

引用格式: 黄健柏, 孙芳, 宋益. 清洁能源技术关键金属供应风险评估[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1477-1488. [Huang J B, Sun F, Song Y. Supply risk assessment of critical metals in clean energy technology[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1477-1488.] DOI: 10.18402/resci.2020.08.04

清洁能源技术关键金属供应风险评估

黄健柏¹, 孙芳¹, 宋益²

(1. 中南大学商学院, 长沙 410083; 2. 中国地质大学(武汉)经济管理学院, 武汉 430074)

摘要: 全球能源结构转型是实现可持续发展的必由之路, 而清洁能源技术的发展依赖于多种关键金属材料。本文选取15种清洁能源技术关键金属, 从供应减少、需求增加、地缘政治和社会监管4个维度, 构建10个评估指标, 对清洁能源技术关键金属的供应风险进行定量评估, 保障全球清洁能源技术发展和能源结构转型。研究结果表明: ①清洁能源技术关键金属的供应风险均处于中风险以上等级, 其中铟、镓、锗3种关键金属处于中高风险水平, 锂、钴、钼、硒、钨、钼、钨、铜、铝、锌、铁、钛12种关键金属处于中风险等级。②供应减少风险维度中铟、铁、钨、锌、锗、钼6种关键金属属于中高风险, 其中铟的风险最高; 需求增加风险维度中铟、镓、锗3种关键金属的风险属于中高风险; 地缘政治风险维度中有9种关键金属属于中高风险, 其中钴的风险最高; 社会监管风险维度中有11种关键金属属于中高风险, 其中铟的风险最高。因此, 需尽快建立关键金属供应安全常态化风险分类管理机制和二次资源回收管理体系, 增进与关键金属供应国间的合作, 以缓解清洁能源技术发展的关键金属约束。

关键词: 清洁能源技术; 关键金属; 地缘政治风险; 供应风险; 风险评估

DOI: 10.18402/resci.2020.08.04

1 引言

全球能源需求加速增长和过度使用化石燃料引发了严重的环境污染和能源安全问题^[1], 发展清洁能源已成为实现能源转型和改善能源安全的必要条件^[2]。《世界能源展望2019》^[3]对未来清洁能源发展进行了评估, 在既定政策情景模式下, 风能和太阳能光伏发电量将占2040年新增发电量一半以上^[4]。越来越多的国家设定了清洁能源的份额目标, 丹麦将在2050年之前摆脱对化石能源的依赖^[5], 欧盟的清洁能源份额到2020年将达到20%, 到2030年将达到27%^[6]。然而, 清洁能源技术的突破、推广和应用与金属资源密不可分^[7], 不仅需要铜和铝等基本金属, 更加离不开铟、镓、钨、钼等关键金属^[8,9]。

全球清洁能源产业的发展引发新一轮国际竞

争, 矿产资源供需形势正在发生显著变化并成为大国资源博弈的焦点。日本将发展清洁能源计划列入国家能源安全政策, 2012年制定《矿产资源保障战略》^[10], 明确提出将铁、铜、铝、铅、锌、铌、镁等30种矿产作为战略性矿产, 并把矿产资源战略作为国家支柱基础性战略。美国政府自冷战期间开始建立关于42种原材料的储备体系, 旨在保障军事危急时原材料获取的独立性, 保障军事需求。之后为改善美国关键矿产过度依赖海外供给格局, 2017年12月特朗普总统发布13817号总统行政命令《确保关键矿产安全和可靠共赢的联邦战略》^[11], 2018年5月更新关键矿产清单, 其中主要涉及稀土、铍、钴、镓、锗、铟、锂、铌、铂族金属、铯、钽、钨、锆等稀有矿产, 并特别备注依赖于中国和俄罗斯的矿产。欧盟委员会2010年、2014年和2017年连续出台关键性原

收稿日期: 2020-02-17, 修订日期: 2020-07-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(71633006); 湖南省哲学社会科学基金项目(19ZWB45)。

作者简介: 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: huangjianbai@163.com

通讯作者: 宋益, 女, 湖南岳阳人, 特任副教授, 研究方向为资源经济与管理。E-mail: littlesy@foxmail.com

材料目录,明确指出其关键矿产与中国存在竞争关系^[12-14]。全球范围内资源分布不均衡容易导致供应不稳定性,急需识别可能影响清洁能源技术发展所需关键金属的可供性风险因素,设定资源储备预警机制,防范供应中断造成的损失。

矿产资源供应风险评估的首要任务是识别影响供应水平的因素,然后根据影响因素遴选矿产资源供应风险评估指标,最终构建关键金属供应安全指标体系,进而合理系统地评估矿产资源的供应风险^[15,16]。近年来,环境安全、资源安全、经济安全的需求加速了清洁能源技术发展,与之相关的金属原材料更是世界各国在清洁能源发展战略中争夺制高点的关键,有关清洁能源技术所需关键金属供应风险评估的研究也越来越多。从供应风险评估的影响因素来看,沙景华等^[17-19]综合考虑了市场供需、价格、进出口、资源、政治多种因素,在全球、区域、国家层面提出综合性风险治理措施。Moss等^[20]确定了欧盟战略能源技术计划中6项低碳能源技术的原材料需求,并考虑了全球需求增长可能性、全球生产能力扩张局限性、国际间生产国集中度、主要生产国政治风险的影响。Blengini等^[21]认为贸易壁垒造成国际金属市场风险扭曲,应将出口限额和贸易协定纳入供应风险评估体系中。Daw^[22]创新性地提出国际材料转换指标,考虑了原材料上游市场和下游加工对于经济影响,并以法国锂金属为案例进行关键性评估。王昶等^[23]考虑了资源外交对于优势金属供应风险评估的影响。从供应风险评估体系的构建来看,从二维评估体系发展到三维和四维评估体系。张艳飞等^[24]界定矿产资源重要性概念,并从经济重要性和供应短缺两个维度确定重要性水平。Blengini等^[21]针对相应政策需求,在供应风险和经济重要性维度提出可以改进的指标,更好地满足欧盟制定原材料清单的需求。Daw等^[25]在供应风险与经济重要性二维评估体系基础上,增加国际原材料转换指标,同时兼顾到原材料上游市场与原材料下游加工对于经济影响,并对法国锂金属关键性进行了评估,该方法更多地考虑了金属对于欧盟内各行业经济影响。耶鲁大学Graedel等^[26,27]设计三维关键性空间,在二维矩阵基础上加入环境因素对关键

矩阵进行扩展,在此基础上系统地对62种金属在供应风险、环境风险和供应中断脆弱性三维空间中进行关键性评估。李鹏飞等^[28]在三因素框架基础上针对中国战略性新兴产业对稀有矿产资源现实需求,对22种稀有矿产资源进行战略性评估。王昶等^[29-31]通过三维供应风险评估框架,研究新能源汽车原材料的供应风险,分析城市矿产循环利用对供应风险调节作用,并利用系统动力学对清洁能源技术关键金属镓的可供性进行了研究。Goe等^[32]从供应风险、环境和经济风险3个方面构建评估体系,对薄膜型太阳能技术相关的17种原材料的关键性进行排序,其中硒、铁、镉、银、锌在消费量和应用性方面具有重要经济意义。Helbig等^[33,34]从供应减少、需求增加、集中风险、政治风险4个维度,更加全面地评估锂电池和薄膜型太阳能电池关键原材料供应风险,该评估体系对于清洁能源技术关键金属而言更加科学合理。

综上所述,学者们在有关金属原材料关键性评估方面的研究取得了大量成果,为清洁能源技术关键金属供应风险评估提供了可靠的研究基础。但是,现有文献还有几方面仍需深入探索:一方面,现有文献并未考虑技术进步对于供应安全的影响,特别是清洁能源技术的快速发展对关键金属需求的影响;另一方面,现有文献并未考虑金属资源的回收利用对于缓解供应风险的影响。因此,在原有学者评估体系研究的基础上,本文以清洁能源技术关键金属供应风险为研究对象,从供应减少风险、需求增加风险、地缘政治风险以及社会监管风险4个方面建立供应风险评估体系,对供应风险评估维度进行重新界定,提出更适合且全面的关键金属供应风险评估体系,保障清洁能源技术关键金属可持续供应安全。

2 研究方法

2.1 评估对象的界定

太阳能、风力和电动汽车等清洁能源技术发展强劲,而关键金属是清洁能源技术发展的核心构件。2018年,全球太阳能光伏发电装机约100 GW,占新增可再生能源发电容量55%,尤其是碲化镉和铜铟镓硒电池占据强有力的光伏发电市场份额,与

2020年8月

之相关的碲、镓、铟、铜、硒、镉等关键金属供应稳定性对其发展至关重要^[20,32,35]。2019年全球陆上风电新增装机量53.2 GW,较2018年提升13.68%,对缓解化石能源依赖、实现能源转型具有广泛而深远的影响。构成风力涡轮机中发电机组件的材料主要有磁钢、铜、稀土,风力涡轮机永磁体原材料主要有铜、钼、铈、铷、铯^[36]。全球范围内新能源汽车处于蓬勃发展阶段,而锂离子电池决定纯电动汽车性能命脉,与锂电池发电技术相关的关键原材料锂、铝、钛、锰、铁、钴、镍、铜的需求激增^[37]。基于数据可获得性,本文最终选取锂、钴、铟、镓、锗、镉、硒、钼、钡、铂、铜、铝、锌、铁、钛15种清洁能源技术关键金属作为研究对象。

2.2 供应风险评估体系构建

本文参考Helbig等^[33,34]使用的矿产资源供应风险评估指标体系,综合之前学者的研究以及清洁能源技术关键金属现状,对供应风险评估维度进行重新界定,提出更适合且全面的关键金属供应风险评估体系。首先,本文针对Helbig等研究中的集中风险这一维度进行改善,将国家集中度与政治稳定性作为地缘政治风险维度的评估指标,将政策感知指数和人类发展指数作为社会监管风险维度的评估指标。其次,本文充分考虑了清洁能源技术的发展对关键矿产资源需求实际情况,也考虑了未来技术进步和金属可替代性引起的需求波动。此外,本文分析了可能由矿产资源分散分布的地理特点引起的低水平竞争或垄断市场,也考虑了生产国政治稳定能力和矿业监管水平对于供应中断产生的影响。因此,本文最终选择从供应风险、需求风险、地缘政治风险、社会监管风险4个维度分解10项评价指标,对清洁能源技术关键金属供应风险进行分项评估,每一维度风险评估结果是由分项指标加权平均求得,然后将每一维度风险评估结果通过加权平均方式进行聚合得出供应风险评估结果,并根据风险等级划分,对关键金属供应风险进行分析(图1)。

2.3 供应风险评估指标测算与数据来源

本文从图1中的供应减少风险、需求增加风险、地缘政治风险和社会监管风险4个维度,对清洁能源技术关键金属供应风险进行评估,并将其分解为

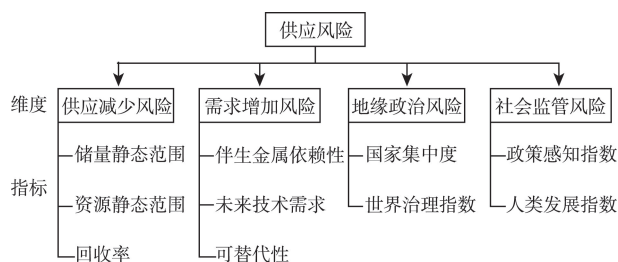


图1 清洁能源技术关键金属供应风险评估体系

Figure 1 Supply risk evaluation system of critical metals in clean energy technology

10项评估指标,这些评估指标的具体含义、作用机制及数据来源如下所示。

2.3.1 供应减少风险

供应减少在原则上是由于储量和资源的减少而发生。储量是指在已探知矿床中具备技术性和经济性的可开采资源蕴藏量。资源量包含已探明的矿产和潜在的矿产资源,即经可行性研究证实为次边际经济的矿产资源以及已勘察但未进行可行性研究的矿产资源。在金属产品贸易全球化背景下,通常采用全球的资源剩余可采储量和资源量与年度初级生产之间的比率来衡量其供应潜力,通常称为“耗尽时间”或“静态范围”。矿产资源的供应潜力不仅是由资源禀赋这一自然条件决定的,还会受到后期勘探采矿技术以及是否具备商业价值的限制。由于储量和资源不断减少而造成的潜在稀缺性可以通过二次生产得到部分补偿,因此将金属回收利用率作为供应减少风险的第三个衡量指标。

(1) 储量静态范围

储量静态范围(SR)这一指标是根据每一矿产资源的全球储量与年初级生产量之比得出的。储量静态范围反映了进一步勘探和开采新矿产资源的压力,储量静态范围值越大,代表矿产资源的可供应能力越高,因而由该矿产资源产生的供应风险越低。本文借鉴Graedal等^[27]提出的换算方法,利用公式转换为取值范围在[0, 100]的指标,最终将每一评估指标转化为统一[0, 100]取值范围内,有助于进行指标比较和各指标聚合。

$$S1 = 100 - 0.2SR - 0.008(SR)^2 \quad (1)$$

式中:S1为储量静态范围原始指标转化为[0, 100]后的测算结果;SR代表储量静态范围指标原始计算结

果,该数据来源于 Mineral Commodity Summaries^[38]。

(2) 资源静态范围

矿产资源静态范围(*RR*)是通过每一矿产资源的全球资源量与年初级生产量的比率进行衡量的。该指标可以衡量因矿产资源损耗可能导致的资源的物理稀缺性,同样,资源静态范围值越大,代表资源的可供应能力越高强。

$$S2 = 100 - 0.1RR - 0.002(RR)^2 \quad (2)$$

式中:*S2*为资源静态范围原始指标转化为[0, 100]后的测算结果;*RR*代表资源静态范围指标原始计算结果,该数据同样来源于 Mineral Commodity Summaries^[38]。

(3) 回收利用率

回收利用率(*EoL_RR*)指标是对独立于采矿和初级精炼活动的可用二次材料数量的估计,循环利用可以缓解供应中断或价格高峰市场风险更符合可持续发展目标。在生命周期的各个阶段,对稀有金属矿产的各产品和各种生产残渣进行有效回收,可以大大减少对原材料的需求,从而缓解关键金属面临的供应风险,故而稀有金属产品回收利用率被认为是可能降低供应风险的参数。回收利用率越高,说明矿产资源的供应安全越有保障,供应风险越小。

$$S3 = 100 - EoL_RR \quad (3)$$

式中:*S3*为回收利用率原始指标转化为[0, 100]后的测算结果;*EoL_RR*代表回收利用率指标原始数据,该数据来源于 Graedel 等^[39]。

2.3.2 需求增加风险

清洁能源技术未来前景可期,但与之相关的金属原材料的可供性有可能无法与需求陡坡式增长同步,尤其是伴生金属,因为伴生金属大多是从开采含有该金属的其他矿石中提炼出来的。伴生金属开采本身不具有经济价值,并且伴生金属并不会因为作为副产品开采而降低供应风险。相反,短时期内很有可能会限制开采量增加,因此我们将伴生金属可依赖性划分到需求增加风险类别。全球范围内智能化信息化革命席卷而来,战略性新兴产业蓬勃发展刺激高新技术增速前进,而新兴技术对关键金属未来需求增加预期会增加关键金属在需求

维度的风险。另一方面,金属的可替代性可以缓解需求增加风险,是从经济技术性角度衡量一种金属材料可以被其他材料替代的程度。Graedel 等^[40]以半定量的方式对每种金属可替代性进行评估,综合考虑每种产品的主要用途、最佳价格、替代材料可获得性,并按照该用途所需的百分比量来加权。

(1) 伴生金属依赖性

伴生金属在地壳中含量稀少,往往分布于具有相似物理和化学性质金属矿山中,不具有单独开采经济价值。伴生金属依赖性(*BPD*)是指金属作为副产品从一种或多种主体金属矿中可获得的程度,通过伴生金属作为副产品开采生产量占主体矿产资源产量的百分比表示。在太阳能、电子信息等高新技术领域,关键性伴生金属往往具有报废回收利用率低的特征,存在供应受限的风险。

$$S4 = BPD \times 100 \quad (4)$$

式中:*S4*为伴生金属依赖性原始指标转化为[0, 100]后的测算结果;*BPD*代表伴生金属依赖性指标原始数据,该数据来源于 Nassar 等^[41]。

(2) 未来技术需求

技术驱动经济扩张会激增矿产资源需求,进而引起供需不平衡,导致特定金属市场动荡。未来技术需求(*FDT*)影响矿产资源持续的供应能力,这是由于未来技术发展使得全球矿产资源开采量增加,该矿产资源对应商品市场潜在额外竞争,形成市场压力。低碳经济成为全球主流,加快清洁能源技术变革将有效提升清洁能源利用效率、降低开发成本。

$$S5 = \left\{ \left(\sqrt[3]{1 + FDT} \right) - 1 \right\} 1000 \quad (5)$$

式中:*S5*为未来技术需求原始指标转化为[0, 100]后的测算结果;*FDT*代表未来技术需求原始数据,该数据来源于 Angerer 等^[42]; *t*代表年限,一般取值为24年^[41]。

(3) 可替代性

可替代性(*Subst*)从经济技术性角度衡量一种金属材料可以被其他材料替代的程度,取决于可替代材料的价格、性能以及可替代技术等因素,在供应短缺情况下,关键原材料需求可以转移至其他材料进而消除供应中断或是价格激增的风险,因此关

2020年8月

键金属的可替代性被认为是可降低供应风险的参数。

$$S6 = 100 - Subst \quad (6)$$

式中: $S6$ 为可替代性原始指标转化为 $[0, 100]$ 后的测算结果; $Subst$ 代表可替代性指标原始数据,该数据来源于Graedel等^[40]。

2.3.3 地缘政治风险

经济全球化格局背景下,每一国家都不可避免地受到其他国家地缘政治事件的冲击,地缘政治风险因素对全球范围内矿产资源供应市场影响日渐凸显。第三类风险来自于矿产资源生产国的国家集中程度以及生产国的政治稳定性。一方面是由于矿产资源分布不均衡性导致的。另一方面,矿产资源地理分布通常具有集中性,通过地理因素进行政治互动形成国家间政治关系,进一步构建关键金属供应安全的政治环境。根据世界银行公布的“全球各国治理稳定性指数”,对每种关键金属来源国的经济和政局的稳定程度进行衡量,而各生产国国家政治以及利益冲突等不稳定因素都会导致供应中断,影响供应安全。

(1) 国家集中度

矿产资源全球范围内资源禀赋不同,地壳中富集的稀有元素更是微乎其微,这既为资源富裕国带来利益,同时也给贫瘠国带来了风险。矿产资源地域分布不均匀,尤其是稀有金属在地壳中含量非常稀疏。本文采用赫芬达尔-赫希曼指数(Herfindahl-Hirschman Index)来衡量矿产资源生产国国家集中程度,国家集中度(HHI)指标根据每一矿产资源生产国年生产量份额平方的总和表示,指数越大,国家集中度越高,意味着在发生国际危机或政治动荡时可能产生战略垄断供应风险越大。根据美国司法部制定标准^[43], HHI 最小值0,最大值10000,高于2500呈高度集中,低于1500为低度集中,位于1500~2500区间属于中度集中。

$$S7 = 17.50 \ln(HHI) - 61.18 \quad (7)$$

式中: $S7$ 为国家集中度原始指标转化为 $[0, 100]$ 后的测算结果; HHI 代表每种关键金属供应国国家集中程度的原始数据,该数据来源于Mineral Commodity Summaries^[38]。

(2) 政治稳定性

政治稳定性(WGI)是由世界银行公开发布的,能反映国家治理水平的指标。该指标覆盖了全球215个国家,主要包括暴力和责任性、政治稳定、政府有效性、腐败程度、法律制度和监管质量6个子指标。它们适用于矿产资源不同生命周期阶段的评估,一般选取 $[-2.5, 2.5]$ 为评估区间,其中 -2.5 代表治理水平最低,2.5代表治理水平最高,然后通过公式(8)逆向转换为 $[0, 100]$ 。根据每一矿产资源的每一生产国的生产量占比对其 WGI 指标进行加权的,反映相关生产国因国内动乱或国际恐怖主义等其他动荡局势而发生中断生产和出口,影响供应稳定性,加剧供应风险。

$$S8 = 20(2.5 - WGI) \quad (8)$$

式中: $S8$ 为政治稳定性原始指标转化为 $[0, 100]$ 后的测算结果; WGI 代表政治稳定性指标原始计算结果,该数据来源于Worldwide Governance Indicators^[44]。

2.3.4 社会监管风险

第四类风险是指社会监管对清洁能源技术关键金属供应安全产生的风险。一方面,由于矿产资源生产国日益严格的采矿和环境保护法规,供应中断可能性随时可能发生。这类风险指标可以通过弗雷泽研究报告中的政策感知指数(PPI)进行估算。另一方面,根据矿产资源生产国的人类发展指数(HDI)估算,一个国家国民素质和经济社会发展水平都将影响矿产资源开采,产生社会监管风险。这两个衡量社会监管风险指标均采用国家或国际报告数据,然后在此基础上并通过基于每个国家或地区的生产量占比的加权平均值进行汇总。

(1) 政策感知指数

矿产资源勘探不仅取决于地质条件和经济效益,还要考虑区内矿业勘探监管和投资政策环境。政策感知指数(PPI)是一个综合指标,包括与矿产资源勘探相关的现行法规、环境规制、税收制度、劳工问题等15个政策因素。如果某一矿产资源的生产国矿业勘探限制性政策复杂或是矿业辖区内开发成本高,社会监管风险高,将对其投资产生消极影响,进而影响可供应水平。政策感知指数区间为 $[0, 100]$,首先利用式(9)进行处理,再按照每一矿产

资源的生产国的生产量占比对其加权平均,该指标分数越高说明清洁能源技术关键金属的供应风险越高。

$$S9 = 100 - PPI \quad (9)$$

式中: $S9$ 为政策感知指数原始指标转化为 $[0, 100]$ 后的测算结果; PPI 代表政策感知指数指标原始数据,该数据来源于Fraser Institute Annual Survey of Mining Companies, 2017^[45]。

(2) 人类发展指数

人类发展指数(HDI)指标衡量全球各国发展状况,包括社会、经济、环境可持续评价,将世界各国发展水平分为低人类发展水平、中等人类发展水平、高人类发展水平、极高人类发展水平4种人类发展类别^[46]。某一生产国的人类发展指数越高,该国家社会发展水平越高,则其矿产资源在开采、冶炼、贸易各个环节社会监管风险越高,其矿产资源供给能力供应风险越大。

$$S10 = 100HDI \quad (10)$$

式中: $S10$ 为人类发展指数原始指标转化为 $[0, 100]$ 后的测算结果; HDI 代表人类发展指数原始数据,该数据来源于UNDP. Human Development Report 2017^[46]。

为了计算10个供应风险评估指标标准化后供应风险评估结果,表1中列出了15种关键金属的基本数据。

2.4 风险等级划分

本文将供应风险定量在 $[0, 100]$ 区间内,根据耶鲁大学Graedel团队和通用电气公司在原材料关键性评估研究中风险等级划分方式^[27],将其划分为高风险(80, 100]、中高风险(60, 80]、中风险(40, 60]、中低风险(20, 40]和低风险(0, 20]5个风险等级,风险等级越高说明关键金属的供应风险越大。

3 结果与分析

3.1 清洁能源技术关键金属供应风险评估结果

供应风险评估结果显示(表2),清洁能源技术关键金属风险等级均处于中等以上,钢、镓、锆3种稀有金属风险评估结果高于60,处于中高风险水平。其中,具有高度依赖性的伴生金属钢,由于资源储量不足且回收利用水平低,导致整体供应风险水平最高;镓和锆生产集中度很高进而导致较高的地缘政治风险,并且都具有伴生性,需求增加风险较高,故而整体供应风险水平较高。锂、钴、镉、硒、钼、钡、铂、铜、铝、锌、铁、钛12种金属评估结果高于40,处于中风险等级。其中,镉和硒是具有高度依

表1 供应风险评估指标数据

Table 1 Supply risk assessment index data

指标	储量/t	资源/t	生产量/t	回收率/%	伴生金属 依赖性/%	未来技术 需求/%	可替 代性	国家集 中度	政治稳 定性	政策感知 指数	人类发展 指数
锂	1.40×10^7	6.20×10^7	8.5×10^4	1	52	390	59	0.42	1.06	69.73	0.88
钴	6.90×10^6	1.45×10^8	1.4×10^5	68	85	90	46	0.45	-1.09	41.74	0.56
钢	1.88×10^4	1.25×10^5	7.5×10^2	1	100	289	40	0.27	0.49	48.24	0.84
镓	1.50×10^6	$(2.75 \sim 3.75) \times 10^6$	4.1×10^2	1	100	581	62	0.91	-0.32	38.17	0.75
锆	4.50×10^2	2.50×10^3	1.2×10^2	2	100	213	56	0.51	-0.25	42.43	0.74
镉	5.00×10^5	$(4.75 \sim 9.5) \times 10^6$	2.6×10^4	15	100	0	62	0.18	0.28	50.61	0.82
硒	9.90×10^4	9.60×10^5	2.8×10^3	5	100	11	53	0.22	0.59	49.24	0.84
钼	1.70×10^7	2.54×10^7	3.0×10^5	30	46	0	30	0.27	0.20	58.19	0.80
钡	3.45×10^4	5.00×10^4	2.1×10^2	14	97	24	61	0.29	-0.08	55.23	0.77
铂	3.45×10^4	5.00×10^4	1.6×10^2	14	16	156	34	0.47	0.03	47.22	0.72
铜	8.30×10^8	5.60×10^9	2.1×10^7	53	9	15	30	0.16	0.11	62.41	0.76
铝	3.00×10^{10}	5.50×10^{10}	3.0×10^8	60	0	0	56	0.35	-0.28	47.74	0.77
锌	2.30×10^8	1.90×10^9	1.3×10^7	31	10	0	62	0.18	-0.09	53.96	0.77
铁	8.40×10^{10}	2.30×10^{11}	4.0×10^9	67	1	0	43	0.20	-0.32	60.03	0.82
钛	9.40×10^8	2.00×10^9	6.1×10^6	1	0	21	37	0.10	0.06	57.92	0.74

注:镓资源量是根据铝土矿资源 $(55 \sim 75) \times 10^9$ t和铝土矿中50 ppm Ga的浓度计算;镉资源量是根据锌资源量 1.9×10^9 t计算,假设Cd:Zn比率为1:400至1:200。

表2 清洁能源技术关键金属供应风险评估结果

Table 2 Supplyriskassessmentresultsofcriticalmetalsincleanenergytechnology

关键原材料	供应减少风险				需求增加风险				地缘政治风险			社会监管风险			供应风险	风险等级
	储量静态范围	资源静态范围	回收率	风险	伴生金属依赖性	未来技术需求	可替代性	风险	国家集中度	政治稳定性	风险	政策感知指数	人类发展指数	风险		
锂	0	0	99	33	52	68	41	54	85	29	57	30	88	59	51	中风险
钴	71	0	32	34	85	27	54	55	86	72	79	58	56	57	56	中风险
钢	90	28	99	72	100	58	60	73	77	40	59	52	84	68	68	中高风险
镓	0	0	99	33	100	83	38	74	98	56	77	62	75	69	63	中高风险
锆	99	0	98	66	100	49	44	64	88	55	72	58	74	66	67	中高风险
镉	93	15	85	64	100	0	38	46	70	44	57	49	82	66	58	中风险
硒	83	0	95	59	100	4	47	50	73	38	56	51	84	68	58	中风险
钼	63	77	70	70	46	0	70	39	77	46	61	42	80	61	58	中风险
钡	0	0	86	29	97	9	39	48	79	52	65	45	77	61	51	中风险
铂	0	0	100	33	16	40	66	41	87	49	68	53	72	62	51	中风险
铜	80	0	47	42	9	6	70	28	68	48	58	38	76	57	46	中风险
铝	0	14	40	18	0	0	44	15	82	56	69	52	77	65	42	中风险
锌	94	43	69	69	10	0	38	16	70	52	61	46	77	61	52	中风险
铁	92	88	33	71	1	0	57	19	72	56	64	40	82	61	54	中风险
钛	0	0	99	33	0	8	63	24	60	49	55	42	74	58	42	中风险

注:评估指标研究结果通过公式将原始数据进行转换为[0, 100]区间相对数,评估结果为0并不代表完全没有风险,只是相对其他金属而言风险较低,同理,评估结果为100意味着相比于其他金属风险较高。

性的伴生金属,供应评估结果风险更高;由于缺乏成熟的可替代性技术和生产国的人类发展指数都偏高,钼的供应风险值达到58;而铝和钛由于在储量静态范围、资源静态范围、伴生金属依赖性以及未来技术需求方面风险值都比较低,因此这两种金属整体供应风险比较低。

3.2 清洁能源技术关键金属供应风险分项评估结果

(1) 供应减少风险

根据储量静态范围评估结果,锆、锌、镉、铁、钢、硒6种关键金属的风险评估结果高于80,处于高风险水平,主要是因为这6种关键金属的储量相对较低,而年生产量也相对较高。铜、钴、钼3种关键金属风险略低,处于中高风险水平,是由于这3种关键金属具备一定的可开采价值的储量,而锂、镓、钡、铂、铝和钛的风险最低。例如关键金属锂,根据美国地质调查局2019年公布数据,已探明锂的储量1400万t,资源丰富。资源静态范围评估结果显示,铁的风险最高为88,处于高风险水平,主要是因为铁的资源量相比较年生产量而言严重不足,具备较高的资源损耗,同时面临着较大的资源勘探和开采的市场压力。紧随其后的是钼,风险评估结果为

77,处于中高风险水平,同样是由于相对短缺的资源量导致的风险。随后按照风险大小依次是锌、钢、镉、铝,这4种关键金属风险较小,说明根据资源总量可暂时满足目前的年生产量。值得注意的是,钴、钢、锆、镉、硒、铜6种关键金属在储量静态范围和资源静态范围指标的风险评估结果差异较大。主要是因为这6种关键金属的储量较为匮乏,不能充分满足年生产量的需要,故而储量静态范围风险较大。由于储量只是资源的一部分,这6种关键金属的资源量比较丰富,与年生产量相比的结果远大于储量与年生产量相比结果,故而资源静态范围风险较小。根据回收利用率评估结果,锂、钢、镓、锆、铂、钛、镉、钡均处于高风险水平;钼、锌处于中高风险水平;铜、铝处于中风险水平;87%的清洁能源技术关键金属在回收利用率方面存在中等以上的风险。例如,锂离子电池以及新能源汽车中关键金属锂价格竞争性低,无法刺激可回收技术发展,进而回收成本较高^[47];薄膜型太阳能光伏发电技术中关键金属钢、镓、锆材料因缺乏政策激励措施,回收技术不成熟,进而导致回收利用水平低。

从清洁能源技术关键金属供应减少风险维度

来看,钢、铁、钼、锌、锆、镉等6种金属处于中高风险水平,锂、钴、镓、钡、铂、铝、钛的风险处于中低风险水平。其中,钢的风险最高,主要是因为已探明钢储量不足以完全支撑市场需求,同时回收利用率低,不能缓减供应中断风险;铝的风险最低。

(2)需求增加风险

根据伴生金属依赖性评估结果,伴生金属钢、镓、锆、镉、硒依赖性最高。稀散金属钢在地壳中含量少,80%左右来自于锌矿,其余来自于锡冶炼;镓主要作为铝土矿副产品进行生产,少数来自锌土矿;锆金属的60%来自于锌矿,40%来自于各种类型的煤矿中;镉几乎完全来自于锌矿;硒90%左右提取自电解铜,其余来自铅、锌、镍、银冶炼。根据未来技术需求评估结果,稀有金属镓的风险数高达89,属于高风险,主要是由薄膜型太阳能电池需求拉动;其次,由于电动汽车技术的快速发展,金属锂的未来技术需求风险属于中高风险。根据可替代性评估结果显示,钼和铜的可替代性风险值最高,达到70,处于中高风险水平;镓、镉、锌的风险值最低,仅为38,处于中低风险水平。

从清洁能源技术关键金属需求增加风险维度来看,风险水平从高到低依次为镓、钢、锆、钴、锂、硒、钨、钡、铂、钼、铜、钛、铁、锌、铝。光伏发电技术关键金属钢、镓、锆是稀有分散金属,这3种金属在需求增加维度风险最高,为中高风险等级;钴、锂、硒、钨为中等风险,钼、铜、钛为中低风险;铁、铝、锌的分项指标低于中等风险,进而整体呈低风险。

(3)地缘政治风险

根据国家集中度评估结果显示,镓、锆、铂、钴、锂、铝6种金属风险评估结果高于80,处于高风险水平。其余关键金属风险值也都高于60,均处于中高风险水平。国家集中度指标风险普遍较高主要是因为关键金属的地理性质,矿产资源地理分布不均衡使得关键金属资源仅被少数几个国家所控制。根据政治稳定性评估结果,钴的风险最高为72,处于中高风险水平。主要是因为钴的主要生产国刚果、古巴、菲律宾、马达加斯加、巴布亚新几内亚等国家的治理水平较低,而国内动乱或是国际恐怖主义等动荡局势都将影响供应的稳定性。其余关键

金属的风险都低于60,均处于中等以下的风险水平,关键金属依赖于主要生产国稳定的政治环境,产生供应中断的可能性较低。

从清洁能源技术关键金属地缘政治风险维度来看,钴、镓、锆、钼、钡、铂、铝、锌、铁等9种金属属于中高风险,其余金属均在中等以上风险水平。钴、镓、锆的风险值都高于70,其中钴的生产国国家集中度高且生产国治理水平低不稳定进而地缘政治风险最高,镓紧随其后,钛的分项指标评估结果相对较低故而地缘政治风险水平最低为55。

(4)社会监管风险

根据政策感知指数评估结果,镓的风险最高为62,处于中等风险水平,主要是因为镓的主要生产国矿业监管比较严格,矿山开采门槛较高。钴、锆、铂、钢、铝、硒、钨、钼、铜、钛、铁12种金属风险略低于镓,处于中等风险,这12种金属的主要生产国在矿产资源勘查、开采方面的监管政策比较有吸引力,可以增加矿产资源的开发利用,缓解供应短缺的风险。根据人类发展指数指标评估结果,处于高风险水平的6种金属由高到低依次是锂、钢、硒、钨、铁、钼,这6种关键金属的风险水平比较高的原因可能时因为矿产资源生产国的社会发展整体水平较高,在矿产资源开采、冶炼等环节门槛较高,极有可能影响矿产资源的供应能力。钡、铝、锌、铜、镓、锆、钛、铂、钴的风险评估结果低于80,风险水平相对较低,关键金属主要生产国的发展水平对供应水平限制较小。

从清洁能源技术关键金属社会监管风险维度来看,镓、钢、硒、锆、钨、铝、铂、钼、钡、锌、铁11种金属风险处于中高水平,锂、钛、钴、铜属于中等风险水平,说明清洁能源技术关键金属主要生产国矿业监管环境严格,资源开采门槛较高,采矿所付出的社会经济环境成本较大,社会监管风险整体较高。

4 结论与政策建议

4.1 结论

全球气候变暖和能源危机双重压力下,清洁能源已成为经济可持续发展的必然选择。清洁能源更具金属密集性,保障关键金属供应能力是清洁能源技术发展的物质基础。面对全球清洁能源技术

2020年8月

爆发式发展,本文以清洁能源技术关键金属为研究对象,从供给减少、需求增加、地缘政治、社会监管风险4个维度建立关键金属供应风险评估体系,对锂、钴、钢、镓、锗、镉、硒、钼、钡、铂、铜、铝、锌、铁、钛15种关键金属的供应风险进行评估,得出以下结论:

(1)清洁能源技术关键金属供应风险评估等级均处于中等风险以上,保障清洁能源技术关键金属的供应安全尤为重要。其中,钢、镓、锗3种关键金属风险评估结果高于60,处于中高风险水平;锂、钴、镉、硒、钼、钡、铂、铜、铝、锌、铁、钛12种关键金属评估结果高于40,处于中风险等级。

(2)供应减少风险结果显示,钢、铁、钼、锌、锗、镉等6种关键金属的风险值处于中高风险水平,其中钢的风险最高。需求增加风险结果显示,钢、镓、锗这3种关键金属的风险值处于中高风险水平,其中镓的需求增加风险最高。地缘政治风险结果显示,钴、镓、锗、钼、钡、铂、铝、锌、铁等9种关键金属属于中高风险,其余金属均在中等以上风险水平,其中钴的地缘政治风险最高,镓紧随其后。社会监管风险结果显示,镓、钢、硒、锗、镉、铝、铂、钼、钡、锌、铁11种关键金属风险处于中高风险水平,锂、钛、钴、铜4种关键金属属于中等风险水平,其中钢的社会监管风险水平最高。

4.2 政策建议

在全球清洁能源技术关键金属供应风险整体较高的背景下,中国清洁能源技术的突破和发展面临严峻挑战。伴随着世界各国关键矿产资源战略保障政策出台,中国急需厘清影响关键金属供应风险的影响因素和影响机制,缓解清洁能源技术发展的关键金属约束。

(1)创建清洁能源技术关键金属供应风险评估机制。经济全球化发展刺激世界各国之间的资源博弈,对清洁能源技术关键金属资源博弈更为激烈。建议国家自然资源管理相关部门,根据资源勘探情况、清洁能源技术变革现状、国际政治局势等因素,定期对清洁能源技术关键金属风险评估体系进行调整更新,并及时采取措施保障关键金属供应安全。

(2)建立清洁能源技术关键金属供应安全常态化风险分类管理机制。健全风险评估信息化系统,强化对矿产资源的风险管控,对不同风险的清洁能源技术关键金属实施分类管理,并对资源管理实行严格的红线管控制度。对供应风险较高的关键金属如钢、镓、锗等,实施严格的国家风险控制战略保障供给安全;对供应风险较低的关键金属如铜、钛、铝等,采取国家和企业双向控制,动态调整资源战略储备。

(3)加快建立清洁能源技术关键金属二次资源回收管理体系。二次资源回收是保障供给安全、有效、可持续的发展途径,应当制定有利于清洁能源技术关键金属回收的相关政策,尤其是对于回收率风险较高的关键金属,应当加大回收利用技术的研发力度。通过国家定向收储和免伴生金属资源税等组合措施鼓励企业加强回收,对于当前技术经济水平下不能回收的关键金属资源尾渣要妥善储存。

(4)加强清洁能源技术关键金属的技术研发。一是加强伴生金属提取技术研发,降低关键金属伴生依赖性。二是加强关键金属可替代性技术研发,增加关键金属的可替代性。国家可以通过增加科研经费、向技术先进研究机构学习等方式,鼓励国内地研究学者进行伴生金属提取技术和关键金属可替代性技术的研发,同时,可以通过降低税收等税收优惠政策鼓励企业进行技术突破,构建完善的伴生关键金属技术研发和可替代技术研发体系。

(5)增进与关键金属供应国间合作,降低地缘政治风险。关键金属资源地理分布时极不均衡的,要求我们加强与世界范围内关键金属供应国加强合作与交流,从而缓解由供应市场高度集中带来的不稳定性,并降低某些生产国因国内或国际政治局势动荡带来的供应短缺风险。此外,伴随着矿产资源全球化流动,应鼓励国内企业“走出去”,建议选择矿产资源丰富并且具备稳定社会环境的国家进行投资,开拓多渠道供应源,从而保障国内资源供应安全。

参考文献(References):

[1] Práválie R, Bandoc G. Nuclear energy: Between global electricity

- demand, worldwide decarbonisation imperativeness, and planetary environmental implications[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 209: 81–92.
- [2] Suman S. Hybrid nuclear–renewable energy systems: A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 181: 166–177.
- [3] IEA. *World Energy Outlook 2019*[R]. Paris: World Energy Outlook, 2019.
- [4] Cheng C T, Lo S L, Lin T T. Applying real options analysis to assess cleaner energy development strategies[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(10): 5929–5938.
- [5] Kwon P S, Østergaard P A. Comparison of future energy scenarios for Denmark: IDA 2050, CEESA (coherent energy and environmental system analysis), and climate commission 2050[J]. *Energy*, 2012, 46(1): 275–282.
- [6] Knopf B, Nahmmacher P, Schmid E. The European renewable energy target for 2030: An impact assessment of the electricity sector[J]. *Energy Policy*, 2015, 85: 50–60.
- [7] 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.
- [8] Pieroni M P P, McAloone T C, Pigosso D C A. Business model innovation for circular economy and sustainability: A review of approaches[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 198–216.
- [9] 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.
- [10] 陈其慎, 张艳飞, 倪善芹, 等. 日本矿产资源经略强国战略分析[J]. *中国矿业*, 2017, 26(12): 8–15. [Chen Q S, Zhang Y F, Ni S Q, et al. Discussion on the mineral resources strategic power in Japan[J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26(12): 8–15.]
- [11] 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): 133–140. [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): 133–140.]
- [12] Brussels E C. *Critical Raw Materials for the EU: Report of the Ad-hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials*[R]. Berlin: Critical Raw Materials for the EU, 2010.
- [13] Entr D. *Report on Critical Raw Materials for the EU*[R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015.
- [14] Blengini G A, Blagoeva D, Dewulf J, et al. *Assessment of the Methodology for Establishing the EU List of Critical Raw Materials—Background report*[R]. Luxembourg: JRC Technical Reports, 2017.
- [15] 龙如银, 杨家慧. 国家矿产资源安全研究现状及展望[J]. *资源科学*, 2018, 40(3): 465–476. [Long R Y, Yang J H. Research status and prospect of national mineral resource security[J]. *Resources Science*, 2018, 40(3): 465–476.]
- [16] 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.]
- [17] 马玉芳, 沙景华, 闫晶晶, 等. 中国镍资源供应安全评价与对策研究[J]. *资源科学*, 2019, 41(7): 1317–1328. [Ma Y F, Sha J H, Yan J J, et al. Safety assessment and countermeasures of nickel resource supply in China[J]. *Resources Science*, 2019, 41(7): 1317–1328.]
- [18] 刘全文, 沙景华, 闫晶晶, 等. 中国铬资源供应风险评价与对策研究[J]. *资源科学*, 2018, 40(3): 516–525. [Liu Q W, Sha J H, Yan J J, et al. Risk assessment and countermeasures of chromium resource supply in China[J]. *Resources Science*, 2018, 40(3): 516–525.]
- [19] 范松梅, 沙景华, 闫晶晶, 等. 中国铁矿石资源供应风险评价与治理研究[J]. *资源科学*, 2018, 40(3): 507–515. [Fan S M, Sha J H, Yan J J, et al. Risk assessment and management of iron ore resource supply in China[J]. *Resources Science*, 2018, 40(3): 507–515.]
- [20] Moss R L, Tzimas E, Kara H, et al. The potential risks from metals bottlenecks to the deployment of strategic energy technologies[J]. *Energy Policy*, 2013, 55: 556–564.
- [21] Blengini G A, Nuss P, Dewulf J, et al. EU methodology for critical raw materials assessment: Policy needs and proposed solutions for incremental improvements[J]. *Resources Policy*, 2017, 53: 12–19.
- [22] Daw G. Security of mineral resources: A new framework for quantitative assessment of criticality[J]. *Resources Policy*, 2017, 53: 173–189.
- [23] 王昶, 宋慧玲, 左绿水, 等. 中国优势金属供应全球需求的风险评估[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(7): 1218–1229. [Wang C, Song H L, Zuo L S, et al. Risk assessment of China's preponderant metals' supplying to global demand[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(7): 1218–1229.]
- [24] 张艳飞, 陈其慎, 于汶加, 等. 中国矿产资源重要性二维评价体系构建[J]. *资源科学*, 2015, 37(5): 883–890. [Zhang Y F, Chen Q S, Yu W J, et al. Building a two dimensional coordinate evaluation system of mineral resource importance[J]. *Resources Science*, 2015, 37(5): 883–890.]
- [25] Daw G. Security of mineral resources: A new framework for quantitative assessment of criticality[J]. *Resources Policy*, 2017, 53: 173–189.
- [26] Graedel T E, Barr R, Chandler C, et al. Methodology of metal criticality determination[J]. *Environmental Science & Technology: ES&T*, 2012, 46(2): 1063–1070.

2020年8月

- [27] Graedel T E, Harper E M, Nassar N T, et al. Criticality of metals and metalloids[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(14): 4257-4262.
- [28] 李鹏飞, 杨丹辉, 渠慎宁, 等. 稀有矿产资源的战略性评估: 基于战略性新兴产业发展的视角[J]. *中国工业经济*, 2014, (7): 44-57. [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.]
- [29] 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(5): 116-127. [Wang C, Qin Y, Shao L G, et al. Key associated materials availability in clean energy technologies based on system dynamic: The case study of Gallium[J]. *Systems Engineering*, 2018, 36(5): 116-127.]
- [30] 王昶, 孙晶, 左绿水, 等. 新能源汽车关键原材料全球供应风险评估[J]. *中国科技论坛*, 2018, (4): 83-93. [Wang C, Sun J, Zuo L S, et al. Evaluation of global supply risk of critical minerals for new energy vehicles[J]. *Forum on Science and Technology in China*, 2018, (4): 83-93.]
- [31] 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 prospects of advanced material innovative development[J]. *Resources Science*, 2019, 41(2): 207-218.]
- [32] Goe M, Gaustad G. Identifying critical materials for photovoltaics in the US: A multi-metric approach[J]. *Applied Energy*, 2014, 123: 387-396.
- [33] Helbig C, Bradshaw A M, Wietschel L, et al. Supply risks associated with lithium-ion battery materials[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 274-286.
- [34] Helbig C, Bradshaw A M, Kolotzek C, et al. Supply risks associated with CdTe and CIGS thin-film photovoltaics[J]. *Applied Energy*, 2016, 178: 422-433.
- [35] Grandell L, Hook M. Assessing rare metal availability challenges for solar energy technologies[J]. *Sustainability*, 2015, 7(9): 11818-11837.
- [36] Valero A, Valero A, Calvo G, et al. Material bottlenecks in the future development of green technologies[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 93: 178-200.
- [37] Helbig C, Bradshaw A M, Wietschel L, et al. Supply risks associated with lithium-ion battery materials[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 274-286.
- [38] U. S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries[EB/OL]. (2020-08-25) [2020-08-26]. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/mineral-commodity-summaries>.
- [39] Graedel T E, Allwood J, Birat J P, et al. Recycling Rates of Metals: A Status Report[R]. Nairobi: A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel, 2011.
- [40] Graedel T E, Harper E M, Nassar N T, et al. On the materials basis of modern society[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(20): 6295-6300.
- [41] Nassar N T, Graedel T E, Harper E M. By-product metals are technologically essential but have problematic supply[J]. *Science Advances*, 2015, 1(3): e1400180.
- [42] Angerer G, Marscheider W F, Lüllmann A, et al. Raw Materials for Emerging Technologies[R]. Fraunhofer ISI, 2009.
- [43] U. S. Department of Justice and Federal Trade Commission. Horizontal Merger Guidelines[EB/OL]. (2010-08-19) [2017-08-30]. <https://www.ftc.gov/sites/default/files/attachments/mergers/100819hmg.pdf>.
- [44] World Bank. The Worldwide Governance Indicators[R]. Washington: The World Bank, 2018.
- [45] Jackson T, Green K P. Fraser Institute Annual Survey of Mining Companies, 2018[EB/OL]. (2020-08-25) [2020-08-26]. <https://www.fraserinstitute.org/sites/default/files/annual-survey-of-mining-companies-2018.pdf>.
- [46] United Nations Development Programme. Human Development Report 2019[R]. New York: The United Nations Development Programme, 2019.
- [47] 郑人瑞, 唐金荣, 周平, 等. 我国锂资源供应风险评估[J]. *中国矿业*, 2016, 25(12): 30-37. [Zheng R R, Tang J R, Zhou P, et al. Risk assessment of lithium resources supply in China[J]. *China Mining Magazine*, 2016, 25(12): 30-37.]

Supply risk assessment of critical metals in clean energy technology

HUANG Jianbai¹, SUN Fang¹, SONG Yi²

(1. School of Business, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Economics and Management, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China.)

Abstract: The transformation of the global energy structure is the only way to achieve sustainable development, and the development of clean energy technology relies on a variety of critical metal materials. To ensure the development of global clean energy technology and the transformation of the global energy structure, this paper selects 15 critical metals of clean energy technology, establishes a supply risk assessment system from four dimensions of supply reduction, demand increase, geopolitics and social supervision, including 10 assessment indicators. The results show that: (1) the critical metals of clean energy technology are all at medium- risk or above. Among them, the supply risk assessment of indium, gallium and germanium is at a high risk level; 12 metals supply risks of lithium, cobalt, cadmium, selenium, molybdenum, palladium, platinum, copper, aluminum, zinc, iron and titanium are in medium risk level. (2) In the supply reduction risk dimension, six metals such as indium, iron, molybdenum, zinc, germanium, and cadmium belong to medium and high risks, and the risk of indium is the highest; among the risk dimensions of increased demand, the risks of indium, gallium, and germanium are medium to high risks; In the political risk dimension, 9 metals belong to medium and high risks, and cobalt has the highest risk; in the social regulatory risk dimension, 11 metals belong to medium and high risks, and indium has the highest risk. Therefore, it is necessary to establish a normalized risk classification management mechanism for the supply of critical metals and a secondary resource recovery management system as soon as possible, and enhance cooperation with critical metal suppliers to alleviate critical metal constraints for the development of clean energy technology.

Key words: clean energy technology; critical metals; geopolitical risk; supply risk; risk assessment