

技术创新对清洁能源金属可持续供应影响的研究综述与展望

宋益^{1,2}, 白文博¹, 成金华^{1,2}, 张亿军^{1,3}

(1. 中国地质大学(武汉)经济管理学院, 湖北武汉, 430078;

2. 中国地质大学(武汉)资源环境经济研究中心, 湖北武汉, 430078;

3. 中国地质大学(武汉)绿色金融与资源环境创新研究中心, 湖北武汉, 430078)

摘要: 技术创新对保障清洁能源金属可持续供应的作用不容忽视。从清洁能源金属的内涵及数据核算、技术创新对清洁能源金属可持续供应的影响及其影响机制、技术创新影响下清洁能源金属可持续供应趋势分析等方面进行了系统梳理与展望。主要结论有: 物质流分析能精确核算清洁能源金属全产业链供需数据, 为探究全产业链技术创新对清洁能源金属可持续供应的影响提供基础数据; 为保障我国清洁能源金属可持续供应, 现有研究主要集中在“开源”“节流”以及全球治理等方面, 有关技术创新影响的研究大部分停留在定性分析和产业链单一环节; 清洁能源金属可持续供应需要考虑全产业链技术创新的影响, 需要耦合清洁能源金属供应链、产业链和创新链, 探究产业链上游的联合生产机制、产业链中游的高效生产机制、产业链下游需求端的产业发展机制以及循环端的耦合配置机制; 未来需突破传统技术创新情景假定的分析框架, 内生化技术创新的影响, 进而科学研判清洁能源金属可持续供应的演变趋势。

关键词: 技术创新; 清洁能源金属; 可持续供应; 全产业链

中图分类号: TG14

文献标识码: A

文章编号: 1672-3104(2024)01-0112-14

一、引言

当前我国碳减排任务艰巨, 发展清洁能源是实现碳达峰与碳中和目标的有效路径^[1]。预计到2030年, 我国清洁能源(含水电)发电装机将达到21.9亿kW, 占当年装机容量的57.6%, 非化石能源发电量占比达到49%, 能源变革大幅提速^[2]。

太阳能发电、风力发电和动力电池等清洁能源技术发展强劲, 而清洁能源金属是清洁能源技术与清洁能源产业发展的核心要件。相较于传统能源系统, 清洁能源系统更具金属密集性^[3], 如风力发电依赖稀土元素钕和镝^[4], 光伏发电依赖金属镓、碲、铟、镉和硒^[5], 动力电池制造离不开清洁能源金属锂和钴^[6-7]。仅在低碳减排领域, 世界银行估计要使全球能源系统在2050年脱碳,

收稿日期: 2023-02-30; 修回日期: 2023-10-25

基金项目: 国家自然科学基金重大项目“新时代战略性关键矿产资源供给安全与管理政策”(71991482); 国家自然科学基金青年项目“全产业链技术创新对清洁能源关键金属可持续供应的影响机制及保障对策研究”(72204236); 国家自然科学基金青年项目“大国竞争背景下战略性关键矿产全产业链韧性提升机制及保障对策研究”(72304255); 教育部人文社会科学青年项目“清洁能源技术关键金属供需格局演变与我国的对策研究”(21YJC790099)

作者简介: 宋益, 女, 湖南湘阴人, 中国地质大学(武汉)经济管理学院副教授, 主要研究方向: 资源环境经济与管理、产业经济; 白文博, 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 中国地质大学(武汉)经济管理学院硕士研究生, 主要研究方向: 矿产资源产业链韧性评估; 成金华, 男, 湖北黄冈人, 中国地质大学(武汉)经济管理学院教授、博士生导师, 主要研究方向: 关键矿产资源安全与治理; 张亿军, 男, 陕西安康人, 中国地质大学(武汉)经济管理学院副教授, 主要研究方向: 资源与环境经济、产业经济, 联系邮箱: yijun39@foxmail.com

将需要大约 30 亿吨清洁能源金属, 促使锂、镍、钴、镓、铟和稀土元素的需求呈指数级增长。伴随我国能源结构转型加速, 清洁能源金属被广泛应用于清洁能源产业, 产生新的巨大需求^[8]。

然而, 清洁能源金属大多属于伴生金属, 其供给系统具有较高的复杂性和不确定性^[9-10]。欧盟 2016 年发布的《未来低碳能源和交通技术的材料供应链潜在瓶颈评估报告》指出, 到 2030 年, 镓、铟、锗、碲等伴生金属的供应将面临高风险。据研究, 我国清洁能源金属的供应风险均处于中风险以上等级, 其中铟、镓、锗 3 种清洁能源金属处于中高风险水平, 钴、铂、铜、铝、钛等 12 种清洁能源金属处于中风险等级^[11]。随着主金属去产能压力的增大以及产量增长放缓, 清洁能源金属的供给风险进一步加大^[12]。此外, 近来一些突发事件加剧了全球清洁能源金属的供应风险, 导致全球关键金属的争夺从初级矿产资源获取向产业链、供应链全链延伸。以锂为例, 全球锂产品贸易的集中化特征明显, 超过 80% 的锂产品贸易被少数国家所掌控^[13]。可以预见, 未来我国清洁能源金属供需矛盾将日益突出, 其可持续供应将面临严重挑战, 不利于能源结构转型和清洁能源产业的发展, 影响碳达峰、碳中和等重大战略的有效实施。面对迫切的新兴产业资源需求和严峻的国际资源竞争态势, 亟需加大技术创新力度, 为保障我国清洁能源金属可持续供应提供技术支撑。

技术创新是化解被卡脖子风险和突破价值链低端锁定的基础性、源头性工作, 对保障清洁能源金属可持续供应的作用不容忽视^[14]。一方面, 技术创新通过拓展矿产资源开发利用空间、提高资源的开发利用效率等实现资源的开源; 另一方面, 技术创新通过提高矿产资源综合利用效率、循环利用水平和资源替代率等实现节约资源的目的^[15]。许多国家或地区利用技术创新相关措施缓解清洁能源金属供需难题, 例如日本为了摆脱对我国的稀土依赖, 早在 2009 年就启动了稀土替代的研发项目; 欧盟早在 2014 年制定关键原材料清单时便提出了以“提高关键原材料循环利用水平、替代率”为主要保障途径的关键原材

料安全战略, 并针对性地做了很多技术研发部署; 特朗普第 13817 号行政命令提出对开发关键矿产回收和再处理技术及关键矿产的技术替代品进行评估; 2020 年联合国环境规划署发布了《未来持续技术用关键金属及其循环回收潜力》。我国关键金属存在勘矿效率不高、资源回收率低等问题, 清洁高效利用技术特别是复杂共伴生金属原生及二次资源高效转化, 清洁分离新原理、新过程和新技术已成为满足资源需求的重要保障^[16]。然而, 清洁能源金属可持续供应不仅需要关注资源本身的可供性, 更需要关注资源从上游供给到下游产业需求全过程的可持续性。一方面, 涉及上游原料以及产业链中间品生产加工和流通过程的可持续供应, 包含勘探、采矿、选矿、分离、冶金、回收等产业链环节^[17]; 另一方面, 涉及产业链上的众多关键技术, 包括原材料制备技术、关键部件加工技术、终端产品制造技术和废弃产品循环利用技术等^[18]。清洁能源金属可持续性供应是建立在资源全生命周期上的, 需要更加关注全产业链条上的技术创新。

因此, 在新技术革命和能源结构转型背景下, 需要重点关注技术创新对清洁能源金属可持续供应的影响。鉴于此, 本研究从清洁能源金属的内涵及数据核算、技术创新对清洁能源金属可持续供应的影响及其影响机制、技术创新影响下清洁能源金属可持续供应趋势分析等方面进行系统梳理, 进而指出未来研究方向, 以期丰富金属资源供应安全方面的理论和方法, 推动我国战略性新兴产业的发展, 保障碳达峰、碳中和等重大国家战略的有效实施。

二、清洁能源金属的内涵及数据核算

(一) 清洁能源金属的内涵

新一轮的技术革命和产业变革拓展了稀土、稀有金属、稀散金属等矿产资源的应用领域, 使其成为新能源汽车、清洁能源、信息通信、航空航天、国防军工等战略性新兴产业不可或缺的物质基础, 成为学者们研究的焦点^[19]。在此背景下, “关键矿产”^[20]、“危机矿产”^[21]、“高

技术矿产”^[22]、“战略性关键矿产”^[23]、“关键金属”^[24]、“战略性关键金属”^[16]等概念被相继提出。

随着太阳能、风能、新能源汽车等清洁能源技术和清洁能源产业的发展,许多学者也从清洁能源需求的角度界定关键金属,如清洁能源金属或者清洁能源技术关键金属^[11]以及清洁能源技术关键伴生金属^[10]。Ballinger等^[25]确定了电动汽车行业存在重大供应风险的7种清洁能源技术关键金属。黄健柏等^[11]界定了存在供应风险的15种清洁能源技术关键金属。在现有研究的基础上,本文认为清洁能源金属的内涵包括以下几个方面:第一,是国家清洁能源技术和清洁能源产业发展的关键原材料;第二,本国具有资源优势,但由于开发技术落后或环境负荷大造成对外依存度高;第三,本国资源紧缺造成对外依存度高。表1是根据现有研究整理出来的部分清洁能源金属的种类。

(二) 清洁能源金属的物质流核算

清洁能源金属的数据可得性和数据质量问题是研究其可持续供应的一大难点。物质流分析能清晰搭建包含国际贸易和产业两个尺度的分析框架,有效归集从矿石到矿产品再到制成品、回收品等环节的供应、需求和国际贸易数据,精确核算清洁能源金属的全产业链供需数据,为探究全产业链技术创新对清洁能源金属可持续供应的影响提供基础数据。表2梳理了现有大宗金

属和清洁能源金属的物质流核算相关文献。

现有关于大宗金属物质流核算的相关文献已非常丰富。从全球层面来看,Cullen和Allwood^[26]运用物质流分析框架探讨了全球金属铝的物质流动情况;Nakajima等^[27]分析了全球镍、铜和铁的物质流动情况。从国家或区域层面来看,Johnson和Graedel^[28]从生命周期视角核算了美国铜、铅、锌、铬和银的流量与存量;Nakajima等^[29]将金属残渣回收利用量纳入物质流分析框架,对日本钢铁产业中锌、锰、镍、铬、钼等金属利用进行了物质流核算;Buchner等^[30]研究了奥地利的铝流;Wang等^[31]从全生命周期视角核算了中国钢铁资源流;Li等^[32]从全生命周期视角核算了中国铁的存量;Chen等^[33-35]追踪了美国和中国金属铝的具体流动过程;Dai等^[36]研究了中国铝工业代谢和产业流动问题;Wang等^[37]分析了铜在美国不同产业的流动情况;韩中奎等^[38]从全产业链视角对铁二次资源回收潜力进行了评估。

随着清洁能源技术的突破和清洁能源产业的发展,清洁能源金属的物质流分析逐渐成为研究热点。从全球层面来看,Ziemann等^[39]对金属锂分别进行了静态物质流分析和动态物质流分析;Nansai等^[40]分析了金属钽、钴和铂的全球流动;Licht等^[41]定量分析了2011年镓、锗、铟在开采、冶炼、中间产品生产和最终产品使用等阶段的存量和流量;Løvik等^[42]核算了2011年全球

表1 部分清洁能源金属的种类

金属	清洁能源领域	最大生产 来源地	金属	清洁能源领域	最大生产 来源地
铟	太阳能发电	中国	锡	核能、电池	中国
锗	太阳能发电	中国	镁	电池、电动汽车	中国
镓	太阳能发电	中国	银	核能、太阳能发电、电动汽车	墨西哥
稀土	核能、风力发电、电池、 电动汽车	中国	锂	电池、电动汽车	澳大利亚
钒	核能、风力发电、电池	中国	铌	核能、风力发电、电池	巴西
钼	核能、风力发电、太阳能发电	中国	铍	核能	美国
铋	电池	中国	镍	核能、风力发电、电池、 电动汽车	印度尼西亚
锑	电池	中国	钴	核能、风力发电、电池、 电动汽车	刚果(金)

镓的存量和流量; Leal-Ayala 等^[43]首次创建了全球钨的流量图; Sun 等^[44]分析了全球贸易层面的锂流; Zeng 等^[45]探讨了金属钴的全球流动与供应安全水平。从国家和区域层面来看, Guyonnet 等^[46]核算了欧盟稀土元素(镨、钕、钐、铽、镱和钇)的流量和存量, 并考虑了价值链和潜在的地质资源; 文博杰等^[47]基于物质流分析模型追踪了 2015 年中国钴的流动状况; 严康等^[48]建立了锂离子电池系统中钴代谢的物质流分析模型, 核算了锂离子电池中钴的流动情况; Ciacci 等^[49]核算了 2016

年欧盟金属钕的流量和存量; Chen 等^[50]核算了 1994 年至 2016 年中国钴的流量与存量; Qiao 等^[51]核算了 2000 年至 2021 年中国城市钴矿的钴流量、存量和回收潜力; 刘立涛等^[52]分析了美国 1995 年到 2015 年钴物质流演变; Zhou 等^[53]核算了我国 2000 年到 2018 年金属铟的流量与存量; 赵连征等^[54]分析了新能源汽车产业驱动下我国锂元素的流量、存量和供需格局; Li 等^[55]核算了 2011 年至 2020 年我国金属镉的流量和存量, 并考虑了镉最终产品的回收问题。

表 2 大宗金属和清洁能源金属的物质流核算相关文献

研究种类	文献来源	核算尺度	时间尺度	具体金属品种
大宗金属	Cullen 和 Allwood ^[26]	全球	2008、2011	金属铝
	Nakajima 等 ^[27]		1995—2010	镍、铜和铁
	Johnson 和 Graedel ^[28]	美国	2004	铜、铅、锌、铬和银
	Nakajima 等 ^[29]	日本钢铁产业	2000	锌、锰、镍、铬、钼
	Buchner 等 ^[30]	奥地利	2010	金属铝
	Wang 等 ^[31]	中国	2003—2012	钢铁
	Li 等 ^[32]	中国	2010—2015	金属铁
	Chen 等 ^[33]	美国	2007	金属铝
	Chen 等 ^[34]	中国	1900—2009	金属铝
	Chen 等 ^[35]	中国	2001、2004 和 2007	金属铝
	Dai 等 ^[36]	中国	1950—2100	金属铝
	Wang 等 ^[37]	美国	1900—2016	金属铜
	韩中奎等 ^[38]	中国	1949—2021	金属铁
清洁能源金属	Ziemann 等 ^[39]	全球	2010—2050	金属锂
	Nansai 等 ^[40]		2005	钕、钴、铂
	Licht 等 ^[41]		2011	镓、锗、铟
	Løvik 等 ^[42]		2011	金属镓
	Leal-Ayala 等 ^[43]		2010	全球钨
	Sun 等 ^[44]		2014	金属锂
	Zeng 等 ^[45]		1998—2019	金属钴
	Guyonnet 等 ^[46]	欧盟	2010	稀土元素(镨、钕、钐、铽、镱和钇)
	文博杰等 ^[47]	中国	2015	金属钴
	严康等 ^[48]	中国锂离子电池	2012	金属钴
	Ciacci 等 ^[49]	欧盟	2016	金属钕
	Chen 等 ^[50]	中国	1994—2016	金属钴
	Qiao 等 ^[51]	中国	2000—2021	城市钴矿
	刘立涛等 ^[52]	美国	1995—2015	金属钴
	Zhou 等 ^[53]	中国	2000—2018	金属铟
	赵连征等 ^[54]	中国新能源汽车	2000—2020	金属锂
	Li 等 ^[55]	中国	2011—2020	金属镉

(三) 研究展望

综上, 现有文献提供了清洁能源金属全生命周期物质流分析的研究框架, 为构建基于全生命周期清洁能源金属产业链各环节产品的流动网络提供了理论基础与技术支持。然而现有文献缺乏追踪我国不同产业和不同产品相互交织的复杂的金属供需路径, 特别是从全产业链视角追踪我国清洁能源金属的可持续供应路径。未来有必要在“载体金属—伴生金属”联合生产、“清洁能源产业—清洁能源金属”需求驱动、“原生金属—再生金属”耦合配置的基础上, 建立追踪清洁能源金属全生命周期循环的“存量与流量”模型, 构建“长尺度、多流程、多产品”的清洁能源金属存量与流量数据核算体系, 提高我国清洁能源金属供需核算的广度、精度和准度(如图1所示)。

三、技术创新影响清洁能源金属可持续供应的理论分析

(一) 清洁能源金属可持续供应研究现状

由于我国清洁能源金属供需矛盾日益突出, 其可持续供应受到严重挑战, 现有研究首先关注

其供需平衡问题。全球的“净零排放”与“碳中和”目标, 促使可再生能源、新能源汽车等产业快速发展, 刺激了稀土、锂、钴、钢、镓等金属的需求增长, 导致这类清洁能源金属的达峰时间有所推迟^[56]。然而, 太阳能光伏发电所需的金属镭^[57]、电动汽车电池所需的金属锂和钴^[25]、风力涡轮机所需的最关键的两种金属钕和镝^[58], 在未来将不能满足需求, 面临可持续供应问题^[3]。Watari等^[59]运用情景分析法预测了与清洁能源技术密切相关的48种金属的需求量, 发现清洁能源金属存在供需不匹配问题。此外, 清洁能源金属的伴生属性也将对其可持续供应构成威胁^[60]。

在供需失衡挑战下, 大量研究构建关键金属供应风险评估体系, 评估其供应风险。供应风险评估不仅要考虑市场供需、价格、进出口贸易、资源、政治等因素, 还应综合考虑全球需求增长可能性、全球生产能力扩张局限性、国际间生产国集中度、主要生产国政治风险、贸易壁垒、原材料产业链、资源外交等因素^[61]。同时, 全球产业结构调整加剧了海外清洁能源金属获取的风险, 且清洁能源金属可持续供应面临贸易保护主义和资源民族主义的双重挑战^[62]。在识别供应风险影响因素的基础上, 供应风险评估体系也逐渐

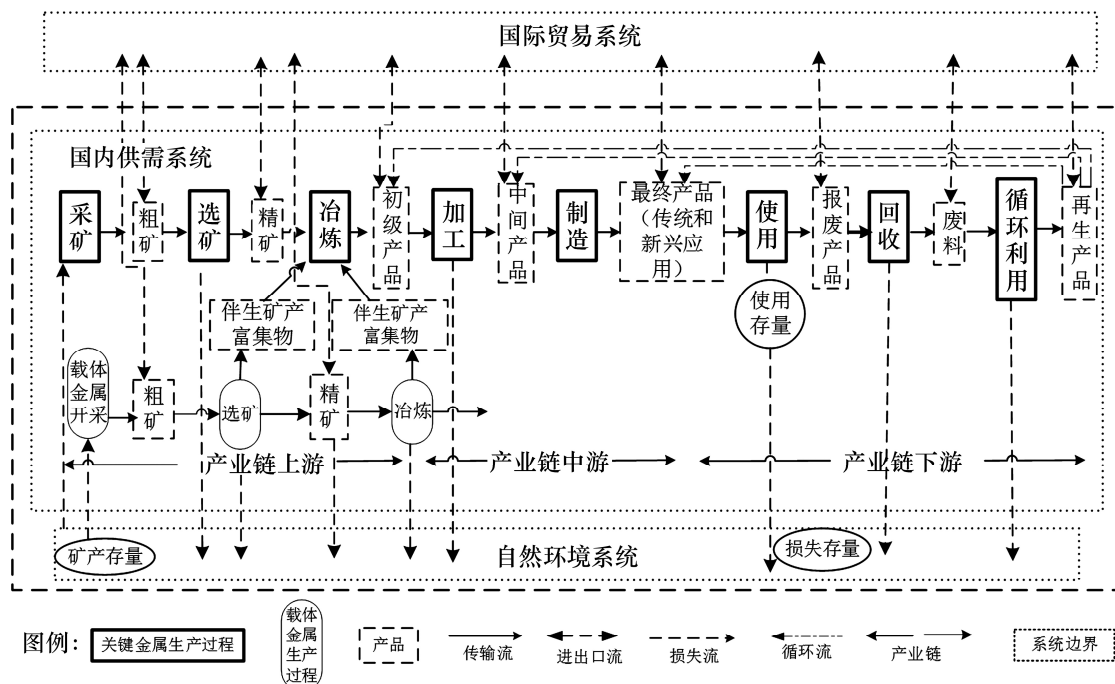


图1 基于多系统多环节全产业链的我国清洁能源金属物质流核算框架

从二维评估体系发展到三维和四维评估体系。如从经济重要性和供应短缺二维度^[63]扩展到供应风险、环境和经济风险三维度^[64],再到供应减少、需求增加、集中风险、政治风险四维度^[65]。黄健柏等^[11]还考虑了清洁能源金属回收对缓解供应风险的影响。

为保障我国清洁能源金属可持续供应,学者们提出了一系列政策措施,主要集中在“开源”“节流”以及全球治理等方面。在“开源”方面,提出了加快新资源开发、实现供给来源多样化、实施“资源外交”等举措^[66-67];杨丹辉等^[68]建议扩展资源边界,建立多元化供给渠道;李鹏飞等^[69]建议加大关键金属勘探和应用技术的研发投入力度;侯增谦等^[24]建议通过研究关键金属成矿规律、成矿作用和高效利用,创新关键矿产成矿及分离理论,提升我国对关键矿产的话语权。在“节流”方面,提高资源利用效率是实现关键金属可持续供应的有效路径^[58];资源的循环利用以及替代品的开发也可以有效缓解其供应约束^[70-71]。例如,在金属锂的循环利用率达到80%的情景下,电动汽车将突破锂资源约束^[59];无钴或低钴电池技术可以通过使用金属镍,减少对钴的依赖^[72]。在全球治理方面,随着新技术革命的到来,关键矿产需求的指数级增长必将引起全球主要大国的激烈竞争,亟需建立全球层面的治理体系来维持全球关键矿产资源网络秩序^[73]。

综上,现有文献对清洁能源金属可持续供应进行了大量研究,是制定保障清洁能源金属可持续供应政策体系的重要文献基础。然而,现有研究缺乏对清洁能源金属可持续供应理论机制的剖析,在一定程度上忽视了清洁能源金属可持续供应的理论性和复杂性;同时也缺乏技术创新尤其是全产业链技术创新对清洁能源金属可持续供应的影响研究。此外,现有的政策建议比较零散。未来有必要从全产业链视角出发,有效耦合清洁能源金属供应链、产业链和创新链,系统解析技术创新尤其是全产业链技术创新对清洁能源金属可持续供应的影响机制。

(二) 技术创新对清洁能源金属可持续供应的影响及其影响机制

在新一轮科技革命和产业革命的背景下,技

术创新对清洁能源金属需求端的影响已成为研究的焦点。清洁能源金属需求的增长主要来自清洁能源技术的发展,清洁能源金属主要用于太阳能光伏发电设备、风力发电设备和电动汽车的制造。Hoenderdaal等^[74]的分析表明电力发动机、混合动力与电动汽车等的发展需要金属镍的支撑。Elshkaki和Graedel^[4]发现风力发电技术依赖铝、铜、铬、镍、铅、铁,尤其是稀土元素钕和镨。Roelich等^[75]分析了低碳发电技术与金属钕消耗之间的关系。Kim等^[66]分析了风能系统对银、镁、铟、金和钽等主要材料的需求。Davidsson和Höök^[5]发现光伏发电技术和薄膜技术依赖金属镓、碲、铟、镉和硒。He等^[76]研究了可再生能源技术进步和化石燃料技术进步对金属材料消费的影响。技术创新同时也是影响清洁能源金属供应端的重要因素^[14]。Langkau和Espinoza^[77]指出技术创新包括新技术的出现和对现有技术的持续改进,可以通过降低生产成本、提高资源利用效率、促进回收以及实现资源替代等方式,直接或间接对金属供应产生影响。Song等^[78]以全球21个主要资源国为例,将关键金属供应划分为采选、冶炼和回收等阶段,从产业链的视角探讨了技术创新对铜、镍、钴、镓、铟、铂等11种关键金属供应的影响;在此基础上引入产业发展规模,发现技术创新对关键金属供应存在规模效应。同时,Song等^[79]探讨了我国战略性关键金属子行业技术创新对关键金属产品供应的影响,发现技术创新对采选阶段和冶炼阶段战略性关键金属供应的影响存在规模效应和成本效应。

技术创新对金属资源产业链各环节的影响存在差异。首先,勘探或采选等产业链上游技术创新可以大幅提高矿产资源的储量和产量。侯增谦等发展的斑岩铜矿成矿理论,指导了我国碰撞带斑岩铜矿的勘查工作,极大地提升了铜矿资源的可供储量^[14];邱冠周等研究的生物冶金技术可以有效应对复杂矿产资源,极大地提升了矿产资源可供产量^[80];第三代酸法串级萃取的理论创新大幅增加了我国的稀土产量,使全球稀土供给进入中国主导时代^[81]。Tilton等^[82]发现金属勘探或开采技术的突破以及探矿或采矿机械设备的革新,可以帮助发现更多的资源储量,增加资源

的发现率、可获得性和产出率。Upstill 和 Hall^[83]发现技术创新对于开采更复杂的新矿床起着至关重要的作用。然而,清洁能源金属大多数属于伴生金属,而伴生金属的特殊之处在于产量严格受限于载体金属的生产,载体金属的供给规模、载体金属的回收利用、伴生金属的分离技术等都将影响清洁能源金属的可持续供应^[12]。因此,清洁能源金属上游采选冶行业的技术创新存在联合生产机制效应,能通过影响载体金属的供给规模、载体金属的回收利用、伴生金属的分离技术对清洁能源金属可持续供应产生影响。

其次,金属冶炼加工等产业链中游的技术改进可以有效提高资源综合利用效率。冶炼行业的技术创新往往来自它们本身,通常包括现有技术的逐步发展和新技术工艺的引入或出现^[84]。加工冶炼类技术可以通过有效处理低品位矿石、加工更复杂的矿石、最小化能源使用或减少碳排放,推动冶金行业的发展^[85]。Mitra^[86]通过分析铜生产各环节的投入产出数据,发现技术创新可以提取出更多金属,从而抵消金属资源的物理损耗。因此,产业链中游技术创新对清洁能源金属可持续供应的影响存在高效生产机制。一方面,加工制造企业可以通过优化工艺流程,减少清洁能源金属原料的消耗、降低生产成本,提高清洁能源金属加工制造的效率,发挥技术创新对清洁能源金属供应的规模效应和激励效应;另一方面,加工制造企业可以通过深加工技术进步,推进现有生产工艺和技术装备的不断完善,提高清洁能源金属产品质量,缓解“低端产能过剩、高端产能不足”的结构性供需失衡问题。

此外,产业链下游的回收利用技术创新可以

变废为宝,实现资源的循环利用。例如,再生铜技术和再生铝技术的发展,增加了可以回收的金属种类,提高了金属回收的效率。清洁能源金属以在用存量或废弃物的形式在社会富集,其循环利用能够有效缓解原生资源的供应压力^[87]。值得注意的是,再生金属是一种特殊的金属资源,既源于原生金属,又与之具有相同的市场竞争目标,两者处于相互竞争、相互替代又相互补充、相互耦合的复杂系统之中^[71]。因此,基于“原生金属—再生金属”的耦合配置机制,在循环利用技术进步和回收效率提升驱动下,再生金属生产对清洁能源金属可持续供应存在乘数效应。

(三) 研究展望

综上,技术创新对清洁能源金属需求的影响研究已较为深入,但技术创新对清洁能源金属供应的影响,大部分停留在理论综述和定性研究上,部分实证研究也仅停留在单一技术或产业链单个环节上,缺乏对全产业链的影响分析,更加缺乏对影响机制或影响路径的探索。金属资源全产业链是包括资源勘探、开采和洗选等矿业项目阶段,冶炼、加工和生产等矿产品生产加工阶段,产业嵌入和行业使用阶段以及回收循环利用阶段等的多主体交互作用的复杂系统,以资源流动为主线,以技术创新为支撑^[17]。李华姣等^[88]指出中国上游优势矿产资源由于缺乏产业链深加工必要的关键技术,使得中下游“被卡脖子”的困境屡屡出现。未来有必要从全产业链视角出发,构建全产业链技术创新影响清洁能源金属可持续供应的机理分析框架(如图2所示),揭示全产业链技术创新对清洁能源金属可持续供应的影响。

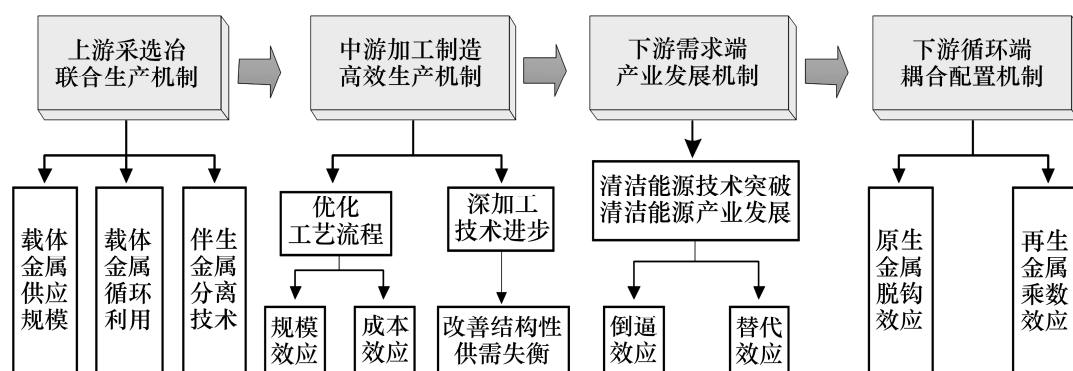


图2 全产业链技术创新影响清洁能源金属可持续供应的机理分析框架

四、技术创新影响下清洁能源金属可持续供应趋势分析

(一) 不同情境下矿产资源供需趋势分析

探究矿产资源的供需趋势对突破资源约束限制、维护国家矿产资源安全具有重要意义。基于此, 学者们综合各类约束性因素, 分析了不同情境下矿产资源的供需趋势。王安建等^[89]基于资源需求理论, 综合考虑人均资源消费和人均 GDP 两个核心变量, 结合产业结构、城市化率、资源价格、消费强度、消费弹性等约束性因素, 参考基础设施建设与财富积累水平情况, 全面预测了 2010—2030 年全球层面以及中国的能源、钢、铜、铝需求变化情况。张艳飞等^[90]综合考虑全球各区域 GDP 增速和人口变化情况, 对 2015—2040 年的全球钢铁供需情况进行了预测。渠慎宁^[91]采用结构向量自回归方法, 将矿产需求量与工业增加值、人均 GDP、城镇化率相联系, 预测了中国 2016—2020 年铁、铜、锡三种资源需求状况, 并进一步基于未来需求增长速度和产能建设速度预测了三类关键矿产的供给, 最终得出中国的供需缺口变化情况。Fang 等^[92]将年产量、累积产量、最终可采储量等因素纳入 Logistic 曲线和 STELLA 模型, 评估了中国铀产量的峰值。Mohr 等^[93]考虑了矿山的生命周期、生产率以及矿产回收利用等因素, 对全球铅和锌的生产进行了预测。Xu 和 Zhu^[94]在传统 Hubbert 模型中加入两种假设, 即各矿物的累积产量呈逻辑曲线分布以及副产品矿物之间存在 Copula 关系, 进而预测了未来锌和铜的峰值时间, 发现峰值的来临受到开采和加工效率的影响。Fu 等^[95]对 2030 年全球钴供应进行预测, 供应情景依次考虑了初次供应的价格, 矿山产量, 矿床的采收率、储量、寿命以及二次供应的生产效率、二次流动; 需求情景则划分为电池需求和非电池需求两类情景。Yi 等^[96]基于动态规划假设, 分析了中国生产配额政策对 26 种关键矿产长期可持续供应的影响。

由于传统的供需趋势分析未考虑技术创新的影响, 研究结果存在一定的偏差, 因此, 部分

学者将技术因素作为特定情境或是主要影响变量, 纳入关键矿产供需预测分析中。Ge 等^[97]在考虑替代和回收层面技术改进的基础上, 构建了动态可计算均衡模型(DCGE)并代入基准、宽松、紧张三类供应情景, 综合预测了 2025 年中国稀土的生产、国内供应和出口情况。Månberger 和 Stenqvist^[98]分析了全球气候减缓情景下不同的技术改进(如海上风力发电、向岸风、太阳热能等)和不同终端技术组合(如个人车辆、重型卡车、混合动力公共汽车、电池电力和燃料电池等)对 12 种关键金属的需求影响情况。Luo 等^[99]分析了特定清洁能源技术和电动汽车领域在可持续发展情景(SDS)和既定政策情景(STEPS)下对各种关键矿产资源的需求。Zeng 等^[45]研究发现电池技术和回收利用可以缓解钴长期供应风险, 并指出即使技术创新在最理想的条件下也难以缓解钴的短期和中期供应短缺问题。Sun 等^[100]基于国内生产总值、储量、价格、技术进步水平和消费等五类影响因素, 制定了 12 种供需方案来探究清洁能源技术关键金属(锂、镍、钴)的未来供应, 并发现技术创新是制约供应可持续性的关键因素。

(二) 研究展望

综上, 清洁能源金属可持续供应趋势分析, 需要综合考虑资源国内供需、资源国际贸易、经济、人口、绿色发展需求、突发事件、政府政策调控等多种因素的影响。但现有研究在进行矿产资源供需预测时, 技术创新往往以简单的假设参数来代替, 未考虑技术演进趋势以及技术在短期与长期的差异。虽然“情景设定一定量预测”分析范式能够在一定程度上反映技术进步对清洁能源金属供需的影响, 但其作用大小以及传导机制中各因素间的相互作用在很大程度上无法得到体现, 导致预测结果存在偏差。未来有必要突破传统技术创新情景假定的分析框架, 将全产业链技术创新的影响效应内生于趋势分析模型中, 构建全产业链技术创新影响下我国清洁能源金属可持续供应综合分析框架(如图 3 所示), 科学研判我国清洁能源金属可持续供应演变趋势, 并识别其关键驱动路径和关键约束路径, 据此制定保障清洁能源金属可持续供应的对策建议。

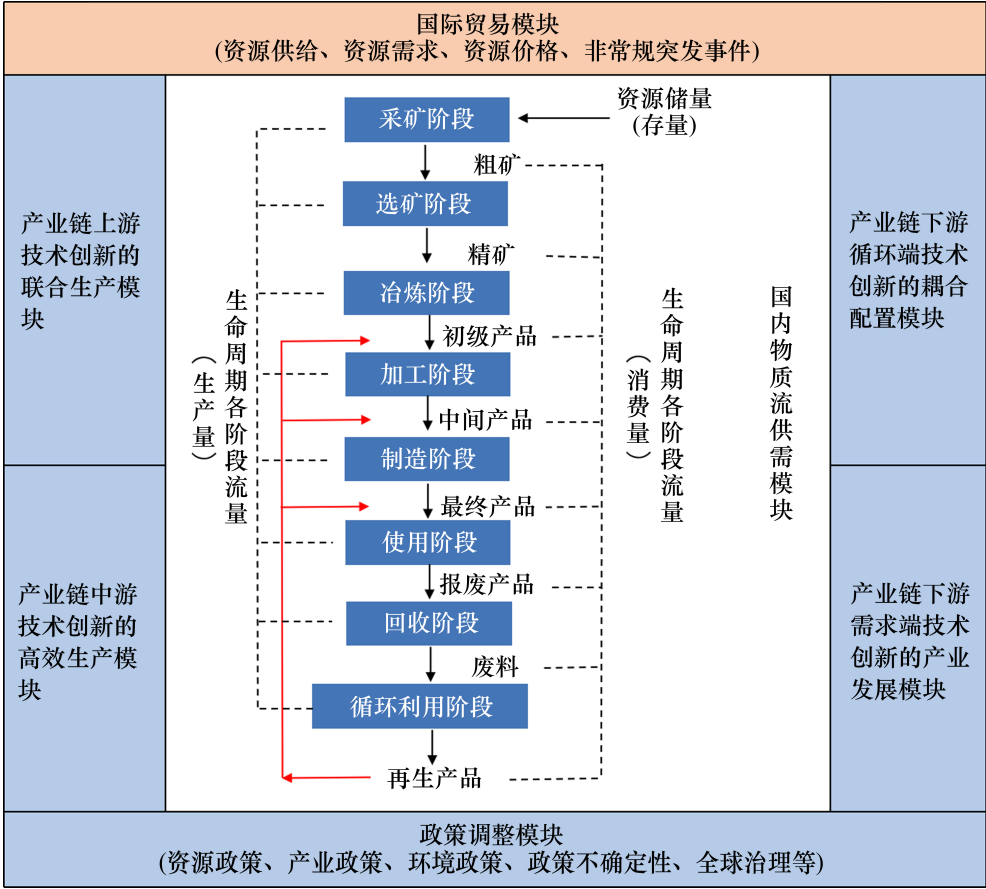


图3 全产业链技术创新影响下清洁能源金属可持续供应综合分析框架

五、结论与展望

(一) 主要结论

在新技术革命和能源结构转型背景下，我国清洁能源金属供需矛盾日益突出，迫切需要发挥技术创新对清洁能源金属可持续供应的积极影响。本文从清洁能源金属的内涵及数据核算、技术创新对清洁能源金属可持续供应的影响及其影响机制、技术创新影响下清洁能源金属可持续供应趋势分析等方面进行了系统梳理与展望。

(1) 清洁能源金属的内涵包含三个方面：第一，是国家清洁能源技术和清洁能源产业发展的关键原材料；第二，本国具有资源优势，但由于开发技术落后或环境负荷大造成对外依存度高；第三，本国资源紧缺造成对外依存度高。

(2) 物质流分析能精确核算清洁能源金属全产业链供需数据，为探究全产业链技术创新对清

洁能源金属可持续供应的影响提供基础数据。现有文献为构建我国清洁能源金属物质流分析框架提供了理论基础与技术支持，但很少追踪我国不同产业和不同产品相互交织的复杂金属供需路径，特别是从全产业链视角追踪我国清洁能源金属的可持续供应路径。

(3) 在清洁能源金属供需矛盾日益突出的背景下，现有文献主要关注其供需平衡问题，并构建供应风险评估体系，评估其供应风险。为保障我国清洁能源金属可持续供应，学者们从“开源”“节流”以及全球治理等方面提出了一系列政策措施。然而，现有研究缺乏对清洁能源金属可持续供应理论机制的剖析，在一定程度上忽视了清洁能源金属可持续供应的理论性和复杂性。

(4) 技术创新对清洁能源金属需求影响的研究已较为深入，但技术创新对清洁能源金属供应的影响研究大部分停留在理论综述和定性研究上，部分实证研究也仅停留在单一技术或产业链

单个环节上, 缺乏对全产业链的影响分析, 更加缺乏对影响机制或影响路径的探索。

(二) 未来展望

(1) 未来有必要在“载体金属—伴生金属”联合生产、“清洁能源产业—清洁能源金属”需求驱动、“原生金属—再生金属”耦合配置的基础上, 建立追踪清洁能源金属全生命周期循环的“存量与流量”模型, 提升我国清洁能源金属供需核算的广度、精度和准度, 为探究全产业链技术创新对清洁能源金属可持续供应的影响提供基础数据。

(2) 未来需要构建一个综合全面的分析框架来探究全产业链技术创新影响清洁能源金属可持续供应的理论机制。全产业链技术创新视角下的清洁能源金属可持续供应需要耦合清洁能源金属供应链、产业链和创新链, 并分析产业链上游采选冶行业载体金属与伴生金属的联合生产机制、产业链中游加工制造行业的高效生产机制、产业链下游消费端关键矿产的产业发展机制以及循环端原生金属与再生金属的耦合配置机制。

(3) 未来需要突破传统技术创新情景假定的分析框架, 将全产业链技术创新的影响效应内生于趋势分析模型中, 科学研判我国清洁能源金属可持续供应的演变趋势, 并识别其关键驱动路径和关键约束路径, 在此基础上制定保障清洁能源金属可持续供应的对策建议, 推动我国清洁能源技术和清洁能源产业发展, 保障碳达峰、碳中和等重大国家战略的实施。

参考文献:

- [1] 汪鹏, 王翹楚, 韩茹茹, 等. 全球关键金属—低碳能源关联研究综述及其启示[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 669–681.
- [2] 屈博, 刘畅, 李德智, 等. “碳中和”目标下的电能替代发展战略研究[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(2): 1–3, 9.
- [3] SOVACOL B K, ALI S H, BAZILIAN M, et al. Sustainable minerals and metals for a low-carbon future[J]. Science, 2020, 367(6473): 30–33.
- [4] ELSHKAKI A, GRAEDEL T E. Dysprosium, the balance problem, and wind power technology[J]. Applied Energy, 2014, 136: 548–559.
- [5] DAVIDSSON S, HÖÖK M. Material requirements and availability for multi-terawatt deployment of photovoltaics[J]. Energy Policy, 2017, 108: 574–582.
- [6] 邢佳韵, 陈其慎, 张艳飞, 等. 新能源汽车发展下锂钴镍等矿产资源需求展望[J]. 中国矿业, 2019, 28(12): 67–71.
- [7] 朱学红, 刘瑾睿, 曾安琪, 等. 基于产业复杂网络的中国隐含钴消费结构特征及关键路径研究[J]. 中南大学学报(社会科学版), 2022, 28(3): 68–81.
- [8] 张所续, 周季鑫. 能源转型进程中的关键矿产安全[J]. 中国国土资源经济, 2022, 35(1): 22–28, 78.
- [9] MUDD G M, JOWITT S M, WERNER T T. The world's by-product and critical metal resources Part I: Uncertainties, current reporting practices, implications and grounds for optimism[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 86: 924–938.
- [10] 宋慧玲, 王昶, 左绿水. 碳中和背景下清洁能源技术关键伴生金属可供性约束研究回顾与展望[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32 (3): 38–48.
- [11] 黄健柏, 孙芳, 宋益. 清洁能源技术关键金属供应风险评估[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1477–1488.
- [12] 邵留国, 蓝婷婷. 伴生性关键矿产资源安全研究综述与展望[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1452–1463.
- [13] 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.
- [14] 成金华, 刘凯雷, 徐德义, 等. 战略性关键矿产资源可供性研究现状与展望[J]. 河北地质大学学报, 2021, 44(1): 95–103.
- [15] 董雪松, 黄健柏, 钟美瑞, 等. 技术进步对关键金属矿产需求影响的研究综述[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1592–1603.
- [16] 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题[J]. 中国科学基金, 2019, 33(2): 106–111.
- [17] 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.
- [18] 王昶, 刘雅琳, 耿红军, 等. 基于 P-TRM 的中国稀土产业技术创新的政策演化路径研究[J]. 中南大学学报(社会科学版), 2023, 29(3): 89–101.
- [19] GOLDTHAU A, HUGHES L. Protect global supply chains for low-carbon technologies[J]. Nature, 2020, 585(7823): 28–30.

- [20] 王登红. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1189–1209.
- [21] 余韵, 陈甲斌. 美国危机矿产研究概况及其启示[J]. 国土资源情报, 2017(2): 45–51.
- [22] 陈从喜, 崔荣国, 李政, 等. 高技术矿产的内涵、分类及应用前景[J]. 国土资源情报, 2020(10): 5–11.
- [23] 王登红. 战略性关键矿产相关问题探讨[J]. 化工矿产地质, 2019, 41(2): 65–72.
- [24] 侯增谦, 陈骏, 翟明国. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿[J]. 科学通报, 2020, 65(33): 3651–3652.
- [25] BALLINGER B, STRINGER M, SCHMEDA-LOPEZ D R, et al. The vulnerability of electric vehicle deployment to critical mineral supply[J]. Applied Energy, 2019, 255: 113844.
- [26] CULLEN J M, ALLWOOD J M. Mapping the global flow of aluminum: from liquid aluminum to end-use goods[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(7): 3057–3064.
- [27] NAKAJIMA K, DAIGO I, NANSAI K, et al. Global distribution of material consumption: Nickel, copper, and iron[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2018, 133: 369–374.
- [28] JOHNSON J, GRAEDEL T E. The “hidden” trade of metals in the United States[J]. Journal of Industrial Ecology, 2008, 12(5–6): 739–753.
- [29] NAKAJIMA K, OHNO H, KONDO Y, et al. Simultaneous material flow analysis of nickel, chromium, and molybdenum used in alloy steel by means of input-output analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(9): 4653–4660.
- [30] BUCHNER H, LANER D, RECHBERGER H, et al. In-depth analysis of aluminum flows in Austria as a basis to increase resource efficiency[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2014, 93: 112–123.
- [31] WANG P, JIANG Z, GENG X, et al. Quantification of Chinese steel cycle flow: Historical status and future options[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2014, 87: 191–199.
- [32] LI Q, DAI T, WANG G, et al. Iron material flow analysis for production, consumption, and trade in China from 2010 to 2015[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 1807–1813.
- [33] CHEN W Q, GRAEDEL T E, NUSS P, et al. Building the material flow networks of aluminum in the 2007 US economy[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(7): 3905–3912.
- [34] CHEN W Q, GRAEDEL T E. Dynamic analysis of aluminum stocks and flows in the United States: 1900–2009 [J]. Ecological Economics, 2012, 81: 92–102.
- [35] CHEN W, SHI L, QIAN Y. Substance flow analysis of aluminium in mainland China for 2001, 2004 and 2007: Exploring its initial sources, eventual sinks and the pathways linking them[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2010, 54(9): 557–570.
- [36] DAI M, WANG P, CHEN W Q, et al. Scenario analysis of China's aluminum cycle reveals the coming scrap age and the end of primary aluminum boom[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 226: 793–804.
- [37] WANG M, LIANG Y, YUAN M, et al. Dynamic analysis of copper consumption, in-use stocks and scrap generation in different sectors in the US 1900–2016 [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2018, 139: 140–149.
- [38] 韩中奎, 代涛, 李强峰, 等. 基于动态物质流分析的中国铁二次资源回收潜力研究[J]. 地球学报, 2023, 44(2): 315–324.
- [39] ZIEMANN S, MÜLLER D B, SCHEBEK L, et al. Modeling the potential impact of lithium recycling from EV batteries on lithium demand: A dynamic MFA approach[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2018, 133: 76–85.
- [40] NANSAI K, NAKAJIMA K, KAGAWA S, et al. Global flows of critical metals necessary for low-carbon technologies: The case of neodymium, cobalt, and platinum[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(3): 1391–1400.
- [41] LICHT C, PEIRÓ L T, VILLALBA G. Global substance flow analysis of gallium, germanium, and indium: Quantification of extraction, uses, and dissipative losses within their anthropogenic cycles[J]. Journal of Industrial Ecology, 2015, 19(5): 890–903.
- [42] LØVIK A N, RESTREPO E, MÜLLER D B. The global anthropogenic gallium system: Determinants of demand, supply and efficiency improvements[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(9): 5704–5712.
- [43] LEAL-AYALA D R, ALLWOOD J M, PETAVRATZI E, et al. Mapping the global flow of tungsten to identify key material efficiency and supply security opportunities[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2015, 103: 19–28.
- [44] SUN X, HAO H, ZHAO F, et al. Tracing global lithium

- flow: A trade-linked material flow analysis[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2017, 124: 50–61.
- [45] ZENG A, CHEN W, RASMUSSEN K D, et al. Battery technology and recycling alone will not save the electric mobility transition from future cobalt shortages[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1341.
- [46] GUYONNET D, PLANCHON M, ROLLAT A, et al. Material flow analysis applied to rare earth elements in Europe[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 107: 215–228.
- [47] 文博杰, 韩中奎. 2015 年中国钴物质流研究[J]. *中国矿业*, 2018, 27 (1): 73–77.
- [48] 严康, 郭学益, 田庆华, 等. 中国锂离子电池系统钴代谢分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(1): 25–30.
- [49] CIACCI L, VASSURA I, CAO Z, et al. Recovering the “new twin”: Analysis of secondary neodymium sources and recycling potentials in Europe[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2019, 142: 143–152.
- [50] CHEN Z, ZHANG L, XU Z. Tracking and quantifying the cobalt flows in mainland China during 1994–2016: Insights into use, trade and prospective demand[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 672: 752–762.
- [51] QIAO D, DAI T, MA Y, et al. Insights into the evolution of cobalt use and implications through dynamic analysis of cobalt flows and stocks and the recycling potential of cobalt from urban mines in China during 2000–2021[J]. *Waste Management*, 2023, 163: 122–133.
- [52] 刘立涛, 赵慧兰, 刘晓洁, 等. 1995—2015 年美国钴物质流演变[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 524–534.
- [53] ZHOU Y, RECHBERGER H, LI J, et al. Dynamic analysis of indium flows and stocks in China: 2000–2018[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, 167: 105394.
- [54] 赵连征, 汪鹏, 汤林彬, 等. 中国锂元素动态物质流及关键驱动因素分析[J]. *科技导报*, 2022, 40(21): 100–109.
- [55] LI Y, WANG Y, GE J. Tracing the material flows of dysprosium in China from 2010 to 2020: An investigation of the partition characteristics of different rare earth mining areas[J]. *Resources Policy*, 2023, 85: 103836.
- [56] 梁姗姗, 杨丹辉. 演化视角下大国工业化与矿产资源消费的典型事实和脱钩实证[J]. *中南大学学报(社会科学版)*, 2023, 29 (1): 66–81.
- [57] CHOI C H, KIM S P, LEE S, et al. Game theoretic production decisions of by-product materials critical for clean energy technologies—Indium as a case study[J]. *Energy*, 2020, 203: 117768.
- [58] SHAMMUGAM S, GERVAIS E, SCHLEGL T, et al. Raw metal needs and supply risks for the development of wind energy in Germany until 2050[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 221: 738–752.
- [59] WATARI T, NANSAI K, GIURCO D, et al. Global metal use targets in line with climate goals[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(19): 12476–12483.
- [60] WANG Q C, WANG P, QIU Y, et al. Byproduct surplus: Lighting the depreciative Europium in China’s rare earth boom[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(22): 14686–14693.
- [61] 王昶, 宋慧玲, 左绿水, 等. 中国优势金属供应全球需求的风险评估[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(7): 1218–1229.
- [62] 杨丹辉, 渠慎宁. 百年未有之大变局下全球价值链重构及国际生产体系调整方向[J]. *经济纵横*, 2021(3): 61–71, 2.
- [63] 张艳飞, 陈其慎, 于汶加, 等. 中国矿产资源重要性二维评价体系构建[J]. *资源科学*, 2015, 37(5): 883–890.
- [64] GRAEDEL T E, BARR R, CHANDLER C, et al. Methodology of metal criticality determination[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2): 1063–1070.
- [65] HELBIG C, BRADSHAW A M, WIETSCHEL L, et al. Supply risks associated with lithium-ion battery materials[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 274–286.
- [66] KIM J, GUILLAUME B, CHUNG J, et al. Critical and precious materials consumption and requirement in wind energy system in the EU 27[J]. *Applied Energy*, 2015, 139: 327–334.
- [67] 葛建平, 刘佳琦. 关键矿产战略国际比较——历史演进与工具选择[J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1464–1476.
- [68] 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(11): 230–234.
- [69] 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.
- [70] ZENG X, ALI S H, TIAN J, et al. Mapping anthropogenic mineral generation in China and its implications for a circular economy[J]. *Nature*

- Communications, 2020, 11(1): 1544.
- [71] 顾一帆, 吴玉锋, 穆献中, 等. 原生资源与再生资源的耦合配置[J]. 中国工业经济, 2016, 5: 22–39.
- [72] BAARS J, DOMENECH T, BLEISCHWITZ R, et al. Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 4(1): 71–79.
- [73] ALI S H, GIURCO D, ARNDT N, et al. Mineral supply for sustainable development requires resource governance[J]. *Nature*, 2017, 543(7645): 367–372.
- [74] HOENDERDAAL S, ESPINOZA L T, MARSCHEIDER-WEIDEMANN F, et al. Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies?[J]. *Energy*, 2013, 49: 344–355.
- [75] ROELICH K, DAWSON D A, PURNELL P, et al. Assessing the dynamic material criticality of infrastructure transitions: A case of low carbon electricity[J]. *Applied Energy*, 2014, 123: 378–386.
- [76] HE R, ZHONG M, HUANG J. The dynamic effects of renewable-energy and fossil-fuel technological progress on metal consumption in the electric power industry[J]. *Resources Policy*, 2021, 71: 101985.
- [77] LANGKAU S, ESPINOZA L A T. Technological change and metal demand over time: What can we learn from the past?[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2018, 16: 54–59.
- [78] SONG Y, ZHANG Z, ZHANG Y, et al. Technological innovation and supply of critical metals: A perspective of industrial chains[J]. *Resources Policy*, 2022, 79: 103144.
- [79] SONG Y, RUAN S, CHENG J, et al. Technological change in critical metallic mineral sub-sectors and its impacts on mineral supply: Evidence from China[J]. *Resources Policy*, 2023, 85: 103850.
- [80] 余润兰, 石丽娟, 周丹, 等. 生物浸出过程中微生物协同作用机制的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23 (10): 3006–3014.
- [81] JOHNSON K R D, HAYES P G. Yttrium and scandium complexes of a bulky bis (phosphinimine) carbazole ligand[J]. *Inorganica Chimica Acta*, 2014, 422: 209–217.
- [82] TILTON J E, CROWSON P C F, De YOUNG Jr J H, et al. Public policy and future mineral supplies[J]. *Resources Policy*, 2018, 57: 55–60.
- [83] UPSTILL G, HALL P. Innovation in the minerals industry: Australia in a global context[J]. *Resources Policy*, 2006, 31(3): 137–145.
- [84] BATTERHAM R J, ALGIE S H. The role of technology in the minerals industry[R]. Littleton, CO (United States): Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc, 1995.
- [85] KUMAR S, KUMAR R, BANDOPADHYAY A. Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and allied industries[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2006, 48(4): 301–314.
- [86] MITRA S. Depletion, technology, and productivity growth in the metallic minerals industry[J]. *Mineral Economics*, 2019, 32(1): 19–37.
- [87] ZUO L, WANG C, CORDER G, et al. Future trends and strategies of recycling high-tech metals from urban mines in China: 2015–2050[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2019, 149: 261–274.
- [88] 李华姣, 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.
- [89] 王安建, 王高尚, 陈其慎, 等. 矿产资源需求理论与模型预测[J]. 地球学报, 2010, 31(2): 137–147.
- [90] 张艳飞, 陈其慎, 于汶加, 等. 2015–2040 年全球铁矿石供需趋势分析[J]. 资源科学, 2015, 37(5): 921–932.
- [91] 渠慎宁. 工业化中后期中国矿产资源供需预测研究[J]. 学习与探索, 2016(3): 79–86.
- [92] FANG J, LAU C K M, LU Z, et al. Estimating peak uranium production in China — Based on a Stella model[J]. *Energy Policy*, 2018, 120: 250–258.
- [93] MOHR S, GIURCO D, RETAMAL M, et al. Global projection of lead-zinc supply from known resources[J]. *Resources*, 2018, 7(1): 17.
- [94] XU D, ZHU Y. A Copula–Hubbert model for co (by)-product minerals[J]. *Natural Resources Research*, 2020, 29(5): 3069–3078.
- [95] FU X, BEATTY D N, GAUSTAD G G, et al. Perspectives on cobalt supply through 2030 in the face of changing demand[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(5): 2985–2993.
- [96] YI J, DAI S, CHENG J, et al. Production quota policy in China: Implications for sustainable supply capacity of critical minerals[J]. *Resources Policy*, 2021, 72: 102046.
- [97] GE J, LEI Y, ZHAO L. China's rare earths supply forecast in 2025: A dynamic computable general equilibrium analysis[J]. *Minerals*, 2016, 6(3): 95.
- [98] MÄNBERGER A, STENQVIST B. Global metal flows in the renewable energy transition: Exploring the effects of

- substitutes, technological mix and development[J]. Energy Policy, 2018, 119: 226–241.
- [99] LUO X, PAN L, YANG J. Mineral resource constraints for China's clean energy development under carbon peaking and carbon neutrality targets: Quantitative evaluation and scenario analysis[J]. Energies, 2022, 15(19): 7029.
- [100] SUN H, MENG Z H, LI M L, et al. Global supply sustainability assessment of critical metals for clean energy technology[J]. Resources Policy, 2023, 85: 103994.

Review and prospect of the effects of technological innovation on sustainable supply of clean energy metals

SONG Yi^{1,2}, BAI Wenbo¹, CHENG Jinhua^{1,2}, ZHANG Yijun^{1,3}

(1. School of Economics and Management,

China University of Geosciences, Wuhan 430078, China;

2. Center of Resource and Environmental Economics,

China University of Geosciences, Wuhan 430078, China;

3. Green Finance and Resource and Environmental Innovation Research Center,

China University of Geosciences, Wuhan 430078, China)

Abstract: The role of technological innovation in ensuring a sustainable supply of clean energy metals cannot be ignored. In this paper, the relevant literatures are systematically reviewed and prospected, including the connotation and data accounting of sustainable supply of clean energy metals, the influence of technological innovation on the sustainable supply of clean energy metals and its influence mechanisms, and the trend analysis of sustainable supply of clean energy critical metals under the influence of technological innovation, and so on. The main conclusions are as follows. Material flow analysis can accurately calculate the supply and demand data of clean energy metals from the perspective of the whole industry chain, and provide basic data for exploring the impact of technological innovation on the sustainable supply of clean energy metals. In order to ensure the sustainable supply of clean energy metals in China, existing researches are mainly focused on "open source", "throttling" and global governance, and most of the impact of technological innovation studies remains in qualitative analysis and a single link of the industrial chain. The sustainable supply of clean energy metals needs to consider the impact of technological innovation in the whole industrial chain, and it is necessary to couple the supply chain, industrial chain and innovation chain of clean energy metals, and explore the joint production mechanism of the upstream, the efficient production mechanism of the midstream, the industrial development mechanism and the coupling configuration mechanism of the downstream. It is necessary to break through the analytical framework of traditional technological innovation scenarios and internalize the impact of technology innovation into the model in the future, so as to scientifically investigate the evolution trends of sustainable supply of clean energy metals.

Key Words: technological innovation; clean energy metals; sustainable supply; the whole industry chain

[编辑: 何彩章]