

引用格式: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.
[Dong X S, Huang J B, Zhong M R, et al. A review on the impact of technological progress on critical metal mineral demand[J].
Resources Science, 2020, 42(8): 1592-1603.] DOI: 10.18402/resci.2020.08.13

技术进步对关键金属矿产需求影响的研究综述

董雪松^{1,2},黄健柏^{1,2},钟美瑞^{1,2},谌金字^{1,2},刘刚³,宋益⁴

(1. 中南大学商学院,长沙 410083;2. 中南大学金属资源战略研究院,长沙 410083;

3. 南丹麦大学工学院生命周期工程研究中心,欧登塞 5230,丹麦;

4. 中国地质大学(武汉)经济管理学院,武汉 430074)

摘要:新技术、新材料、新产业的蓬勃发展将对关键金属矿产需求产生深远影响,探讨技术进步如何影响关键金属矿产需求,从而确保关键金属矿产安全,对中国经济迈上高质量发展阶段和实现低碳转型具有一定现实意义。本文对技术进步与关键金属需求关系的文献展开了系统梳理,发现:随着资源安全成为国家重要需求问题,技术进步与关键金属需求预测研究逐渐成为热点,但现有文献量化研究较少且缺乏系统性,鉴于技术进步测度和数据获取等难点,需求预测结果的精准性有待进一步提高。本文提炼了技术进步作用于关键金属需求的3条微观影响机制,即技术进步—经济增长—关键金属、技术进步—产业结构—关键金属、技术进步—替代循环—关键金属,为后续研究提供整体分析框架;提出该领域后续研究重点,即重点关注低碳技术—关键金属、战略新兴产业—关键金属耦合问题,同时解决技术进步在理论模型和计量模型中的测度问题,推进新技术革命背景下关键金属需求预测分析框架的构建。

关键词:技术进步;关键金属;影响机制;需求预测

DOI: 10.18402/resci.2020.08.13

1 引言

关键矿产是近年美国和欧盟等西方发达国家提出的概念^[1],目前国际上尚无统一、严格的定义,在不同国家、不同时段、不同场合会给出不同的动态界定概念。一般来说,所谓关键矿产是指对国家经济和安全至关重要、在人类社会发展到关键阶段发挥关键性作用的紧缺矿种或者优势矿种^[2-4]。如铜和锡开启了青铜时代,铁开启了农耕文明时代,锗和硅开启了微电子时代和信息时代。而在中国特色社会主义新时代,关键金属矿产则是指对新能源产业、信息技术产业、高端装备制造业等战略性新兴产业发展具有不可替代重大用途的一类金属元素及其矿床的总称^[5,6],大致包括稀有、稀土、稀散

金属(简称“三稀”金属)、稀贵金属(铂族金属)和部分在中国被称为有色金属而国际上公认属于稀有金属的锑、锡、钴、钛、钒等^[3]。各国或机构所认定的关键金属矿产高度重合,反映出各国对第四轮工业革命中诞生的战略性新兴产业和高新技术产业的关注,以及对支撑这些产业发展的关键金属矿产的高度认同^[7]。

改革开放40年来发展奇迹的创造离不开矿产资源的有力支撑和保障^[8]。而关键金属作为支撑中国经济高质量发展、低碳能源转型和高新技术发展的重要矿种,是维系国民经济正常运行、经济调整及产业升级的关键,也是未来增强国家竞争力的关键^[3]。当今世界贸易冲突加剧,国际形势面临更大

收稿日期:2020-02-17,修订日期:2020-08-02

基金项目:湖南省社会科学基金智库专项项目(19ZWB45);国家自然科学基金重点项目(71633006);国家自然科学基金项目(71874207);国家自然科学基金重大项目(71991484)。

作者简介:董雪松,女,辽宁营口人,博士生,研究方向为资源经济与管理。E-mail: codenamedxs@csu.edu.cn

通讯作者:黄健柏,男,湖南临武人,教授,研究方向为资源经济与管理。E-mail: jbhuan@csu.edu.cn

不确定性,发达国家基础金属消费总量普遍达到或接近峰值,关键金属矿产的战略性不断凸显,目前已有多国根据自身新兴产业发展和制造业转型需要,相继发布关键原材料清单,纷纷推出“再工业化”战略,加剧了对关键金属矿产的争夺^[9]。同时,中国已进入生态文明发展新阶段,大量消耗资源、不计环境成本的赶超式战略受到抑制,中国目前还处于工业化中后期,未来经济高质量发展和战略性新兴产业发展,仍需要大量关键金属支撑。经济有效性驱动下的资源使用将带来自主创新,由此催生的发展方式和产业结构变化,使得关键金属矿产需求呈现出新的特点。在以上三重作用叠加下的关键金属需求演变规律及其预测成为支撑中国第二个百年目标和经济高质量发展的重大理论课题。

过去的几十年中,越来越多的关键金属被用于支撑技术进步带来的特殊功能^[10],尤其是21世纪以来,随着新技术革命的兴起,新能源技术与现代信息、材料和先进制造技术的深度融合依赖多种关键金属材料,进而影响关键金属矿产的需求,并推动其需求结构转型。技术所需的金属,以及技术在金属市场中的预期作用逐渐成为选择技术的一个重要标准^[11],而评估关键金属矿产未来的需求更取决于新技术的突破和发展^[12]。在这一背景下,关键金属的需求问题被赋予了新的内涵,面临更为复杂的风险与不确定性,受到极大关注^[13],技术进步对关键金属矿产需求影响等问题亟待深入探讨。当前,新一轮技术革命迅猛发展,清洁能源与新材料等技术的推广与应用将通过应用拓展或替代效应,对应用端的关键金属需求产生深远影响^[14]。如风力发电、燃料电池等技术的突破和应用将影响铂族、稀土等关键金属的需求^[15]。太阳能光伏技术中稀土永磁风力发电机的广泛推广对相关11种关键金属的需求有重要影响^[16]。此外,重型车领域全面电动化的绿色低碳技术将明显提升以锂为代表的金属需求,而铂族金属可以有效支撑未来燃料电池汽车的发展^[17,18]。基于此,许多学者对基于技术进步的关键金属矿产资源需求预测展开研究。考虑到关键金属技术路线变更快的特点,深入剖析技术进步对其需求的影响机制并精准预测其需求成为两大关键点与难点。

近年来,新技术、新材料、新产业的不断突破和快速发展对关键金属矿产需求产生哪些影响?如何厘清技术进步对关键金属需求的影响机制?怎样基于技术进步提出切实可行的研究框架,对关键金属矿产需求总量和结构进行精准预测?研判这些问题不仅对拓展资源需求理论与方法、丰富资源安全理论具有重要理论价值,而且对提前洞察关键金属矿产需求趋势与演变规律、化解供给约束瓶颈,进而保障国家金属资源安全、支撑中国第二个百年目标和经济高质量发展具有重大现实意义。据此,论文系统梳理国内外相关研究进展,尝试厘清技术进步对关键金属矿产需求的影响机制,进一步提出未来基于技术进步的关键金属需求预测研究的重点方向和分析框架,为构建中国新时代的关键金属资源战略提供理论和实证支撑。

2 技术进步对关键金属矿产需求的影响机制

关键金属作为支撑中国经济和高新技术产业发展的重要矿产资源,技术的不断进步将从供应端和需求端对其产生影响,但两者的作用机理存在显著差别。从供给端来看,以共生矿分离、生物选矿等为代表的采选冶技术进步,直接提高了关键金属的开发利用效率,再循环技术的突破则通过循环效应增加关键金属可回收品种、提高回收效率,影响关键金属矿产资源的供给。如由于锂电池回收技术的突破,二次资源的锂在2030年将对总供应量产生可识别的影响^[19]。而从需求端来看,新技术、新材料、新业态的发展通过促进经济增长和产业结构转型升级间接拉动或减少相应关键金属的消费需求,而循环替代技术将直接或间接影响一次关键金属资源需求。两端影响机制的区别在于,供给端的技术进步对关键金属供给存在直接影响,而需求端的技术进步对关键金属需求既有直接影响又有间接影响,其影响机制更为复杂和多层次。下文主要针对这一方面进行详细阐述。

对矿产资源消费的研究始于矿产资源可持续优化利用理论^[18]。Hartwick等^[20]在此基础上进行拓展,重点研究了矿产资源的有效配置和使用效率。此后,矿产资源需求的影响因素研究引起国内外学

者的普遍关注^[21]。现有研究多采用弹性系数法^[22]、结构分解法(SDA)^[23,24]、指数分解法(IDA)^[25]、生产理论分解方法(PDA)^[26,27]、结构路径分解法(SPD)^[28]和计量模型法^[29-31]等,得出了技术进步是影响矿产资源需求的重要因素这一结论。而关键金属的需求问题包括需求总量与结构两大内容,其本质又是经济增长模式和发展阶段问题,讨论技术进步对关键金属需求的影响,就不能不讨论中国的经济增长和产业结构变化,特别是那些不同于国际发展经验、具有中国特色的问题。技术进步主要通过拓展其应用领域和替代循环等渠道对不同关键金属需求产生不同的影响,一方面,技术的迅猛发展拓宽了关键金属的用途,促进其进入新的消费领域,并大幅提高关键金属使用效率,降低消费强度,引起高科技产品消费激增^[32],大大增加相关关键金属需求。另一方面,技术进步可以通过改善关键金属资源循环利用效率,或为突破现有应用中关键材料所使用关键金属的替代技术来促进或转移需求,改变其需求总量和结构。

概括而言,技术进步影响关键金属需求的传导机制主要有3种,分别是经济增长效应、产业结构效应和替代循环效应(图1)。

2.1 经济增长效应

面对疫情全球大流行、国际金融危机、欧美经济深度衰退、中美贸易摩擦、转型升级等重大挑战,中国经济正迈向高质量发展^[33],亟需新的增长点。一个国家或地区经济增长的动力从短期看是来自于资本、劳动力等生产要素的投入,但长期的增长还要依赖于技术进步所带来的全要素生产率的提高,即技术进步是经济增长的源动力^[34,35]。如通过大力发展5G、特高压、太阳能和风力发电技术、人工智能、工业互联网、城际高速铁路和城际轨道交通、新能源汽车充电桩等创新型技术,以技术进步稳增长^[33]。

经济增长会进一步影响关键金属需求。首先,经济增长将作用于战略新兴产业链中各节点,通过产业间的横纵向关系,推动关键矿产上游和下游产业链高端技术的发展,拉动太阳能和风力发电技术、新能源车及充电桩板块等建设规模,进而对所需的镓、锗、铅、锌、钴、锂等关键金属需求产生影响^[36-39],即经济增长能够反过来推动技术进步,技术进步与经济增长作为相互促进的两个因素,良性互动下,新技术的不断突破将持续影响关键金属的需求。其次,经济增长到一定程度带来的经济结构调

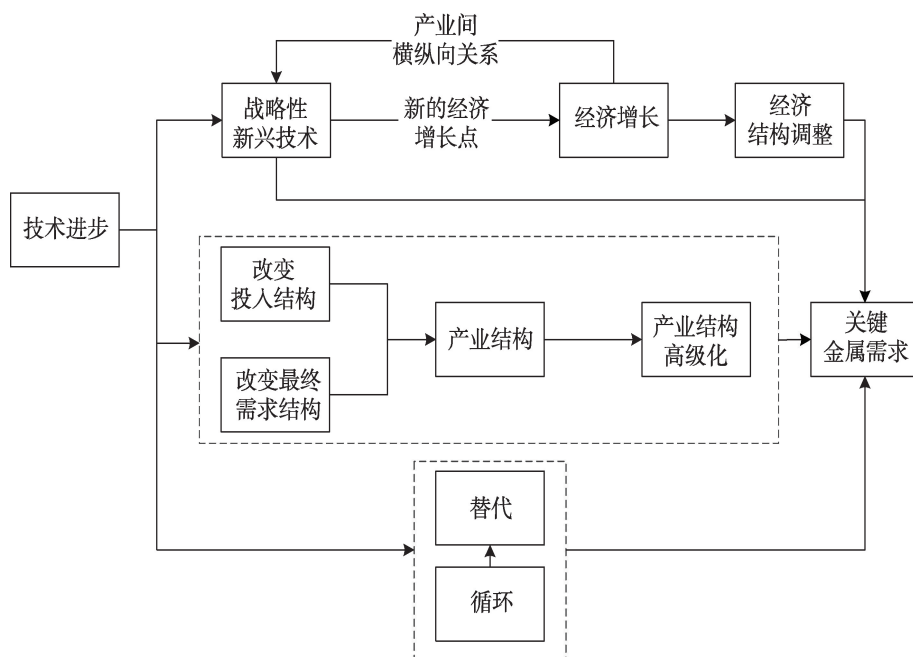


图1 技术进步对关键金属矿产需求的影响路径

Figure 1 Pathway of technological progress affecting critical metal mineral demand

整,能够改变关键金属需求。在经济增长初期,投入增加和产能扩张意味着对关键金属资源的过度使用,导致资源和环境的压力。随着经济增长超过一定规模,对增长质量的追求势必带来经济结构调整,而经济结构调整与工业化密切相关,且以稀有稀散金属为主的小矿产,如钽、铌、锂、稀土、钷、锆、镓、铟、铍、碲、砷等不仅是美国、欧盟、英国等发达经济体关注的重点,同时也是与中国未来建设5G通信站、物流网、新能源汽车充电站等新基建密切相关的矿产^[14],是经济高质量增长和经济结构调整的关键,其需求必然会受到深远影响。

2.2 产业结构效应

技术进步还通过产业结构效应对关键金属需求产生影响。产业结构升级是技术进步的动力,技术进步更是产业结构转型升级的根本途径^[40]。总的来说,技术进步从投入结构和最终需求结构两个方面影响产业结构。一方面,随着技术的发展,对初级商品的投入依赖逐渐转移到中间商品和最终商品,初级产品的投入减少,而制成品投入增加,中间商品使用量比重上升,促进了产业结构的转型升级。另一方面,技术进步通过节省劳动力、能源、金属等投入要素的成本,增加对应产品需求,进而改变了最终需求结构,对产业结构产生影响^[41]。

同时,产业结构效应会严重影响关键金属需求。从整体工业化进程来看,根据工业化发展与资源开发阶段性理论,不同发展阶段下各类资源的作用存在差异。随着工业化的发展,资源的需求结构则会发生显著变化^[42]。而关键金属消费贯穿国家工业化始终,其消费趋势随着产业结构变化呈现出鲜明的阶段性特征^[43],尤其在进入工业化中后期之后,产业结构高级化,战略性新兴产业的迅猛发展使相关关键金属需求逐步扩大^[44,45]。如节能环保产业中的高效节能产业和先进环保产业对镓、稀土金属和稀贵金属有较强的依赖性,新一代信息技术产业的发展将消耗较多锂、锆、镓、铟、铈等关键金属,生物产业将增加钛和稀贵金属的需求,铍、铷、铯、钽、铌、钼、钨、钼和铈等对高端装备制造产业的发展具有重要作用,新材料产业依赖钛和钨,新能源产业的发展普及将拉动钛、锆、钨和铌等关键金属的需求,此外,以锂、钴、镍、铂族金属等为代表的关

键金属矿产,在以纯电动汽车、燃料电池汽车为代表的下一代交通绿色低碳技术中发挥支撑作用^[14]。

2.3 替代循环效应

随着替代、循环技术的引入,对一些关键金属需求增加,而对另一些关键金属的需求将减少^[46]。一方面,技术的突破可以通过对现有应用中的关键金属进行替代来降低其临界性。如2009年UNEP发布的《未来可持续技术所使用的关键金属及其回收潜力》报告指出,电子技术的迭代更新将引致关键金属之间的替代^[47]。具体来说,镍氢电池正逐渐被锂离子电池取代,铝掺杂氧化锌对液晶显示器中的钢锡氧化物、电容器中的各种稀土化合物存在替代潜力^[48,49]。另一方面,循环技术的发展将使我们在未来用更少的关键金属生成相同的服务,从而促进相关产品的生产,或在产量不变的前提下减少对一次关键金属资源的需求^[50],进而降低对外依存度。同时,某种关键金属的循环技术发展可能会鼓励对其他可替代品种的替代行为,间接影响两种关键金属的需求,如过氧化钠电池具有更好的循环性能和能源效率^[51,52],在大规模储能方面极具优势,一旦突破现存的技术瓶颈,就将引发对锂的替代倾向。

3 基于技术进步的关键金属矿产需求预测研究进展

探究技术变革背景下关键金属需求变化趋势,对构建中国中长期随技术进步调整的关键金属消费图谱,提前洞察其需求演变规律、化解资源约束瓶颈,保障国家金属资源安全具有重要意义。20世纪初对石油耗竭时间的预测,开辟了矿产资源消费预测研究领域。早期分析金属需求多采用生产函数或需求函数^[53]。目前预测大宗金属需求主要采用趋势外推法^[54]、BP人工神经网络预测^[55]、消费强度存量驱动模型^[56]、灰色预测模型^[57]、部门或产品预测分析法^[58]、IPAT模型^[59]、回归和库存动态模型^[60]等方法。

考虑到关键金属在多方面有别于大宗金属矿产,具有应用涉及面广、技术路线变更快等特点,已有研究中大宗金属需求预测领域广泛使用的“S”型规律和“倒U”型规律^[61-65]等传统方法对关键金属不具有适用性,为能更精准、合理地预测关键金属需

求,就要采用区别于大宗金属领域的研究方法和框架。针对关键金属特点,学者们基于技术进步对锂、钢、钨、钴、碲等需求预测进行了分类研究^[66]。其中一些研究仅评估了一种技术,例如太阳能光伏技术,风力发电技术,新能源汽车技术等^[36,67,68]。其他学者则处理了一组可再生技术组合^[11,69,70],提供有关新兴技术未来发展所需关键金属的有用信息。根据3种间接效应,相关研究主要采用以下路径:技术进步—经济增长—关键金属矿产,技术进步—产业结构—关键金属矿产,技术进步—替代循环—关键金属矿产。

3.1 技术进步—经济增长—关键金属矿产耦合

目前研究大多只对“技术进步—经济增长”或“经济增长—金属矿产”分别进行讨论。韩莹^[34]、李晓宁^[35]分别通过静态分析和动态模拟实证表明技术进步对经济增长有突出贡献。其他文献以人均GDP衡量经济增长水平,研究发现经济增长是金属消费的主要驱动因素。如王安建等^[62-64]指出,中国工业化进程中,单种金属消费与人均GDP的关系符合“S”型规律。Wiedmann等^[71]对1990—2008年186个国家的金属消费进行了时间序列分析,认为经济合作及发展组织和欧盟27国的金属消费足迹与GDP同步增长。可以看出,现有考虑经济增长效应的研究仅关注了大宗金属领域,且通常将“技术进步—经济增长—金属矿产”割裂开,对技术进步—经济增长—关键金属矿产框架的理论和实证研究不足;用来预测的方法仍停留在适用于大宗金属的“S”型规律和“倒U”型规律,对应用领域集中、技术路线变更快的关键金属。

3.2 技术进步—产业结构—关键金属矿产耦合

从已有研究来看,基于技术进步—产业结构—关键金属矿产耦合的文献较为丰富,研究框架一般遵循“情景设置—定量预测”模式。对于情景设置,目前已经开发了几种全球和区域能源情景方案用来分析能源、水和资源材料系统的未来情况^[66,72-74]。这些情景通常考虑全球一体化发展趋势、生态、经济、技术等宏观因素。但在实际应用中,传统的情景方案不能很好地满足需求,需要根据不同研究目的和研究对象来设置。为此,学者们设置了具有异质性和针对性情景^[37-39],并广泛用作技术进步视

角下关键金属需求预测的基础。

对于如何在情景设置的基础上实现关键金属需求预测,现有文献提供了一些可参考的思路。主要方法有基于材料强度的预测方法^[75-78],系统动力学模型(SD)^[79,80],物质流分析(MFA)模型^[81-83],Bass模型^[39],基于生命周期评估(LCA)的投入产出方法^[84],经济模型^[85],或系统动力学与物质流相结合^[86,87]。其中,基于材料强度的预测方法、系统动力学和物质流模型的应用最为广泛。

Yano等^[19]基于材料强度预测了到2030年日本混合动力汽车对稀有金属的需求。Houari等^[80]使用系统动力学(SD)模型预测将来的太阳能光伏技术部署,首次尝试用动态供需参数解决此类预测问题。Sverdrup^[88]构建了一个包括全球锂开采和需求、资源等级、市场和价格等因素的系统动力学模型。Liu等^[79]根据锂市场价格、供需差距、进口量和锂消费构成趋势等因素设置情景,在此基础上使用系统动力学模型预测电能存储(EES)和新能源汽车(NEV)中金属锂的需求。这些方法能够定量预测关键金属需求,但其预测主要基于流量指标,忽略了社会经济系统中物质资本存量累积的内在规律,对短期趋势预测有一定适用性,但无法反映社会经济代谢过程中关键金属需求长期演变的非线性特征,缺乏稳健性,预测精度具有较高的不确定性^[89,90]。

基于此,Müller^[91]提出了动态物质流分析方法,通过估算人口及其生活方式来同时确定国家或地区资源需求和废物产生。与其他方法相比,动态物质流模型不是通过反馈回路在内部产生动态变化,而是根据情景方案动态地进行模拟预测^[92],系统计算在工业系统中的物质流^[93],近年来越来越多地被用于分析新兴技术中的关键金属需求问题^[94,95]。其中一些研究分析一种或一组关键金属在其所有最终用途部门中的流动^[76],如Habib等^[96]根据政策和技术、产品的市场渗透率等因素设置情景方案,预测了风力涡轮机、电动汽车、计算机等终端使用中钕和镝的需求量。Martin等^[97]使用类似方法,通过推测锂所有应用领域技术的发展趋势,预测其使用量。而其他研究则分析特定技术或一系列技术的关键金属需求^[69,98-100]。如Elshkaki等^[70]设定7种能源场景,采用动态物质流模型,通过研究发电技术,分

2020年8月

析出能源系统低碳化所需的关键金属及在此过程中由于技术进步使得供需风险降低的关键金属。Cao等^[68]进一步收集大量单体风机微观技术数据,对丹麦未来风电技术发展过程中稀有金属钨、铈的需求与循环再生潜力进行了全面预测。

3.3 技术进步—替代循环—关键金属矿产耦合

目前在关键金属需求研究领域中,考虑替代循环因素的文献较少,且研究对象单一,但随着相关技术不断突破与改进,替代循环效应越来越引起关注。如Yano等^[19]估计了2010—2030年日本混合动力传动装置中的稀土金属回收潜力。Martin等^[97]考虑高端领域和日常应用中的锂替代品,创建了2020年锂的需求预测模型。实证结果预计,在2030年,二次资源的锂将产生可识别的影响,到2050年,将代替25%的一次锂资源需求量,其中最大的回收潜力在于锂电池。

4 结论

本文基于国内外相关研究进展,主要从技术进步对关键金属矿产资源需求影响机制和基于技术进步的关键金属需求预测两个方面,系统全面地梳理了已有研究成果,为进一步将技术进步嵌入关键金属需求预测框架奠定基础。对已有研究现状评价如下:

(1)技术进步对关键金属需求影响研究成果不断涌现。通过分析整理已有成果发现,相关文献多从技术进步测度、技术进步对关键金属需求影响和基于技术进步的关键金属需求预测等方面对该问题进行研究。研究尺度多为全球、国家或某一特定行业。总体看来,国内外学者在这一问题上的关注越来越多,相关研究成果丰富了该领域的研究内容、创新了研究框架与方法,对以后的研究具有很好的指导和借鉴意义。但目前对微观产品尺度分析不足,分辨率不高,研究框架没有形成统一的体系,用于预测需求情况的数据和方法存在高度不确定性,还需进一步探讨^[101]。

(2)技术进步对关键金属需求影响机制尚未统一。目前大多数文献在这一问题上重现状研究而轻演变剖析。随着新一轮技术革命兴起,技术进步对不同关键金属需求产生不同影响,要想突破现有文献对技术进步外生的假定,应具体到技术进步内

生于关键金属需求变化的微观作用机制上,考虑经济增长、产业结构和替代循环等效应。在这一方面,现有研究大多只对“技术进步—经济增长”或“经济增长—大宗金属矿产”的关系分别进行讨论,而对技术进步—经济增长—关键金属整体框架的理论和实证研究不足。虽然基于技术进步—产业结构—关键金属矿产耦合的研究越来越多,但大多专注于预测结果,没有对其中的传导路径进行深入剖析。总的来看,技术进步—关键金属的微观作用机制并没有量化展开,还处于黑箱化。

(3)基于技术进步的关键金属需求预测研究框架有待规范。目前矿产资源需求预测体系较为成熟,已将大部分矿产资源涵盖在内,且研究手段与方法也趋于多样化,研究领域主要集中于大宗矿产消费规律及峰值预测。对基于技术进步的关键金属需求研究主要考虑经济增长、产业结构和替代循环3种效应。前者的研究方法仍停留在传统的“S”型规律和“倒U”型规律,没有充分考虑技术进步的影响,对关键金属需求的预测缺乏针对性。同时,考虑替代循环效应的文献较少,研究对象单一,这与替代循环技术仍处在发展初期有关。而目前在技术进步—产业结构—关键金属矿产耦合方面已经有了很多研究成果,广泛采用的“情景设置—一定量预测”研究框架虽然能在一定程度上表征技术进步对未来关键金属需求的影响,但传导路径中各因素的相互作用在很大程度上没有得到体现。由于产业特点、投入情况等因素的行业差异性较大,情景设置选取的设计因素也存在决策单元差异较大的缺陷,具有一定主观性和随意性。且研究中选择的不同预测方法虽然能从不同角度实现预测,但结合研究对象对所选方法的适用性进行论述的文献不多,导致结果存在偏差。此外,预测方法本身存在的缺陷也会导致结果的误差。

5 研究展望

基于文献系统梳理,未来研究可以从以下4个方面深入拓展:

(1)构建技术进步作用关键金属需求预测的整体分析框架。考虑到关键金属应用涉及面广、技术路线变更更快等特点,其需求预测采取区别于大宗金属矿产需求预测的理论模型和方法。未来可以沿

本文提炼的技术进步—经济增长—关键金属矿产、技术进步—产业结构—关键金属矿产、技术进步—替代循环—关键金属矿产3条作用路径继续深化研究,即技术进步—经济增长—主金属—伴生关键金属、技术进步—新材料—关键金属、低碳能源技术—清洁能源产品—关键金属等更加细化的微观路径来分类预测关键金属需求演变趋势。预测理论模型和方法构建方面,应结合研究对象特点和研究目的,基于科学性、客观性等原则,选取能够体现影响传导路径的设定因素和预测模型,结合大数据理念展开预测分析,增强预测结果的政策指导作用。大量研究比较关注技术进步产生的直接影响,但从中长期来看,预测理论模型和方法构建过程中更应考虑各种中介变量或者调节变量的影响,甚至相关政策因素的干预作用。

(2)在产业结构与关键金属关系分析中,重点关注低碳能源技术、战略新兴产业发展对关键金属需求的推动机理。相比传统能源依赖化石、水等资源,清洁能源不管是在种类还是数量方面都依赖更多的关键金属。如节能环保产业将拉大对镓、稀土金属和稀贵金属的需求,而钛、锆、钨和铌等的供需平衡问题也将制约新能源产业的发展。在清洁能源行业政策红利的推动下,清洁能源技术的推广与应用对关键金属需求产生了巨大冲击。如何基于清洁能源技术—关键金属矿产耦合的角度,合理预测关键金属需求变化,并据此推出相关政策,让清洁能源技术能打破资源约束长期持续地运营下去,还需要大量的科学研究和实践探索。未来应该在更加关注清洁能源技术的前提下,继续深入研究技术进步对关键金属需求的影响。

(3)在技术进步与关键金属关系研究中,推进技术进步测度研究,解决实证分析中的难点问题。测度技术进步是需求预测研究中的难点。由于技术进步的特点,直接衡量其质量和数量不够精准,但可以采用相关替代性指标来反映,如专利活动指标和单位价值指标可以针对不同领域,研究技术进步对不同种类关键金属需求的影响^[102-107]。总的来说,技术进步测度已从同质走向差异化,但仍存在指标选择不全面、没有统一选取依据的缺点。未来技术进步测度应逐渐趋向微观和差异化,并借鉴

Acemoglu^[108]提出的技术进步偏向内生化的理念和方法,将技术进步内生到关键金属需求框架中。除此之外,还可以通过比较分析不同来源有偏技术进步对关键金属需求影响的差异,估计有偏技术进步对关键金属需求影响的偏弹性,并利用工业行业数据刻画资本、劳动、能源等要素对关键金属需求的动态影响机制,从而预判关键金属需求变化趋势。

(4)在需求预测基础上,为了分析关键金属安全问题,还需从供给端进一步研究技术进步对关键金属矿产的供需影响。新一轮技术革命也将对关键金属的供给端产生重大影响。如以共生矿分离、生物选矿等为代表的采选冶技术进步,提高了复杂多元素共生矿、低品位矿、难选难冶矿的开发利用,以再生铜、再生铝等为代表的金属资源再循环技术增加了金属可回收品种,提高了回收效率。未来可以在技术进步对关键金属供给端冲击这一方面进行下一步研究。以专利地图为基础,从技术活跃度、技术生命周期、技术进化方向3个方面对采选冶技术、替代循环技术进行预测,结合技术扩散理论深入分析这些技术对关键金属资源供给趋势及峰值的影响,阐明作用机理,并突破原有资源供需分析框架中技术不变的假定条件,分析新技术革命对关键金属供给侧的冲击作用。

参考文献(References):

- [1] 汪灵. 战略性非金属矿产的思考[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(6): 1-7. [Wang L. Considerations on strategic non-metallic mineral resources[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(6): 1-7.]
- [2] 唐金荣, 杨宗喜, 周平, 等. 国外关键矿产战略研究进展及其启示[J]. 地质通报, 2014, 33(9): 1445-1453. [Tang J R, Yang Z X, Zhou P, et al. The progress in the strategic study of critical minerals and its implications[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(9): 1445-1453.]
- [3] 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. [Wang D H. Study on critical mineral resources: Significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1189-1209.]
- [4] 张所续, 刘伯恩, 马朋林. 美国关键矿产战略调整对我国的相关启示[J]. 中国国土资源经济, 2019, 32(7): 38-45. [Zhang S X,

2020年8月

- Liu B E, Ma P L. The enlightenment of the strategic adjustment of key minerals in the United States to Our country[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2019, (7): 38–45.]
- [5] 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, 115(16): 4111–4115.
- [6] 郭佳, 易继宁, 王慧. 全球主要战略性矿产名录评价因素对比研究[J]. *现代矿业*, 2018, 34(12): 1–5. [Guo J, Yi J N, Wang H. Comparative study on evaluation factors of global major strategic mineral resources lists[J]. *Modern Mining*, 2018, 34(12): 1–5.]
- [7] 毛景文, 杨宗喜, 谢桂青, 等. 关键矿产: 国际动向与思考[J]. *矿床地质*, 2019, 38(4): 689–698. [Mao J W, Yang Z X, Xie G Q, et al. Critical minerals: International trend and thinking[J]. *Mineral Deposits*, 2019, 38(4): 689–698.]
- [8] 王安建, 王高尚, 邓祥征, 等. 新时代中国战略性关键矿产资源安全与管理[J]. *中国科学基金*, 2019, 33(2): 31–38. [Wang A J, Wang G S, Deng X Z, et al. Security and management of China's critical mineral resources in the new era[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2019, 33(2): 31–38.]
- [9] 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. [Zhai M G, Wu F Y, Hu R Z, et al. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2019, 33(2): 106–111.]
- [10] 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.
- [11] Grandell L, Lehtil A, Kivinen M, et al. Role of critical metals in the future markets of clean energy technologies[J]. *Renewable Energy*, 2016, 95: 53–62.
- [12] Vidal O, Rostom F, François C, et al. Global trends in metal consumption and supply: The raw material–energy nexus[J]. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 2017, 13(5): 319–324.
- [13] Choi C H, Eun J, Cao J J, et al. Global strategic level supply planning of materials critical to clean energy technologies: A case study on indium[J]. *Energy*, 2018, 147: 950–964.
- [14] 李鹏飞, 杨丹辉, 渠慎宁, 等. 稀有矿产资源的战略评估: 基于战略性新兴产业发展的视角[J]. *中国工业经济*, 2014, (7): 44–57. [Li P F, Yang D H, Qu S N, et al. A strategic assessment of rare minerals: Based on the perspective of strategic emerging industries development[J]. *China Industrial Economics*, 2014, (7): 44–57.]
- [15] Han H, Geng Y, Tate J E, et al. Securing platinum–group metals for transport low–carbon transition[J]. *One Earth*, 2019, 1(1): 117–125.
- [16] Pieronni M P, Mcaloon T, Pigosso D A C. Business model innovation for circular economy and sustainability: A review of approaches[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 198–216.
- [17] Hao H, Geng Y, Tate J E, et al. Impact of transport electrification on critical metal sustainability with a focus on the heavy–duty segment[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1–7.
- [18] Hotelling H. The economics of exhaustible resources[J]. *Bulletin of Mathematical Biology*, 1931, 39(1–2): 137–175.
- [19] Yano J, Muroi T, Sakai S I. Rare earth element recovery potentials from end-of-life hybrid electric vehicle components in 2010–2030 [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2016, 18 (4): 655–664.
- [20] Hartwick J M, Dasgupta P S, Heal G M. Economic theory and exhaustible resources[J]. *The Canadian Journal of Economics/Revue Canadienne d'Economie*, 1981, 14(2): 355–358.
- [21] 梁姗姗, 杨丹辉. 矿产资源消费与产业结构演进的研究综述[J]. *资源科学*, 2018, 40(3): 535–546. [Liang S S, Yang D H. A review of mineral resource consumption and industrial structure evolution [J]. *Resources Science*, 2018, 40(3): 535–546.]
- [22] 刘东霖, 张俊瑞. 我国能源消费需求的时变弹性分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(2): 92–97. [Liu D L, Zhang J R. Time varying elasticity of energy consumption demand[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(2): 92–97.]
- [23] Weinzettel J, Kovanda J. Structural decomposition analysis of raw material consumption[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2011, 15 (6): 893–907.
- [24] Song Y, Huang J B, Zhang Y J, et al. Drivers of metal consumption in China: An input–output structural decomposition analysis[J]. *Resources Policy*, 2019, 63: 101421.
- [25] 王双英, 李东, 王群伟. 基于LMDI指数分解的中国石油消费影响因素分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(4): 759–765. [Wang S Y, Li D, Wang Q W. Analysis of factors affecting China's oil consumption based on LMDI[J]. *Resources Science*, 2011, 33(4): 759–765.]
- [26] Du K, Lin B. Understanding the rapid growth of China's energy consumption: A comprehensive decomposition framework[J]. *Energy*, 2015, 90: 570–577.
- [27] Wang C. Decomposing energy productivity change: A distance function approach[J]. *Energy*, 2007, 32(8): 1326–1333.
- [28] Wood R, Lenzen M. Structural path decomposition[J]. *Energy Economics*, 2009, 31(3): 335–341.
- [29] Cheng F F, Yang S L, Zhou K L. Quantile partial adjustment model with application to predicting energy demand in China[J]. *Energy*, 2019, DOI: 10.1016/j.energy.2019.116519.
- [30] Benjamin N I, Lin B Q. Influencing factors on electricity demand in Chinese nonmetallic mineral products industry: A quantile perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118584.

- [31] Alam M M, Murad M W. The impacts of economic growth, trade openness and technological progress on renewable energy use in organization for economic cooperation and development countries [J]. *Renewable Energy*, 2020, 145: 382–390.
- [32] Izatt R M, Izatt S R, Bruening R L, et al. Challenges to achievement of metal sustainability in our high-tech society[J]. *Chemical Society Reviews*, 2014, 43(8): 2451–2475.
- [33] 任泽平, 熊柴, 孙婉莹, 等. 中国新基建研究报告[J]. *发展研究*, 2020, (4): 4–19. [Ren Z P, Xiong C, Sun W Y, et al. Research report of China's new infrastructure[J]. *Development Research*, 2020, (4): 4–19.]
- [34] 韩莹. 技术进步对我国经济增长贡献率的测定及实证分析[J]. *经济问题探索*, 2008, (4): 11–16. [Han Y. The measurement and its substantial evidence analysis for the growth contribution rate of technique progress to Chinese economy[J]. *Inquiry into Economic Issues*, 2008, (4): 11–16.]
- [35] 李晓宁. 经济增长的技术进步效率研究: 1978–2010[J]. *科技进步与对策*, 2012, 29(7): 5–10. [Li X N. Study on technology advancement efficiency of economic growth: 1978–2010[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2012, 29(7): 5–10.]
- [36] Sun X, Hao H, Liu Z W, et al. The dynamic equilibrium mechanism of regional lithium flow for transportation electrification[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 53(2): 743–751.
- [37] Nassar N T, Wilburn D R, Goonan T G. Byproduct metal requirements for U. S. wind and solar photo voltaic electricity generation up to the year 2040 under various Clean Power Plan scenarios[J]. *Applied Energy*, 2016, 183: 1209–1226.
- [38] Arowosola A, Gaustad G. Estimating increasing diversity and dissipative loss of critical metals in the aluminum automotive sector[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 150: 104382.
- [39] Li X Y, Ge J P, Chen W Q, et al. Scenarios of rare earth elements demand driven by automotive electrification in China: 2018–2030 [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 145: 322–331.
- [40] 李健, 徐海成. 技术进步与我国产业结构调整关系的实证研究 [J]. *软科学*, 2011, 25(4): 8–13. [Li J, Xu H C. Research on the relationship between technical progress and adjustment of industry structure in China[J]. *Soft Science*, 2011, 25(4): 8–13.]
- [41] Langkau S, Luis A T E. Technological change and metal demand over time: What can we learn from the past?[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2018, 16: 54–59.
- [42] Burns L S, Friedmann J. *Natural Resources Endowment and Regional Economic Growth*[R]. Springfield: Environment, Development and Public Policy (Cities and Development), 1961.
- [43] 陈其慎, 于汶加, 张艳飞, 等. 资源-产业雁行式演进规律[J]. *资源科学*, 2015, 37(5): 871–882. [Chen Q S, Yu W J, Zhang Y F, et al. Resources- industry 'flying geese' evolving pattern[J]. *Resources Science*, 2015, 37(5): 871–882.]
- [44] 王昶, 黄健柏. 中国金属资源战略形势变化及其产业政策调整研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(171): 391–394. [Wang C, Huang J B. The changes in strategic situation of China's metal resources and the adjustment of the industrial policy[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(171): 391–394.]
- [45] 王昶, 宋慧玲, 耿红军, 等. 关键新材料创新突破的研究回顾与展望[J]. *资源科学*, 2019, 41(2): 207–218. [Wang C, Song H L, Geng H J, et al. Review and prospect of advanced material innovative development[J]. *Resources Science*, 2019, 41(2): 207–218.]
- [46] Sprecher B, Reemeyer L, Alonso E, et al. How black swan disruptions impact minor metals[J]. *Resources Policy*, 2017, 54: 88–96.
- [47] UNEP. *Critical Metals for Future Sustainable Technologies and Their Recycling Potential*[R]. Darmstadt: Öko-Institut, United Nations Environment Programme, 2009.
- [48] Kim J Y, Shin D O, Chang T, et al. Effect of the dielectric constant of a liquid electrolyte on lithium metal anodes[J]. *Electrochimica Acta*, 2019, 300: 299–305.
- [49] Nevin K P, Woodard T L, Franks A E, et al. Microbial electrosynthesis: Feeding microbes electricity to convert carbon dioxide and water to multicarbon extracellular organic compounds[J]. *mBio*, 2010, DOI: 10.1128/mBio.00103–10.
- [50] Løvik A N, Hagelüken C, Wäger P. Improving supply security of critical metals: Current developments and research in the EU[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2018, 15: 9–18.
- [51] Nevin K P, Hensley S A, Franks A E, et al. Electrosynthesis of organic compounds from carbon dioxide is catalyzed by a diversity of acetogenic microorganisms[J]. *Applied and Environmental Microbiology*. 2011, 77(9): 2882–2886.
- [52] Hartmann P, Bender C L, Vracar M, et al. A rechargeable room-temperature sodium superoxide (NaO₂) battery[J]. *Nature Materials*, 2013, 12(3): 228–232.
- [53] Slade M E. Recent advances in econometric estimation of materials substitution[J]. *Resources Policy*, 1981, 7(2): 103–109.
- [54] 王安建, 王高尚, 张建华, 等. 矿产资源与国家经济发展[M]. 北京: 地质出版社, 2002. [Wang A J, Wang G S, Zhang J H, et al. *Mineral Resources and National Economic Development*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.]
- [55] 任忠宝, 王世虎, 唐宇, 等. 矿产资源需求拐点理论与峰值预测 [J]. *自然资源学报*, 2012, 27(9): 1480–1489. [Ren Z B, Wang S H, Tang Y, et al. The inflection point theory of mineral resources demand and peak forecast[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(9): 1480–1489.]
- [56] Pauliuk S, Wang T, Muller D B, et al. Moving toward the circular economy: The role of stocks in the Chinese steel cycle[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(1): 148–154.
- [57] Ma W, Zhu X, Wang M. Forecasting iron ore import and consumption of China using grey model optimized by particle swarm optimi-

2020年8月

- zation algorithm[J]. *Resources Policy*, 2013, 38(4): 613–620.
- [58] 刘艳飞, 张艳, 于汶加, 等. 全球原镁需求预测及中国合理产能分析[J]. *资源科学*, 2015, 37(5): 1047–1058. [Liu Y F, Zhang Y, Yu W J, et al. Analysis and forecast of world primary magnesium demand and reasonable productivity for China[J]. *Resources Science*, 2015, 37(5): 1047–1058.]
- [59] Xuan Y, Yue Q. Forecast of steel demand and the availability of depreciated steel scrap in China[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2016, 109: 1–12.
- [60] 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.
- [61] 王昶, 宋慧玲, 左绿水, 等. 国家金属资源安全研究回顾与展望[J]. *资源科学*, 2017, 39(5): 805–817. [Wang C, Song H L, Zuo L S, et al. Review and prospects of national metal resource security[J]. *Resources Science*, 2017, 39(5): 805–817.]
- [62] 王安建, 王高尚, 陈其慎, 等. 能源与国家经济发展[M]. 北京: 地质出版社, 2008. [Wang A J, Wang G S, Chen Q S, et al. *Energy and National Economic Development*[M]. Beijing: Geology Press, 2008.]
- [63] 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. [Wang A J, Wang G S, Chen Q S, et al. The mineral resources demand theory and the prediction model[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, 31(2): 137–147.]
- [64] 王安建, 王高尚, 周凤英. 能源和矿产资源消费增长的极限与周期[J]. *地球学报*, 2017, 38(1): 3–10. [Wang A J, Wang G S, Zhou F Y. The limits and cycles of the growth of energy and mineral resources consumption[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2017, 38(1): 3–10.]
- [65] 陈其慎, 于汶加, 张艳飞, 等. 点石: 未来20年全球矿产资源产业发展研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016. [Chen Q S, Yu W J, Zhang Y F, et al. *Point Stone: Research on the Development of Global Mineral Resources Industry in the Next 20 Years*[M]. Beijing: Science Press, 2016.]
- [66] 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.
- [67] Bustamante M L, Gaustad G. Challenges in assessment of clean energy supply-chains based on byproduct minerals: A case study of tellurium use in thin film photovoltaics[J]. *Applied Energy*, 2014, 123: 397–414.
- [68] Cao Z, O'Sullivan C, Tan J, et al. Resourcing the fairytale country with wind power: A dynamic material flow analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(19): 11313–11322.
- [69] Manberger 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.
- [70] 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.
- [71] Wiedmann T O, Schandl H, Moran D. The footprint of using metals: New metrics of consumption and productivity[J]. *Environmental Economics and Policy Studies*, 2015, 17(3): 369–388.
- [72] Nakicenovic N, Swart R. *Emission Scenarios*[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [73] UNEP. *Global Environmental Outlook 4*[R]. Nairobi: Environment for Development, United Nations Environment Programme, 2007.
- [74] Greenpeace, EREC. *Energy Revolution: A Sustainable World Energy Outlook*[R]. The Netherlands: Greenpeace International, European Renewable Energy Council, 2008.
- [75] Alonso E, Sherman A M, Wallington T J, et al. Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46: 3406–3414.
- [76] Hoenderdaal S, Tercero E L, Marscheider W F, et al. Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies?[J]. *Energy*, 2013, 49: 344–355.
- [77] 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.
- [78] Pavel C C, Laca A R, Marmier A, et al. Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines[J]. *Resource Policy*, 2017, 52: 349–357.
- [79] Liu D H, Gao X Y, An H Z, et al. Supply and demand response trends of lithium resources driven by the demand of emerging renewable energy technologies in China[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2019, 145: 311–321.
- [80] Houari Y, Speirs J, Candelise C, et al. A system dynamics model of tellurium availability for CdTe PV[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2014, 22(1): 129–146.
- [81] Tazi N, Kim J, Bouzidi Y, et al. Waste and material flow analysis in the end-of-life wind energy system[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2019, 145: 199–207.
- [82] Moreau V, Dos R P, Vuille F. Enough metals? Resource constraints to supply a fully renewable energy system[J]. *Resources*, 2019, DOI: 10.3390/resources8010029.
- [83] Fishman T, Graedel T E. Impact of the establishment of US offshore wind power on neodymium flows[J]. *Nat. Sustain*, 2019, 2: 332–338.
- [84] 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 of the United States of America*,

- 2015, 112: 6277–6282.
- [85] Imholte D D, Nguyen R T, Vedantam A, et al. An assessment of U. S. rare earth availability for supporting U. S. wind energy growth targets[J]. *Energy Policy*, 2018, 113: 294–305.
- [86] Gloser S, Soulier M, Tercero E L A. Dynamic analysis of global copper flows. Global stocks, post consumer material flows, recycling indicators, and uncertainty evaluation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(12): 6564–6572.
- [87] Mancheri N A, Sprecher B, Deetman S, et al. Resilience in the tantalum supply chain. *Resources*[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 129: 56–69.
- [88] Sverdrup H U. Modelling global extraction, supply, price and depletion of the extractable geological resources with the LITHIUM model[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016, 114: 112–129.
- [89] 王琳, 齐中英, 潘峰. 社会演进中钢未来使用规律预测及政策分析[J]. *运筹与管理*, 2017, 26(1): 173–181. [Wang L, Qi Z Y, Pan F. Patterns prediction and policy analysis of steel use in societal evolution[J]. *Operations Research and Management Science*, 2017, 26(1): 173–181.]
- [90] 张超, 王韬, 陈伟强, 等. 中国钢铁长期需求模拟及产能过剩态势评估[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(10): 169–176. [Zhang C, Wang T, Chen W Q, et al. Simulation of China's long-term steel demand and evaluation of the trend of overcapacity of steel industry[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(10): 169–176.]
- [91] Müller D B, Wang T, Duval B, et al. Exploring the engine of anthropogenic iron cycles[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103: 16111–16116.
- [92] Stamp A, Wager P A, Hellweg S. Linking energy scenarios with metal demand & modeling: The case of indium in CIGS solar cells [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, 93: 156–167.
- [93] Brunner P H, Rechberger H. Practical handbook of material flow analysis[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2004, 9(5): 337–338.
- [94] Elshkaki A, Graedel T E, Ciacchi L, et al. Resource demand scenarios for the major metals[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52: 2491–2497.
- [95] Deetman S, Pauliuk S, Van Vuuren D P, et al. Scenarios for demand growth of metals in electricity generation technologies, cars, and electronic appliances[J]. *Environmental Science & Technology: ES&T*, 2018, 52(8): 4950–4959.
- [96] Habib K, Wenzel H. Exploring rare earths supply constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 84: 348–359.
- [97] Martin G, Rentsch L, Höck M, et al. Lithium market research: Global supply, future demand and price development[J]. *Energy Storage Materials*, 2017, 6: 171–179.
- [98] Kucukvar M, Onat N C, Haider M A. Material dependence of national energy development plans: The case for Turkey and United Kingdom[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 200: 490–500.
- [99] Watari T, McLellan B C, Ogata S, et al. Analysis of potential for critical metal resource constraints in the international energy agency's long-term low-carbon energy scenarios[J]. *Minerals*, 2018, DOI: 10.3390/min8040156.
- [100] Watari T, McLellan B C, Ogata S, et al. Analysis of potential for critical metal resource constraints in the international energy agency's long-term low-carbon energy scenarios[J]. *Minerals*, 2018, DOI: 10.3390/min8040156.
- [101] Candelisea C, Spiersa J F, Gross R J K. Materials availability for thin film (TF) PV technologies development: A real concern? [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15: 4972–4981.
- [102] Chen Y H, Chen C Y, Lee S C. Technology forecasting and patent strategy of hydrogen energy and fuel cell technologies[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(12): 6957–6969.
- [103] Lanzi E, Verdolini E. Efficiency-improving fossil fuel technologies for electricity generation: Data selection and trends[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(11): 7000–7014.
- [104] 王班班, 齐绍洲. 有偏技术进步、要素替代与中国工业能源强度 [J]. *经济研究*, 2014, (2): 117–129. [Wang B B, Qi S Z. Biased technological progress, factor substitution and China's industrial energy intensity[J]. *Economic Research Journal*, 2014, (2): 117–129.]
- [105] Koh H, Magee C L. A functional approach for studying technological progress: Application to information technology[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2006, 73(9): 1061–1083.
- [106] Saur M I. How methodological issues affect the energy indicator results for different electricity generation technologies[J]. *Energy Policy*, 2013, 63(6): 283–299.
- [107] Zhang Y G, Gu Y, Chen X Y, et al. An effective indicator for evaluation of wavelength extending InGaAs photodetector technologies [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 83: 45–50.
- [108] Acemoglu D. Directed technical change[J]. *Review of Economic Studies*, 2002, 69(4): 781–809.

A review on the impact of technological progress on critical metal mineral demand

DONG Xuesong^{1,2}, HUANG Jianbai^{1,2}, ZHONG Meirui^{1,2}, CHEN Jinyu^{1,2}, LIU Gang³, SONG Yi⁴

(1. School of Business, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Institute of Metal Resources Strategy, Central South University, Changsha 410083, China; 3. SDU Life Cycle Engineering, Department of Chemical Engineering, Biotechnology, and Environmental Engineering, University of Southern Denmark (SDU), 5230 Odense, Denmark; 4. School of Economics and Management, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: The emerging technologies, materials, and industries have a profound and increasing impact on the amount and structure of demand of critical metals. Understanding how technological progress affects the demand for critical metals and minerals is of certain practical significance for the high-quality economic transformation, the low-carbon energy transformation, and the critical minerals security in China. This paper conducted a systematic review of the literature on the relationship between technological progress and critical metal demand, and finds that: As resource security has become an important national demand issue, technological progress and critical metal demand prediction have gradually become a hot spot. However, there are few quantitative studies and lack of systematization in existing literature. And the accuracy of demand forecasting results needs to be further improved due to difficulties in measuring technological progress and data acquisition. In this paper, three micro-influencing mechanisms of technological progress on the demand for critical metals were applied: technological progress—economic growth, industrial structure and substitution and recycle—metal minerals, providing an overall analytical framework for subsequent studies. The focus of follow-up research in this field was proposed, that is, focusing on the coupling problem of low-carbon technology—critical metals and strategic emerging industries—critical metals, solving the measurement problem of technological progress in theoretical and econometric model, and promoting the construction of analytical frameworks for critical metal demand forecasting as technological revolution continues in the new era.

Key words: technological progress; critical metal; mechanism of effect; demand forecasting