

引用格式:朱学红,李双美,曾安琪. 清洁能源转型下关键金属产业链碳排放研究综述与展望[J]. 资源科学, 2023, 45(1): 1-17.
[Zhu X H, Li S M, Zeng A Q. A review and prospect of research on carbon emissions from the critical metal industry chain under clean energy transition[J]. Resources Science, 2023, 45(1): 1-17.] DOI: 10.18402/resci.2023.01.01

清洁能源转型下关键金属产业链碳排放研究综述与展望

朱学红^{1,2}, 李双美^{1,2}, 曾安琪^{2,3}

(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. 中南大学马克思主义学院, 长沙 410083)

摘要:【目的】在全球碳中和背景下,清洁能源技术迎来井喷期,关键金属需求及产业链碳排放将大幅攀升。【方法】为了深入厘清清洁能源转型下关键金属产业链碳排放的驱动机理、研究方法和减排路径,本文基于系统性关联视角,站在全产业链的高度对相关研究进行了系统梳理和整合分析。【结果】研究发现:①清洁能源转型从需求侧拉动关键金属需求,从供给侧降低碳排放强度,供需双轮共同驱动关键金属产业链碳排放;②关键金属产业链碳排放核算和预测需集成多种方法模型,应根据不同的分析对象选择适配的研究方法;③现有研究重点关注关键金属冶炼和回收环节的碳减排路径,尚未从全产业链的角度识别降碳路径。【结论】未来需基于“金属-能源-碳”多要素关联视角和集成性方法进一步验证关键金属产业链碳排放的内在机理并研判其未来态势,在此基础上结合“中国因素”系统性地设计和识别关键金属全产业链碳减排路径,为达成碳中和目标提供现实依据和决策参考。

关键词:清洁能源转型;关键金属;碳排放;系统性关联视角;全产业链

DOI: 10.18402/resci.2023.01.01

1 引言

面对全球气候变化风险日益加剧的现实挑战,欧盟、美国、日本等碳排放大国纷纷作出碳减排承诺,中国明确提出力争于2030年前实现碳达峰,于2060年前实现碳中和。清洁能源转型是全球实现碳中和的关键举措和必然选择,欧盟于2022年5月披露新的清洁能源计划“RepowerEU”,将2030年可再生能源消费占比目标提高到45%,计划到2030年光伏累计装机容量突破600 GW,风能装机容量增加至480 GW,新能源汽车保有量达3000万辆;美国在《2022年度能源展望》中设定了2050年可再生能源发电比例达44%的远景目标,预计到2030年清洁能源车销量占半,海上风电增加1倍,到2050年光

伏装机容量达1600 GW;中国“十四五”规划提出到2025年非化石能源消费比重将提高至20%,国家主席习近平在气候雄心峰会上宣布至2030年风电、太阳能发电总装机容量超1200 GW,工信部等牵头制定了新版节能与新能源汽车技术路线图,预估2035年新能源汽车渗透率将达50%。显然,作为清洁能源转型的核心抓手,太阳能光伏、风力发电和新能源汽车等新兴技术领域将成为新的经济增长点和未来的朝阳产业。

关键金属是清洁能源技术的基础原材料,随着动力电池、风力涡轮机和太阳能薄膜电池等清洁能源技术的井喷式发展,锂^[1,2]、钴^[3-6]、镍^[7]、稀土^[8-10]、镓^[11]、锗^[12]、铂^[13]、铜^[14]等关键金属需求呈现高位增长态

收稿日期:2022-09-09;修订日期:2022-12-22

基金项目:国家社会科学基金重大项目(21&ZD103);国家自然科学基金青年项目(72204270);中南大学研究生自主探索类科研创新项目(2022ZZTS0325)。

作者简介:朱学红,女,湖南长沙人,研究员,主要从事资源和环境经济与管理研究。E-mail: zhxxh@csu.edu.cn

通讯作者:李双美,女,湖南益阳人,博士生,主要从事金属工业低碳发展和资源安全研究。E-mail: 201601035@csu.edu.cn

势。Hao等^[1]研究显示21世纪轻重型车辆全面电气化对锂矿的累计需求达39.9 Mt,相当于当前全球锂储量的2.85倍。Zeng等^[3]基于历史数据模拟了未来的全球钴循环,结果表明2050年乘用车动力电池的钴需求最高可达1258 kt,占其总需求的79%。Li等^[8]研究发现为了实现2050年全球风电目标,稀土元素产量需扩大11~26倍。Stamp等^[12]预测在铜钢镓硒太阳能电池需求最强劲的情景下,关键金属铜2000—2050年的累计需求将达30.56 kt,为基准情景下铜累计需求的38.73倍。与此同时,金属矿产资源的选冶流程长且工艺复杂,具有高能耗和高排放属性。钢铁的碳排放总量占全球碳排放总量的7%以上^[15],自1995年以来钢铁行业的碳排放效率停滞不前^[16]。铝的生产过程需消耗全球3.5%的电力,且大部分为高碳火电^[17]。镍^[18]、稀土^[19]和铜^[20]等关键金属的生产过程同样存在碳锁定效应^[21]。在关键金属需求强劲和高碳工艺占主导的双重因素叠加下,关键金属产业链碳排放总量将大幅攀升,进而削弱清洁能源技术的碳减排潜力^[22]。故在保障清洁能源技术领域关键金属需求的同时,推动关键金属产业链低碳转型对于全面实现碳中和具有现实紧迫性。

清洁能源转型下能源系统和金属系统之间的耦合关联更趋紧密化并呈现出交互性,一方面,清洁能源技术的发展依赖于关键金属材料,进而刺激关键金属需求增长,与此同时,关键金属生产依赖于化石能源投入,能源结构清洁化转型会约束关键金属供给^[23];另一方面,关键金属供需失衡将反过来制约清洁能源转型进程,能源系统和金属系统在交互式的耦合关联中实现动态平衡。由此可见,清洁能源转型下关键金属产业链碳排放的研究框架将变得更加复杂,在需求端,清洁能源技术大幅拉动关键金属需求,驱动关键金属产业链碳排放攀升;在供给端,能源结构升级倒逼生产者调整用能结构,反哺关键金属生产工艺低碳化转型,清洁能源转型从供需两侧共同影响关键金属产业链碳排放。现有相关文献主要分为两支:一是基于金属“耗能属性”探究金属供给过程的低碳化发展路径^[16,17,24-28];二是基于关键金属“赋能属性”^[29]研究清洁能源转型对关键金属需求的冲击效应及其应对策略^[1-9,11-13]。目前研究主要存在两个方面的不足:一是基于单向线

性化的理论视角看待清洁能源与关键金属的关联关系,尚未从系统性关联视角剖析清洁能源转型驱动关键金属产业链碳排放的复杂机理。二是聚集于关键金属产业链单一环节或将关键金属产业链看作一个整体黑箱展开研究,缺乏从全产业链的高度洞察关键金属脱碳路径。

鉴于此,本文通过梳理和整合清洁能源转型下关键金属产业链碳排放的研究脉络和分析框架,首先,从理论层面揭示系统性关联视角下关键金属产业链碳排放的供需双轮驱动机理;其次,从方法层面架构关键金属产业链碳排放研究的方法体系;然后,从全产业链的角度归纳关键金属碳减排路径;最后,提出未来研究展望,以为后续研究提供理论和方法指引。

2 清洁能源转型下关键金属产业链碳排放的理论分析

2.1 关键金属产业链界定

关键金属(Critical Metals)或关键矿产资源(Critical Minerals)是国际上新提出的资源概念^[30],其中关键矿产资源包含关键金属。欧盟、美国、中国等均制定了关键矿产目录并定期更新。欧盟于2020年9月公布了最新版关键矿产清单,共涵盖30个矿种;美国地质调查局(USGS)则在2022年2月发布了包含50种关键矿物商品的新清单;中国目前虽没有对关键矿产进行明确界定,但早在2016年国务院批复的《全国矿产资源规划(2016—2020年)》中,已将24种矿产列为战略性矿产。通过提取各国关键矿产目录中的关键金属,可以发现欧盟、美国和中国的关键金属清单存在多处重合(图1)。关键金属主要应用于新能源、新材料、通讯信息、航空航天、国防军工等领域,是战略性新兴产业不可或缺和难以替代的原材料;由于地理储备稀缺性和地缘政治不确定性,关键金属通常具有较高的供应风险^[31,32]。本文参考翟明国等^[33]的研究,将关键金属定义为广泛应用于战略性新兴产业且存在较高供应风险的金属元素及其矿床的总称。

清洁能源技术的发展依赖于关键金属的支撑。光伏产业中铜钢镓硒等太阳能薄膜电池技术的关键原材料包括铜、钢、镓等关键金属^[34];风电系统核心部件风力涡轮机的性能严重依赖于稀土元

2023年1月

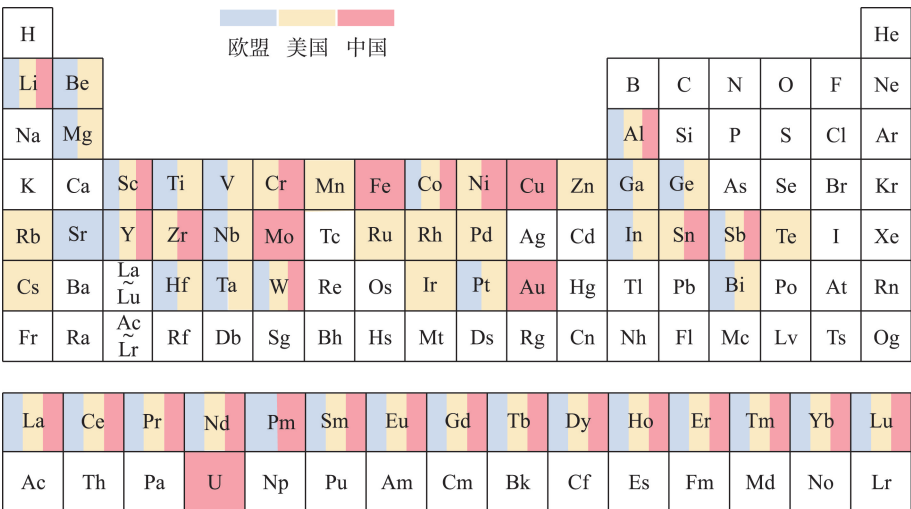


图1 欧盟、美国和中国的关键金属清单

Figure 1 List of critical metals for the European Union, the United States, and China
资料来源:根据欧盟、美国和中国发布的关键矿产和战略性矿产名录整理得出。

素^[8];新能源汽车电动机大量使用铜、稀土等关键金属,动力电池则以锂、钴、镍等为正极材料,以铂族金属为催化剂,功率半导体器件主要利用镓、锗、钢等关键金属保证新能源汽车的充电速度和安全性能^[32,35]。清洁能源技术与关键金属的关联度如图2所示。

产业链是指存在有机关联的各经济部门依据投入与产出、供给与需求等特定逻辑形成的关联关系^[36],一般始于自然资源,止于消费市场。矿产资源产业链不仅包含采选、冶炼、加工制造和终端应用

环节,还涵盖终端产品废弃和矿产资源回收等全生命周期过程^[37]。本文将关键金属产业链划分为采选、冶炼、制造、使用和回收5个环节(图3),其中采选环节涵盖矿石开采和精矿提取,位于产业链上游;冶炼环节是指采用冶金工艺提炼高纯度金属,制造环节通过进一步深加工生产金属元部件,两者处于产业链中游;使用环节即将金属元部件应用于下游终端产品,回收环节包括收集分选报废产品和二次冶炼,两者均居于产业链下游。

2.2 关键金属产业链碳排放影响因素

关键金属产业链碳排放可以分解为碳排放强度和金属产量^①两个直接驱动因素^[16]。碳排放强度表示产业链各环节生产单位金属产生的碳排放量,由供给侧因素决定;根据供需均衡理论,需求曲线的移动会引发价格变动,促使生产者调整生产行为,直到达到市场均衡,故产业链各环节的金属产

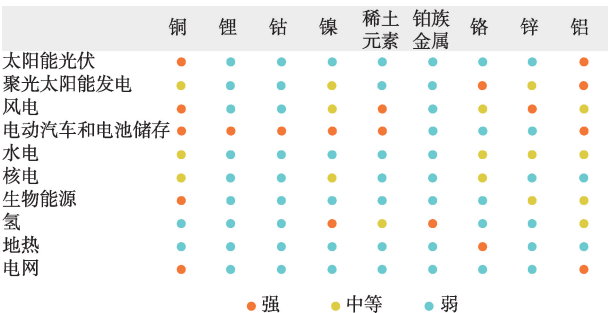


图2 清洁能源技术与关键金属的关联度

Figure 2 The nexus between clean energy technologies and critical metals

资料来源:根据中国可再生能源学会风能专业委员会发布的报告整理得出。

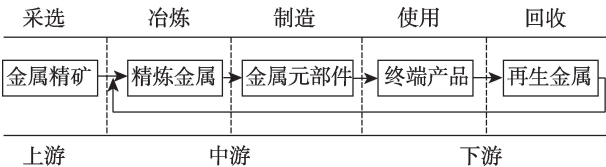


图3 关键金属产业链

Figure 3 Critical metal industry chain

① 本文中的金属产量是指关键金属产业链各环节生产的金属产品中金属元素的含量。

量由其下游环节的金属需求和市场价格决定。总而言之,关键金属产业链碳排放受供需两侧因素的共同影响(图4)。

在供给侧,碳排放强度的影响因素主要包括矿石品位、能源结构、节能技术进步、冶金技术路线和循环回收。矿石品位直接影响采选环节的碳排放强度,随着矿石开采量不断增加,全球矿石品位逐渐下降并呈现矿床细粒化趋势,金属矿产开采及其矿物加工的能耗和温室气体排放越来越密集^[24,38,39]。能源结构、节能技术进步、冶金技术路线、循环回收同时影响关键金属产业链各个环节的碳排放强度。由于各类能源的碳排放因子存在显著差异,能源结构在很大程度上决定了金属生产过程的碳排放强度^[40];节能技术进步主要通过节能技术引进或自主创新改进生产前沿面,进而影响能源使用效率和碳排放强度^[41];随着硫化矿石的枯竭,湿法冶金逐渐替代火法冶金,用于提炼氧化矿石中的关键金属,两种冶金技术路线的能耗、能源投入结构和碳排放强度具有明显差异性^[14,42];鉴于再生金属生产过程的能耗水平远低于原生金属供给过程,循环回收成为了影响关键金属产业链碳排放强度的关键因素^[43]。

在需求侧,金属需求的驱动因素主要包括经济增长、产业结构、终端技术进步和资源使用效率。

前3个因素直接拉动使用环节的关键金属需求。经济增长通常伴随着高强度金属消费,王安建等^[44]提出人均金属消费量与人均GDP具有“S”形规律,且不同种类资源的需求顶点随着经济增长呈波次性递进规律。在工业化初期,机器工业的发展消耗了大量铁矿石等大宗矿产;在工业化中期,电力技术的兴起拉动了铜、铝等基本金属的消费增长;在后工业化时期,伴随着新技术革命和产业变革的浪潮,稀有金属的需求迎来了迅速攀升期^[45,46],这种“雁行式”的消费峰值演进规律本质上是由产业结构的演变所导致^[47]。终端应用领域的技术进步会引发金属使用强度变化或关键金属替代,导致一种或多种关键金属的终端需求发生变化^[48]。资源使用效率表示产业链各环节金属产出量与投入量的比值,直接决定产业链各环节的关键金属需求^[16]。

2.3 关键金属产业链碳排放驱动机制

清洁能源转型从供需两侧共同驱动关键金属产业链碳排放(图5)。从需求侧的驱动机制来看,清洁能源转型通过发展清洁能源技术影响关键金属终端需求及产业链各环节产量。一方面,清洁能源技术的兴起塑造了新的经济增长点,关键金属社会在用存量随之增加。根据美国经济学家罗斯托的经济成长阶段理论和主导产业理论,随着经济增长阶段的转换,经济结构不断调整,主导产业也随之

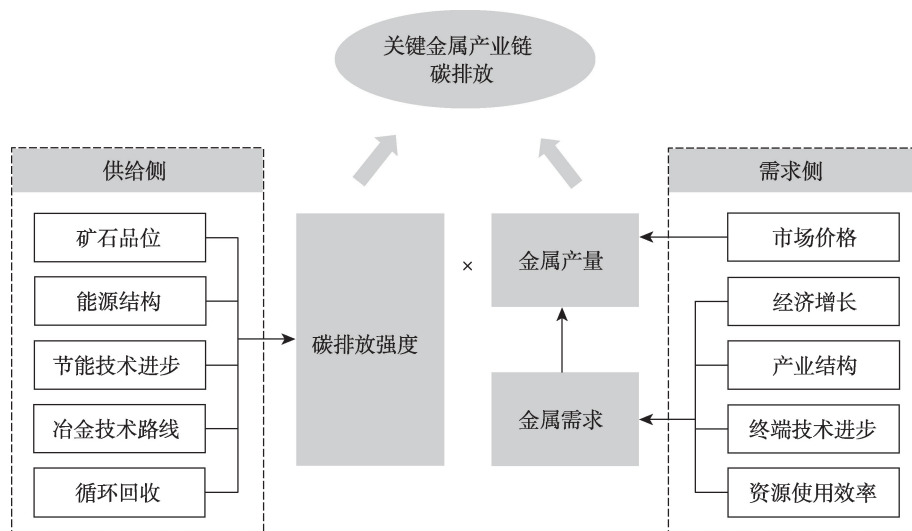


图4 关键金属产业链碳排放影响因素

Figure 4 Influencing factors for carbon emissions of critical metal industry chain

2023年1月

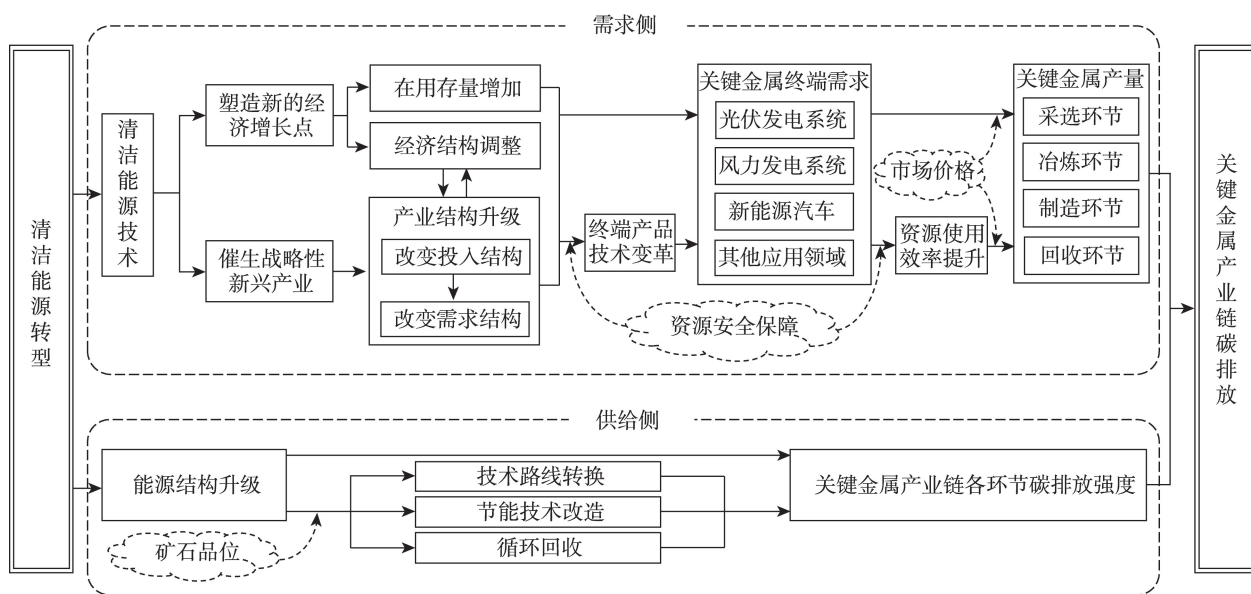


图5 清洁能源转型下关键金属产业链碳排放驱动机制

Figure 5 Driving mechanism for carbon emissions of critical metal industry chain under clean energy transition

更迭,推动产业结构迈向高级化^[49]。产业结构升级将引导投入要素流向具有高生产率和 high 生产增长率的经济部门,由此产生的“结构红利”反过来促进经济结构优化^[50]。另一方面,清洁能源技术将催生战略性新兴产业并淘汰高耗能高排放的落后产业,使要素投入结构和终端产品需求结构得到优化^[48]。社会在用存量增长和产业结构升级共同影响关键金属终端需求,并叠加价格因素拉动产业链各环节的金属产量。与此同时,关键金属矿产的地理储备稀缺且地缘政治不稳定,面临较大的供应中断风险^[31,32,51]。从保障资源安全的角度出发,终端应用领域将加快技术变革,调节终端市场的关键金属需求^[3]。随着关键金属需求强劲和矿产资源供给乏力的矛盾日益突出,产业链中上游企业通常倾向于提高资源使用效率以减少资源消耗^[52],进而缓减其上游环节的关键金属产量压力。

就供给侧的驱动机制而言,清洁能源转型将加速能源结构升级,推动关键金属产业链用能结构清洁化,进而降低产业链各环节的碳排放强度。然而,传统金属生产工艺无法快速适应高比例可再生能源投入结构,而矿石品位持续下降使得能耗需求不断增加,这将倒逼生产者从调整能源投入结构和降低能源消耗两个维度寻求突破口。一方面,转换

冶金技术路线将加快能源投入结构转型^[42];另一方面,节能技术改造和循环回收有利于提升能源使用效率^[41],共同降低关键金属产业链碳排放强度。总体而言,在清洁能源转型背景下,清洁能源技术的发展从需求侧拉动关键金属需求,能源结构升级从供给侧降低关键金属碳排放强度,供需双轮共同驱动其产业链碳排放。

3 关键金属产业链碳排放研究方法

关键金属产业链碳排放等于各环节碳排放强度和金属产量的乘积之和,而金属产量由其终端需求驱动,故本文分别梳理了碳排放强度和终端需求及产量的核算和预测方法,通过方法集成构建关键金属产业链碳排放趋势研判的集成式方法框架。

3.1 关键金属碳排放强度评估和预测方法

3.1.1 关键金属碳排放强度评估方法

碳排放强度评估方法主要分为两类:比值法和生命周期评估法(表1)。比值法通常以碳排放与经济产值的比值^[53]或碳排放与物质产量的比值^[25,54]作为碳排放强度的衡量指标,运用比值法的前提是已知碳排放量,而产业链各环节的碳排放数据通常无法直接获取,故该方法主要用于评估产业链整体碳排放强度,难以高精度地刻画关键金属产业链各环节的碳排放强度。

生命周期评估(LCA)是一种量化评估产品或服务环境影响的工具,涵盖从原材料获取、加工、制造、使用到回收各个生命周期阶段^[55]。根据LCA的核算方式可以将其分为基于投入产出分析的LCA和基于过程分析的LCA。第一种方法主要根据投入产出表详细地量化商品^[56,57]或经济部门^[58]的环境影响,通常不考虑技术流程细节;第二种方法主要基于技术过程的投入产出关系精细地量化产业链特定环节的碳排放强度^[59],广泛用于评估金属采选^[60]、冶炼^[28]、回收^[61]等单一环节和全产业链^[16,20,42,62]的碳排放强度。近年来,Guinée等^[63]进一步将LCA发展为一个跨学科的集成方法,即生命周期可持续性评估(LCSA),同时将环境、经济和社会影响纳入评估范畴^[64]。Cusenza等^[65]应用LCSA评估了插电式混合动力汽车中牵引锂离子电池组的可持续性。

3.1.2 关键金属碳排放强度预测方法

碳排放强度预测方法主要包括模型预测法和模拟仿真法(表1)。模型预测法主要基于数理模型预测碳排放强度,大致可以分为两类:一类是采用灰色模型^[66]、自回归积分移动平均模型^[67]、二阶多项式回归模型^[67]、输入输出线性规划模型^[68]等数学模型分析碳排放强度演变趋势;另一类是基于IPAT^[69]、

ImPACT^[70]、STIRPAT^[71]等理论模型,结合情景分析法,量化分析模型中关键参数的变动对碳排放强度的影响。模型预测法适用于经济技术系统稳定运行情况下的碳排放强度预测。模拟仿真法中最典型的方法即系统动力学方法,它适用于解决高阶、非线性、时变的相关问题,Li等^[26]通过构建金属铝的碳排放强度系统反馈回路,分析了2015年至2030年原铝行业的碳排放强度趋势。近年来,人工智能算法因其出色的学习和自组织能力,在碳排放强度预测领域开始兴起,Niu等^[72]应用改进的烟花算法与广义回归神经网络模型(GRNN)模拟预测了2040年前中国的碳排放强度。模拟仿真法适用于研判复杂系统的碳排放强度趋势。

3.2 关键金属终端需求及产量的核算和预测方法

3.2.1 关键金属终端需求及产量核算方法

关键金属终端需求是指终端市场的关键金属实际消费量,通常采用特定年份使用环节的金属流入量表征;金属产量即产业链各环节的金属流出量,等于该环节金属流入量减去损失量。物质流分析(MFA)是一种基于物质守恒理论,追踪和刻画系统边界内物质流量和存量的研究方法^[73],可以全面而精确地核算关键金属终端需求及其产业链各环

表1 关键金属碳排放强度评估和预测方法

Table 1 Evaluation and prediction methods for carbon emission intensity of critical metals

类别	方法原理	方法模型	方法适用性	典型文献
评估方法	比值法	—	基于经济产值的比值法 基于物质产量的比值法	粗略刻画产业链整体碳排放强度 Zhong等 ^[53] Oda等 ^[54]
	生命周期评估法	投入产出理论	基于投入产出分析的生命周期评估	精细刻画产业链整体碳排放强度 Vendries Algarin等 ^[58]
			基于过程分析的生命周期评估	精细刻画产业链各环节碳排放强度 Liu等 ^[61]
			生命周期可持续性评估	刻画产业链各环节的环境、经济和社会影响 Guinée等 ^[63]
预测方法	模型预测法	基于数理模型预测碳排放强度	灰色模型 自回归积分移动平均模型 二阶多项式回归模型 输入输出线性规划模型 IPAT ImPACT STIRPAT	经济技术系统稳定运行情况下的碳排放强度预测 Li等 ^[66] Liu等 ^[67] Kang等 ^[68] Yue等 ^[69] Long等 ^[70] Xie等 ^[71]
			系统动力学模型 烟花算法 广义回归神经网络模型	复杂系统的碳排放强度预测 Li等 ^[26] Niu等 ^[72]
	模拟仿真法	基于系统建模和人工智能量化外部因素对碳排放强度的影响		

资料来源:根据相关文献整理得出。

2023年1月

节产量。如表2所示,基于时间特征可以将MFA分为静态物质流分析和动态物质流分析,前者用于呈现特定年份物质存流量的“快照”^[74],后者用于表征一段时间内物质存流量的变化^[75],有利于捕捉关键金属来源动向及其演变特征^[76]。根据核算方式可以将MFA划分为自上而下^[77]和自下而上两种核算方法^[78,79],自上而下方法主要基于政府文件、技术文献、贸易组织报告等数据资料量化产业链环节的物质流量,并由此推导出物质在用存量,适用于宏观层面的关键金属存流量分析;自下而上方法则通过汇总终端产品的元素含量核算物质在用存量,进而推算产业链各环节的物质流量,有利于高分辨率地呈现关键金属需求分布视图^[80]。

3.2.2 关键金属终端需求及产量预测方法

借鉴Müller等^[81]和宋慧玲等^[82]的研究,本文将关键金属终端需求预测方法分为流量驱动法和存量驱动法(表2)。流量驱动法是一种基于历史流量数据和数理模型预测关键金属消费量的方法,主要包括计量经济学方法、灰色预测法、投入产出分析和部门分析法。其中,计量经济学方法主要包含多

元回归分析和趋势外推法,Schipper等^[83]通过构建铜需求与经济发展水平和人口规模等宏观经济变量的多元回归模型,预测2100年的全球铜需求;柳群义^[84]和代涛等^[85]依据人均资源消费量和人均GDP间的“S”型曲线分别预测全球铜和锌需求。灰色预测法主要根据灰色系统因素之间的关联性预测事物发展趋势,Ma等^[86]通过开发基于灰色预测和滚动机制优化的高精度混合模型,对中国铁矿石消费量进行预测。投入产出分析主要基于投入产出表预测资源需求,Tisserant等^[87]通过构建全球多区域投入产出模型(MRIO)研判全球不同区域到2050年的钴需求。部门分析法则根据资源应用部门发展趋势预测资源需求,张若然等^[88]采用部门分析法研究了未来不同应用领域的铂族金属需求。流量驱动方法适用于传统产业和成熟技术领域的金属需求预测,无法考量产业结构升级、新兴技术变革等突变性因素对关键金属终端需求的影响。

随着清洁能源转型的深入推进,新兴清洁能源技术和产业迎来爆发式增长,基于简单线性假定的金属终端需求预测方法适用性受限。近年来,国内

表2 关键金属需求及产量核算和预测方法

Table 2 Evaluation and prediction methods for critical metal demand and production volume

	类别	方法原理	方法模型	方法适用性	典型文献
核算方法	物质流分析法	物质守恒定理	静态物质流分析	呈现特定年份关键金属存流量“快照”	陈伟强等 ^[74]
			动态物质流分析	表征一段时间内关键金属存流量变化	Liu等 ^[75]
			自上而下核算方法	刻画宏观层面的关键金属终端需求和产量	Glöser等 ^[77]
			自下而上核算方法	识别微观尺度的关键金属终端需求和产量	Duan等 ^[79]
终端需求预测	流量驱动法	基于历史流量数据和数理模型预测关键金属消费量	多元回归分析 趋势外推法 灰色预测法 投入产出分析 部门分析法	传统产业和成熟技术领域的关键金属终端需求预测	Schipper等 ^[83] 柳群义 ^[84] Ma等 ^[86] Tisserant等 ^[87] 张若然等 ^[88]
	存量驱动法	根据终端产品社会在用存量的预测结果和物质守恒定理,推算关键金属终端需求	动态物质流存量驱动模型+情景分析法	新兴产业和技术领域的关键金属终端需求预测	Ren等 ^[90] Cao等 ^[89] Zeng等 ^[3]
产量预测	直接预测法	基于数学模型或仿真模型直接估测关键金属产量	Hubbert供给曲线 系统动力学模型	原生关键金属产量预测 粗略预测关键金属产量	张亚斌等 ^[91] Sverdrup ^[93]
	间接推导法	根据需求预测结果和供需平衡定理推导关键金属产量	前文所述的终端需求预测方法	精细预测关键金属产业链各环节产量	前文归纳的终端需求预测方法对应的文献

资料来源:根据相关文献整理得出。

外学者广泛采用存量驱动方法预测锂^[1,2]、钴^[3,5]、稀土元素^[8,10,89]、钢^[12,90]、铂族金属^[13]等关键金属的终端需求。该方法结合了动态物质流存量驱动模型和情景分析法,其逻辑范式是基于一系列关键情景参数设定和寿命分布函数预测相关终端产品的社会在用存量和市场需求,然后根据物质守恒定理推算出关键金属终端需求,具有典型的高分辨率特征,主要适用于新兴产业和技术领域的关键金属终端需求预测。Ren等^[90]基于光伏装机容量增长模式和基础设施寿命的假定,运用动态物质流分析的存量驱动模型估算中国2050年光伏系统的市场需求,在此基础上对第一、二代太阳能电池技术的市场份额和薄膜电池技术进步进行参数设定,根据不同情景下的金属使用强度预测光伏系统对关键金属碲和钢的需求。Cao等^[89]将动态物质流存量驱动模型与6种可再生能源组合情景相结合,计算出丹麦2019—2050年陆上和海上新增风电装机容量,并基于风力涡轮机使用寿命、永磁发电机市场份额和金属使用强度设置多个情景,预测关键金属钕和镨的终端需求。Zeng等^[3]基于车辆服务寿命、电动汽车市场份额和电池使用寿命的情景设定,采用动态物质流存量驱动模型估计动力电池市场需求,并引入现有电池技术改良、低钴技术发展、无钴技术渗透和下一代无钴技术突破4种电池化学技术情景,预测不同情景组合下2020—2050年全球动力电池领域的钴需求。

关键金属产量预测方法可以分为两种:一是直接预测法,二是间接推导法。直接预测法是一种基于数学模型或仿真模型直接估测关键金属产量的方法,主要包括Hubbert曲线拟合法和系统动力学方法。张亚斌等^[91]和李天骄等^[92]运用Hubbert供给曲线预测了中国锑、铜、铝、铅、锌、钨、钼、锑、锡、镍、钴等有色金属矿石的产量峰值;Sverdrup等^[93]基于全球锂供给动态、市场价格和开采年限等要素构建系统动力学模型,预测全球锂资源的开采峰值和供给态势;王昶等^[94]通过综合考虑载体金属铝和伴生金属镓之间的“供求-价格”交互关系构建系统动力学模型,模拟仿真全球镓资源产量的演化趋势。Hubbert供给曲线只能用于预测原生金属矿石产量,无法预测回收环节的再生金属产量;系统动力学方

法对市场、价格等模型参数的表征相对宏观,难以捕捉微观因素的变化对产业链各环节关键金属产量的冲击效应。间接推导法是指采用前文所述的需求预测方法预测关键金属终端需求,在此基础上遵循物质守恒定理推导产业链各环节产量。该方法中需求预测的分辨率越高,产量预测越精细。

3.3 关键金属产业链碳排放趋势研判方法框架

本文通过集成碳排放强度和终端需求及产量的核算和预测方法,构建关键金属产业链碳排放趋势研判的集成式方法框架(图6)。集成式方法主要包括3类:①数理统计法。同时将供需两侧的影响因素纳入数理模型,预测关键金属产业链碳排放,由于因素选取存在一定的主观性和片面性,该方法的预测精准度不可控。Cao等^[95]基于二氧化碳排放量与能源效率、能源结构、碳排放因子、工业增加值和劳动生产率等因素的关系构建向量自回归模型,对有色金属矿开采和冶炼环节的碳排放趋势进行预测。②模拟仿真法。通过构建系统仿真模型,综合考量供需两侧关键参数的变动对关键金属产业链碳排放的冲击效应,系统仿真模型涵盖的要素全面并详细刻画了要素之间的复杂关系,但正因为模型复杂度高,部分参数设置往往趋于简单线性化,使预测结果的精准度有所折损。Li等^[26]通过构建原铝生产、次铝生产、二氧化碳排放强度、经济发展和政策制定5个子系统,并根据子系统之间的因果关联进行系统建模,考察了中国原铝行业未来的碳排放趋势。③基于核算模型的情景分析法。在碳排放强度和终端需求及产量核算的基础上,对供需核算模型中的关键变量进行情景参数设置,通过情景组合综合研判关键金属产业链碳排放趋势,该方法的可行性较强且分辨率较高,有利于精准识别关键金属产业链的降碳路径。卢浩浩等^[27]在动态物质流分析和生命周期评估的基础上,针对存量水平、技术水平和能源结构设置了15种情景,研究中国铝工业1990—2100年的能耗和碳排放;Kuipers等^[42]从单位铜生产碳排放和铜供需两个维度构建核算模型,并根据联合国环境规划署发布的第4期全球能源展望情景和国际能源署制定的电力结构情景,对两个维度的关键变量进行参数设定,预测全球关键金属铜的碳排放态势;Dong等^[62]首先将MFA和LCA方

2023年1月

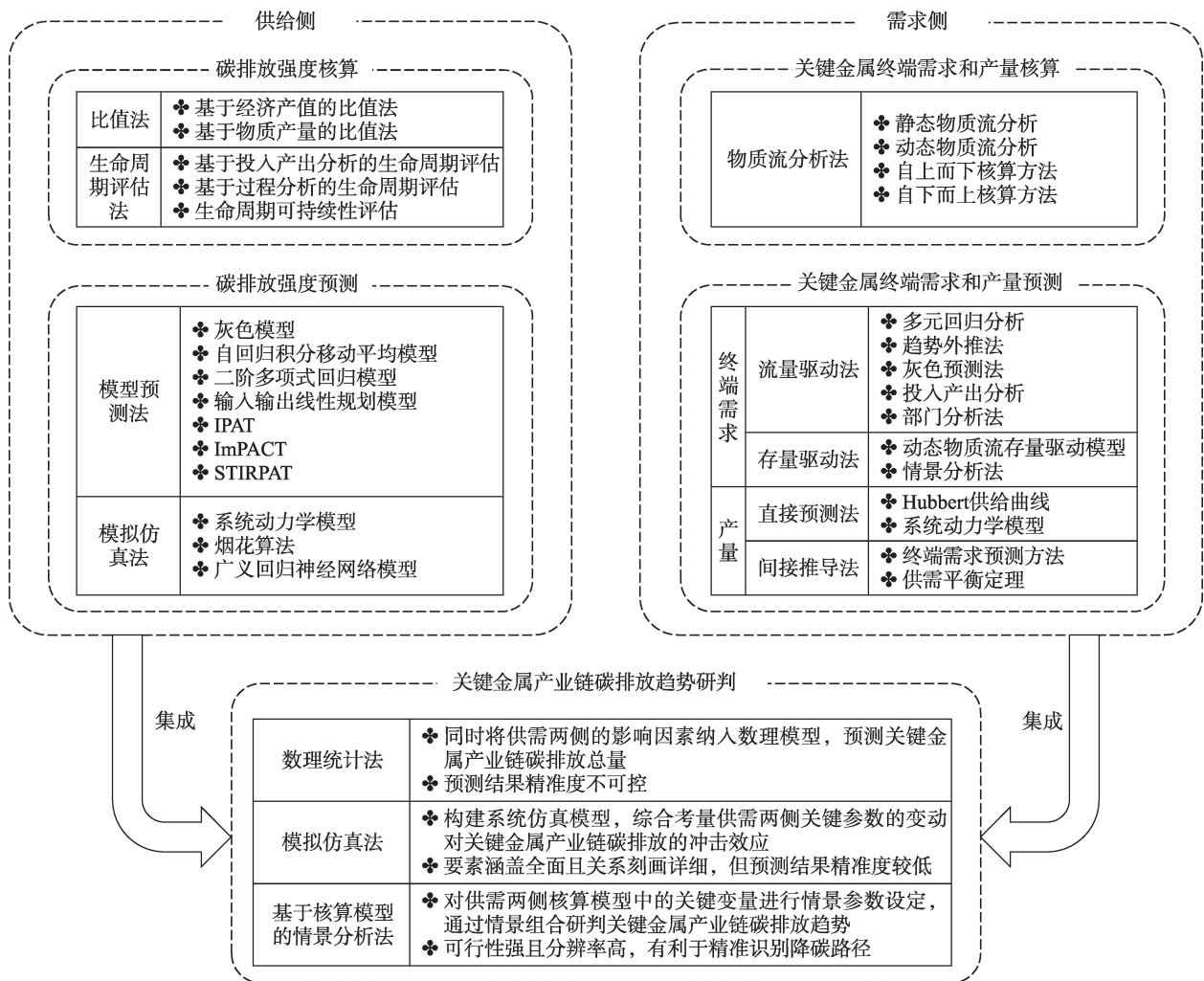


图6 关键金属产业链碳排放趋势研判的方法框架

Figure 6 Methodological framework for identifying the carbon emission trends of critical metal industry chain

法相结合核算铜全生命周期的历史碳排放,然后根据中国可再生能源中心制定的“既定政策情景”和“低于2°C情景”,设置矿石品位、能源结构、能源效率、铜需求、铜矿石和废料进口、二次生产等关键变量的参数值,研判未来中国铜生产的环境影响。

4 清洁能源转型下关键金属产业链碳减排路径研究

关键金属产业链碳减排路径分布在采选、冶炼、制造、使用和回收各环节(图7)。能源结构升级和资源效率提升是关键金属产业链各个环节的协同降碳路径。能源结构升级意味着化石能源被可再生能源大规模替代,Ciacci等^[20]和Kuipers等^[42]研究表明电力结构清洁化是减少铜产业链温室气体

排放的关键所在。资源效率提升表示满足同等终端需求所需的产业链各环节关键金属产量减少^[16],主要通过降低产业链各环节损失率^[14,96,97]和延长终端产品寿命^[20,52,98,99]等方式实现。外延提离技术消除了半导体器件制造过程中90%以上的砷化镓损失^[100],延长光伏基础设施寿命和增强电池耐用性很大程度上稀释了铜、钢、锂的市场需求^[1,90],相应地缓解了关键金属产业链各环节的产量压力,有利于降低关键金属产业链的能耗和碳排放。

产业链各环节同样存在其特有的碳减排路径。针对采选环节,采选技术创新是目前采选行业最为缺乏但碳减排潜力最大的路径选择^[101,102],人工智能和数字技术在很大程度上为智慧采选矿等低

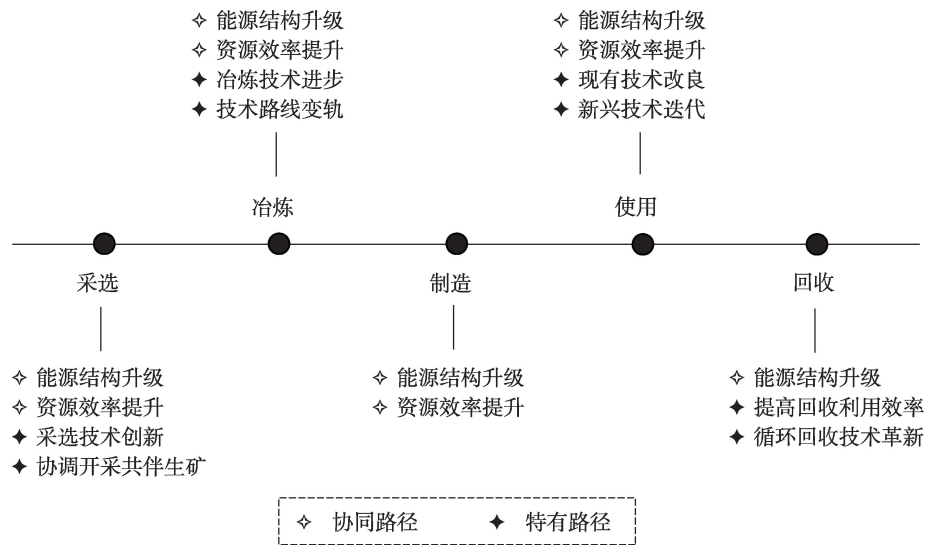


图7 清洁能源转型下关键金属产业链碳减排路径

Figure 7 Carbon emission reduction pathways for critical metal industry chain under clean energy transition

碳技术的发展赋能,大幅降低了关键金属采选环节的碳排放^[103]。协调开采共伴生矿则是减少非必要碳排放的关键路径。风电技术和新能源汽车技术对稀土元素镱的需求最大,故与镱共生的其他稀土元素会出现供应过剩,而过剩金属供应过程中的碳排放比生产目标金属镱产生的碳排放高出数倍,相关研究表明只有集中开采富含镱的矿床,才能有序协调稀土元素供需和最大程度上降低非必要碳排放^[104]。

针对冶炼环节,冶炼技术进步和技术路线变轨将有效缓解关键金属产业链碳减排压力。在铜冶炼过程中,传统鼓风炉熔炼工艺的能耗和碳排放显著高于闪速熔炼和熔池熔炼,彻底淘汰传统熔炼工艺并推广先进熔炼技术是火法炼铜环节碳减排的关键所在^[28,105];烧结拜耳系列工艺和改进拜耳工艺替代石灰碱烧结矿工艺可以有效减少铝冶炼环节6%的碳排放^[106]。关于火法冶金和湿法冶金两条技术路线的环境影响,不同学者得出了差异性的结论。Kuipers等^[42]和Azadi等^[107]研究显示相较于火法冶金方式,湿法冶金技术路线下铜生产带来的环境影响更小,Harpprecht等^[108]则发现随着湿法冶金市场份额提高,铜冶炼的温室气体排放会持续增加。现有研究结论不同主要是因为相关研究对系统边界的定义存在差异性。Yang等^[109]进一步比较了堆

浸出和堆搅拌浸出两条湿法冶金技术路线下铜冶炼过程的环境影响,研究发现堆搅拌浸出方式更环保,为企业的技术路线选择提供了参考。

针对使用环节,现有技术改良和新兴技术迭代是从源头上削减关键金属需求,进而降低产业链碳排放的根本路径。现有技术改良是一种渐进式的技术创新,主要通过降低终端产品的金属使用强度减少关键金属需求。多种太阳能薄膜电池技术同步渗透和铜钢镓硒电池技术进步降低了关键金属铜和镓的使用强度^[112,34,110];相比于齿轮式永磁发电机,直驱式永磁发电机的稀土元素使用强度大幅降低^[8];镍锰钴三元锂电池中镍锰钴比例从1:1:1向6:2:2、8:1:1和9:0.5:0.5转变,大大降低了关键金属钴的使用强度^[3-6],在一定程度上缓解了清洁能源技术领域关键金属需求激增的态势。新兴技术迭代则是一种突破式技术创新,直接导致关键金属需求曲线发生突变。磷酸铁锂、固态电池、锂硫电池和锂空气电池等下一代无钴电池化学技术的诞生和迭代将彻底扭转动力电池领域钴需求呈指数级增长的局面^[3-5];过氧化钠电池一旦突破技术瓶颈,钠将大规模替代关键金属锂^[22,111]。尽管现有技术改良和新兴技术迭代是最具前景的关键金属需求缓解策略,但很有可能导致环境负担转移,例如,镍锰钴三元锂电池技术改良和过氧化钠电池技术突破在

2023年1月

消减钴和锂需求的同时增加了镍和钠的需求^[5,6],将相应的环境负担从钴和锂转嫁给镍和钠。因此,在技术研发创新过程中,应对新兴技术的环境影响进行综合考量。

针对回收环节,提高回收利用效率和循环回收技术革新是关键金属产业链降碳的重要突破口。回收利用效率越高,生产单位再生金属的能源消耗和碳排放越低,优化产品设计和构建回收管理体系是提高回收利用效率的关键举措。材料循环性能直接决定关键金属回收利用效率,在产品设计阶段应充分考虑金属可重用性、可修复性、再制造潜力和可回收性^[20]。Schafer等^[112]及Wang等^[113]研究发现如果合金废料中的金属浓度过低,金属回收过程将产生比初级生产过程更多的温室气体,应尽可能避免在合金中使用低浓度关键金属,如果不可避免,则应在设计阶段着重考虑金属的可识别性^[114]。为此,多国引入了生产者责任延伸制度,规定生产者对产品的整个生命周期负责,为生产者加强产品可持续性设计提供内生动力^[22]。构建“前端源头分类、中端智慧清运、后端精细分拣、末端资源利用”的回收管理体系将进一步促进关键金属高效回收^[15],而这亟需政府联合企业共同布局全新的商业运作模式并落实回收基础设施建设^[5,62,116-118]。循环回收技术革新是指通过开发前沿的循环回收技术提高回收利用率,在增加再生金属供给的同时减少原生金属需求,促进关键金属产业链低碳发展。电池低负荷技术和催化转化器分离技术将有效提高燃料电池中铂族金属的可回收程度^[13];离子交换和溶剂萃取的组合方法可以将废旧电池中基础元素和稀土元素完全分离,有利于回收具有高附加值的金属^[119];Lin等^[120]研究表明应致力于多组分回收技术研发,实现更高水平的循环回收。

5 结论与研究展望

5.1 结论

本文立足于清洁能源转型下关键金属需求及其产业链碳排放大幅攀升的现实问题,突破现有研究理论视角单向线性化、仅关注产业链单一环节或将产业链看作一个整体黑箱的局限性,从系统性关联视角出发,站在全产业链的高度对关键金属产业链碳排放的驱动机理、研究方法和碳减排路径展开

系统梳理与整合分析。主要得出如下结论:

(1)关键金属产业链碳排放是供需两侧因素交互作用和共同驱动的结果。矿石品位、能源结构、节能技术进步、冶金技术路线、循环回收是影响关键金属碳排放强度的供给侧因素;经济增长、产业结构、终端技术进步、资源使用效率、市场价格等需求侧因素则影响关键金属终端需求及产量。清洁能源转型通过发展清洁能源技术从需求侧拉动关键金属需求,通过能源结构升级从供给侧降低关键金属碳排放强度,供需双轮共同驱动关键金属产业链碳排放。

(2)关键金属产业链碳排放强度和终端需求及产量的核算和预测方法逐渐呈现涵盖全生命周期、动态化和精细化特征。通过集成供需两侧核算和预测模型,可以将关键金属产业链碳排放趋势研判方法划分为数理统计法、模拟仿真法和基于核算模型的情景分析法。应根据不同的研究对象选择适配的方法模型。

(3)关键金属产业链碳减排路径分布在采选、冶炼、制造、使用和回收各环节,涵盖多个环节的协同路径和单个环节的特有路径。目前冶炼和回收环节的碳减排路径最受学者关注,主要原因是关键金属冶炼环节的碳排放最密集且碳减排潜力较大,而循环回收是全球倡导的低碳可持续发展模式。虽然众多学者基于技术进步视角研究关键金属使用环节的需求消减策略,但尚未将其与关键金属产业链低碳发展置于同一框架下展开研究。此外,现有研究缺乏从全产业链的角度系统地识别和分析关键金属碳减排路径。

5.2 研究展望

本文虽搭建了清洁能源转型下关键金属产业链碳排放研究的分析框架,但未来仍需从以下3个方面进一步延伸和细化:

(1)深化清洁能源转型下关键金属产业链碳排放的理论机制剖析。本文从供需两侧视角揭示了关键金属产业链碳排放的影响因素和驱动机制,未来还需要结合清洁能源产业和技术发展现状,运用定量化的方法进一步解构和验证各因素的内在关联及其作用路径,为关键金属产业链碳排放趋势预测奠定理论基础。

(2)基于系统性关联视角和集成性方法综合研判关键金属产业链碳排放趋势。清洁能源和关键金属彼此联动又互相制约,现有研究大多基于关键金属“赋能属性”或“耗能属性”分别预测其终端需求和碳排放趋势,两者处于割裂状态,缺乏对关键金属、清洁能源和碳三要素的关联属性进行系统考量。未来需从“金属-能源-碳”多要素关联视角出发,基于清洁能源转型从需求端驱动关键金属需求及其产业链碳排放增长,从供给端倒逼关键金属工艺流程低碳转型的逻辑机理,通过集成关键金属碳排放强度和需求预测模型,系统研判关键金属产业链碳排放态势。

(3)强化关键金属产业链碳减排路径的全方位和多维度识别。现有相关文献大多针对单个环节或产业链整体提出突破路径,未来亟需从全产业链的角度系统性地分析关键金属降碳路径。由于不同路径之间可能存在抵消效应或协同效应,通过多维路径组合判定关键金属产业链碳减排最佳方案将是今后的重点研究方向。此外,未来研究应密切结合国家经济增长阶段转换、市场演变和技术革命等“中国因素”设计碳减排路径,为中国碳中和政策制定者提供决策参考。

参考文献(References):

- [1] 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, DOI: 10.1038/s41467-019-13400-1.
- [2] Speirs J, Contestabile M, Houari Y, et al. The future of lithium availability for electric vehicle batteries[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 35: 183-193.
- [3] Zeng A Q, 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, DOI: 10.1038/s41467-022-29022-z.
- [4] Olivetti E A, Ceder G, Gaustad G G, et al. Lithium-ion battery supply chain considerations: Analysis of potential bottlenecks in critical metals[J]. *Joule*, 2017, 1(2): 229-243.
- [5] 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.
- [6] Fu X K, 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.
- [7] Elshkaki A, Graedel T E, Ciacchi L, et al. Resource demand scenarios for the major metals[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(5): 2491-2497.
- [8] Li J S, Peng K, Wang P, et al. Critical rare-earth elements mismatch global wind-power ambitions[J]. *One Earth*, 2020, 3(1): 116-125.
- [9] 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.
- [10] Wang P, Chen L Y, Ge J P, et al. Incorporating critical material cycles into metal-energy nexus of China's 2050 renewable transition [J]. *Applied Energy*, 2019, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113612.
- [11] Song H L, Wang C, Sen B, et al. China factor: Exploring the by-product and host metal dynamics for gallium-aluminum in a global green transition[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(4): 2699-2708.
- [12] Stamp A, Wäger P A, Hellweg S. Linking energy scenarios with metal demand modeling: The case of indium in CIGS solar cells[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2014, 93: 156-167.
- [13] Hao 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.
- [14] Watari T, Northey S, Giurco D, et al. Global copper cycles and greenhouse gas emissions in a 1.5 °C world[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2022, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.106118.
- [15] Li Z L, Hanaoka T. Plant-level mitigation strategies could enable carbon neutrality by 2060 and reduce non-CO₂ emissions in China's iron and steel sector[J]. *One Earth*, 2022, 5(8): 932-943.
- [16] Wang P, Ryberg M, Yang Y, et al. Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply- and demand-side mitigation efforts[J]. *Nature Communications*, 2021, DOI: 10.1038/s41467-021-22245-6.
- [17] Saevarsdottir G, Kvande H, Welch B J. Aluminum production in the times of climate change: The global challenge to reduce the carbon footprint and prevent carbon leakage[J]. *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 2019, 72(1): 296-308.
- [18] Khoo J Z, Haque N, Woodbridge G, et al. A life cycle assessment of a new laterite processing technology[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 1765-1777.
- [19] Weng Z H, Haque N, Mudd G M, et al. Assessing the energy requirements and global warming potential of the production of rare earth elements[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 139:

2023年1月

- 1282–1297.
- [20] Ciacci L, Fishman T, Elshkaki A, et al. Exploring future copper demand, recycling and associated greenhouse gas emissions in the EU–28[J]. *Global Environmental Change*, 2020, DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102093.
- [21] Tong D, Zhang Q, Zheng Y, et al. Committed emissions from existing energy infrastructure jeopardize 1.5 °C climate target[J]. *Nature*, 2019, 572(7769): 373–377.
- [22] Sovacool 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.
- [23] Wang P, Wang H M, Chen W Q, et al. Carbon neutrality needs a circular metal–energy nexus[J]. *Fundamental Research*, 2022, 2(3): 392–395.
- [24] Norgate T, Jahanshahi S. Reducing the greenhouse gas footprint of primary metal production: Where should the focus be?[J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24(14): 1563–1570.
- [25] Pedneault J, Majeau-Bettez G, Krey V, et al. What future for primary aluminium production in a decarbonizing economy?[J]. *Global Environmental Change*, 2021, DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2021.102316.
- [26] Li Q, Zhang W, Li H, et al. CO₂ emission trends of China's primary aluminum industry: A scenario analysis using system dynamics model[J]. *Energy Policy*, 2017, 105(6): 225–235.
- [27] 卢浩洁, 王婉君, 代敏, 等. 中国铝生命周期能耗与碳排放的情景分析及减排对策[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(1): 451–462. [Lu H J, Wang W J, Dai M, et al. Scenario analysis of energy consumption and carbon emissions in Chinese aluminum life cycle and emissions reduction measures[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(1): 451–462.]
- [28] 曾广圆, 杨建新, 宋小龙, 等. 火法炼铜能耗与碳排放情景分析: 基于生命周期的视角[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(4): 46–50. [Zeng G Y, Yang J X, Song X L, et al. Energy consumption and carbon emissions scenario analysis of pyrometallurgical copper based on LCA[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(4): 46–50.]
- [29] 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. [Wang P, Wang Q C, Han R R, et al. Nexus between low-carbon energy and critical metals: Literature review and implications[J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 669–681.]
- [30] 陈骏. 关键金属超常富集成矿和高效利用[J]. *科技导报*, 2019, 37(24): 1. [Chen J. Metallogenesis and effective utilization of strategic-critical metals[J]. *Science and Technology Review*, 2019, 37(24): 1.]
- [31] 吴巧生, 周娜, 成金华. 战略性关键矿产资源供给安全研究综述与展望[J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1439–1451. [Wu Q S, Zhou N, Cheng J H. A review and prospects of the supply security of strategic key minerals[J]. *Resources Science*, 2020, 42(8): 1439–1451.]
- [32] 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. [Ge J P, Liu J Q. International comparison of critical mineral strategies: Historical evolution and tool selection[J]. *Resources Science*, 2020, 42(8): 1464–1476.]
- [33] 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.]
- [34] Månberger 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.
- [35] Grandell L, Lehtilä A, Kivinen M, et al. Role of critical metals in the future markets of clean energy technologies[J]. *Renewable Energy*, 2016, 95: 53–62.
- [36] 曲永义, 贺俊, 江鸿, 等. 产业链链长的理论内涵及其功能实现[J]. *中国工业经济*, 2022, (7): 5–24. [Qu Y Y, He J, Jiang H, et al. The theoretical connotation of the central enterprise as the chain leader of industry chain and the function realization[J]. *China Industrial Economics*, 2022, (7): 5–24.]
- [37] 周娜. 中国锂产业链安全态势与治理研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021. [Zhou N. Security Dynamics and Governance of China's Lithium Supply Chain[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.]
- [38] Northey S, Mohr S, Mudd G M, et al. Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2014, 83: 190–201.
- [39] Norgate T, Haque N. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18(3): 266–274.
- [40] El Anshasy A A, Katsaiti M S. Energy intensity and the energy mix: What works for the environment?[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 136: 85–93.
- [41] 杨莉莎, 朱俊鹏, 贾智杰. 中国碳减排实现的影响因素和当前挑战: 基于技术进步的视角[J]. *经济研究*, 2019, 54(11): 118–132. [Yang L S, Zhu J P, Jia Z J. Influencing factors and current challenges of CO₂ emission reduction in China: A perspective based on technological progress[J]. *Economic Research Journal*, 2019, 54(11): 118–132.]
- [42] Kuipers K J J, van Oers L F C M, Verboon M, et al. Assessing environmental implications associated with global copper demand and supply scenarios from 2010 to 2050[J]. *Global Environmental Change*, 2018, 49: 106–115.

- [43] Gorman M R, Dzombak D A, Frischmann C. Potential global GHG emissions reduction from increased adoption of metals recycling [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2022, DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106424.
- [44] 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.]
- [45] 杨建峰, 余韵, 马腾, 等. 工业革命驱动下能源与金属资源需求演变特征与前景分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(12): 45–54. [Yang J F, Yu Y, Ma T, et al. Evolution of energy and metal demand driven by industrial revolutions and its trend analysis [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(12): 45–54.]
- [46] 陈其慎, 于汶加, 张艳飞, 等. 矿业发展周期理论与中国矿业发展趋势[J]. *资源科学*, 2015, 37(5): 891–899. [Chen Q S, Yu W J, Zhang Y F, et al. Mining development cycle theory and development trends in Chinese mining[J]. *Resources Science*, 2015, 37(5): 891–899.]
- [47] 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.]
- [48] 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.]
- [49] 曾新群. 产业主导部门分析理论的发展[J]. *中国工业经济*, 1988, (1): 40–46. [Zeng X Q. Development of industry–dominant sector analysis theory[J]. *China Industrial Economics*, 1988, (1): 40–46.]
- [50] 干春晖, 郑若谷, 余典范. 中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响[J]. *经济研究*, 2011, 46(5): 4–16. [Gan C H, Zheng R G, Yu D F. An empirical study on the effects of industrial structure on economic growth and fluctuations in China[J]. *Economic Research Journal*, 2011, 46(5): 4–16.]
- [51] 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.]
- [52] Pauliuk S, Heeren N, Berrill P, et al. Global scenarios of resource and emission savings from material efficiency in residential buildings and cars[J]. *Nature Communications*, 2021, DOI: 10.21203/rs.3.rs-93217/v1.
- [53] Zhong M R, Xiao S L, Zou H, et al. The effects of technical change on carbon intensity in China’s non-ferrous metal industry[J]. *Resources Policy*, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102226.
- [54] Oda J, Akimoto K. Carbon intensity of the Japanese iron and steel industry: Analysis of factors from 2000 to 2019[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130920.
- [55] Finnveden G, Hauschild M Z, Ekvall T, et al. Recent developments in life cycle assessment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(1): 1–21.
- [56] Suh S, Lenzen M, Treloar G J, et al. System boundary selection in life-cycle inventories using hybrid approaches[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(3): 657–664.
- [57] Nansai K, Kondo Y, Kagawa S, et al. Estimates of embodied global energy and air-emission intensities of Japanese products for building a Japanese input-output life cycle assessment database with a global system boundary[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(16): 9146–9154.
- [58] Vendries Algarin J, Hawkins T R, Marriott J, et al. Effects of using heterogeneous prices on the allocation of impacts from electricity use: A mixed-unit input-output approach[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, 21(5): 1333–1343.
- [59] Säynäjoki A, Heinonen J, Junnila S, et al. Can life-cycle assessment produce reliable policy guidelines in the building sector?[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, DOI: 10.1088/1748-9326/aa54ee.
- [60] Durucan S, Korre A, Munoz-Melendez G. Mining life cycle modeling: A cradle-to-gate approach to environmental management in the minerals industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2006, 14 (12): 1057–1070.
- [61] Liu L X, Keoleian G A. LCA of rare earth and critical metal recovery and replacement decisions for commercial lighting waste management[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104846.
- [62] Dong D, van Oers L, Tukker A, et al. Assessing the future environmental impacts of copper production in China: Implications of the energy transition[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122825.
- [63] Guinée J B, Heijungs R, Huppes G, et al. Life cycle assessment: Past, present, and future[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(1): 90–96.
- [64] Onat N C, Kucukvar M, Tatari O, et al. Integration of system dynamics approach toward deepening and broadening the life cycle sustainability assessment framework: A case for electric vehicles [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, 21 (7): 1009–1034.
- [65] Cusenza M A, Bobba S, Ardente F, et al. Energy and environmental assessment of a traction lithium-ion battery pack for plug-in hybrid electric vehicles[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215(4): 634–649.

2023年1月

- [66] Li F, Xu Z, Ma H. Can China achieve its CO₂ emissions peak by 2030? [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 84(1): 337–344.
- [67] Liu L W, Zong H J, Zhao E D, et al. Can China realize its carbon emission reduction goal in 2020: From the perspective of thermal power development [J]. *Applied Energy*, 2014, 124: 199–212.
- [68] Kang J D, Ng T S, Su B. Optimizing electricity mix for CO₂ emissions reduction: A robust input–output linear programming model [J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 287(1): 280–292.
- [69] Yue T, Long R Y, Chen H, et al. The optimal CO₂ emissions reduction path in Jiangsu Province: An expanded IPAT approach [J]. *Applied Energy*, 2013, 112: 1510–1517.
- [70] Long R Y, Yang R R, Song M L, et al. Measurement and calculation of carbon intensity based on ImPACT model and scenario analysis: A case of three regions of Jiangsu Province [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 51: 180–190.
- [71] Xie P, Liao J, Pan X, et al. Will China's carbon intensity achieve its policy goals by 2030? Dynamic scenario analysis based on STIRPAT–PLS framework [J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155060.
- [72] Niu D, Wang K, Wu J, et al. Can China achieve its 2030 carbon emissions commitment? Scenario analysis based on an improved general regression neural network [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118558.
- [73] 刘刚, 曹植, 王鹤鸣, 等. 推进物质流和社会经济代谢研究, 助力实现联合国可持续发展目标 [J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(1): 30–39. [Liu G, Cao Z, Wang H M, et al. Promoting material flow and socioeconomic metabolism analysis for achieving UN 2030 sustainable development goals [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(1): 30–39.]
- [74] 陈伟强, 石磊, 钱易. 2005年中国国家尺度的铝物质流分析 [J]. *资源科学*, 2008, (9): 1320–1326. [Chen W Q, Shi L, Qian Y. Aluminium substance flow analysis for mainland China in 2005 [J]. *Resources Science*, 2008, (9): 1320–1326.]
- [75] Liu W, Liu W, Li X, et al. Dynamic material flow analysis of critical metals for lithium–ion battery system in China from 2000–2018 [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105122.
- [76] Graedel T E. Material flow analysis from origin to evolution [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(21): 12188–12196.
- [77] Glöser S, Soulier M, Espinoza L T. Dynamic analysis of global copper flows. global stocks, postconsumer material flows, recycling indicators, and uncertainty evaluation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(12): 6564–6572.
- [78] 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.
- [79] Duan L L, Liu Y P, Yang Y, et al. Spatiotemporal dynamics of in-use copper stocks in the Jing–Jin–Ji urban agglomeration, China [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105848.
- [80] Gerst M D, Graedel T E. In-use stocks of metals: Status and implications [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(19): 7038–7045.
- [81] Müller E, Hilty L M, Widmer R, et al. Modeling metal stocks and flows: A review of dynamic material flow analysis methods [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(4): 2102–2113.
- [82] 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. [Song H L, Wang C, Zuo L S. Review and prospects of the availability constraints of critical byproduct metals for clean energy technologies in the context of carbon neutrality goal [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(3): 38–48.]
- [83] 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 & Recycling*, 2018, 132: 28–36.
- [84] 柳群义. 基于“S”形模型的全球铜需求分析 [J]. *中国矿业*, 2019, 28(10): 61–68. [Liu Q Y. Global copper demand based on S-shape model [J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(10): 61–68.]
- [85] 代涛, 陈其慎, 于汶加. 全球锌消费及需求预测与中国锌产业发展 [J]. *资源科学*, 2015, 37(5): 951–960. [Dai T, Chen Q S, Yu W J. Global zinc consumption and demand forecast and development of China's zinc industry [J]. *Resources Science*, 2015, 37(5): 951–960.]
- [86] Ma W, Zhu X, Wang M. Forecasting iron ore import and consumption of China using grey model optimized by particle swarm optimization algorithm [J]. *Resources Policy*, 2013, 38(4): 613–620.
- [87] Tisserant A, Pauliuk S. Matching global cobalt demand under different scenarios for co-production and mining attractiveness [J]. *Journal of Economic Structures*, 2016, 5: 1–19.
- [88] 张若然, 陈其慎, 柳群义, 等. 全球主要铂族金属需求预测及供需形势分析 [J]. *资源科学*, 2015, 37(5): 1018–1029. [Zhang R R, Chen Q S, Liu Q Y, et al. World demand and analysis of supply and demand of platinum–group metals [J]. *Resources Science*, 2015, 37(5): 1018–1029.]
- [89] 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.
- [90] Ren K P, Tang X, Höök M. Evaluating metal constraints for photovoltaics: Perspectives from China's PV development [J]. *Applied Energy*, 2021, DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116148.
- [91] 张亚斌, 李鹏远, 李天骄, 等. 基于Hubbert模型的中国锑矿生产峰值研究 [J]. *中国矿业*, 2019, 28(8): 66–71. [Zhang Y B, Li P

- Y, Li T J, et al. Peak production of antimony ore in China based on the Hubbert model[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(8): 66–71.]
- [92] 李天骄, 梁海峰, 李建武, 等. 基于 Hubbert 峰值模型的中国有色金属产量峰值研究[J]. 中国矿业, 2019, 28(7): 75–80. [Li T J, Liang H F, Li J W, et al. Research on maximum production peak of nonferrous metals based on the Hubbert's peak model[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(7): 75–80.]
- [93] Sverdrup H U. Modelling global extraction, supply, price and depletion of the extractable geological resources with the LITHIUM model[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2016, 114: 112–129.
- [94] 王昶, 秦雅, 邵留国, 等. 基于系统动力学的清洁能源技术关键伴生金属可供性研究: 以镓为例[J]. 系统工程, 2018, 36(4): 116–127. [Wang C, Qin Y, Shao L G, et al. Key associated materials availability in clean energy technologies based on system dynamics: The case study of gallium[J]. Systems Engineering, 2018, 36(5): 116–127.]
- [95] Cao Y, Guo L L, Qu Y. Evaluating the dynamic effects of mitigation instruments on CO₂ emissions in China's nonferrous metal industry: A vector autoregression analysis[J]. The Science of the Total Environment, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158409.
- [96] Elshkaki A, Graedel T E, Ciacchi L, et al. Copper demand, supply, and associated energy use to 2050[J]. Global Environmental Change, 2016, 39: 305–315.
- [97] Viebahn P, Soukup O, Samadi S, et al. Assessing the need for critical minerals to shift the German energy system towards a high proportion of renewables[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 49: 655–671.
- [98] Zhong X, Hu M, Deetman S, et al. Global greenhouse gas emissions from residential and commercial building materials and mitigation strategies to 2060[J]. Nature Communications, 2021, DOI: 10.1038/s41467-021-26212-z.
- [99] Dong D, Tukker A, Voet E V d. Modeling copper demand in China up to 2050: A business-as-usual scenario based on dynamic stock and flow analysis[J]. Journal of Industrial Ecology, 2019, 23(6): 1363–1380.
- [100] Lovik A N, Restrepo E, Muller D B. The global anthropogenic gallium system: Determinants of demand, supply and efficiency improvements[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(9): 5704–5712.
- [101] Zhu R Q, Lin B Q. Energy and carbon performance improvement in China's mining Industry: Evidence from the 11th and 12th five-year plan[J]. Energy Policy, 2021, DOI: 10.1016/j.enpol.2021.112312.
- [102] Whitworth A J, Forbes E, Verster I, et al. Review on advances in mineral processing technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes[J]. Cleaner Engineering and Technology, 2022, DOI: 10.1016/j.clet.2022.100451.
- [103] Barnewold L, Lottermoser B G. Identification of digital technologies and digitalisation trends in the mining industry[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2020, 30(6): 747–757.
- [104] Elshkaki A. Sustainability of emerging energy and transportation technologies is impacted by the coexistence of minerals in nature[J]. Communications Earth & Environment, 2021, 2(1): 186.
- [105] Alexander C, Johto H, Lindgren M, et al. Comparison of environmental performance of modern copper smelting technologies[J]. Cleaner Environmental Systems, 2021, DOI: 10.1016/j.cesys.2021.100052.
- [106] Zhang W J, Li H Q, Chen B, et al. CO₂ emission and mitigation potential estimations of China's primary aluminum industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 863–872.
- [107] Azadi M, Northey S A, Ali S H, et al. Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation[J]. Nature Geoscience, 2020, 13(2): 100–104.
- [108] Harpprecht C, Oers L, Northey S A, et al. Environmental impacts of key metals' supply and low-carbon technologies are likely to decrease in the future[J]. Journal of Industrial Ecology, 2021, 25(6): 1543–1559.
- [109] Yang Z Y, Yang Z D, Yang S, et al. Life cycle assessment and cost analysis for copper hydrometallurgy industry in China[J]. Journal of Environmental Management, 2022, DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114689.
- [110] 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.
- [111] 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.
- [112] Schafer P, Schmidt M. Discrete-Point analysis of the energy demand of primary versus secondary metal production[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(1): 507–516.
- [113] Wang T, Berrill P, Zimmerman J B, et al. Copper recycling flow model for the United States economy: Impact of scrap quality on potential energy benefit[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(8): 5485–5495.
- [114] Graedel T E, Reck B K, Miatto A. Alloy information helps prioritize material criticality lists[J]. Nature Communications, 2022, DOI: 10.1038/s41467-021-27829-w.
- [115] 王翹楚, 孙鑫, 郝瀚, 等. 锂的城市矿产利用: 前景、挑战及政策建议[J]. 科技导报, 2020, 38(15): 6–15. [Wang Q C, Sun X, Hao H, et al. Urban mining of lithium: Prospects, challenges and policy

- recommendations[J]. *Science and Technology Review*, 2020, 38 (15): 6–15.]
- [116] Zhang F, Ding Y Z, Deng X Z, et al. Prediction of China's copper material flows under carbon emissions projections for the shared socioeconomic pathways[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2022, DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106340.
- [117] Rademaker J H, Kleijn R, Yang Y X. Recycling as a strategy against rare earth element criticality: A systemic evaluation of the potential yield of NdFeB magnet recycling[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(18): 10129–10136.
- [118] Heath G A, Silverman T J, Kempe M, et al. Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy[J]. *Nature Energy*, 2020, 5(7): 502–510.
- [119] Meshram P, Pandey B D, Abhilash. Perspective of availability and sustainable recycling prospects of metals in rechargeable batteries: A resource overview[J]. *Resources Policy*, 2019, 60: 9–22.
- [120] Lin J, Zhang X D, Cai L, et al. Recycling of rechargeable batteries: Insights from a bibliometrics-based analysis of emerging publishing and research trends[J]. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 2021, DOI: 10.1002/aesr.202100153.

A review and prospect of research on carbon emissions from the critical metal industry chain under clean energy transition

ZHU Xuehong^{1,2}, LI Shuangmei^{1,2}, ZENG Anqi^{2,3}

(1. School of Business, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Institute of Metal Resources Strategy, Central South University, Changsha 410083, China; 3. School of Marxism, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: [Objective] Under the background of achieving global carbon neutrality, clean energy technologies are booming and the demand for critical metals and the industrial carbon emissions will rise sharply. **[Methods]** To further clarify the driving mechanism, methodological framework, and carbon emission reduction pathways of the critical metal industry chain under the clean energy transition, this study systematically reviewed and integrated the relevant research from the perspectives of systematic nexus and the whole industry chain. **[Results]** We found that clean energy transition induces the terminal demand for critical metals from the demand side and reduces the carbon emission intensity from the supply side, which jointly drive the industrial carbon emissions; it is required to integrate a variety of methods and models to calculate and predict the carbon emissions of the critical metal industry chain, and we should select suitable research methods according to the research objects; existing research mainly focuses on carbon emission reduction pathways in the smelting and recycling stages, and has not systematically identified the pathways from the viewpoint of the whole industry chain yet. **[Conclusion]** In the future, based on the metal-energy-carbon nexus theory and integrated methods, it is necessary to further verify the internal mechanism and study the trends of carbon emissions in the critical metal industry chain. Furthermore, it is essential to systematically design and identify the carbon reduction pathways from the whole industry chain with the “China factor” incorporated, providing a realistic basis and decision-making reference for achieving the goal of carbon neutrality.

Key words: clean energy transition; critical metals; carbon emissions; systematic nexus perspective; whole industry chain