

引用格式: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.] DOI: 10.18402/resci.2020.08.01

战略性关键矿产资源供给安全研究综述与展望

吴巧生,周娜,成金华

(中国地质大学(武汉)经济管理学院,武汉 430074)

摘要:战略性关键矿产资源事关人类社会持续发展、在关键领域发挥战略性作用。本文从战略性关键矿产资源的界定与遴选、供给风险评价与预警、供给安全体系优化与政策三方面对当前研究进行了综述。主要结论有:①战略性关键矿产资源是满足国防军事需求与实现战略性新兴产业良性发展的原材料,是一个国家或地区主权属性的集中体现,需结合国家或地区发展实际动态遴选战略性新兴产业矿种;②战略性关键矿产资源供给风险具有更强的模糊性与不确定性,战略性新兴产业供给风险评价模型的建立面临诸多挑战;③通过全球资源优化配置,完善全球治理体系,是战略性新兴产业供给安全体系优化与政策选择的重要方向。从多学科交叉研究供给安全的形成机理,由大数据驱动与全球供应链跟踪明确供给风险评价要素,基于外部冲击因素和内部产业因素结合的视角完善战略性新兴产业供给安全政策是未来战略性新兴产业供给安全研究的重要方向。

关键词:战略性新兴产业;供给安全;风险评价与预警;政策选择;研究综述

DOI :10.18402/resci.2020.08.01

1 引言

矿产资源供给安全问题由来已久^[1]。20世纪中叶以来,化石燃料消费量急剧增长,石油在一次能源消费中的比重超过煤炭,跃居一次能源首位,随之而来的石油危机使世界对能源供给安全问题的认识愈加深刻。1974年成立的国际能源署(IEA)将国际原油市场的平稳供给及其价格变化定义为影响国家能源供给安全的核心,强调价格的波动对原油等能源供给的可靠性、稳定性和充足性的影响。受可持续发展议题的影响,矿产资源利用全生命周期内产生的生态环境问题显现,使矿产资源供给安全的内涵和外延逐渐扩展。矿产资源供给安全从传统关注资源利用的可获得性、可接受性、可利用性和可承受性,延伸至生态环境协调与经济社会可持续发展^[2-4]。但当前关于矿产资源供给安全的定义尚没有形成一致的认识,供给安全评价缺乏统一的

标准^[5-9]。

经济全球化的不断深化,新技术革命和产业变革的持续推进,推动了全球矿产资源需求结构的转型,使抢占全球经济制高点和创新能力制高点成为国家核心竞争目标。战略性新兴产业作为战略性新兴产业发展的基础,其供给安全受到广泛关注。目前已有多个国家根据自身新兴产业发展需要,相继发布关键原材料清单^[10-12]。在中国政治、经济、文化、社会正处在历史变革的新时代背景下,以实现伟大梦想为目标,国家战略性新兴产业供给安全必须落实共同、综合、合作、可持续的新安全观,为构建人类命运共同体发挥积极作用^[13]。战略性新兴产业供给安全被赋予了新的内涵,面临更为复杂的风险与不确定性,其影响因素、形成机理与实现路径等问题有待深入探讨。

据此,本文对现有文献进行分析,通过系统梳

收稿日期:2020-02-17;修订日期:2020-04-09

基金项目:国家自然科学基金重大项目(71991482);国家社会科学基金重大项目(19ZDA112);中国地质大学(武汉)中央高校基本科研业务费资助项目(2201710266)。

作者简介:吴巧生,男,湖南娄底人,教授,研究方向为资源环境经济与管理。E-mail: qshwu@cug.edu.cn

通讯作者:周娜,女,湖北恩施人,博士生,研究方向为矿产资源经济学与可持续发展。E-mail: nazhou@cug.edu.cn

理已有文献,总结研究进展,重点关注战略性关键矿产资源的内涵及遴选、供给风险评价与预警、供给安全体系优化与政策等问题,指出战略性关键矿产资源供给安全未来的研究方向,进而为保障国家战略性关键矿产资源供给安全提供决策参考。

2 战略性关键矿产资源的内涵及遴选

2.1 战略性关键矿产资源的内涵

当前对于“危机矿产”“关键矿产”“关键金属”“战略性矿产”“战略性新兴产业矿产”“战略性关键矿产”“三稀矿产”“战略性高技术矿产”等概念的讨论方兴未艾。对战略性关键矿产资源内涵的分析,首先有必要明确上述概念的联系和区别。“危机矿产”“关键矿产”或“关键金属”(Critical Minerals)与“战略性矿产”(Strategic Minerals)源于美国20世纪30年代末矿物原材料供给储备,其中“战略性矿产”最早作为一个军事概念提出,“关键矿产”则概括为受限于国内资源禀赋或生产开采条件,在战争等造成的国家紧急状态下,对国防、工业和居民基本生活需求造成重要影响的矿产资源^[4,15],因此“关键矿产”包含“战略性矿产”^[16,17]。“战略性新兴产业矿产”与“战略性高技术矿产”则强调与新技术和新材料产业发展有关的重要原材料,“三稀矿产”便是重要的矿种^[16,18]。2016年11月,自然资源部印发《全国矿产资源规划(2016—2020)》^[19](以下简称《规划》),全文共出现“战略性矿产”概念11次,“战略性新兴产业矿产”概念7次。《规划》共列出24种战略性矿产,包括6种能源矿产、14种金属矿产和4种非金属矿产;战略性新兴产业矿产则是与新兴产业发展息息相关的非常规能源、稀土、铌、钽、锂、晶质石墨等。王登红^[16]在此基础上将“战略性关键矿产”界定为“用量不大但关键”的战略性矿产资源。

基于上述分析,可以发现目前战略性关键矿产概念较为模糊,无严格统一的界定,不同国家、地区或国际组织基于国家或地区安全、经济发展、产业升级等视角,分别提出了“关键矿产”“战略性新兴产业矿产”和“战略性矿产”等概念,它们既相互联系又各有侧重,但核心为满足国防军事需求与实现战略性新兴产业良性发展的原材料,其供给具有重要性与脆弱性双重属性。总体来看,战略性关键矿产资

源可以定义为事关人类社会持续发展、在关键领域发挥战略性作用的矿产资源,是一个国家或地区主权属性的集中体现,其内涵大致涵盖以下几个方面:第一,与国家或地区高科技产业与新兴产业发展息息相关的关键原材料;第二,本国或地区资源条件优渥,但由于核心开发技术落后,使其处于全球产品价值链下游环节,或由于开发产生的环境负效应过大而采取从国外进口策略,造成对外依存度过高的矿种;第三,本国或地区资源匮乏,导致对外依存度过高或进口集中度过高的矿种;第四,需依据国家或地区发展战略目标、具体市场条件进行动态遴选。

2.2 战略性关键矿产资源的遴选

在现有文献中,常见的被纳入关键矿种的资源有57种,其中,稀土(REE)、铂族金属与钨普遍被评为战略性或关键矿种^[20]。美国、日本、澳大利亚和欧盟等国家或地区已经从产业发展需求出发,完成了关键矿种选择^[8],对中国战略性关键矿产资源的遴选具有借鉴意义。欧盟从维护欧共体各国整体利益出发,提出了关键原材料目录,以确保能可靠而不受阻碍地获取某些原材料^[21,22]。为确保关键矿产资源供应和其供应链的弹性,美国商务部于2019年发布《确保关键矿物安全可靠供应的联邦战略》^[23],将35种矿种确定为关键矿产,其中14种100%需要进口的矿种中,从中国进口的有8种。作为贫矿国的日本于2009年提出了稀有金属确保战略,以应对供给中断造成的潜在风险,并优选出31种关键矿种^[24]。而澳大利亚作为世界矿产资源主要供给国,提出的关键矿产战略则致力于改善澳大利亚矿业投资环境,以占据在关键矿产原材料和精炼市场的优势地位^[25]。澳大利亚将关键矿产分为3类,即一类7种(铂族元素、锆、铬、钴、镍、稀土元素、铜)、二类15种(铋、氦、锂、锰、钼、铍、铌、石墨、钛、钽、锶、钨、锡、钨)、三类12种(钡、碲、钒、氟、镉、汞、镓、铼、砷、锑、硒、锗)。当前国家一级的关键矿产清单如图1,其中铋、铂、锶等21种矿产均被美日澳列入清单之中。与传统大宗矿产相比,上述21种矿种均符合“用量不大但关键”的定义,且由于世界新能源、新材料、新技术等战略性新兴产业的发展,其有

表1 关键矿种评价统计结果

Table 1 Critical minerals identified in selected studies

代表文献	评价矿种数	战略性或关键矿种数	具体矿种	评价维度		
				供给风险	脆弱性	生态风险
NRC ^[28]	11	5	锰、铌、铜、铂族金属、稀土	√	√	部分使用
Morley等 ^[29]	36	7	铍、银、锡、锑、金、汞、铂族金属	√	√	×
Buchert等 ^[30]	9	9	锂、钴、镓、锗、铜、碲、钽、铂族金属、稀土	√	×	×
EC ^[31]	30	13	铍、碳、镁、钴、镓、锗、铌、铜、锑、钽、钨、铂族金属、稀土	√	√	√
DLA ^[32]	34	9	铍、铬、钴、锌、锗、铌、钨、铂族金属	√	×	×
Sarah等 ^[20]	28	14	铍、碳、氟、镁、钴、镓、锗、铌、铜、锑、钽、钨、铂族金属、稀土	√	√	√
Moss ^[33]	12	8	钒、镓、硒、铌、铜、锡、蹄、稀土	√	×	×
BGS ^[34]	50	29	氦、锂、铍、碳、镁、钾、锰、钴、锗、砷、溴、铍、铌、银、镉、铜、锡、锑、碘、钽、钨、铼、金、汞、铋、钍、铂族金属、稀土	√	×	×
BGS ^[35]	40	21	铍、碳、镁、钴、镓、锗、砷、硒、铍、铌、铜、锑、蹄、钽、钨、汞、铋、铂族金属、稀土	√	×	×
Willis等 ^[36]	34	27	锂、铍、氟、镁、硅、钛、铬、锰、钴、镍、锌、镓、锗、钼、铌、银、铜、锡、锑、碲、钽、钨、铼、铅、铋、铂族金属、稀土	√	×	×
DLA ^[37]	35	13	铍、氟、铝、铬、锰、镓、锗、锡、锑、钽、钨、铋、稀土	√	×	×
Moss等 ^[38]	24	16	碳、钒、铬、钴、镓、锗、铌、铜、锡、碲、钼、钨、铼、金、铂族金属、稀土	√	×	√
Skirrow等 ^[39]	2	2	磷、钾	√	√	×
EC ^[40]	38	17	铍、硼、碳、氟、镁、硅、磷、铬、钴、镍、镓、锗、铌、铜、锑、钨、铂族金属	√	√	√
DLA ^[41]	30	8	铍、镁、铝、锰、锗、锑、钨、稀土	√	×	×
BGS ^[42]	40	25	锂、铍、碳、氟、镁、钒、钴、镓、锗、砷、硒、铍、铌、银、镉、铜、锡、钼、钽、钨、铼、汞、铋、铂族金属、稀土	√	×	×
Bastein等 ^[43]	37	10	铝、铁、铜、镓、锗、钼、铂族金属、稀土元素	√	√	√
Hatayama等 ^[44]	19	17	铬、锰、铁、钴、铜、锌、铌、钼、银、铜、锡、钽、钨、金、铅、铂族金属、稀土	√	√	×
Graedel等 ^[45]	44	14	钨、砷、硒、锗、银、镉、铜、锡、铼、金、汞、铊、铋、铂族金属	√	√	√
Bortnikov等 ^[46]	18	18	锂、铍、钨、钴、镓、锗、硒、铍、钨、银、铜、锡、蹄、钽、铼、铊、铋、稀土	√	√	×
NSTC ^[47]	47	11	镁、钒、钴、锗、铋、锑、钨、汞、铋、铂族金属、稀土	√	×	×
Schulz等 ^[48]	23	23	锂、铍、碳、氟、钛、钒、锰、钴、镓、锗、硒、锗、铌、铜、锡、锑、蹄、钽、钨、铼、铂族金属、稀土	√	√	√
EC ^[22]	43	24	氦、铍、硼、碳、氟、镁、硅、磷、钨、钒、钴、镓、锗、铋、铌、铜、锑、钼、钽、钨、铼、铂族金属、稀土	√	√	√
McCullough等 ^[49]	47	19	碳、镁、磷、钒、钴、镓、锗、铍、钨、汞、铋、铂族金属、稀土	√	×	×
Fortier等 ^[50]	52	34	氦、锂、铍、碳、氟、镁、铝、钾、钒、铌、钛、钨、铬、锰、钴、镓、锗、铍、砷、锗、铜、锡、锑、蹄、铍、钨、钼、铋、铊、铋、铈、铂族金属、稀土	√	×	×

类型更复杂,且存在共伴生属性,在资源风险、经济技术风险、生态环境风险等方面均具有更强的模糊性与不确定性,战略性关键矿产资源供给风险评价必将更加富有挑战性,如何改进或拓展现有评价模型显得尤为必要。

3.2 战略性关键矿产资源供给预警研究

基于供给风险评价的安全预警机制研究也取得了重要进展。Knobloch等^[84]指出,脆弱性是矿产资源供给风险预警的基础。矿产资源供应市场易

受多种因素的影响,且这些因素很大程度上不受单个国家或组织的控制,因此在脆弱性评价中,“敏感性”“适应能力”对特定系统具有内生性,而“暴露”显示的不安全基本与系统无关(图2)。但Erdman等^[59]认为内部和外部的各种随机风险都可能导致供应中断,使系统“暴露”。还有研究认为供应链的复杂性使政府和企业面临更大的随机供应中断风险^[85]。

战略性关键矿产资源品种繁多,特别是一些稀有金属、稀土矿产,利用方式、利用前景不好确定,

表2 国外矿产资源供给风险评价指标

Table 2 Supply risk indicators of mineral resources in international studies

供给风险指标类别	具体指标	作者/机构	数据来源
地质风险	储量可获得性	Hatayama 等 ^[44] 和 USGS ^[69]	USGS
	矿产产能利用	Rosenau-Tornow 等 ^[70]	世界金属统计局(World Bureau of Metal Statistics)
技术风险	联产水平	Nassar 等 ^[71] 和 Gulley 等 ^[72]	耶鲁大学
	可再利用性	Graedel 等 ^[52] 和 Chapman 等 ^[73]	联合国环境规划署, Oakdene Hollins and Fraunhofer ISI
经济风险	市场可替代性	Chapman 等 ^[73]	Oakdene Hollins and Fraunhofer ISI
	需求增长	Chapman 等 ^[73]	Oakdene Hollins and Fraunhofer ISI
	历史价格波动	USGS ^[69]	USGS; Metals Economics Group
	市场均衡	Rosenau-Tornow 等 ^[70]	多种来源
	矿产资源生产成本	Rosenau-Tornow 等 ^[70]	企业年报
	矿业投资	Hatayama 等 ^[44]	多种来源
	库存水平	Rosenau-Tornow 等 ^[70]	多种来源
地缘政治风险	全球供给集中度	Hatayama 等 ^[44] , Masoudi 等 ^[61] , Rosenau-Tornow 等 ^[70] 和 Glöser 等 ^[74]	国家层面数据来源于 USGS 或 UN Comtrade, 暂无企业层面的集中度数据源
	政府稳定度	Nassar 等 ^[71]	世界银行
	进口贸易依存度	Rosenau-Tornow 等 ^[70] 和 Gulley 等 ^[72]	地方地质调查或统计机构
	气候变化脆弱性	Achzet 等 ^[51] 和 Graedel 等 ^[52]	德国气候变化咨询委员会
规制风险	环境标准	Hsu 等 ^[75] 和 Zhang 等 ^[76]	耶鲁大学
	政策潜力指数	Zhang 等 ^[76] 和 Jackson 等 ^[77]	Fraser Institute
	贸易壁垒	Gulley 等 ^[72]	政府数据库
社会风险	经济子系统稳定度	UNDP ^[78]	联合国环境规划署
	新闻曝光数量	Gulley 等 ^[72]	多种来源

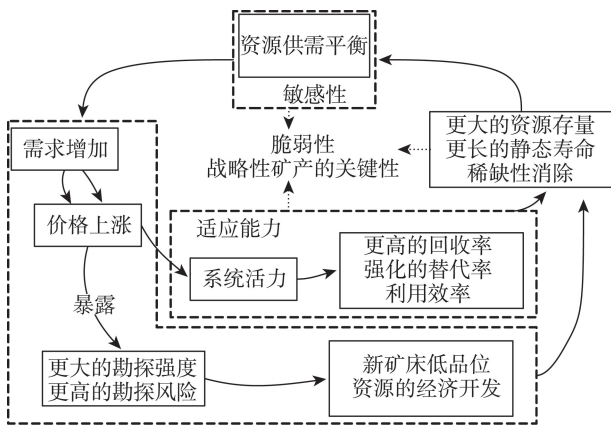


图2 资源供需调节回路^[84]

Figure 2 A loop of resource supply and demand adjustment^[84]

资源供应国集中,需求模型建立困难,供求缺口难以预估,加上环境因素和国际竞争,风险评估模型和预警机制建立困难较大。近年来,一些专家借鉴大宗矿产资源风险评估和预警方法,建立了战略性关键矿产资源供给风险评估和预警机制^[86,87],可为进一步研究提供借鉴。

尽管大量研究为矿产资源供给风险评价与预警搭建了一个相对完整的分析框架,但是由于存在指标量化困难以及资源异质性问题,战略性关键矿产资源供给风险评价模型的建立面临诸多挑战。尤其是如何结合新时代背景下战略性关键矿产资源的市場风险、技术风险、产业风险、环境风险等构建动态安全评价模型与预警机制,显得尤为重要。

4 战略性关键矿产资源供给安全体系优化与政策响应

4.1 战略性关键矿产资源供给安全体系优化策略

全球经济失衡和由其导致的竞争恶化对战略性关键矿产资源供给安全体系造成了重大冲击^[88],只有采取更加强有力的举措才能保障资源供给安全^[89]。Hilpert 等^[90]的研究显示,一国奉行的矿产资源安全战略不仅取决于其资源禀赋、生产、消费和产业结构,更是防范风险的历史总结与国家利益的

集中体现。如 Barteková等^[91]分析了全球5个稀土贸易国的供给战略(图3),结果显示各国在保证稀土稳定供给这一共同目标下的供给安全体系优化重点并不相同:美国通过提高创新能力保证稀土供给稳定;欧洲和日本则是利用资源外交,同时日本也重视国外供应多元化和回收与研发环节;中国在“两个市场”持续实施供给多元化战略时,也在加大资源储备实现资源保护;澳大利亚重视资源外交与国内资源开发。

一般来说,战略性关键矿产资源供给安全要求保证国内资源的控制能力和国外资源的获取能力^[92],现有文献大多集中在供给多元化战略方面,强调增加资源供应的灵活性^[93-96]。供给多元化战略包括进口来源的多元化、运输方式的多元化和资源结构的多元化等3个方面:进口来源的多元化,目的是减少对某个供给国(地区)或者供给路线的过度依赖,以免发生突然供给中断造成的巨大影响,从而对供给风险进行管理;运输方式的多元化强调采用多种方式进行运输,降低运输路线中断造成的风险和损失;资源结构的多元化则是利用研发提高资源替代率,优化资源结构。事实上,大部分矿产资源载体的生产和消费地区因为距离遥远而相互分隔,短时间难以实现替代与大量存储。另一方面,“原材料案”和“稀土案”争端的浮现,是美国、欧盟和日

本等主要发达国家(地区)利用已取得的现行多边贸易体系主导权,倒逼中国敞开优势矿产资源供应的集中体现^[97]。随着战略性新兴产业的发展和工业4.0时代的到来,中国的战略性关键矿产消费也将呈现快速增长趋势。在国内资源消费需求强劲和发达经济体不断加紧对中国优势关键矿种争夺的双重压力下,通过全球资源优化配置与完善全球治理体系,是战略性关键矿产资源供给安全体系优化必须关注的重要方面。

4.2 战略性关键矿产资源供给安全政策响应

为了应对不同的矿产资源供给风险及其潜在发生概率,现有研究也提出了各类预防策略与应对策略,预防策略包括冗余策略、缓冲策略、套期保值策略、增加容量等,旨在限制供应中断造成的风险^[98];应对策略包括灵活性策略、计划后行动、控制策略、提高响应能力等,旨在快速应对此类中断^[99]。其中,作为冗余策略的资源储备,其最优储备方案的确定是大多学者关注的重点,一般运用随机动态规划方法和数值模拟技术,研究资源的最优储备规模和最优储备策略^[100]。

对应的供给安全政策主要集中在资源保护、环境保护、产业发展和国际贸易等多个方面^[87]。借鉴上述政策分类方法,本文对 Hilpert等^[90]列出的战略性关键矿产资源全球治理工具进行了再分类(表3)。与传统大宗矿产资源相比,战略性关键矿产资源成矿地质条件更加特殊,在资源基础、勘查开发利用技术、价格波动等方面具有更强的模糊性、复杂性与不确定性,传统的矿产资源供给安全管理模式显然不适用于这类矿产资源的需要。尤其是在新时代背景下,战略性关键矿产资源是高质量发展、绿色发展的基础,如何在化解资源供给外源风险、维护发展权益的同时,满足现代化经济体系建设和资源环境监管体制改革的内源性需求,是新时代中国战略性关键矿产资源供给安全政策响应面临的重要挑战,也是今后战略性关键矿产资源供给安全体系理论探索的重要方面。

从系统工程思想出发,战略性关键矿产资源供给安全体系优化的核心就是识别战略性关键矿产资源供给风险因素,刻画风险因子的相互作用,评

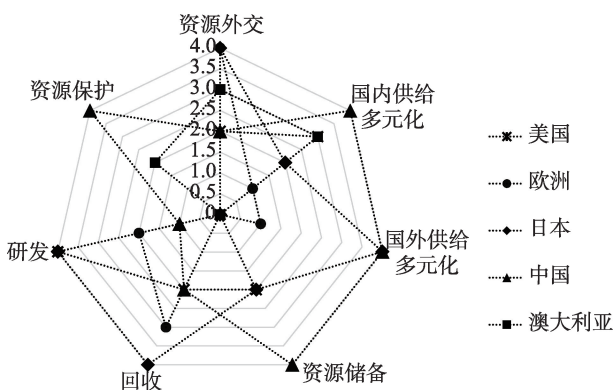


图3 主要国家稀土供给战略

Figure 3 Rare earth supply strategies in selected countries

数据来源:根据 Barteková等^[91]整理而成,雷达图中0~4表示各国稀土政策在不同目标上的完备程度,0表示未发布相应政策;1表示已发布相关政策但未形成体系;2表示发布了相关政策并逐渐形成体系;3表示体系已经形成但未完善;4表示已经形成成熟的政策体系。

2020年8月

表3 战略性关键矿产资源供给安全政策工具及中国使用情况

Table 3 Supply security policy tools for strategic key minerals and their use in China

政策类型	政策工具	中国使用情况
资源保护	国家战略性关键矿产战略	√
	战略性关键矿产资源动态优选	×
	国家储备	√
环境保护	影响战略性关键矿产行业发展的环境法律	√
	环境税	√
产业发展	促进国内勘探和开采	√
	促进资源回收利用	√
	促进替代品的发展	×
	促进生产效率提升	√
	加大创新与研发	√
	补贴国内生产和加工	√
	私人投资许可	√
	竞争法/反托拉斯机构	√
	外商直接投资许可	√
	国家投资担保	√
	税收优惠	√
	企业技术扶持	√
	提高供应链透明度	×
	国际贸易	资源出口限制
非关税壁垒		√
进口补贴		√
双边投资(贸易)协议		√
利用世贸组织争端解决机制		√

数据来源:作者根据 Hilpert 等^[90]的政策工具按照杨丹辉^[87]的分类方法整理得到。“√”表示中国已使用该种政策工具,“×”表示未使用。

估其对战略性关键矿产供给安全产生的影响^[101]。全球治理作为全球化背景下出现的一种新理念与新实践,其实质是治理层级的国际化或全球化,是一种多层次公共产品供给机制。新时代背景下,中国参与全球治理已成为一种必然。从全球治理角度看,中国战略性关键矿产资源安全就是战略性关键矿产资源各类主体间的“优态互利共生”,即以构建矿产资源人类命运共同体为目标,统筹兼顾国家战略性关键矿产资源自身安全与全球资源共同安全,发挥不同类型、不同层次主体的主观能动性,通过投资或贸易上的互惠互利,以提供矿产资源关键性基础设施为手段,以构建全球统一的矿产资源市场为目标,整合各行为主体的利益诉求,实现战略

性关键矿产资源可持续发展目标。其中,“优态”指各类型主体实现资源可持续发展的生存境况;“互利共生”指各类型主体通过投资或贸易的融合发展实现帕累托改进或最优。伴随全球化进程,“优态互利共生”已逐渐成为世界各国战略性关键矿产资源供给安全政策的潮流与趋势。

5 战略性关键矿产资源供给安全研究展望

从世界各国应对战略性关键矿产资源供给安全问题的政策演变来看,其内在动因主要表现为应对突出性“黑天鹅”属性的供给中断,关键性储备成为一种政策取向。但近年来随着全球化进程的推进,如何防范“灰犀牛”属性的资源供给风险成为世界各国参与全球治理的一种必然选择。就中国而言,实现降低生态文明建设内源性风险,化解资源供给外源性风险,进而主动融入矿产资源全球治理,是目前中国战略性关键矿产资源供给安全政策面临的重要挑战。为了应对全球化的诸多不确定性,获得经济、社会、技术、政治和环境等目标的一致性,探索能同时促进战略性关键矿产资源供给安全和可持续发展的策略,避免政策只集中于减少进口依赖,还必须考虑战略性关键矿产资源供给安全的地缘政治维度、多元化进口、自主策略、科技革命等的协同效应。据此,未来战略性关键矿产资源供给安全研究,尤其是评价要素的选择方面有必要从以下几个方面加以强化:

(1)加强战略性关键矿产资源供给安全形成机理的多学科交叉研究。综合运用地球系统科学、复杂系统科学、管理科学等理论与方法,科学识别战略性关键矿产资源供给各类影响因素的协同耦合关系,客观描述各因子对战略性关键矿产资源供给的传导机理与调控方式,构建多准则决策优化模型,优化资源供给安全体系。

(2)在战略性关键矿产资源供给风险评价要素的选择上,强化对战略性关键矿产资源全球供给链的跟踪与大数据驱动的影响分析,从国内外市场联系的角度,考察世界资源缺口及区域异质化(供需区域不对称性)、国际矿产资源价格波动、国内资源缺口、经济发展韧性等因素在多大程度上影响国家

战略性关键矿产资源供给安全系统的演化。

(3)结合新时代背景,加强战略性关键矿产资源供给安全政策研究,将外部冲击因素和内部产业因素同时纳入资源供给安全政策评估体系,测度开放条件下国际金融资产、国际矿产资源价格波动、汇率波动、国内矿产资源产业竞争力等如何影响国家战略性关键矿产资源供给安全,检测各环节隐藏的脆弱点,综合研判风险来源,并对潜在风险进行预警;模拟分析资源不确定性、技术不确定性、经济影响不确定性以及社会和生态环境影响不确定性等对资源供给安全政策的影响,研判“一带一路”倡议和中国制造2025、德国工业4.0、“美国优先”等国家或区域战略的实施对战略性关键矿产供给安全的作用效果,动态评估和预测国家战略性关键矿产资源安全。

6 结论

本文以战略性关键矿产资源供给安全为研究对象,从战略性关键矿产资源的内涵及遴选、供给风险评价与预警、供给安全体系优化与政策等维度梳理了当前研究进展,得出了以下结论:

(1)不同国家(地区)或国际组织基于国家(地区)安全、经济发展、产业升级等需求,提出了“关键矿产”“战略性新兴矿产”和“战略性矿产”等概念,它们既相互联系又各有侧重,但核心为满足国防军事需求与实现战略性关键产业良性发展。战略性关键矿产供给具有重要性与脆弱性双重属性,需结合国家(地区)发展实际动态遴选战略性关键矿产资源。

(2)当前矿产资源供给风险评价对象主要集中在大宗矿产资源,评价指标主要涉及地质风险、技术风险、经济风险、地缘政治风险、规制风险和社会风险。考虑到大部分战略性关键矿产资源在成矿条件、资源基础、勘查开发利用技术、价格波动等方面具有更强的模糊性、复杂性与不确定性,其供给风险评价模型和预警机制建立困难较大。

(3)现有矿产资源供给安全保障策略的研究集中在实现供给多元化,强调增加资源供应的灵活性。大部分矿产资源的生产和消费地区因为距离遥远而相互分隔,短时间难以实现替代与大量存

储。在国内资源消费需求强劲和发达经济体不断加紧对中国优势关键矿种争夺的双重压力下,在化解资源供给外源风险、维护发展权益的同时,满足现代化经济体系建设和资源环境监管体制改革的内源性需求,是中国优化战略性关键矿产资源供给安全体系必须关注的重要方面。

基于上述结论,本文展望了未来战略性关键矿产资源供给安全研究的3个重要方向,即综合运用多学科交叉方法研究供给安全形成机理,基于大数据驱动分析供给风险评价要素,从全球治理视角出发完善战略性关键矿产资源供给安全政策。

参考文献(References):

- [1] McClure J A. Stockpiling of strategic and critical materials[J]. Idaho Law Review, 1983, 19: 417-453.
- [2] Kyriakopoulos G L, Arabatzis G. Electrical energy storage systems in electricity generation: Energy policies, innovative technologies, and regulatory regimes[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 56: 1044-1067.
- [3] Silva R C D, Neto I D M, Seifert S S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 59(3): 328-341.
- [4] 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.]
- [5] Checchi A, Behrens A, Egenhofer C. Long-term Energy Security Risks for Europe: A Sector-specific Approach[EB/OL]. (2009-01-29) [2020-02-23]. <http://aei.pitt.edu/10759/1/1785.pdf>.
- [6] Mansson A, Johansson B, Nilsson L J. Assessing energy security: An overview of commonly used methodologies[J]. Energy, 2014, 73(7): 1-14.
- [7] Chester L. Conceptualizing energy security and making explicit its polysomic nature[J]. Energy Policy, 2010, 38(2): 887-895.
- [8] Kruyt B, Vuuren D P V, Vries H J M D, et al. Indicators for energy security[J]. Energy Policy, 2009, 37(6): 2166-2181.
- [9] 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 resources[J]. Resources Science, 2018, 40(3): 465-476.]
- [10] US Department of Energy. Critical Materials Strategy[EB/OL]. (2011-12-01) [2020-07-08]. https://www.energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf.

2020年8月

- [11] 曹庭语. 日本稀有金属保障战略[J]. 国土资源情报, 2011, (4): 42-46. [Cao T Y. Japan's rare metal safeguard strategy[J]. Land and Resources Information, 2011, (4): 42-46.]
- [12] European Commission. Report Lists 14 Critical Mineral Raw Materials[EB/OL]. (2010-06-17) [2020-04-01]. <http://www.docin.com/p-60945422.html>.
- [13] 吴巧生, 薛双娇. 中美贸易变局下关键矿产资源供给安全分析[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2019, 19(5): 69-78. [Wu Q S, Xue S J. Supply security analysis of China's critical minerals under the Sio-US trade Change[J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2019, 19(5): 69-78.]
- [14] 李宪海, 王丹, 吴尚昆. 我国战略性或关键矿产资源评价指标选择: 基于美国、欧盟等关键矿产名录的思考[J]. 中国矿业, 2014, 23(4): 30-33. [Li X H, Wang D, Wu S K. The domestic strategic mineral resources evaluation index selection: Thinking based on list of key-minerals such as the United States, the European Union[J]. China Mining Magazine, 2014, 23(4): 30-33.]
- [15] 陈毓川. 建立我国战略性或关键矿产资源储备制度和体系[J]. 国土资源, 2002, (1): 20-21. [Chen Y C. To establish a reserve system of strategic mineral resources in China[J]. Land and Resources, 2002, (1): 20-21.]
- [16] 王登红. 战略性关键矿产相关问题探讨[J]. 化工矿产地质, 2019, 41(2): 65-72. [Wang D H. Discussion on issues related to strategic key mineral resources[J]. Geology of Chemical Minerals, 2019, 41(2): 65-72.]
- [17] 余韵, 陈甲斌. 美国危机矿产研究概况及其启示[J]. 国土资源情报, 2017, (2): 45-51. [Yu Y, Chen J B. Summary and enlightenment of research of USA critical minerals[J]. Land and Resources Information, 2017, (2): 45-51.]
- [18] 王登红, 王瑞江, 孙艳, 等. 我国三稀(稀有稀土稀散)矿产资源调查研究成果综述[J]. 地球学报, 2016, 37(5): 569-580. [Wang D H, Wang R J, Sun Y, et al. A review of achievements in the three-type rare mineral resources (rare resources, rare earth and rarely scattered resources) survey in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(5): 569-580.]
- [19] 中华人民共和国自然资源部. 全国矿产资源规划(2016-2020年)[EB/OL]. (2016-11-15) [2020-07-08]. http://www.mnr.gov.cn/gk/gjhj/201811/t20181101_2324927.html. [Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. National Mineral Resources Planning[EB/OL]. (2016-11-15) [2020-07-08]. http://www.mnr.gov.cn/gk/gjhj/201811/t20181101_2324927.html.]
- [20] Sarah M H, Erin A M. Critical mineral: A review of elemental trends in comprehensive criticality[J]. Resources Policy, 2018, 59: 192-199.
- [21] European Commission. Tackling the Challenges in Commodity Markets and on Raw Materials[R]. Brussels: European Commission, 2011.
- [22] European Commission. On the 2017 List of Critical Raw Materials for the EU[R]. Brussels: European Commission, 2017.
- [23] US Department of Commerce. A Federal Strategy to Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals[EB/OL]. (2019-06-04) [2020-04-01]. <https://www.commerce.gov/news/reports/2019/06/federal-strategy-ensure-secure-and-reliable-supplies-critical-minerals>.
- [24] METI. Annual Report on Energy[EB/OL]. (2019-06-07) [2020-07-21]. https://www.meti.go.jp/english/report/index_whitepaper.html.
- [25] Australian Government Department of Industry, Innovation and Science, Australian Trade and Investment Commission. Australia's Critical Mineral Strategy[EB/OL]. (2019-03) [2020-04-01]. <https://www.industry.gov.au/data-and-publications/australias-critical-minerals-strategy>.
- [26] 黄琳, 孙艳, 郭唯明, 等. 当前新材料及所需战略性矿产概述[J]. 中国矿业, 2018, 27(8): 1-8. [Huang L, Sun Y, Guo W M, et al. Summary of current new materials and necessary strategic mineral resources[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(8): 1-8.]
- [27] 黄健柏, 王志平, 钟美瑞. 关键行业对中国金属消费的影响: 基于跨行业视角的综合分析[J]. 中南大学学报(社会科学版), 2018, 24(6): 103-112. [Huang J B, Wang Z P, Zhong M R. The impact of key industries on China's metal consumption: Based on comprehensive analysis from inter-sectoral perspective[J]. Journal of Central South University (Social Science), 2018, 24(6): 103-112.]
- [28] NRC. Minerals, Critical Minerals, and the U. S. Economy[M]. Washington: National Academies Press, 2008.
- [29] Morley N, Eatherley D. Material Security: Ensuring Resource Availability for the UK Economy[EB/OL]. (2008-05-01) [2020-07-21]. <https://www.oakdenehollins.com/reports/2008/5/1/material-security-ensuring-resource-availability-for-the-uk-economy>.
- [30] Buchert M, Schuler D, Bleher D. Critical Metals for Future Sustainable Technologies and Their Recycling Potential[EB/OL]. (2009-07-01) [2020-07-21]. <https://www.oeko.de/oekodoc/1070/2009-129-en.pdf>.
- [31] EC. Critical Raw Materials for the EU: Report of the Ad-hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials[R]. Brussels: European Commission: Brussels, 2010.
- [32] DLA. Strategic and Critical Materials 2011 Report on Stockpile Requirements[EB/OL]. (2011-01-31) [2020-07-21]. http://www.dmsmeeting.com/2012/images/2011_NDS_Requirements_Report-04-25-2011.pdf.
- [33] Moss R, Tzimas E, Kara H, et al. Critical Metals in Strategic Energy Technologies: Assessing Rare Metals as Supply-chain Bot-

- tlenecks in Low Carbon Energy Technologies[EB/OL]. (2011-12-01) [2020-07-21]. <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC65592>.
- [34] BGS. British Geological Survey Risk List 2011[EB/OL]. (2011-09-01) [2020-07-21]. <https://strategic-metal.typepad.com/strategic-metal-report/2011/09/the-british-geological-survey-risk-list-2011.html>.
- [35] BGS. British Geological Survey Risk List 2012[EB/OL]. (2011-09-01) [2020-07-21]. https://www.bgs.ac.uk/news/NEWS/Risk_List_2012_Press_Release.pdf.
- [36] Willis P, Chapman A, Fryer A. Study of By-products of Copper, Lead, Zinc, and Nickel[EB/OL]. (2014-01-15) [2020-07-21]. <https://www.oakdenehollins.com/reports/2014/1/15/study-of-by-products-of-copper-lead-zinc-nickel-executive-summary>.
- [37] DLA. Strategic and Critical Materials 2013 Report on Stockpile Requirements[R]. Washington D C: Department of Defense, 2013.
- [38] Moss R, Tzimas E, Willis P, et al. Critical Metals in the Path towards the Decarbonization of the EU Energy Sector: Assessing Rare Metals as Supply Chain Bottlenecks in Low-carbon Energy Technologies[EB/OL]. (2020-07-11) [2020-07-21]. <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/critical-metals-path-towards-decarbonisation-eu-energy-sector-assessing-rare-metals-supply>.
- [39] Skirrow R G, Huston D L, Mernagh T P, et al. Critical Commodities for a High-tech World: Australia's Potential to Supply Global Demand[EB/OL]. (2009-12-09) [2020-07-21]. <https://www.ga.gov.au/data-pubs/data-and-publications-search/publications/critical-commodities-for-a-high-tech-world#heading-1>.
- [40] EC. Study on the Review of the List of Critical Raw Materials for the EU and the Implementation of the Raw Materials Initiative[EB/OL]. (2017-06-01) [2020-07-21]. <http://hytechcycling.eu/wp-content/uploads/Study-on-the-review-of-the-list-of-Critical-Raw-Materials.pdf>.
- [41] DLA. Strategic and Critical Materials 2015 Report on Stockpile Requirements[R]. Washington D C: Department of Defense, 2015.
- [42] BGS. British Geological Survey Risk List 2015[EB/OL]. (2020-07-19) [2020-07-21]. <https://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/riskList.html>.
- [43] Bastain T, Reitveld E. Materials in the Dutch economy: A Vulnerability Analysis[EB/OL]. (2015-12-01) [2020-07-08]. <https://www.fme.nl/sites/default/files/afbeeldingen/TNO%202015%20R11613%20Materials%20in%20the%20Dutch%20Economy.pdf>.
- [44] Hatayama H, Tahara K. Criticality assessment of metals for Japan's resource strategy[J]. Materials Transactions, 2015, 56(2): 229-235.
- [45] Graedel T E, Harper E M, Nassar N T, et al. Criticality of metals and metalloids[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(14): 4257-4262.
- [46] Bortnikov N S, Volkov A V, Galyamov A L, et al. Mineral resources of high-tech metals in Russia: State of the art and outlook [J]. Geology of Ore Deposits, 2016, 58(2): 83-103.
- [47] NSTC. Assessment of Critical Minerals: Screening Methodology and Initial Application[R]. Washington: Executive office of the President, 2016.
- [48] Schulz K J, DeYoung J H, Seal II R R, et al. 2017. Critical Mineral Resources of the United States: Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply[M]. Virginia: U.S. Geological Survey, 2017.
- [49] McCullough E, Nassar N T. Assessment of critical minerals: Updated application of an early-warning screening methodology[J]. Mineral Economics, 2017, 30(3): 257-272.
- [50] Fortier S M, Nassar N T, Lederer G W, et al. Draft Critical Mineral List: Summary of Methodology and Background Information: U. S. Geological Survey Technical Input Document in Response to Secretarial Order No. 3359[EB/OL]. (2018-02-16) [2020-07-08]. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20181021>.
- [51] Achzet B, Heilbig C. How to evaluate raw material supply risks: An overview[J]. Resources Policy, 2013, 38: 435-447.
- [52] Graedel T E, Barr R, Chandler C, et al. Methodology of metal criticality determination[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 46(2): 1063-1070.
- [53] Nassar N T, Barr R, Browning M, et al. Criticality of the geological copper family[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 46(2): 1071-1078.
- [54] Graedel T E, Harper E M, Nassar N T, et al. Criticality of metals and metalloids[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(14): 4257-4262.
- [55] Habib K, Hamelin L, Wenzel H. A dynamic perspective of the geopolitical supply risk of metals[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 133: 850-858.
- [56] 孔锐, 裴文林, 曾祯. 我国重要矿产资源评价模型设计与研究 [J]. 资源与产业, 2011, 13(2): 31-36. [Kong R, Pei W L, Zeng Z. Design and study of evaluation model of China's vital mineral resources[J]. Resources and Industries, 2011, 13(2): 31-36.]
- [57] 李文芳, 孔锐, 王仁财. 我国重要矿产资源评价指标体系研究 [J]. 中国国土资源经济, 2008, 21(7): 26-28. [Li W F, Kong R, Wang R C. Research on evaluation target system of important mineral resources in China[J]. Natural Resource Economics of China, 2008, 21(7): 26-28.]

2020年8月

- [58] 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 source importance[J]. Resources Science, 2015, 37(5): 883-890.]
- [59] Erdmann L, Graedel T E. Criticality of non-fuel minerals: A review of major approaches and analysis[J]. Environment Sciences Technology, 2011, 45(18): 7620-7630.
- [60] Georges D. Security of mineral resources: A new framework for quantitative assessment of criticality[J]. Resources Policy, 2017, 53: 173-189.
- [61] Masoudi S M, Ezzatia E, Rashidnejad-Omran N, et al. Geoeconomics of fluorspar as strategic and critical mineral in Iran[J]. Resources Policy, 2017, 52: 100-106.
- [62] Teresa B. Measurement of mineral supply diversity and its importance in assessing risk and criticality[J]. Resources Policy, 2018, 58: 202-218.
- [63] Ray G F. Mineral reserves: Projected lifetimes and security of supply[J]. Resources Policy, 1984, 10(2): 75-80.
- [64] Anderson D L. Implications of the Canada-USA free trade agreement for the Canadian minerals industry[J]. Resources Policy, 1988, 14(2): 121-134.
- [65] Harker R I, Lutz T M. Securities of mineral supplies[J]. Resources Policy, 1990, 16(2): 115-127.
- [66] Lusty P A J, Gunn A G. Challenges to global mineral resource security and options for future supply[J]. Geological Society London Special Publications, 2015, 393(1): 265-276.
- [67] Cinelli M, Coles S R, Sadik O, et al. A framework of criteria for the sustainability assessment of nanoproductions[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 126: 277-287.
- [68] Jasiński D, Meredith J, Kirwan K. A comprehensive framework for automotive sustainability assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 135: 1034-1044.
- [69] USGS. Mineral Commodity Summaries 2019[EB/OL]. (2019-02-28) [2020-07-08]. https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/mcs2019_all.pdf.
- [70] Rosenau-Tornow D, Buchholz P, Riemann A, et al. Assessing the long-term supply risks for mineral raw materials: A combined evaluation of past and future trends[J]. Resources Policy, 2009, 34(4): 161-175.
- [71] 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): 1-10.
- [72] Gulley A L, Nassar N T, Xun S. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4111-4115.
- [73] Chapman A, Arendorf J, Castella T, et al. Study on Critical Raw Materials at EU Level[EB/OL]. (2017-06-01) [2020-07-08]. <http://hytechcycling.eu/wp-content/uploads/Study-on-the-review-of-the-list-of-Critical-Raw-Materials.pdf>.
- [74] Glöser S, Tercero E L, Gandenberger C, et al. Raw material criticality in the context of classical risk assessment[J]. Resources Policy, 2015, 44: 35-46.
- [75] Hsu A, Zomer A. Environmental Performance Index[EB/OL]. (2016-11-15) [2020-02-17]. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat03789.pub2>.
- [76] Zhang L, Bai W, Yu J, et al. Critical mineral security in China: An evaluation based on hybrid MCDM methods[J]. Sustainability, 2018, DOI: 10.3390/su10114114.
- [77] Jackson T, Green K P. Survey of Mining Companies 2016[EB/OL]. (2017-02-01) [2020-07-08]. <https://www.fraserinstitute.org/sites/default/files/survey-of-mining-companies-2016.pdf>.
- [78] UNDP. Human Development Report 2015: Work for Human Development[EB/OL]. (2015-12-14) [2020-07-21]. <http://hdr.undp.org/en/content/human-development-report-2015>.
- [79] 张所续. 矿产资源战略储备与国家安全[J]. 中国矿业, 2010, 19(10): 1-4. [Zhang S X. Mineral resources reserve national security strategy[J]. China Mining Magazine, 2010, 19(10): 1-4.]
- [80] 严筱, 陈莲芳, 严良, 等. 基于 PSR 模型的我国重要矿产资源安全评价[J]. 中国矿业, 2016, 25(1): 43-49. [Yan X, Chen L F, Yan L, et al. Evaluation of major mineral resources' security in China based on PSR model[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(1): 43-49.]
- [81] 朱永光, 徐德义, 成金华, 等. 国际铁矿石贸易空间互动过程及中国进口策略分析[J]. 资源科学, 2017, 39(4): 664-677. [Zhu Y G, Xu D Y, Cheng J H, et al. The interactive process of international iron ore trade and analysis of China's importation strategy [J]. Resources Science, 2017, 39(4): 664-677.]
- [82] 余敬, 高思宇, 张龙. 重要矿产资源安全评价的集成算法与实证[J]. 统计与决策, 2017, (6): 61-63. [Yu J, Gao S Y, Zhang L. Integrated algorithm and empirical study on safety evaluation of important mineral resources[J]. Statistics and Decision, 2017, (6): 61-63.]
- [83] 朱学红, 邹佳纹, 黄健柏. 基于信息可替代的有色金属产业安全指标体系构建与评估[J]. 软科学, 2019, 33(2): 42-46. [Zhu X H, Zou J W, Huang J B. Construction and evaluation of non-ferrous metal industry safety index system based on information substitutable[J]. Soft Science, 2019, 33(2): 42-46.]
- [84] Knobloch V, Zimmermann T, Gößling-Reisemann S. From criticality to vulnerability of resource supply: The case of the automobile industry[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 138: 272-282.

- [85] Son J Y, Orchard R K. Effectiveness of policies for mitigating supply disruptions[J]. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 2013, 43(8): 684-706.
- [86] 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.]
- [87] 杨丹辉. 中国稀土产业发展与政策研究[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2015. [Yang D H. *Research on China's Rare Earth Industry Development and Policy*[M]. Beijing: China Social Science Press, 2015.]
- [88] 沈镭, 张红丽, 钟帅, 等. 新时代下中国自然资源安全的战略思考[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(5): 721-734. [Shen L, Zhang H L, Zhong S, et al. Strategic thinking on the security of natural resources of China in the New Era[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(5): 721-734.]
- [89] Ali S H, Giurco D, Arndt N, et al. Mineral supply for sustainable development requires resource governance[J]. *Nature*, 2017, 543(7645): 367-372.
- [90] Hilpert H G, Mildner S A. Fragmentation or Cooperation in Global Resource Governance? A Comparative Analysis of the Raw Materials Strategies of the G20[EB/OL]. (2013- 03- 01) [2020- 07- 08]. https://www.swp-berlin.org/fileadmin/contents/products/research_papers/2013_RP01_hlp_mdn.pdf.
- [91] Barteková E, Kemp R. National strategies for securing a stable supply of rare earths in different world regions[J]. *Resources Policy*, 2016, 49: 153-164.
- [92] 于宏源, 余博闻. 资源自立与全球治理: 欧盟矿产资源安全战略评析[J]. *欧洲研究*, 2017, 35(2): 85-104. [Yu H Y, Yu B W. Resource independence and global governance: An analysis of the EU's mineral resources security strategy[J]. *Chinese Journal of European Studies*, 2017, (2): 85-104.]
- [93] Bielecki J. Energy security: Is the wolf at the door?[J]. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 2002, 42(2): 235-250.
- [94] Vivoda V. Diversification of oil import sources and energy security: A key strategy or an elusive objective?[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(11): 4615-4623.
- [95] Cabalu H. Indicators of security of natural gas supply in Asia[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(1): 218-225.
- [96] Zhang Y J. The impact of financial development on carbon emissions: An empirical analysis in China[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(4): 2197-2203.
- [97] 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 global demand[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(7): 1218-1229.]
- [98] Chang W, Ellinger A E, Blackhurst J. A contextual approach to supply chain risk mitigation[J]. *The International Journal of Logistics Management*, 2015, 26(3): 642-656.
- [99] Bode C, Wagner S M, Petersen K J, et al. Understanding responses to supply chain disruptions: Insights from information processing and resource dependence perspectives[J]. *Academy of Management Journal*, 2011, 54(4): 833-856.
- [100] 周德群, 孙立成, 万红. 考虑石油替代品和关税配额政策的石油储备模型研究[J]. *中国管理科学*, 2010, 18(1): 149-155. [Zhou D Q, Sun L C, Wan H. Study on the strategic petroleum reserve model with the factor of petroleum substitution and tariff quota policy[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2010, 18(1): 149-155.]
- [101] 姚予龙, 谷树忠. 资源安全机理及其经济学解释[J]. *资源科学*, 2002, 24(5): 46-51. [Yao Y L, Gu S Z. Mechanism and economic definition of resources security[J]. *Resources Science*, 2002, 24(5): 46-51.]

A review and prospects of the supply security of strategic key minerals

WU Qiaosheng, ZHOU Na, CHENG Jinhua

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

Abstract: Strategic key minerals are related to the sustainable development of the society and play strategic roles in key industrial fields. This article reviewed the definition and selection of strategic and critical minerals, their supply risk assessment, and early warning research, and supply security system optimization and related policies. The main conclusions are as followed. (1) Strategic key minerals are raw materials that meet the needs of national defense and military systems, and for achieving the stable development of strategic key industries. There is a need to define strategic key minerals dynamically based on national development. (2) The supply risks of strategic key minerals have stronger ambiguity and uncertainty, and the supply risk evaluation models of strategic key minerals face many challenges. (3) Optimizing global resource allocation and improving the global governance system are important directions for optimizing supply security system of strategic key minerals and for policy choices. Future research on the supply security of strategic key minerals could be deepened from multidisciplinary research on the formation mechanism of supply security and the identification of supply risk factors by global supply chain tracking and big data-driven methods, and optimizing the policy system from the perspective of integrating external shock factors and internal industrial factors.

Key words: strategic key minerals; supply security; risk assessment and early warning; policy choice; review