, Ormerod J, et al. An integrated supply chain analysis for cobalt and rare earth elements under global electrification and constrained resources[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106761.
- [74] 刘妍心, 李华姣, 安海忠, 等. 基于“废钢回收”的中国钢铁产业链资源-经济-环境动态耦合[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 588–600. [Liu Y X, Li H J, An H Z, et al. Dynamic coupling of the resource-economic-environment systems of China’s steel industrial chain based on scrap steel recycling[J]. *Resources Science*, 2021, 43(3): 588–600.]
- [75] Gemechu E D, Helbig C, Sonnemann G, et al. Import-based indicator for the geopolitical supply risk of raw materials in life cycle sustainability assessments[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, DOI: 10.1111/jiec.12279.
- [76] Schneider L, Berger M, Schueler-Hainsch E, et al. The economic resource scarcity potential (ESP) for evaluating resource use based on life cycle assessment[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(3): 601–610.
- [77] Drielsma J A, Russell-Vaccari A J, Drnek T, et al. Mineral resources in life cycle impact assessment—defining the path forward[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, DOI: 10.1007/s11367-015-0991-7.
- [78] United States Geological Survey. *Mineral Commodity Summaries 2023*[EB/OL]. (2023-01-31)[2024-03-22]. <https://www.usgs.gov/publications/mineral-commodity-summaries-2023>.
- [79] 中华人民共和国自然资源部. *中国矿产资源报告2022*[M]. 北京: 地质出版社, 2022. [Ministry of Natural Resources of the People’s Republic of China. *China Mineral Resources Report 2022* [M]. Beijing: Geology Press, 2022.]
- [80] Goovaerts P. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*[M]. New York: Applied Geostatistics, 1997.
- [81] Moon C J, Whateley M K, Evans A M. *Introduction to Mineral Exploration*[M]. New Jersey: Blackwell Publishing, 2006.
- [82] Rossi M E, Deutsch C V. *Mineral Resource Estimation*[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.

- [83] Benson T R, Coble M A, Dilles J H. Hydrothermal enrichment of lithium in intracaldera illite-bearing claystones[J]. *Science Advances*, 2023, DOI: 10.1126/sciadv.adh8183.
- [84] Baars J, Domenech T, Bleischwitz R, et al. Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials[J]. *Nature Sustainability*, 2021, DOI: 10.1038/s41893-020-00607-0.
- [85] Greim P, Solomon A A, Breyer C. Assessment of lithium criticality in the global energy transition and addressing policy gaps in transportation[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4570.
- [86] Elshkaki A, Graedel T E. Dynamic analysis of the global metals flows and stocks in electricity generation technologies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 59: 260-273.
- [87] Elshkaki A, Shen L. Energy-material nexus: The impacts of national and international energy scenarios on critical metals use in China up to 2050 and their global implications[J]. *Energy*, 2019, 180: 903-917.
- [88] Wang X Q, Qin M, Moldovan N C, et al. Bubble behaviors in lithium price and the contagion effect: An industry chain perspective[J]. *Resources Policy*, 2023, DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.103725.
- [89] 陈毓川, 毛景文. 加大矿业开发科技投入国内找矿大有可为[J]. *中国科技产业*, 2022, (8): 6-10. [Chen Y C, Mao J W. Increasing investment in mining development technology has great potential for domestic mineral exploration[J]. *Science & Technology Industry of China*, 2022, (8): 6-10.]
- [90] Cordano A L, Zavallos R P. Country competitiveness and investment allocation in the mining industry: A survey of the literature and new empirical evidence[J]. *Resources Policy*, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102136.
- [91] Cosi M. A New Valuation Method for Dimension Stone Mining Projects and Properties[C]. Durham: Proceedings of the 20th Extractive Industry Geology Conference 2018 and Technical Meeting, 2018.
- [92] Graedel T E, Harper E M, Nassar N, et al. On the materials basis of modern society[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, DOI: 10.1073/pnas.1312752110.
- [93] Rosenau-Tornow D, Buchholz P, Riemann A, et al. Assessing long-term supply risks for mineral raw materials—a combined evaluation of past and future trends[J]. *Resources Policy*, 2009, 34(4): 161-175.
- [94] Schipper B W, Lin H C, Meloni M A, et al. Estimating global copper demand until 2100 with regression and stock dynamics[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 132: 28-36.
- [95] 陈甲斌. 中国铁矿资源未来供需态势与国外供矿前景[J]. *矿产保护与利用*, 2005, (2): 5-8. [Chen J B. Situation of supply & demand for iron ore in China and its supplying prospect between foreign countries[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2005, (2): 5-8.]
- [96] Zhu Z Y, Dong Z L, Zhang Y X, et al. Strategic mineral resource competition: Strategies of the dominator and nondominator[J]. *Resources Policy*, 2020, DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101835.
- [97] Jin P F, Wang S G, Meng Z, et al. China's lithium supply chains: Network evolution and resilience assessment[J]. *Resources Policy*, 2023, DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.104339.
- [98] 陈凡. 我国金属矿开采技术发展趋势研究[J]. *中国金属通报*, 2021, (2): 1-2. [Chen F. Research on the development trends of metal mining technology in China[J]. *China Metal Bulletin*, 2021, (2): 1-2.]
- [99] 安文杰, 姚维信, 武拴军, 等. 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*, 2022, 42(7): 1-6. [An W J, Yao W X, Wu S J, et al. Study on low-cost mining technology of ore body in west No. 2 mining area of Longshou mine[J]. *Mining Research and Development*, 2022, 42(7): 1-6.]
- [100] Okada K. Breakthrough technologies for mineral exploration[J]. *Mineral Economics*, 2022, DOI: 10.1007/s13563-022-00317-3.
- [101] 罗振中, 杨晓青, 廖利波. 国内钼冶炼及加工技术最新进展[J]. *中国钼业*, 2008, (1): 14-18. [Luo Z Z, Yang X Q, Liao L B. Progress in molybdenum smelting and processing technology of China[J]. *China Molybdenum Industry*, 2008, (1): 14-18.]
- [102] Nassar N T, Graedel T E, Harper E M. By-product metals are technologically essential but have problematic supply[J]. *Science Advances*, 2015, DOI: 10.1126/sciadv.1400180.
- [103] Gulley 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*, 2018, DOI: 10.1073/pnas.1717152115.
- [104] Graedel T E, Barr R, Chandler C, et al. Methodology of metal criticality determination[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2): 1063-1070.
- [105] Nicolli F, Nick J, Patrik S, et al. Resolving failures in recycling markets: The role of technological innovation[J]. *Environmental Economics and Policy Studies*, 2012, 14(3): 261-288.
- [106] Zhang L G, Chen Z Y, Yang C Y, et al. Global supply risk assessment of the metals used in clean energy technologies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129602.
- [107] 李华蛟, 安海忠, 齐亚杰, 等. 基于产业链国际贸易网络的中国优势矿产资源全球贸易格局和竞争力: 以钨为例[J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1504-1514. [Li H J, An H Z, Qi Y J, et al. Trade and competitiveness structure of China's advantageous mineral resources based on the international trade network of industrial chain: A case study of Tungsten[J]. *Resources Science*, 2020, 42(8): 1504-1514.]
- [108] 许明, 杨丹辉. 中国稀有矿产资源产业的国际竞争力分析[J]. *东南学术*, 2019, (1): 111-122. [Xu M, Yang D H. An Analysis of international competitiveness of China's rare mineral resources industry[J]. *Southeast Academic Research*, 2019, (1): 111-122.]
- [109] Sievers H, Tercero L. European Dependence on and Concentration Tendencies of the Material Production[R]. Polinares: EU Policy on

2024年4月

- Natural Resources, Working Paper, 2012.
- [110] 刘舒飞, 陈德稳, 李会谦. 中国锂资源产业现状及对策建议[J]. 资源与产业, 2016, 18(2): 12–15. [Liu S F, Chen D W, Li H Q. Situation and suggestions of China's lithium resources industry[J]. Resources & Industries, 2016, 18(2): 12–15.]
- [111] Tang Q Y, Li H J, Qi Y J, et al. The reliability of the trade dependence network in the tungsten industry chain based on percolation [J]. Resources Policy, 2023, DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.103421.
- [112] 安海忠, 李华姣. 战略性矿产资源全产业链理论和研究前沿 [J]. 资源与产业, 2022, 24(1): 8–14. [An H Z, Li H J. Theory and research advances in whole industrial chain of strategic mineral resources[J]. Resources & Industries, 2022, 24(1): 8–14.]
- [113] 刘克强, 王丹, 孟旭光. 矿产资源规划实施政策措施分析[J]. 中国国土资源经济, 2007, (8): 19–20. [Liu K Q, Wang D, Meng X G. Policies and measures for mineral resource planning[J]. Natural Resource Economics of China, 2007, (8): 19–20.]
- [114] Daly A, Humphreys D, Raffo J D, et al. Global Challenges for Innovation in Mining Industries[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [115] Cheng S, Shu C, Jin M, et al. Balancing resources and sustainability: Analyzing the impact of mineral resources utilization on green growth[J]. Resources Policy, 2023, DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.104143.
- [116] Yi J H, Dai S, Cheng J H, et al. Production quota policy in China: Implications for sustainable supply capacity of critical minerals[J]. Resources Policy, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102046.
- [117] Barteková E, Kemp R. National strategies for securing a stable supply of rare earths in different world regions[J]. Resources Policy, 2016, 49: 153–164.
- [118] Iloje C O, Xavier A S, Graziano D, et al. A systematic analysis of the costs and environmental impacts of critical materials recovery from hybrid electric vehicle batteries in the US[J]. IScience, 2022, DOI: 10.1016/j.isci.2022.104830.
- [119] Tiess G. Minerals policy in Europe: Some recent developments[J]. Resources Policy, 2010, 35(3): 190–198.
- [120] Wagner M A, Huisman J, Løvik A N, et al. Methodology to prospect electronics compositions and flows, illustrated by material trends in printed circuit boards[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127164.
- [121] van Oorschot J, Sprecher B, Roelofs B, et al. Towards a low-carbon and circular economy: Scenarios for metal stocks and flows in the Dutch electricity system[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.106105.
- [122] Srivastava N. Trade in critical minerals: Revisiting the legal regime in times of energy transition[J]. Resources Policy, 2023, DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.103491.
- [123] Tan Q Y, Li J H, Boljkovac C. Responding to China's waste import ban through a new, innovative, cooperative mechanism[J]. Environmental Science & Technology, 2018, DOI: 10.1021/acs.est.8b01852.
- [124] Chen L Y, Liu W X, Yang T, et al. Probabilistic material flow analysis of eight commodity plastics in China: Comparison between 2017 and 2020[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023, DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.106880.
- [125] Sun N, Tabata T. Environmental impact assessment of China's waste import ban policies: An empirical analysis of waste plastics importation from Japan[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129606.
- [126] Liu S, Liu W, Tan Q Y, et al. The impact of China's import ban on global copper scrap flow network and the domestic copper sustainability[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105525.
- [127] Ryter J, Fu X K, Bhuwarka K, et al. Emission impacts of China's solid waste import ban and COVID-19 in the copper supply chain [J]. Nature Communications, 2021, DOI: 10.1038/s41467-021-23874-7.
- [128] Honeycutt E. Why Buy Local Food? It's Healthier for You and Better for the Environment[R/OL]. (2017-12-21) [2024-01-12]. <https://foodrevolution.org/blog/why-buy-local-food/>.
- [129] 王安建, 高蕊蕊. 中国能源与重要矿产资源需求展望[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(3): 338–344. [Wang A J, Gao X R. China's energy and important mineral resources demand perspective [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(3): 338–344.]
- [130] 文博杰, 陈毓川, 王高尚, 等. 2035年中国能源与矿产资源需求展望[J]. 中国工程科学, 2019, 21(1): 68–73. [Wen B J, Chen Y C, Wang G S, et al. China's demand for energy and mineral resources by 2035[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(1): 68–73.]
- [131] Alycia M D, Dobrin P, Patrick L. COVID-19 Mining Impacts: Mining Projects with at-Risk Production[R/OL]. (2020-07-13) [2023-08-08]. <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/blog/covid19-mining-impacts-mining-projects-with-at-risk-production>.
- [132] Johnston R. Supply of Critical Minerals Amid the Russia-Ukraine War and Possible Sanctions[N/OL]. (2022-04-19) [2023-08-13]. <https://www.energypolicy.columbia.edu/publications/supply-critical-minerals-amid-russia-ukraine-war-and-possible-sanctions>.
- [133] Carvalho V M, Nirei M, Saito Y, et al. Supply chain disruptions: Evidence from the great east Japan earthquake[J]. Quarterly Journal of Economics, 2021, DOI: 10.1093/qje/qjaa044.
- [134] 王永中. 资源国关键矿产博弈的新动向及可能影响[J]. 人民论坛, 2022, (15): 90–95. [Wang Y Z. New trends and potential impacts of the game of key mineral resources in resource countries [J]. People's Tribune, 2022, (15): 90–95.]

## Progress and frontiers of critical mineral resource availability research based on the perspective of industrial chain

ZHANG Yuqi<sup>1,2</sup>, LI Huajiao<sup>1,2</sup>, AN Haizhong<sup>1,2</sup>, WANG Anjian<sup>3,4</sup>

(1. School of Economics and Management, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Resources Environmental Carrying Capacity, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China; 3. Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** As the global economy continues to evolve and human society's resource demands grow, the strategic significance of mineral resources becomes increasingly pronounced. The competition for mineral resources extends beyond primary minerals and encompasses the entire industrial chain. This article, from the perspective of the industrial chain, defined the boundaries of the critical mineral resource industrial chain as the whole industry chain of exploration and mining-smelting and processing (transportation)-production-industrial utilization-recycling and reuse. We defined the availability of critical mineral resources in terms of each link of the industrial chain, emphasizing the critical roles played by different segments of the industrial chain. Building upon existing research methods on mineral resource availability, we identified 20 factors that influence the availability. These factors were categorized into six dimensions: geological, economic, technological, geopolitical, regulatory, and social aspects. Furthermore, we defined the industrial chain links that they directly affect, and constructed the indicator system of the availability of critical mineral resources from the perspective of different links. In the process of the systematic review, we found that research on critical mineral resource availability from the industrial chain perspective still has shortcomings in terms of its implication, secondary supply, multi-link nexus, and model development and utilization. We proposed four major frontier directions: (1) The new connotation of critical mineral resource availability from the perspective of industrial chain. (2) The novel construction of the relationship between primary resource and secondary resource availability under the background of resource challenges. (3) The coupling relationship of multi-link availability of the whole industrial chain of critical mineral resources. (4) The construction of the availability database and research model of the whole industrial chain of critical mineral resources.

**Key words:** critical minerals; availability; whole industrial chain; supply security; influencing factors; review