

doi: 10.12029/gc20210605

王欢, 马冰, 贾凌霄, 于洋, 胡嘉修, 王为. 2021. 碳中和目标下关键矿产在清洁能源转型中的作用、供需分析及其建议[J]. 中国地质, 48(6): 1720–1733.

Wang Huan, Ma Bing, Jia Lingxiao, Yu Yang, Hu Jiaxiu, Wang Wei. 2021. The role, supply and demand of critical minerals in the clean energy transition under carbon neutrality targets and their recommendations [J]. *Geology in China*, 48(6):1720–1733 (in Chinese with English abstract).

碳中和目标下关键矿产在清洁能源转型中的作用、 供需分析及其建议

王欢¹, 马冰¹, 贾凌霄¹, 于洋¹, 胡嘉修², 王为³

(1. 中国地质调查局地学文献中心, 中国地质图书馆, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 10083; 3. 东方地球物理公司, 河北涿州 072751)

摘要:在“碳中和”目标的驱动下, 全球能源系统向清洁化、低碳化甚至无碳化发展已是大势所趋。针对向清洁能源转型的需求, 采用了统计对比、分类汇总、综合分析等方法, 分析研究了关键矿产在电池、电网、低碳发电和氢能等行业中的作用和需求。结合当前关键矿产产量的地理集中度高、项目开发周期长、资源质量下降等矿产供应和投资计划不能满足清洁能源转型的需求等问题, 提出确保关键矿产多样性供应, 推动价值链各环节的技术创新, 扩大回收利用, 增强供应链弹性和市场透明度, 将更高的环境、社会和治理标准纳入主流程及加强生产者与消费者之间的国际合作等建议。

关键词:关键矿产; 清洁能源转型; 矿产需求; 碳中和; 气候变化; 矿产勘查工程

中图分类号: F426.1; TD98 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)06-1720-14

The role, supply and demand of critical minerals in the clean energy transition under carbon neutrality targets and their recommendations

WANG Huan¹, MA Bing¹, JIA Lingxiao¹, YU Yang¹, HU Jiaxiu², WANG Wei³

(1. *Geoscience Documentation Center, CGS, National Geological Library of China, Beijing 100083, China*; 2. *School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*; 3. *Bureau of Geophysical Prospecting, Zhuozhou 072751, Hebei, China*)

Abstract: Driven by the goal of "carbon neutrality", it is a general trend for the global energy system to develop towards cleaner, low-carbon or even carbon-free. In response to the demand for the transition to clean energy, the methods of statistical comparison, classified summary and comprehensive analysis are adopted to analyze and study the role and demand of critical minerals in department such as batteries, electricity networks, low-carbon power generation and hydrogen. Combined with the problems, such as high geographical concentration of current critical mineral output, long cycle of project development, and decline in resource

收稿日期: 2021-08-19; 改回日期: 2021-11-12

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190414)资助。

作者简介: 王欢, 女, 1985年生, 工程师, 从事矿产资源管理研究; E-mail: whuan@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 马冰, 女, 1967年生, 研究员, 从事矿产资源管理研究; E-mail: mabing@mail.cgs.gov.cn。

quality, that cannot meet the needs of clean energy transition, it is proposed to ensure the diversified supply of key minerals, promote technological innovation in all links of the value chain, scale up recycling, enhance supply chain resilience and market transparency. It is suggested to mainstream higher environmental, social and governance standards into the main process, and strengthen international collaboration between producers and consumers.

Key words: critical minerals; clean energy transition; mineral demand; carbon neutralization; climate change; mineral exploration engineering

About the first author: WANG Huan, female, born in 1985, engineer, engaged in mineral resources management research; E-mail: whuan@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: MA Bing, female, born in 1967, professor, engaged in mineral resources management research; E-mail: mabing@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190414).

1 引言

为了应对气候变化这一重大而紧迫的全球性挑战,在“碳中和”目标的驱动下,全球能源系统向清洁化、低碳化甚至无碳化发展已是大势所趋(汪鹏等,2021)。碳中和愿景下能源转型的核心是零碳、低碳能源对高碳能源的逐步替代,是非化石能源消费比重的大幅度提高,这将深度改变未来能源系统(林卫斌等,2021)。为了实现碳中和,未来将会始终坚持清洁能源、绿色能源发展,太阳能将会是能源行业的主要能源结构,其次是风能、潮汐能等清洁能源,可再生能源将会是实现“碳中和”目标第一大贡献力量(强海洋等,2021)。另外,氢能及其他能源结构将会成为辅助,而化石能源消费占比将会逐渐降低,直至与清洁能源的平衡予以实现碳中和大趋势。

向清洁能源系统转型将推动越来越多的国家广泛部署清洁能源技术,其中许多技术反过来依赖于铜、锂、镍、钴和稀土元素等关键矿产,在风力发电机、太阳能电池板、电解储氢、动力电池等低碳技术产品中,锂、钴、镍、镓、铟、稀土、铂等金属发挥了关键作用,被认为是支撑低碳产业发展不可或缺的物质基础(Eggert,2011;MRS/APS,2011)。

西方国家对关键矿产的关注起步很早,这源于在第一次、第二次世界大战中关键矿产所发挥的“关键性”作用(郭娟等,2021)。这一概念最早出现在1938年,美国政府决定为42种具有军事意义的原材料建立库存(NRC,2008)。目前,关键矿产在国际上并没有统一的定义或概念,通常各国或组织根据其经济的重要性和供应风险等因素来厘定。

中国厘定关键矿产的原则有5点:(1)对国家具有重大战略意义的矿产;(2)经济意义大且大量依赖进口的矿产;(3)对战略性新兴产业具有关键作用且大量依赖进口的矿产;(4)具有较强国际市场优势的矿产;(5)其他需要国家强化管理的矿产(陈其慎等,2021)。2016年,国土资源部在《全国矿产资源规划(2016—2020年)》中,将石油、天然气等24种矿产列入关键矿产目录。自然资源部根据目前国内的资源现状和供需形势,为确保中国未来新兴高技术产业高质量可持续发展,初步厘定出了包含有36种关键矿产的清单,并将其中的铁、铜、铝、锰、油气、铬、钴、铌、钽、锆、锂、镍等12种矿产列为中国特别紧缺的关键矿产(李光明等,2021)。中国有32种矿产资源消费量居世界第一,钨、锑、锰、钴等24种消费量占比超过全球的40%,近年来中国大量进口铁、铜、铝等矿产品,17种关键矿产对外依存度超过40%(图1)(王登红等,2013)。

在国际上,美国将关键矿产(Critical Minerals)定义为:(1)由内政部长联合其他部门根据《美国矿产安全法》确定的;(2)对美国经济和国家安全至关重要的非燃料矿产;(3)供应链易受破坏并且在关键产品制造具有重要功能,一旦短缺会对国民经济和国家安全具有重大影响(陈其慎等,2021)。美国确定的关键矿产清单包括(35种):铝、锑、砷、重晶石、铍、铋、铯、铬、钴、萤石、镓、锆、天然石墨、钆、氦气、铟、锂、镁、锰、铌、铂族、钾盐、稀土、铼、铷、铉、铪、铈、钽、铊、铋、锡、钛、钨、钼、钒和锆。在这35种关键矿产中,有31种依赖进口(指进口量大于每年消费量的50%)。美国没有任何国内产量,完全依靠进口来满足其需求的关键矿产有14种。

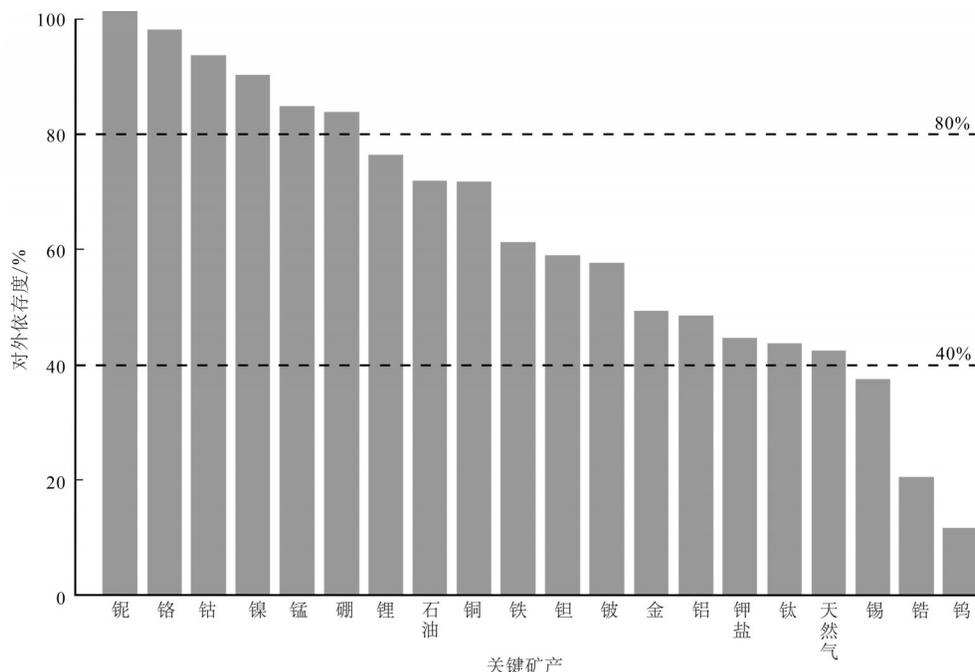


图1 2018年中国部分关键矿产对外依存度(据翟明国等,2021修改)

Fig.1 External dependence of some critical minerals in China in 2018 (modified from Zhai Mingguo et al., 2021)

欧盟将关键矿产(Critical Raw Materials)定义为由于地缘政治因素、供应国环境约束因素等造成供应中断后,难以替代或难以循环利用的,对国民经济产生重大影响的物资(陈其慎等,2021)。评估时主要参考2类参数:(1)矿产的经济重要性;(2)该种矿产面临的供应风险。欧盟于1975年将钨、锰、铬、磷酸盐、铂等矿产确定为受关注的原材料,这可视为欧洲主要国家最早的关键矿产清单(张家林等,2021)。2011年发布涉及14种原材料的《关键矿产清单》,2014年增至20种,2017年增至27种。2020年欧盟确定的关键矿产清单30种,包括:锑、钽、钛、铍、铋、钒、钨、钨、镓、锗、铟、铀、锂、铈、重稀土元素、轻稀土元素、铂族金属、镁、铝土矿、金属硅、磷、萤石、重晶石、硼酸盐、磷酸盐岩、天然石墨、焦煤及天然橡胶(王欢,2021)。中国是欧盟的主要供应国,占欧盟矿产供应的44%,其他几个国家在欧盟关键矿产供应中也具有重要地位,例如巴西(铌),智利(锂)和墨西哥(萤石),见图2。

关键矿产在风力涡轮机、太阳能电池板、电动汽车等当今广泛使用的许多清洁能源技术中发挥了关键作用。随着清洁能源的转型,矿产与能源之间的联系将得到加强。然而,是否有足够的可持续的矿产供

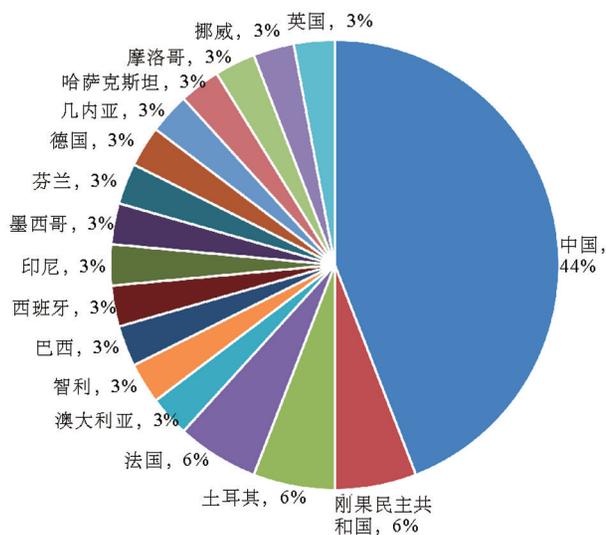


图2 欧盟关键矿产的主要供应国(EU, 2020)

Fig.2 Main global supply countries of critical minerals in the EU(2020)

应来支持能源转型的加速? 清洁能源转型将对矿业部门带来什么样的影响? 基于这些问题,本文在清洁能源转型对关键矿产的需求、关键矿产在清洁能源转型中的作用等方面开展研究,以期为关键矿产资源的未来开发和利用提供决策依据。

2 关键矿产在清洁能源转型中的作用

Grandell et al.(2016)指出,能源与金属资源之间存在十分紧密的联系,能源产业发展离不开金属资源的保障。关键矿产在当今广泛使用的许多清洁能源技术中发挥了关键作用——从风力涡轮机和太阳能电池板到电动汽车和储能。锂、镍、钴、锰和石墨对于电池技术至关重要,稀土元素对于风力涡轮机和电动汽车发动机中的永磁体必不可少,而铜则是所有电力相关技术的“基石”,氢电解器和燃料电池根据技术类型需要镍或铂族金属,表1展示部分关键矿产在各种清洁能源技术中的重要性。随着清洁能源技术部署的增加,关键矿产在清洁能源转型中的作用也在不断加大,与传统能源相比,清洁能源对关键矿产资源的依赖明显增强(徐德义等,2020)。

2.1 关键矿产是电池储能发展的基础

锂、镍、钴、石墨等关键矿产是电池技术必不可

表1 关键矿产在清洁能源技术中的重要性(IEA,2021)
Table 1 The importance of critical minerals in clean energy technology (IEA, 2021)

	铜	钴	镍	锂	稀土元素	铬	锌	铂族金属	铝
太阳能光伏	●	○	○	○	○	○	○	○	●
风能	●	○	●	○	●	●	○	○	●
水能	●	○	○	○	○	●	●	○	●
太阳能集中发电	●	○	●	○	○	●	●	○	●
生物质能	●	○	○	○	○	○	●	○	●
地热能	○	○	●	○	○	●	○	○	○
核能	●	○	●	○	○	●	○	○	○
电网	●	○	○	○	○	○	○	○	●
电动汽车和储能	●	●	●	●	●	○	○	○	●
氢能	○	○	●	○	●	○	○	●	●

注:阴影表示矿产对特定清洁能源技术的相对重要性(●=高;●=中等;○=低)。

少的组成部分。依靠可再生能源、电动汽车、储能等低碳技术推动的清洁能源转型对电池的需求正不断攀升,众所周知锂电是实现零排放的最佳能源(刘帅,2019),锂离子电池由电池模块中的电池芯组成,电池芯通常占电池总重量的70%~85%,并在活性阴极材料(如锂、镍、钴和锰)、阳极(如石墨)和集电器(如铜)中含有大量矿物质(ANL,2020a)。其余模块和组件主要由铝、钢、冷却剂和电子部件组成。铅酸电池的阳极材料主要为铅-锑-钙合金栏板,内含氧化铅为活性物质,阴极材料主要为铅-锑-钙合金栏板,在电池的电化学反应中,硫酸作为电解液传导离子(表2)。

2.2 关键矿产在低碳发电技术中必不可少

铜、铁、稀土元素等关键矿产大量应用于涡轮机。涡轮机的主要部件(塔架、铸件、机舱、转轴等)主要由钢制成。叶片由玻璃纤维、树脂、轻木和黏合剂的复合材料(有些使用碳纤维)制成。齿轮式涡轮机的发电机绝大多数是双馈感应发电机,使用大量的铜和铁,直驱式风力涡轮机使用永磁发电机,除需要钕(0.25~0.50 kg/辆)和其他稀土元素(0.06~0.35 kg/辆)外,还需要铜(3~6 kg/辆)、铁(0.9~2 kg/辆)和硼(0.01~0.03 kg/辆)(Sprecher et al.,2014;Fishman et al.,2018;Ballinger et al.,2019;Nordelöf et al.,2019)。表3列出了一些关键矿产的应用领域。

太阳能光伏子技术包括:(1)晶体硅电池,可以采用单晶硅、多晶硅或非晶硅制成;(2)硒化铜铜镓,是一种“薄膜”太阳能技术;(3)碲化镉是另一种薄膜技术,与晶体硅相比,它具有成本优势和良好的效率;(4)非晶硅太阳能电池是最终的薄膜技术,其性能虽比晶体硅差,但能够印刷在柔性材料上。

表2 锂电池、铅酸电池的子技术及用途(据World Bank,2020)

Table 2 Sub-technologies and applications of lithium batteries and lead-acid batteries (from World Bank, 2020)

	阴极	阳极	电解质	用途
锂离子电池	各类矿物质:			电动汽车、固定式储能、医疗设备、电动自行车 便携式电子设备 电动工具、医疗设备 电动汽车、电动公交车、固定式储能
	● 镍锰钴氧化物		石墨	
	● 镍钴铝氧化物			
	● 锂钴氧化物			
	● 锂锰氧化物			
● 磷酸铁锂				
铅酸电池	二氧化铅	铅	硫酸	车辆、备用电源系统、固定式储能

表3 关键矿产的应用领域
Table 3 Application fields of critical minerals

关键矿产	应用领域
稀土	电动汽车、风能
铜	太阳能光伏
铂族金属	氢能
钴	储能
锂	储能
铝	太阳能光伏、风能
石墨	储能
铜	太阳能光伏、风能、水能
镍	储能、地热

铝、铜和银是太阳能光伏技术的主要构成矿产，铝是太阳能光伏技术的主要贡献者，既用于电池本身，也用于框架和附件，最大的用途是晶体硅电池。铜是另一种几乎专门用于太阳能光伏发电的关键矿产，主要用于硒化铜钢镓太阳能电池，硅、镓和碲等矿产在太阳能电池中也必不可少。

地热发电是利用地下热水和蒸汽为动力源的一种新型发电技术。其基本原理与火力发电类似，也是根据能量转换原理，首先把地热能转换为机械能，再把机械能转换为电能。地热储层的高温和潜在腐蚀性要求使用专用钢承受恶劣的工作环境，镍、铬、钼和钛是专用钢材料。此外，铜、锰、镍和钛在水电和生物质能发电中也发挥重要作用。

2.3 铂族金属助力氢能经济

在全球的清洁能源转型中，氢燃料电池被认为是最重要的渠道之一。铂族金属在质子交换膜燃

料电池(PEMFC)应用中,可以对氢气进行催化反应来发电。铂族金属是氢燃料电池产业唯一具备规模化生产能力的催化剂材料,在燃料电池系统中发挥着不可替代的作用。

铂金不仅在燃料电池中助推氢能经济发展,它还用于绿氢的生产。电解水制氢是最常见的制氢方法,在这个过程中,电流被用来将水分离成其组成元素氢和氧。当电流来自可再生能源时,它生产的氢气被称为绿氢。铂金在这种绿色的制氢方式中扮演着重要的角色,在电解水过程中作为催化剂,提供商业规模的电解水生产系统所必需的性能和耐久性。此外,铂族金属中的铂、钯、铑被广泛应用于汽车尾气催化转换器以降低有害的尾气排放。

2.4 铜和铝是电缆的主要材料

电网材料的选择主要取决于电线的类型,铜和铝是电线和电缆的主要材料,有些还用于变压器。铜广泛用于地下和海底电缆,这些电缆要求具有优良的技术性能(耐腐蚀性、抗拉强度);铝通常用于架空线路,在某些情况下,也用于地下和海底电缆。

在关键矿产生产的过程中也会产生大量的碳排放,即使是这样的情况,清洁能源技术的气候优势仍然十分明显(图3)。为应对气候变化,全球都在加大部署太阳能、风能、电动汽车等清洁能源技术,随之而来的是对关键矿产需求的大幅增长。

3 关键矿产需求

以清洁能源技术驱动的能量系统,与以传统碳

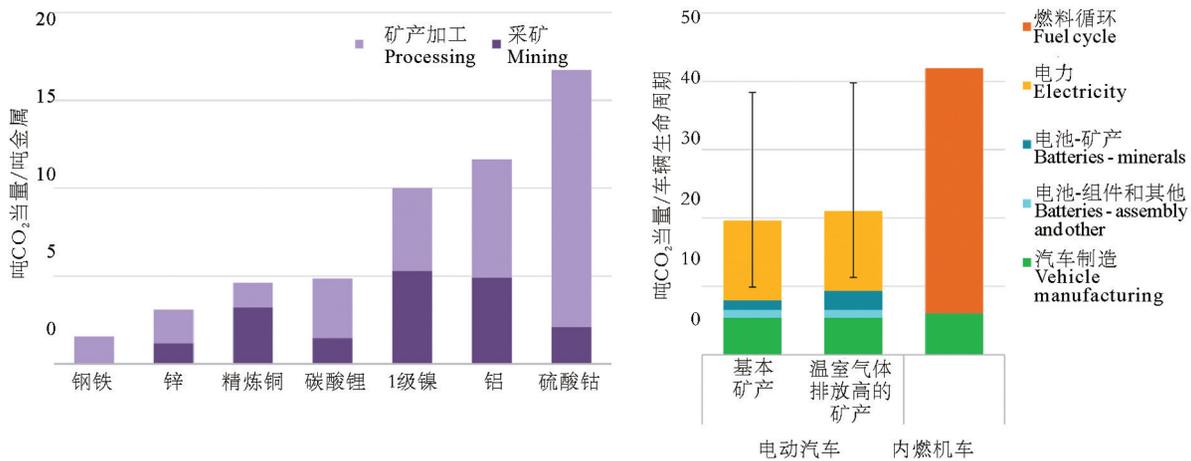


图3 某些矿产品生产的平均温室气体排放强度与一辆电动汽车和一辆内燃机车在生命周期内的温室气体排放量(IEA, 2021)
Fig.3 Average GHG emissions intensity for production of selected commodities and life-cycle GHG emissions of a BEV and ICE vehicle(IEA, 2021)

氢化合物资源为燃料的能源系统截然不同。建造太阳能光伏(PV)发电厂、风电场和电动汽车(EV)通常比基于化石燃料的发电厂需要更多的矿产。一辆典型的电动汽车所需的矿产资源是传统汽车的6倍,而一座陆上风力发电厂所需的矿产资源是燃气发电厂的9倍多(IEA,2021)。全球清洁能源转型将对未来20年的矿产需求产生深远影响。IEA预计,到2040年,清洁能源技术对矿产的总需求量在基准政策情景(STEPS)中翻一番,在可持续发展情景(SDS)中翻四番。作为能源转型的一部分,清洁能源技术的快速部署意味着矿产需求显著增加(马冰等,2021),如图4所示。2020年5月世界银行发布的《气候变化行动所需的矿产资源——清洁能源转型的矿产耗用强度》报告显示,在2°C情景(2DS)下,到2050年,石墨、锂和钴的产量将需要比2018年水平大幅度增加450%以上,才能满足储能技术的需求,基础矿产铝和铜到2050年分别需要增加的产量为1.03亿t和2900万t。这些预测不包括支持部署这些技术所需要的相关基础设施(例如:输电线路)或实体零部件(例如:新生产电动汽车的底盘)。图5显示的是到2050年,在国际可再生能源署(IRENA)的可再生能源路线图情景(REmap)和国际能源署(IEA)的4°C情景(4DS)和2°C以内情景(B2DS)下,发电技术对矿产的累积总需求量。

3.1 电池的矿产需求

根据IEA的估计,2020—2040年随着清洁能源

技术的增长,推动电池材料需求的激增。在SDS中:电动汽车的电池需求在2020年(160 GWh)和2040年(6200 GWh)之间将增长近40倍。在SDS中,2020年至2040年间,矿产的总体需求将增长30倍,从40万t增加到1180万t;镍需求量将增长41倍,达到330万t,而钴需求量仅增长21倍,锂需求增长43倍,铜需求增长28倍,石墨需求量增长25倍,从2020年的14万t增加到2040年的350万t以上。硅的需求量相对增长最大,将超过460倍,因为掺硅石墨阳极的份额从2020年的1%增长到2040年的15%。稀土需求量增长15倍,到2040年的3.5万t。在STEPS中,电动汽车的电池需求在2040年将仅增长11倍,达到近1800 GWh,而矿产需求在2040年将增长9倍,达到约35万t。

3.2 电网的矿产需求

随着能源转型加速,能源部门成为矿产资源的一个主要消费行业。不断增长的电力需求,以及更高比例的风能和太阳能光伏,需要大幅扩大电网(图6)。电网是另一个主要驱动力,它们占当今能源技术矿产需求的70%。在IEA的研究中,尽管随着其他技术(最显著的是电动汽车和存储技术)的快速增长,它们的份额将继续下降。

2021—2030年,STEPS中对全球新输电线路的预计需求将比过去2011—2020年的扩张高出80%。在能源转型速度更快的情况下,电网的重要性甚至更大。在STEPS中,电网的年铜需求量从

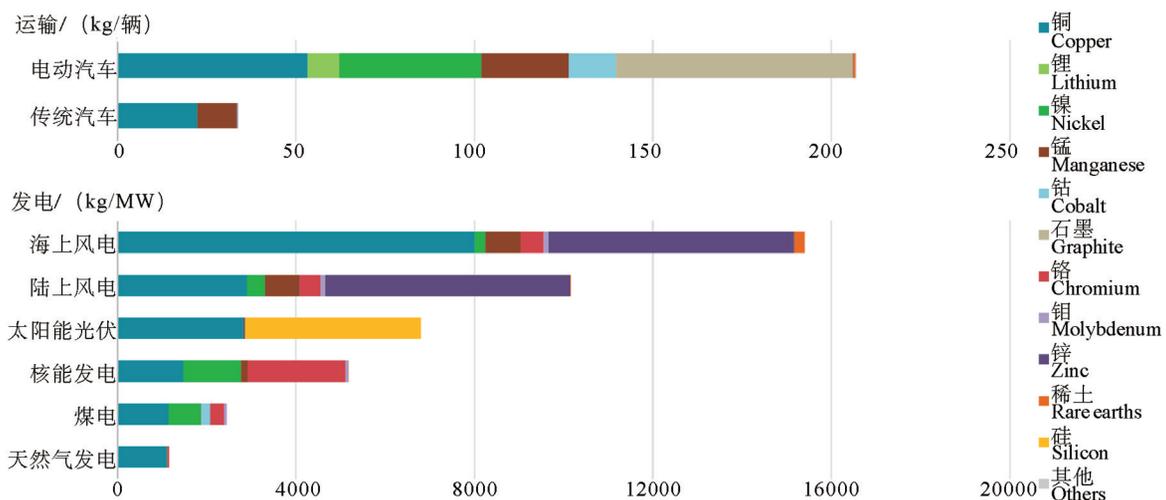


图4 用于某些清洁能源技术的矿产(IEA,2021)

Fig.4 Minerals used in the selected clean energy technologies(IEA,2021)

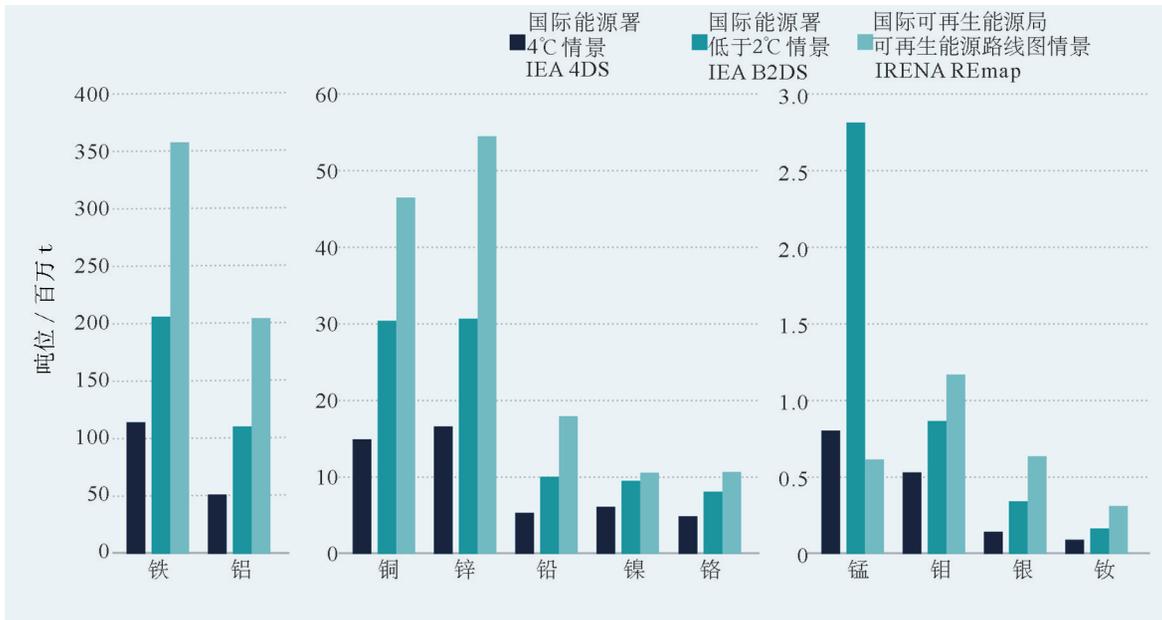


图5 到2050年,4DS、B2DS和REmap下能源技术(不含储能)对某些矿产的累积需求量(世界银行,2020)
 Fig.5 Cumulative demand for certain minerals from energy technologies (excluding energy storage) under 4DS, B2DS and REmap by 2050 (World Bank, 2020)

2020年的500万t增长到2040年的750万t,在SDS中增长一倍多,达到近1000万t。铝需求以类似的年增长速度增长,从2020年的900万t增加到2030年的1300万t,到2040年的SDS增加到1600万t(图7)。

3.3 低碳发电的矿产需求

低碳发电对矿产的需求快速增长,到2040年

STEPS下将翻一番,SDS下将翻近3倍(IEA, 2021)。由于大规模扩容和更高的矿产耗用强度(特别是矿产密集型海上风电的贡献不断增加),风力发电在推动需求增长方面发挥了主导作用。太阳能光伏紧随其后,在低碳发电技术中,其容量增加的规模无与伦比。水电、生物质能和核能的矿产

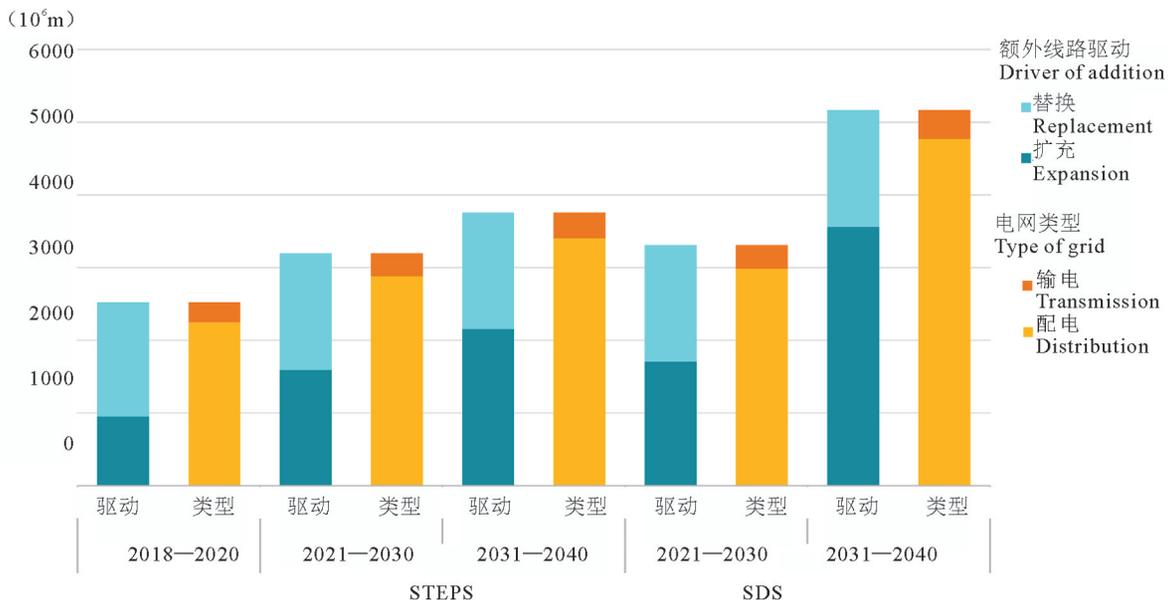


图6 按情景划分的年平均电网扩建和更换需求(IEA, 2021)
 Fig.6 Annual average grid expansion and replacement needs by scenario(IEA, 2021)

需求相对较低,且发电量增加不大,因此它们对矿产需求的贡献很小。到2040年,为实现气候目标,清洁能源技术所需矿产的需求量将至少增加4倍,电动汽车相关矿产需求量的增幅尤其高(图8)。

受新兴经济体巨大增长的推动,到2040年,太阳能光伏在SDS的年部署量将增加3倍。太阳能光伏发电厂的矿产耗用强度的差异主要来自组件类型的差异。晶体硅(c-Si)组件已成为主要的光伏技术,其次是“薄膜”替代品:碲化镉(CdTe)、铜铟镓硒(CIGS)和非晶硅(a-Si)(郭慧等,2018)。按重量计,c-Si光伏电池板通常含有约5%的硅(太阳能电池)、1%的铜(互连器)以及少于0.1%的银和其他金属(IRENA,2016)。薄膜技术需要更多的玻璃,但总的来说比c-Si需要更少的矿物质。CdTe和CIGS面板不使用银或硅,而是需要镉和碲(CdTe)或铜、镓和硒(CIGS)。分布式太阳能光伏系统倾向于使用串级逆变器或微型逆变器,比通常使用中央逆变器的实用规模项目需要多约40%的铜。

在SDS中,2040年的新增产能是2020年的3倍,导致太阳能光伏对铜的需求几乎增加了3倍。矿产耗用强度的降低有助于显著抑制对银和硅的需求增长。尽管年新增产能较高,但2040年对银和硅的需求比2020年高18%和45%。

2010—2019年,全球风力发电装机容量几乎翻了两番,原因是成本下降(全球平均下降约40%)以

及130多个国家的政策支持(IEA,2020)。在STEPS和SDS中,风力发电将实现强劲增长,海上风电行业在技术改进和低成本融资的支持下日趋成熟,并增加了陆上风电的发展。预计到2040年,SDS的风电年装机容量将增加一倍以上,达到160 GW,占新增总发电容量的五分之一以上。

风力涡轮机是由混凝土、钢、铁、玻璃纤维、聚合物、铝、铜、锌和稀土等组成的。在IEA的SDS中,风力发电中稀土元素的需求(特别是钕和镨)预计到2040年将增长3倍以上,这是由于年新增发电量将翻一番以及转向使用永久磁铁的涡轮机导致的。2040年,由于需要更多电缆的海上风电,铜需求量将达到每年60万t。尽管海上风电仅占风力发电新增总容量的20%,但其铜需求量占风力发电铜需求量的近40%。

在SDS中,2020—2040年,地热发电的矿产需求增加了4倍多。尽管地热发电占2040年所有低碳发电容量增加量的不到1%,但地热发电是电力部门对镍、铬、钼和钛需求的主要来源。在2040年所有低碳能源的总矿产需求中,地热占镍需求的四分之三,占铬和钼总需求的近一半,占钛需求的40%(IEA,2021)。

水电和生物质能,对矿产需求的影响有限,虽然水力发电使用的水泥和混凝土比其他任何发电技术都要多,但与其他低碳能源相比,它的矿产耗



图7 不同情景下电网的铜、铝需求(IEA,2021)

Fig.7 Demand for copper and aluminum for electricity grids by scenario(IEA,2021)

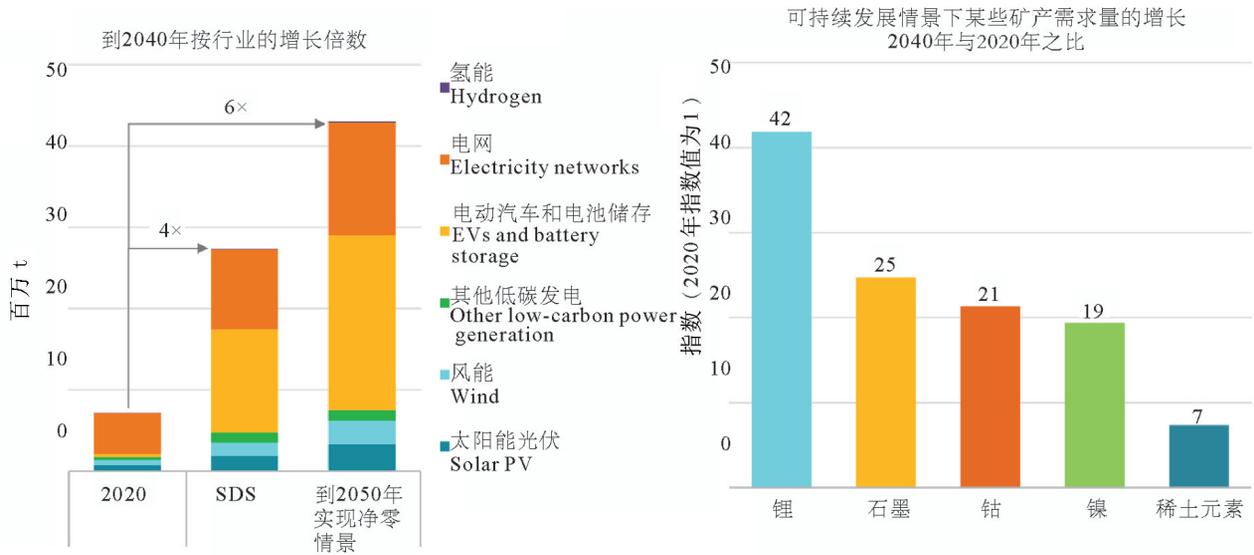


图8 按情景划分的清洁能源技术对矿物的需求量(IEA, 2021)
 Fig.8 Demand for minerals from clean energy technologies by scenario(IEA, 2021)

用强度相对较低。水电不使用稀土元素,目前使用的铜(1050 kg/MW)、锰(200 kg/MW)和镍(30 kg/MW)是所有低碳源中最低的(Ashby, 2013)。IEA 预计,在2040年SDS中所有新增低碳发电量中,水电分别占铜和铬总需求的2%和11%;到2040年,生物质能的总体矿产需求比2020年增加了一倍多,铜占总量的四分之三以上。然而,2040年,生物质能的铜需求仅占所有低碳能源铜总需求的2.5%。相反,生物质能中的钛需求在2040年的所有钛需求中占低碳能源中钛需求的近60%。

核电由于矿产耗用强度低,对矿物的需求影响有限,主要矿产需求包括铬(2190 kg/MW, 2019年)、铜(1470 kg/MW)、镍(1300 kg/MW)、钨(0.5 kg/MW)和钽(0.5 kg/MW)(EC JRC, 2011)。铀不在分析范围内,因为本文侧重于设备生产的矿产需求。在IEA的SDS中,2031—2040年间核电的年均矿产需求与2020年的水平相比增长了约60%,达到8.2万t,以铬(42%)、铜(28%)和镍(25%)为主(图9)。2040年的钽需求约为7.7t,约占当前全球储量的0.0015%。

3.4 氢能的矿产需求

国际能源署的SDS中氢气使用量的快速增长支撑了电解槽用镍和钴以及燃料电池电动汽车(FCEV)用铜和铂族金属需求的大幅增长。尽管燃料电池电动汽车的快速增长以及汽油和柴油汽车催化转化器的下降,但在2040年的SDS中,内燃机汽车对铂族金属的需求仍高于燃料电池电动汽车。与此同时,煤炭与能源转型矿产的命运将发生根本性的变化。清洁能源转型为生产矿产的企业提供了机遇和挑战。煤炭目前是矿业公司最大的收入来源,其生产的收入是能源转型矿产收入的10倍(图10)。然而,随着清洁能源转型的加速发展将改变这一状况,在SDS中,到2040年之前,能源转型矿产的总收入将超过煤炭的总收入(IEA, 2021)。近年来,一些矿业巨头已经减少了与煤炭的接触,尽管目前还看不到向能源转型所需矿产的决定性

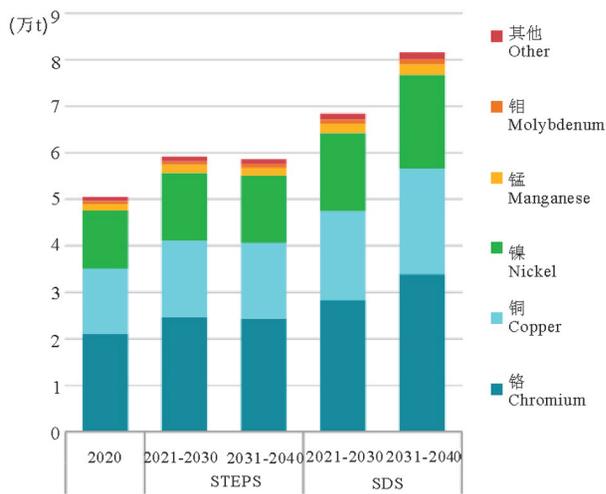


图9 核电的矿产需求(IEA, 2021)
 Fig.9 Mineral demand for nuclear power(IEA, 2021)

转变。力拓近年来完全退出了煤炭业务,其他公司通过减少动力煤产量,也在朝着类似的方向发展。

4 能源转型的矿业影响

国际能源署(IEA)的评估表明,要实现《巴黎协定》目标(IEA可持续发展情景(SDS)中的气候稳定在“全球升温远低于2°C”),意味着到2040年清洁能源技术对矿产的需求量将翻四番。实现到2050年全球实现净零排放的更快速转型,意味着在2040年所需要的矿产投入将是现在的6倍。这些增长来自哪些行业?在气候驱动情景下,电动汽车和蓄电池储能的矿产需求是一个主要力量,到2040年需求量至少增长30倍。锂需求增长最快,到2040年,在可持续发展情景下的需求量增长超过40倍,其次是石墨、钴和镍(为20~25倍)。电网的扩张意味着同期电线对铜的需求量增加一倍以上。

为实现气候目标而兴起的低碳发电也意味着,到2040年,该行业对矿产的需求量将翻三番。风能原材料密集型的海上风电的支持下处于矿产需求增长的领先地位。由于新增容量庞大,太阳能光伏将紧随其后。水电、生物质能和核电对矿产的需求量相对较低,对矿产需求增长的贡献很小。在其他行业,氢作为一种能源载体的快速增长支撑了解析槽用镍和

铂以及燃料电池用铂族金属的需求量大幅增长。

需求轨迹面临技术和政策重大不确定性的影响。IEA分析了11个替代案例以了解其影响。例如,未来钴需求量可能比当前的水平高6~30倍,具体取决于对电池化学成分和气候政策演变的假设。同样,到2040年稀土元素的需求量可能比现在高3~7倍,具体取决于风力涡轮机的选项和政策支持的力度。需求变化的最大来源来自气候政策严格性的不确定性。供应商面临的一个大问题是,世界是否真的正朝着符合《巴黎协定》情景的方向发展。政策制定者在减少这种不确定性方面发挥着至关重要的作用,他们要明确自己的雄心,把目标转化为行动。这对于降低投资风险和确保新项目有足够的资本流至关重要。

4.1 关键矿产供应存在的问题

当前的矿产供应和投资计划不能满足能源部门转型的需求。关键矿产需求量快速增长的前景(在大多数情况下远高于以往的任何水平)对供应的可得性和可靠性提出了巨大的疑问。在以前,不同矿产的供需平衡压力,促使增加投资,并采取措缓解或替代需求。但这些响应存在时间滞后性,并伴随着相当大的价格波动性。未来类似的事件可能会推迟清洁能源转型并推高其成本。考虑到

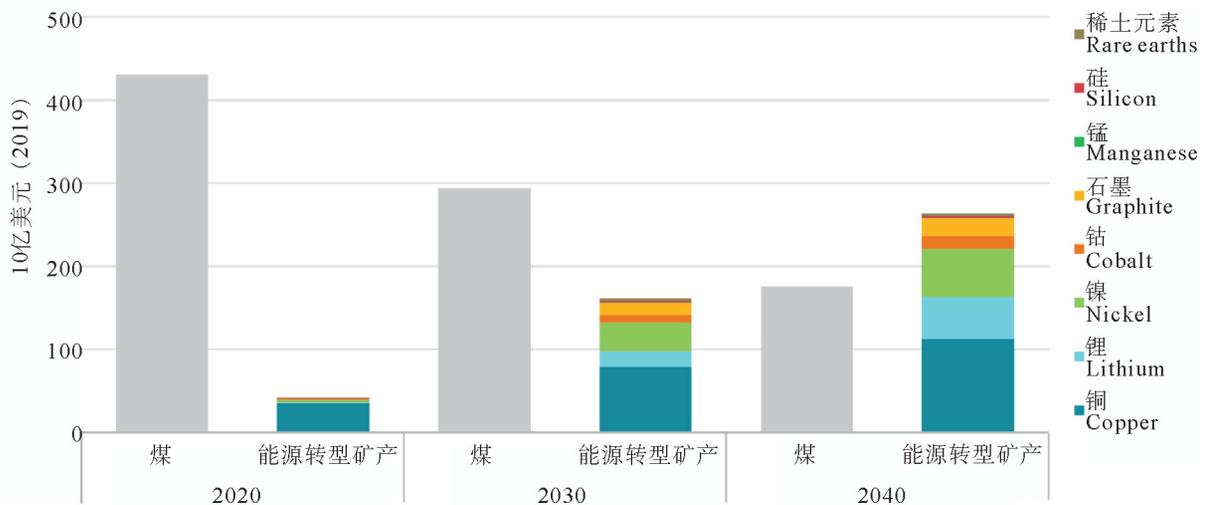


图10 可持续发展情景下煤炭和某些能源转型矿产的生产收入(IEA, 2021)

注释:能源转型矿产的收入仅包括清洁能源技术对该种矿产的需求量,而非其总需求量。能源转型矿产的价格基于对未来价格趋势的保守假设(较目前水平温和增长10%~20%)

Fig.10 Revenue from coal production and selected energy transition minerals in the SDS(IEA, 2021)

Notes: Revenue for energy transition minerals includes only the volume required in clean energy technologies, not total demand. Prices for energy transition minerals are based on conservative assumptions about future price trends (moderate growth of around 10%–20% from today's levels)

减排的紧迫性,这种可能性全世界无法承受。

在能源转型所需的许多技术的成本结构中,原材料是一个重要组成部分。就锂电池而言,技术学习曲线和规模经济在过去10年中将总成本降低了90%。然而,这也意味着原材料成本占比越来越高,占电池总成本的50%~70%,高于5年前的40%~50%。因此,矿产品价格上涨可能会产生重大影响:锂或镍价格翻一番将导致电池成本增加6%。如果锂和镍的价格同时翻番,这将抵消与电池产能翻番相关的所有预期单位成本的降低。就电网而言,铜和铝目前约占电网总投资成本的20%。供应紧张导致的价格上涨可能会对电网投资水平产生重大影响。

IEA对近期矿产品供应前景的分析呈现出复杂的现象。一些矿产品,如矿山锂和钴,预计在短期内将出现供应过剩,而锂化工产品、电池级镍和关键稀土元素(如钕和镝)在未来几年可能面临供应紧张的局面。然而,在符合气候目标的情景下,预计到2030年,现有矿山和在建项目的预期供应量仅能满足预计锂和钴需求量的一半,满足铜需求量的80%。

目前的供应和投资计划是为了适应对气候变化采取更为渐进和不充分行动(即STEPS轨迹),还没有为支持能源加速转型做好准备。虽然有许多项目处于不同的开发阶段,但存在许多脆弱性,可能会加剧市场紧张和价格波动的可能性:

产量的地理集中度高:许多能源转型矿产的产量比石油或天然气的产量更加集中(图11)。对于锂、钴和稀土元素,世界前三大生产国控制着全球四分之三以上的产量。在某些情况下,一个国家的产量约占全球产量的一半左右。2019年,刚果(DRC)和中国分别占全球钴和稀土元素产量的70%和60%。矿产加工业的集中度更高,中国在各个领域都有强大的影响力。中国的镍精炼份额约为35%,锂和钴为50%~70%,稀土元素近90%。中国企业还在澳大利亚、智利、刚果和印度尼西亚对海外资产进行大量投资。集中度高,加上复杂的供应链,增加了主要生产国的实际供应中断、贸易限制或其他情况可能产生的风险。

项目开发周期长:IEA的分析表明,采矿项目从发现到首次生产,平均需要16年以上的时间。如此漫长的滞后期引发了一个问题,即如果需求迅速回

升,供应商是否有能力提高产量。如果矿业公司在承诺新项目之前等待供应缺口的出现,可能会导致市场长期紧张和价格波动。

资源质量下降:对资源的担忧与质量有关。近年来,一系列大宗矿产品的矿石质量持续下降。例如,智利的铜矿石平均品位在过去15年中下降了30%。从低品位矿石中提取金属成分需要更多的能源,对生产成本、温室气体排放和废物量造成了上行压力。

对环境和社会绩效的审查日益严格:如果不负责任地管理采掘和矿产加工活动,满足清洁能源部署增加带来的对矿产的新需求,这些活动的增加可能会产生严重的环境和社会影响(World Bank, 2020)。消费者和投资者越来越多地呼吁企业寻找可持续和负责任生产的矿产资源。如果没有广泛和持续的努力来改善环境和社会效益,消费者就很难排除低标准生产的矿产,因为绩效较高的供应链可能不足以满足需求。

更进一步暴露于气候风险中:矿业资产面临越来越大的气候风险。考虑到铜和锂的需水量高,它们特别容易受到缺水的影响。当前,超过50%的锂和铜生产集中在缺水严重的地区。澳大利亚、中国和非洲等几个主要产区也受到极端高温或洪水的影响,这对确保可靠和可持续的供应构成了更大的挑战。

矿产供应的可靠性、可负担性和可持续性面临的这些风险是可控的,但它们是真实存在的。政策制定者和企业如何应对,将决定关键矿产到底是清洁能源转型的重要推动者,还是转型过程中的瓶颈因素。

4.2 建议

国际能源署2021年发布的报告《关键矿产在清洁能源转型中的作用》为确保关键矿产供应安全提出了6项建议:

(1)确保对多样化的新供应来源进行充足的投资。政策制定者发出的关于能源转型速度和关键清洁能源技术增长轨迹的强烈信号,对于推动对新供应的及时投资至关重要。政府可以在创造有利于矿产供应链多样化投资的条件方面发挥重要作用。

(2)推动价值链各环节的技术创新。加大需求侧和生产侧技术创新的研发力度,可以提高原材料的利用效率,实现原材料替代,释放大量新供应,从而带来可观的环境和安全效益。

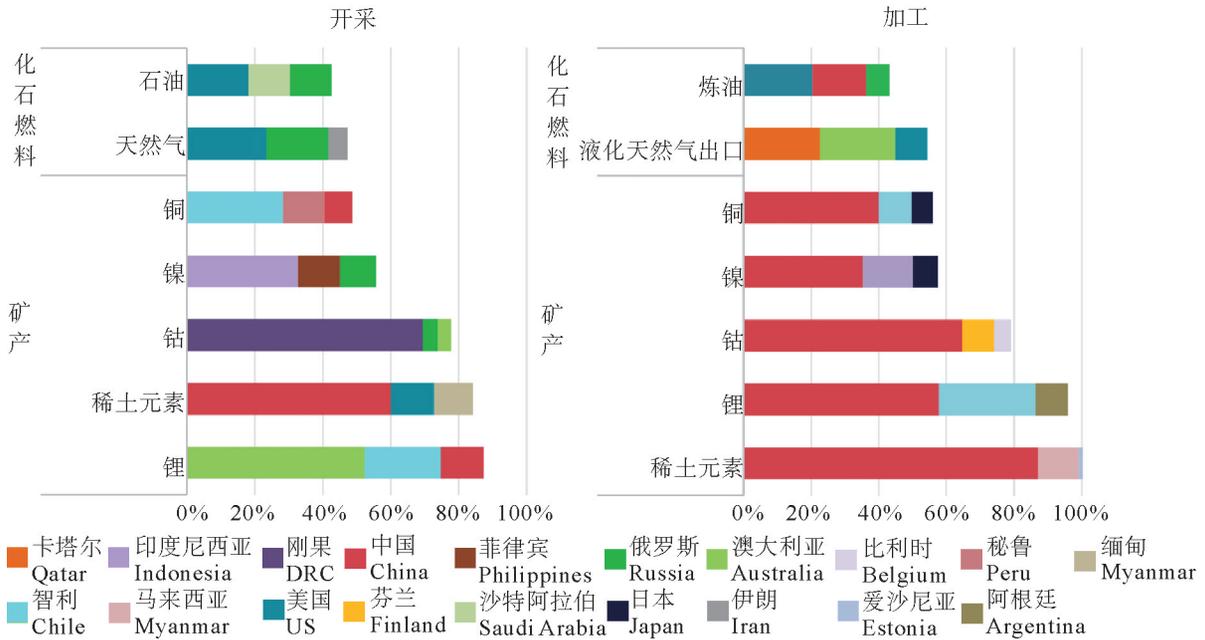


图 11 2019年某些矿产品和化石燃料产量排名前三的生产国所占份额(IEA, 2021)

Fig 11 Share of top three producing countries in production of selected minerals and fossil fuels, 2019(IEA, 2021)

(3)扩大回收利用。政策可在废物量快速增长准备方面发挥关键作用,鼓励产品在运营寿命结束时回收利用,支持高效收集和分类活动,并为研发新的回收技术提供资金。图 12 列出了 SDS 中电动汽车废旧锂离子电池的储存、回收和再利用量。

(4)增强供应链弹性和市场透明度。政策制定者需要探讨一系列措施,以提高不同矿产供应链的

弹性,发展应对潜在供应中断的能力,并提高市场透明度。措施可以包括定期的市场评估和压力测试,以及在某些情况下的自愿性战略储备。建立可靠的价格基准将是提高透明度和支持市场发展的关键一步。

(5)将更高的环境、社会 and 治理标准纳入主流程。鼓励提高环境和社会效益的努力可以增加可持

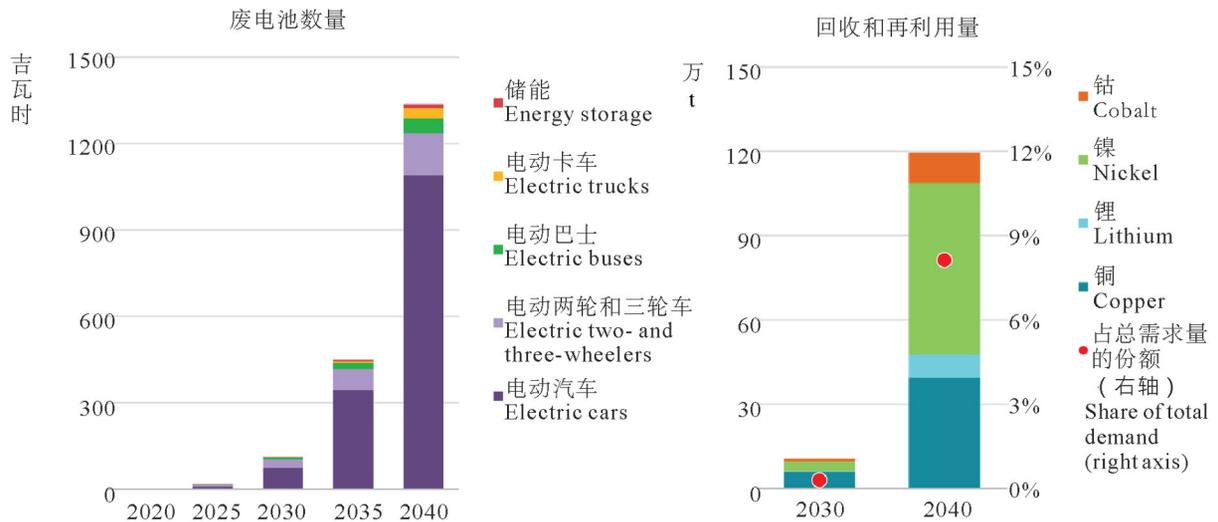


图 12 可持续发展情景下电动汽车废旧锂离子电池及其储存、回收和再利用量(IEA, 2021)

Fig 12 Amount of spent lithium-ion batteries from EVs, and the storage, recycled and reused minerals from batteries in the SDS (IEA, 2021)

续和责任的产量,并降低采购成本。如果具有强大环境和社会标准的行业参与者在市场上获得奖励,这也可以为更多元化的市场带来新的供应商。

(6)加强生产者和消费者之间的国际合作。在生产者和消费者之间进行对话和政策协调的总体国际框架可以发挥至关重要的作用,IEA的能源安全框架可以在这一领域得到有效利用。这一倡议可包括采取以下行动:1)提供可靠和透明的数据;2)定期评估供应链的潜在脆弱性和可能的集体响应;3)促进知识转让和能力建设,以推广可持续和负责任的发展实践;4)强化环境和社会绩效标准,确保公平竞争环境。

5 结 论

(1)清洁能源转型过程中,关键矿产需求激增。随着各国逐步落实应对气候变化的措施,电动汽车、风力涡轮机等清洁能源技术需要大量铜、锂、镍、钴和稀土等关键矿产,在未来几十年中需求量将大幅增加。预计到2040年,能源行业对关键矿产的需求将比现在增加6倍。特别是在落实应对气候变化所采取行动的推动下,用于电动汽车和电网存储的关键矿产需求将迅猛增长,到2040年时将至少增长30倍。

(2)清洁能源转型依赖大量关键矿产的稳定供应。与化石燃料供应相比,清洁能源技术的供应链更加复杂,许多清洁能源技术及其原材料的供应链在地理上更加集中。对于许多对制造清洁能源技术设备和基础设施至关重要的矿产来说,情况尤其如此。应对大规模部署清洁能源的挑战,需要各种关键矿产的稳定供应以及稳定的价格和最低限度的市场中断。

(3)可持续开发关键矿产。确保对多样化的新供应来源进行充足的投资,政府可以在创造有利于矿产供应链多样化投资的条件方面发挥重要作用。推动价值链各环节的技术创新,提高原材料的利用效率,实现原材料替代,释放大量新供应。鼓励产品在运营寿命结束时回收利用,政策制定者需要探讨一系列措施,以提高不同矿产供应链的弹性,发展应对潜在供应中断的能力,并提高市场透明度。

References

Argonne National Laboratory(ANL). 2020. BatPaC Model Software, <https://www.anl.gov/cse/batpac-model-software>.

- Asby M F. 2013. Materials for low-carbon power//Materials and the Environment (2nd ed.), 349-413, <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385971-6.00012-9>.
- Ballinger B, Stringer M, Schmeda-Lopez D R, Kefford B, Parkinson B, Greig C, Smart S. 2019. The vulnerability of electric vehicle deployment to critical mineral supply[J]. Applied Energy, 255, 113844,0306-2619.
- Chen Qishen, Zhang Yanfei, Xing Jiayun, Long Tao, Zheng Guodong, Wang Kun, Cui Bojing, Qin Sheng. 2021. Methods of strategic mineral resources determination in China and abroad[J]. Acta Geosciences, 42(2):137-144(in Chinese with English abstract).
- Eggert R G. 2011. Minerals go critical[J]. Nature Chemistry, 3(9): 688-691.
- EC JRC (Joint Research Center). 2011. Critical Metals in Strategic Energy Technologies.
- European Union (EU). 2020. Study on the EU's list of Critical Raw Materials.
- Fishman T, Myers R, Rios O, Graedel T E. 2018. Implications of emerging vehicle technologies on rare earth supply and demand in the US[J]. Resources, 7(1):1-15.
- Grandell L, Lehtilä A, Kivinen M, Koljonen T, Kihlman S, Lauri L. 2016. Role of critical metals in the future markets of clean energy technologies[J]. Renewable Energy, 95:53-62.
- Guo Hui, Li Yaping, Wang Xueming. 2018. Indium, gallium and selenium have become new favorites of new energy materials. Geological prospecting and comprehensive utilization should be strengthened [J]. Geology in China, 45 (1): 205-206(in Chinese).
- Guo Juan, Yan Weidong, Xu Shuguang, Cui Rongguo, Hu Rongbo, Lin Bolei, Zhou Qizhong, Zhou Zhou, Yang Ling. 2021. Discussion on evaluation criteria and list of critical minerals in China [J]. Acta Geosciences, 42 (2): 151-158(in Chinese with English abstract).
- IEA. 2020. World Energy Outlook 2020.
- IEA. 2021. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions.
- IRENA. 2016. End of Life Management Solar PV Panels, <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-lifemanagement-Solar-Photovoltaic-Panels>
- Li Guangming, Zhang Linkui, Zhang Zhi, Xia Xiangbiao, Liang Wei, Hou Chunqiu. 2021. New exploration progresses, resource potentials and prospecting targets of strategic minerals in the southern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Sedimentation and Tethyan Geology, 41 (2): 351-360(in Chinese with English abstract).
- Lin Weibin, Wu Jiayi. 2021. Three Trends for China's Energy Transition under the Carbon Neutrality Vision[J/OL]. Price Theory and Practice:<https://doi.org/10.19851/j.cnki.CN11-1010/F.2021.07.89>(in Chinese with English abstract).
- Liu Shuai. 2019. Supply, demand and future trend of lithium resources in 2018 [J]. Geology in China, 46 (6): 1580-1582 (in Chinese).
- Ma Bing, Jia Lingxiao, Yu Yang, Wang Huan, Chen Jing, Zhong Shuai, Zhu Jichang. 2021. Geoscience and carbon neutralization: Current

- status and development direction[J]. *Geology in China*, 48(2): 347–358(in Chinese with English abstract).
- Materials Research Society (MRS), American Physical Society (APS). 2011. *Energy Critical Elements: Securing Materials for Emerging Technologies* [R]. College Park: Materials Research Society, American Physical Society.
- National Research Council(NRC). 2008. *Committee on critical Mineral Impacts on the US Economy: Minerals, Critical Minerals, and the US Economy*[M]. Washington: National Academies Press.
- Nordelöf A, Grunditz E, Lundmark S, Tillman A, Alatalo M, Thiringer T. 2019. Life cycle assessment of permanent magnet electric traction motors[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67:263–274.
- Qiang Haiyang, Gao Bing, Guo Dongyan, Wang Xinyi. 2021. Options for sustainable development of mining industry under the background of carbon neutrality[J]. *China Land and Resources Economy*, 34(4): 4–11(in Chinese with English abstract).
- Sprecher B, Xiao Yanping, Walton A, Speight J, Harris R, Kleijn R, Visser G, Kramer G. 2014. Life cycle inventory of the production of rare earths and the subsequent production of NdFeB rare earth permanent magnets[J]. *Environmental Science and Technology*, 48(7): 3951–3958.
- Wang Denghong, Wang Ruijiang, Li Jiankang, Zhao Zhi, Yu Yang, Dai Jingjing, Chen Zhenghui, Li Dexian, Qu Wenjun, Deng Maochun, Fu Xiaofang, Sun Yan, Zheng Guodong. 2013. Summary of the research progress of China's three rare mineral resources strategy survey[J]. *Geology in China*, 40(2): 361–370(in Chinese with English abstract).
- Wang Huan. 2021. EU releases list of 30 key minerals and source countries [J]. *Geology in China*, 48(2): 674–675 (in Chinese).
- Wang Peng, Wang Qiaochu, Han Ruru, Tang Binbin, Liu Yu, Cai Wenjia, Chen Weiqiang. 2021. Nexus between low-carbon energy and critical metals: Literature review and implications[J]. *Resources Science*, 43(4): 669–681(in Chinese with English abstract).
- World Bank. 2020. *Climate-Smart Mining: Minerals for Climate Action*, <https://www.worldbank.org/en/topic/extractiveindustries/brief/climate-smart-mining-minerals-for-climate-action>.
- Xu Deyi, Zhu Yongguang. 2020. Review and outlook of key minerals security during energy transformation[J]. *Resources and Industry*, 22(4): 1–11(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jialin, Fan Jun, Qin Yuan. 2021. Scientific and technological counter measures for increasing reserves of key minerals in China[J]. *Nonferrous Metal Engineering*, 11(5): 102–109(in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Hu Bo. 2021. Thinking to state security, internet competition and national strategy of mineral resources[J]. *Journal of Earth Science and Environment*, 43(1): 1–11(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈其慎, 张艳飞, 邢佳韵, 龙涛, 郑国栋, 王琨, 崔博京, 覃升. 2021. 国内外战略性矿产厘定理论与方法[J]. *地球学报*, 42(2):137–144.
- 郭慧, 李亚萍, 王学明. 2018. 铜、镓、硒成为新能源材料新宠应加强地质找矿与综合利用[J]. *中国地质*, 45(1):205–206.
- 郭娟, 闫卫东, 徐曙光, 崔荣国, 胡容波, 林博磊, 周起忠, 周舟, 杨玲. 2021. 中国关键矿产评价标准和清单的探讨[J]. *地球学报*, 42(2): 151–158.
- 李光明, 张林奎, 张志, 夏祥标, 梁维, 侯春秋. 2021. 青藏高原南部的主要战略性矿产: 勘查进展、资源潜力与找矿方向[J]. *沉积与特提斯地质*, 41(2):351–360.
- 林卫斌, 吴嘉仪. 2021. 碳中和愿景下中国能源转型的三大趋势[J/OL]. *价格理论与实践*, <https://doi.org/10.19851/j.cnki.CN11-1010/F.2021.07.89>
- 刘帅. 2019. 2018年锂资源供需及未来趋势[J]. *中国地质*, 46(6): 1580–1582.
- 马冰, 贾凌霄, 于洋, 王欢, 陈静, 钟帅, 朱吉昌. 2021. 地球科学与碳中和: 现状与发展方向[J]. *中国地质*, 48(2): 347–358.
- 强海洋, 高兵, 郭冬艳, 王心一. 2021. 碳中和背景下矿业可持续发展路径选择[J]. *中国国土资源经济*, 34(4): 4–11.
- 汪鹏, 王翘楚, 韩茹茹, 汤林彬, 刘昱, 蔡闻佳, 陈伟强. 2021. 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*, 43(4): 669–681.
- 王登红, 王瑞江, 李建康, 赵芝, 于扬, 代晶晶, 陈郑辉, 李德先, 屈文俊, 邓茂春, 付小方, 孙艳, 郑国栋. 2013. 中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述[J]. *中国地质*, 40(2): 361–370.
- 王欢. 2021. 欧盟发布30种关键矿产与来源国清单[J]. *中国地质*, 48(2): 674–675.
- 徐德义, 朱永光. 2020. 能源转型过程中关键矿产资源安全回顾与展望[J]. *资源与产业*, 22(4): 1–11.
- 张家林, 樊俊, 秦媛. 2021. 我国关键矿产勘查增储的科技应对策略[J]. *有色金属工程*, 11(5): 102–109.
- 翟明国, 胡波. 2021. 矿产资源国家安全、国际争夺与国家战略之思考[J]. *地球科学与环境学报*, 43(1): 1–11.