

引用格式: 邵留国, 蓝婷婷. 伴生性关键矿产资源安全研究综述与展望[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1452-1463. [Shao L G, Lan T T. Review of the by-product critical minerals resource security research and prospects[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1452-1463.] DOI: 10.18402/resci.2020.08.02

伴生性关键矿产资源安全研究综述与展望

邵留国^{1,2}, 蓝婷婷¹

(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)

摘要:按单一元素计, 伴生性矿产占美国和欧盟关键矿产的60%以上。与非伴生性关键矿产相比, 伴生性关键矿产有着特殊的地质和经济性质, 这对其资源安全保障产生了独特的影响。近年来, 随着关键矿产成为政府、科研机构关注的热点, 针对伴生性矿产资源安全的研究也逐渐增多。本文从伴生性矿产的伴生程度测算、关键性评价、供给机制和可供性、全球贸易格局、价格理论等方面对此进行了系统梳理。综述发现: 由于伴生性关键矿产的重要战略地位, 伴生程度开始成为重要的矿产关键性评价指标, 伴生性关键矿产的供应安全得到了一定保障; 伴生性关键矿产的供给取决于主矿产的供需变化, 导致其供给缺乏弹性, 面临供给风险; 同时, 伴生性关键矿产的地理分布高度集中, 使得其在全球贸易中面临着更高的贸易风险; 而相较于非伴生性关键矿产, 伴生性关键矿产有更高的价格波动性, 且其价格波动受到主矿产价格波动的影响, 致使伴生性关键矿产供需稳定存在风险。最后, 结合未来经济发展的背景和趋势, 本文对未来伴生性关键矿产资源安全的研究方向进行了展望。

关键词:伴生性关键矿产; 关键性评价; 供给机制; 全球贸易格局; 价格理论

DOI: 10.18402/resci.2020.08.02

1 引言

稀有矿产是新能源材料、高精尖设备的重要原材料, 近些年来, 随着新技术的加速推广, 对于生产新兴产品的稀有矿产需求急剧增加。这也符合Clark等^[1]提出的矿产资源消费时序演进理论, 随着工业化进程的推进, 传统类型、现代类型和新兴类型3种矿产消费依次演进。成金华等^[2]的研究也证实了产业结构向高技术产业演进的过程中, 矿产需求由传统大宗矿产转向稀有矿产。一方面新兴产业对稀有矿产的需求在快速增长, 如清洁能源、环保技术、新兴电子、先进制造等高技术的发展越来越依赖于钨、镓、碲、锗、硒、镉、钴和稀土元素等稀有矿产; 另一方面这些矿产缺乏替代性, 导致其供应风险大增, 为了保障它们的供应安全, 这些矿产被诸多国家提升到关键矿产地位^[3]。虽然各国对关键矿产的定义各不相同, 但基本上都是在国防军

工、新兴产业等高技术应用和经济发展中具有重要战略地位, 而资源安全保障存在风险的矿产^[4]。关键矿产已成为新一轮科技革命与产业变革背景下大国竞争的焦点, 国家矿产资源安全保障重点从大宗矿产转向关键矿产, 美、欧、日等国家建立了关键矿产定期评估制度, 持续开展关键矿产评估及清单更新工作, 并制定专门的政策以保障其供应安全^[5]。而中国虽然还没有发布权威的关键矿产名录, 但是对战略性矿产的研究在不断深化和推进, 为中国提高关键矿产资源的战略统筹能力提供了重要的理论基础。

关键矿产多数属于伴生性矿产, 按单一元素计, 美国“关键矿产”清单和欧盟“关键原材料”清单中, 伴生性矿产占比皆高达60%以上, 其在大国竞争中的重要地位可见一斑。与非伴生性矿产相比, 伴生性矿产具有独特的属性, 其在地壳中的丰度

收稿日期: 2020-03-05 修订日期: 2020-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(71974208); 国家自然科学基金重点项目(71633006); 2018湖南省智库专项课题(18ZWB20)。

作者简介: 邵留国, 男, 山东汶上人, 副教授, 研究方向为资源经济学。E-mail: shaoliuguo@qq.com

通讯作者: 蓝婷婷, 女, 湖南怀化人, 博士生, 研究方向为资源经济学。E-mail: 251854707@qq.com

2020年8月

低、分布稀疏,难于从矿石中提取,仅作为主金属的副产品回收生产,相应地,其资源安全机制也具有独特性^[6]。对此,美国地质调查局^[7]提出在制定与关键矿产相关的供给战略时,需要充分考虑到关键矿产的伴生特性。随着高新技术发展,伴生性关键矿产资源安全研究逐渐增多,然而还没有文献对相关研究动态进行系统梳理。鉴于此,论文从伴生性关键矿产的伴生程度测算、关键性评价、供给机制和可供性评价、国际贸易格局分析、价格理论研究等5方面进行系统回顾,总结分析伴生性关键矿产的基本特征、战略地位、供给安全、贸易安全和价格安全等领域的研究进展,进而指出未来研究方向,以期为保障伴生性关键矿产资源安全提供理论参考。

2 伴生性关键矿产的伴生程度测算

从地质因素来看,伴生性关键矿产的地壳集中度非常低,通常不到0.1%,伴生性关键矿产主要存在于具有相似物理或化学性质的其他矿石中,往往只能作为主矿产加工过程中的副产品被回收^[6]。伴生性关键矿产生产流程包括3个主要环节:第一步是选矿,把原矿中包含具有回收价值和不具有回收价值的两部分材料分离,伴生性关键矿产随着值得回收的材料进入到精矿中;第二步是对精矿进行冶炼分离,得到包含主矿产和伴生性关键矿产在内的中间产品以及废料;第三步,中间矿产进一步冶炼分离出主矿产和伴生性关键矿产。

不同关键矿产的伴生程度差异非常大。矿石中钢含量大概是千万分之一,这么低的含量以至于不可能从单独的钢矿中开采钢,高达80%的钢都是作为锌的伴生产品生产的。相对而言,银的伴生程度较低,既可以通过锌、铅、铜和金等主金属伴生开采,也能在银矿中大量开采。为了确定矿产的伴生程度,Nassar等^[6]综合矿产资源报告和已有文献,核算了61种伴生性矿产在不同主矿产中的伴生生产产量占比,结果显示61%的矿产伴生程度大于50%,少数伴生性关键矿产有两种以上的主矿产,而大多数伴生性关键矿产只有一种或两种主矿产,以钴为例,钴全球产量的85%左右是伴生生产的,其中50%从镍矿中伴生,35%从铜矿中伴生。

但是通过对结果的观察,他们认为由于缺乏各个伴生开采环节的详细数据,仅依靠产量来定义伴生性矿产可能并不精确。伴生性关键矿产是在经

济上依赖其他矿产来进行回收,因此不能仅仅根据是否与主矿产一同生产来判断,应通过分析有关矿产的经济贡献,更精确地定义伴生程度。核心思想是根据某一种矿产的收入贡献是否足以覆盖选矿和精炼过程的全部成本费用来确定矿产的伴生程度,由此给出伴生程度(Companionality)的计算式:

$$Companionality_i = \frac{\sum_j \left(\left(100 \cdot \left(1 - \min \left(\frac{Revenue_{i,j}}{Cost}, 1 \right) \right) \right) \cdot Sales_{i,j} \right)}{Sales_i} \quad (1)$$

式中: i 表示某种矿产; j 表示采矿过程中的操作步骤; $Revenue$ 表示收益; $Cost$ 表示成本; $Sales$ 表示销售量。从式(1)可以看出,在测算伴生程度时,需要对经营过程的成本和收益进行分析,最后再进行加权平均以确定矿产的伴生程度。那些每个经营项目的收益都可以覆盖成本的矿产,其伴生程度为0即完全自给自足;而那些每一个经营项目的收益都无法覆盖成本的矿产,其伴生程度为100即完全依赖于其他矿产生产。

3 伴生性关键矿产的关键性评价

Graedel等^[8]和Erdmann等^[9]总结发现,大多数关键性评价方案主要涉及供应风险、供给系统的脆弱性两个评估维度。早期的关键性评价方案并未针对伴生性矿产设计特殊的评价指标,但生产集中度、进口集中度、供应潜力等指标在一定程度上反映了伴生性矿产在“地理分布高度集中、缺乏适当的替代品和政治不稳定”等方面的特征^[8]。而张艳飞等^[10]指出矿产重要性评价体系要注重时空适用性,进口集中度等指标构成的评价体系主要适用于工业化中期阶段,随着产业的发展和演进,评价指标应当要进行拓展。因此,近年来有很多文献开始关注伴生对供应风险带来的影响。Graedel等^[8]提到,因为伴生性关键矿产地质含量极低、供应风险更大,稀缺性可能是其最重要的关键性评价标准之一,并通过聚类分析和多维分析进一步证实,在他研究的目标矿产中,只有伴生性关键矿产在供应风险维度上得分较高。Moss等^[11]、Erdmann等^[12]、Graedel等^[13]引入副产品依存度指标衡量供应风险,指明伴生程度越高供应风险越大。伴生程度已成为采用频率最高的关键性评价指标之一。

在评价供给系统的脆弱性时,矿产的经济重要

2020年8月

键矿产的供应,应该针对其伴生特性制定专门的战略,尤其需要考虑主矿产的开采和加工。陆挺等^[23]指出中国铅、锌、氧化铝消减过剩产能可能导致钢、锗、镓等伴生性关键矿产供应不足。

其次,主矿产产能除了决定伴生性关键矿产的供给上限之外,还会使得伴生性关键矿产供给弹性呈现结构性突变。换句话说,伴生性关键矿产的供给数量对其自身价格的变化在有些区间呈现出正常的弹性,但在有些区间对价格却非常不敏感。Hagelükén等^[24]给出了更详细的解释:伴生性关键矿产需求的增加必然会导致伴生性关键矿产价格的上涨,但只要主矿产的产量不相应增加,矿业公司就无法生产更多伴生性关键矿产,因为增加主矿产产量以获得伴生性关键矿产并不具有经济合理性。Frenzel等^[25]将伴生性关键矿产的可得性曲线划分为两个部分,在达到生产上限之前,伴生性关键矿产的供应是具有弹性的,其供给可以根据市场需求的变化作出反应,而在达到生产上限之后,供应变得无弹性,市场机制失效。因此,在考虑伴生性关键矿产的供给时,需要区分其位于供给弹性区域还是无弹性区域。

而从伴生性关键矿产对主矿产的生产决策影响来看,Fizaine^[26]提出伴生性矿产价值并不影响主矿产最优产量,只会给采矿项目带来额外的价值。而理论上,如果伴生性关键矿产的市场发生剧烈变化,可能会迫使伴生性关键矿产被当作共生矿产甚至是主矿产来对待,但现实中这种可能性微乎其微。

4.2.2 主矿产需求变化对伴生性关键矿产供给的影响

与非伴生性矿产不同,伴生性关键矿产的供给变化主要取决于主矿产需求变化,而非它本身的市场需求,如果技术或社会变化致使对一种主矿产的需求大幅减少,这可能导致伴生性关键的供给严重受限。例如以往的钢材中大部分都涂有一层薄薄的锌层以防止腐蚀,但Prasai等^[27]和Raman等^[28]提出应该使用石墨烯等材料来替代,进一步地,Sprecher等^[18]对受替代影响的锌需求变化以及它的伴生性关键矿产的供给变化进行了预测,他们预计到2040年,石墨烯将取代大约2/3的镀层用锌,这将使得整体锌需求下降33%,并由此导致其伴生性关键矿产

锗的供给短缺程度达30%左右,而钢的供给短缺程度则高达50%。

4.2.3 矿产回收对伴生性关键矿产供给影响

除了技术更替对主矿产需求产生影响,进而影响伴生性关键矿产的供给之外,主矿产的二次回收和伴生性矿产资源再利用也会影响伴生性关键矿产的供给。

Sprecher等^[18]提到为避免水污染,密歇根州弗林特市拆除和替换下来大量的铅管道,这些管道将被回收利用,以防止垃圾填埋场的污染,从而有可能取代开采来获得铅源,并对铅价格构成巨大的下行压力,影响了银的供给。同时,由于锌、铅材料有一定的替代作用,因此铅价变动也影响了对锌的需求,进而影响锌的伴生性关键矿产的供给。

资源短缺和地理分布集中问题可能对伴生性关键矿产的供应构成障碍,提高伴生性关键矿产回收效率可能是一种可行的解决办法。但就伴生性关键矿产的回收现状而言,Nassar等^[6]指出大部分伴生性关键矿产的回收率不超过10%。Ylä-Mella等^[29]发现目前钢的回收率在1%以下,而耗散率高达90%以上。进一步地,他们详细分析了制约伴生性关键矿产回收的原因:首先,伴生性关键矿产大多都是资源高耗散的,难以回收;其次,矿产的生命周期没有形成闭环,因为伴生性关键矿产的相关产品设计不合理难以拆卸,产品流动性很强但所有权归属不稳定,回收欠缺经济激励,技术发展也相对滞后;最后,当前的一些回收政策也存在不合理之处,盲目将回收率最大化定为主要目标,Kral等^[30]指出高回收率与高质量回收的目标往往是矛盾的。为了在回收质量和回收效率中达到平衡,何朋蔚等^[31]认为必须保障回收网络畅通。近年来在中国诞生的电子废弃物互联网回收平台,打破了传统的时空边界,解决了市场信息不畅、资源配置不合理等问题,有助于回收网络的通畅,在保障回收质量的同时将极大地提升伴生性关键矿产的回收效率。

4.2.4 其他因素

此外,张维新^[32]认为复杂的供求关系、技术和投资需求、价格关系加剧了伴生性关键矿产面临的供给挑战。Nassar等^[6]提出相对于来源多样的伴生性关键矿产,来源单一的伴生性关键矿产的可供性受市场力量的影响更大。一些伴生性关键矿产还可

能会对环境造成负面影响,Mudd等^[33]认为随着时间的推移,社会环境因素(国家公园禁止采矿、“冲突”矿产、劳动力成本等)的变化也会改变伴生性关键矿产的供应潜力。

4.3 伴生性关键矿产的可供性

利用地质会计或工程经济学方法来评估矿产可供性,已成为一种常规和直接的做法,例如基于财务模型的美国地质调查局矿产资源可供性评价系统和基于资源潜力转化系数、勘查投入产出比等参数的可回收储量—可供储量—可供产量转化模型,但这些方法都是针对普通矿产设计的。由于伴生性关键矿产的特殊生产流程,Mudd等^[33]认为对伴生性关键矿产供应潜力进行估计时,除了考虑与普通矿产一致的参数:主矿产的矿体大小和类型等,还需要采用针对伴生性关键矿产的参数:伴生性关键矿产在主矿产中的丰度,回收效率(区别不同技术)、回收的相对成本和收益等。相应地,Frenzel等^[25]给出了伴生性矿产供应潜力(*SP*)的计算公式:

$$SP = \sum_{i=1}^N m_i x_i R(x_i, x_{cut-off}^d) \quad (2)$$

式中: N 代表分离出来的矿床总数; m_i 是分离出的矿床*i*中的矿产产量; x_i 是在第*i*个分离矿床中,伴生性关键矿产的丰度; $x_{cut-off}^d$ 是伴生性关键矿产提炼的临界丰度,这个丰度由当前伴生性关键矿产的经济价值确定; $R(x_i, x_{cut-off}^d)$ 是回收函数,基于 x_i 和 $x_{cut-off}^d$ 来判断在中间产品和废弃过程中可回收的伴生性关键矿产,只有丰度大于提炼临界点,伴生性关键矿产才会被回收生产。

在进行供应潜力测算时,还有学者采用了仿真模拟方法。Sverdrup等^[34]综合使用地质学Hubbert模型和系统动力学模型,确定了铁、镍、锰等几十种矿产的供给峰值年份,其中也包括多种伴生性关键矿产,例如碲、镉、铟和铋等。此后,由于具有情景设置的优势,系统动力学成为伴生性关键矿产供应潜力动态评价的常用方法。如王昶等^[35]利用系统动力学方法,对清洁、能源技术关键伴生金属可供性演化情况进行分析,发现直到2050年镓将一直处于供给短缺的状态,而提高全球经济增长率、降低太阳能电池发电总需求和加快技术进步能够有效缓解金属镓供给短缺。

此外,对于矿业公司而言,伴生性关键矿产带

来的经济价值较小,因此绝大多数矿业公司都忽视报告伴生性关键矿产的资源数据,并且不重视数据的真实性和透明度,Mudd等^[33]认为由此造成的数据缺失成为了伴生性关键矿产可供性分析的最大障碍。同时数据缺失也造成了Frenzel等^[25]针对伴生性矿产设计的可供性核算公式存在使用障碍,对此他们采用的是蒙特卡洛模拟法来解决数据缺失问题,Frenzel等^[36]也已经验证了这个方法具有可行性,但这个方法还存在一定的缺陷,人为设定的参数可能不能反映真实的供应水平。

为了更好地解决数据缺失问题,Mudd等^[37]开发了一种全新的方法,对于缺乏数据的伴生性关键矿产用代理数据加以量化。首先,代理数据可以通过与伴生性关键矿产具有相似性质的矿产得到。通过回归分析确定与数据丰富的相似矿产之间的相关关系,进而通过相关关系近似得到伴生性关键矿产的数据,这是基于Werner等^[38]的研究提出的。其次,可以对伴生性关键矿产已有的公开矿床进行深入分析,找出相似性和一致性,来推测未公开矿床的储量数据。最后一个获得代理数据的方法是认为主伴生性矿产之间存在成比率的生产关系,并通过主矿产的数据和比率关系来推算伴生性关键矿产的储量,Schwarz-Schampera等^[39]提供了很好的范例,他提出每1 t锌矿中存在50 g钢,而每1 t铜矿中存在10 g钢。基于代理数据的方法,Mudd等^[37]对钢的可供性进行了研究,他们发现全球钢供应链具有较强的适应性,而且钢资源的空间分布与当前的供应链存在较大的偏差,只要技术发展增强钢资源的流动,钢的供给并不会很快耗竭,所以人们应该持乐观态度。

5 伴生性关键矿产的全球贸易格局分析

伴生性关键矿产在全球工业升级和科技发展中发挥着重要作用,为了保障伴生性关键矿产在全球贸易中有序流转,防止国际资源争端和贸易冲突,有必要从各国自身贸易状况、国家间的贸易关联、矿产全产业链的全球贸易关联等方面对伴生性关键矿产的国际贸易格局进行系统分析。

5.1 伴生性关键矿产贸易格局的单一国别分析

单一国家的贸易状况涉及诸多方面,而各种综

2020年8月

合性经济指标是评价贸易国市场势力或市场风险的经典方法。沈镭等^[40]使用供给、需求变化和贸易中心转移指标,对矿产市场的贸易趋势进行预测;朱学红等^[41]采用拓展SMR模型,对各国的市场势力进行测度;Achzet等^[42]和Glöser等^[43]提及的衡量地理分布集中程度的HHI指数(赫芬达尔指数),也是评价市场势力的核心指标。Nassar等^[6]指出,当HHI指数大于5000时,矿产变得供给敏感,极容易受到市场势力和战争的影响,而伴生性关键矿产的HHI指数一般都是大于5000的。梁靛等^[44]使用矿产品对外依存度评估中国矿产资源贸易现状,结果发现中国各类矿产品全球进口区域集中度较高,不利于中国矿产供应安全,出口区域集中于北半球,不利于巩固优势矿产国际市场地位。Gulley等^[45]则利用进口依赖程度对中国和美国的伴生性矿产贸易竞争情况作了深入分析,结果表明:美国高度进口依赖同时中国又是主要出口国的伴生性关键矿产9种(锑、钴、稀土等);中国高度进口依赖同时美国又是主要出口国的伴生性关键矿产1种(铍),美国在铍贸易中占据绝对的竞争主导地位;中国和美国都高度进口依赖的伴生性关键矿产5种(铌、铬、3种铂族金属铂、钯、铑),但铌和铬在全球分布范围较广,这就削弱了中美的竞争强度,相反3种铂族金属集中在南非,这就增加了中美的竞争强度。

5.2 伴生性关键矿产单一供应环节的贸易网络分析

在Serrano等^[46]发现国际贸易网络符合复杂网络无标度分布、小世界属性、高聚类系统等特征后,复杂网络开始被用于分析矿产的供应国和需求国之间的贸易联系。但大多数研究使用单层网络,一个模型只能研究矿产供应链上的一个环节,目前大多文献研究冶炼环节的金属原材料。随着复杂网络在基础金属等大宗商品研究中的大量运用,伴生性关键矿产的研究也开始利用复杂网络作为建立国际贸易格局的基础方法。

不同的国家可以看作复杂网络分析中不同的网络节点,各个节点之间的关系可以用来描述矿产国际贸易格局的特征。一方面,通过节点的连接关系,可以分析得到贸易各方的贸易联系。Mancheri等^[47]利用复杂网络对钽的供应链进行了分析,他们发现钽的初级产品主要在巴西和非洲国家获得,之后运输到中国、日本、德国等加工国来冶炼加

工提纯得到钽精矿,但采矿国向加工国运输矿产的供应链可能会发生中断,中断的原因包括偷窃、集装箱遗失和政治冲突等。另一方面,通过网络节点的指向关系,可以分析得出贸易连接各方的市场势力分布。例如Ge等^[48]通过复杂网络分析全球稀土贸易网络,发现以美国、中国、日本和德国为首的贸易社区对全球稀土贸易的影响最大。Tokito等^[49]对铂族金属的贸易网络进行了聚类分析,研究发现包括南非在内的集团和由西方国家组成的集团占据贸易优势,因为其贸易流量占据国际贸易总额的一半,此外对日本而言,对其铂族金属贸易稳定性影响最大的是南非、俄罗斯和中国等贸易国。Klimek等^[50]对包括伴生性关键矿产在内的71种矿产资源进行了贸易网络风险评价,分析发现,越具有矿产储量优势的国家,贸易风险越低,矿产对外依存程度越高的国家,贸易风险越高,同时他们还发现伴生性关键矿产贸易网络的系统性风险远高于非伴生性关键矿产。此外,Wang等^[51]还提出生态网络分析(ENA)和流动距离分析(FDA)可以用来分析不同国家之间的控制、依赖关系,而Kitamura等^[52]则利用引力模型来计算国际贸易的驱动力和阻力。

5.3 伴生性关键矿产全球产业链的贸易格局分析

矿产资源通过国际贸易连接的供应链从采矿国流向全球各地,而对于地理分布集中程度非常高的伴生性关键矿产而言更是如此。因此,从矿产供应的全产业链进行贸易格局分析是至关重要的环节。基于贸易关联的物质流分析方法(MFA)可以很好地刻画矿产全产业链环节的贸易流动情况,既包括矿石形式的矿产,还包括中间产品和最终产品形式的矿产。

Shi等^[53]发现从1990—2010年,中国逐渐成为了世界上最大的砷的生产者和使用者。从全球流入中国的砷的供应量超过了中国国内的主观需求量,同时中国是三氧化二砷和二氧化砷的净出口国。Nassar等^[54]则建立了钽的全球存量和流量模型,他们发现由于钽经济价值的下降,钽的生产从澳大利亚等发达国家向刚果民主共和国和卢旺达等发展中国家转移,从政治稳定的国家转移到了政治不稳定的国家,进而又造成了钽的全球需求降低。Nansai等^[55]分析了包括稀土金属在内的3种金

属的全球贸易流动状况,发现钽产品的开采主要是在亚洲内部,再通过日本和德国的钽产品精加工出口至西欧和北美等地,这是因为日本和德国掌握着更加高级的加工技术;钴主要以矿石的形式从非洲(开采)转移到亚洲和西欧(加工),然后再主要出口到亚洲和其他更广阔的地区,同样地,这也是因为非洲不具有成熟的钴加工技术。由此,基于物质流核算伴生性关键矿产的全球贸易流动和格局演变已经具有了方法上的可行性,并且通过核算结果,可以确定参与贸易流动的國家的作用。但在研究中,由于海关商品编码的原因,不少伴生性矿产难以获得相关贸易数据。

从上述研究可以看出,正如Mudd等^[56]和Weng等^[57]指出的,与非伴生性矿产不同的是,伴生性关键矿产的地理分布高度集中,首先在资源端高度集中,既有储量分布的集中,也有冶炼产能的集中;而中后端产品从资源国向制造国转移,又集中在技术先进的发达国家,这可能会导致单个矿山或单个國家的影响在全球范围内蔓延。而且Klimek等^[50]指出越是稀缺的资源越是容易受到贸易冲击的影响,由此,伴生性关键矿产在全球贸易中受到的贸易冲击可能远高于非伴生性关键矿产。

6 伴生性关键矿产的价格理论研究

主矿产和伴生性关键矿产之间存在复杂的生

产关系,伴生性关键矿产的产能约束来自于主矿产的生产,而主矿产的生产又取决于其自身价格,进而主伴生矿产之间可能存在着复杂的价格影响关系。因此单独针对伴生性关键矿产价格的文献较少,研究主要集中于主矿产对伴生性关键矿产的价格约束。

6.1 主矿产-伴生性关键矿产的价格关系

由于过去伴生性矿产在全球经济中的作用不显著,且缺乏关键数据,对主矿产和伴生性关键矿产之间价格依赖关系的研究直到20世纪80年代左右才开始,主要研究发现如表1所示。在研究初期,学者使用的方法较为简单,目标样本的取样时间也较短,因而得到的结论多为短期规律,即在短期内主矿产价格影响伴生性关键矿产价格。如Campbell^[17]通过分析美国金属矿业联合产品的价格变动和波动,发现主矿产和伴生性关键矿产的价格存在单向因果关系。Naumov等^[19]证实当主矿产和伴生性关键矿产的需求反向变化时,主矿产和伴生性关键矿产价格呈负相关关系。而当主矿产的供给和伴生性关键矿产的需求同向变动时,伴生性关键矿产的价格变化不可预测。Kim等^[58]对薄膜光伏组件中存在的伴生性关键矿产(如锗、铟、镉和硒)及其主金属锌和铜的价格进行了格兰杰因果关系分析,也同样发现了主矿产和伴生性关键矿产存在单向

表1 主矿产-伴生性关键矿产的价格关系

Table 1 Price relationship between by-product minerals and their main minerals

文献作者	研究对象	研究方法	研究结论
Campbell ^[17]	整个矿业行业	一般均衡模型、实证分析	短期内,主矿产和伴生性关键矿产需求反向变化时,它们价格之间存在负相关关系,需求同向变化时,则关系不明确,呈现单向因果关系
Naumov等 ^[19]	稀土金属、稀散金属及其主矿产	需求原理分析	短期内,主矿产开采减少,伴生性关键矿产需求增加,伴生性关键矿产的价格上涨;相反,当主矿产开采增加,而伴生性关键矿产下降,伴生性关键矿产的价格下跌。呈现单向因果关系
Kim等 ^[58]	锌(锗);铜(硒)	实证分析、格兰杰因果检验	短期内,主矿产价格单向影响伴生性关键矿产价格。但例外的是,锌和铟的价格之间没有相关关系
Fizaine ^[26]	铝(镓);铜(硒、碲、钼);锌(铟)	VAR模型、协整分析	从长期来看,主矿产价格正向影响伴生性关键矿产价格。但只有铜和钼,铜和硒之间存在这种相关关系
Afflerbach等 ^[59]	铝(镓);铜(钴、钼、硒、碲);镍(钴、铟、钨、碲);锌(锗、铟)	利润最大化优化模型、线性回归分析	需求冲击下,主矿产和伴生性关键矿产的价格呈负相关关系。但铝和镓、钴和镍关系较弱
Shammugam等 ^[60]	铝(镓);锌(铬、铟);铅(硒、铋);镍(钴);铜(钴)	改进的Toda-Yamamoto方法	主矿产价格对伴生性关键矿产价格的影响是长期规律。但例外的是,铝和镓,镍和钴,铜和钴,锌和铟之间没有显著的因果关系

注:括号里为伴生性关键矿产。

2020年8月

因果关系的证据。

而随着研究方法的不断优化和数据规模的增加,学者们发现了主矿产和伴生性关键矿产价格关系的长期规律。Fizaine^[26]将Campbell的结论运用到更长的历史交易数据中进行有效性验证,他们发现多对主矿产和伴生性关键矿产的价格之间长期正相关,但是短期内相关性较差。Afflerbach等^[59]在Campbell、Naumov等、Fizaine的研究基础上,建立了一般均衡最优化模型,发现在需求冲击下,主矿产的价格和伴生性关键矿产的价格呈负相关关系,但是在市场脱钩(主矿产大量生产,主矿产的变动无法对伴生性矿产产生影响)的情形下,主矿产和伴生性关键矿产的价格影响关系消失。Shammugam等^[60]采用了改进的Toda-Yamamoto方法,并建立了检验模型,他们得到的基本结论是:联合生产中的主矿产价格是伴生性关键矿产价格的格兰杰原因。

从上述研究可以看出,主矿产和伴生性关键矿产价格之间确实存在相关关系,但这并不是一个总是成立的趋势。正如Fizaine^[26]通过大样本分析发现的短期内主矿产和伴生性关键矿产的价格相关性较差,对此他们给出的解释是,短期内联合生产的主矿产和伴生性关键矿产根据市场价格发生需求演变的方式并不具有同步性和一致性,所以它们的价格可能不存在直接联系。另外, Kim等^[58]、Shammugam等^[60]都发现了锌和钢、铝和镓等多对主矿产和伴生性关键矿产之间不存在价格影响关系。对于这个现象, Jordan^[61]给出的解释是用收入份额作为划分主矿产和伴生性关键矿产的标准可能忽略了其他特性,造成了主矿产和伴生性关键矿产对应错误,由此某些主矿产和伴生性关键矿产的价格之间可能不存在显著的相关关系。

6.2 伴生性关键矿产的价格波动机制

伴生性关键矿产对主矿产价格的敏感性高于其自身价格,由此可以预计伴生性关键矿产的价格将更不稳定。通过Slade^[62]对伦敦金属交易所的主矿产和伴生性关键矿产历史交易数据的分析,这个结论得到了证实,即伴生性关键矿产相比主矿产具有更高的价格波动性。而Redlinger等^[63]认为伴生性关键矿产具有更高价格波动性的原因在于:其

一, Campbell^[17]提出的伴生性关键矿产有独特的总供给曲线。总供给曲线在最初阶段相对具有弹性,但当到达了伴生性关键矿产供给限制时,总供给曲线变得无价格弹性,而主矿产的生产通常比伴生性关键矿产更加昂贵,这种成本之间的巨大差异导致了总供给曲线的显著跳跃。鉴于这种总供给曲线形状,需求的变化可能会导致伴生性关键矿产价格的显著增加;其二, Afflerbach等^[59]认为伴生性关键矿产受到主矿产产量波动的影响,这可能是造成伴生性关键矿产高价格波动性的另一个原因。通常来说,矿产供给曲线在一段时间内是相对稳定的,并且价格波动主要由经济活动的周期性波动引起,但是对于伴生性关键矿产来说,主矿产的变化可能改变伴生性关键矿产供给曲线并增加价格波动。此外, Fizaine^[64]提出伴生性关键矿产的高价格波动性还可能归因于其具有稀有金属市场的特性,极少的生产者、极少的消费者和最终用途的局限性以及稀有金属市场的不透明性都可能导致伴生性关键矿产更高的价格波动性。进一步地, Redlinger等^[63]对伴生性关键矿产的稀有金属市场特性进行了解读,少数生产者(即集中供给)可能增加波动性,因为单一企业或矿场的进入或退出就会显著改变伴生性关键矿产的全球供给总量。有限的应用途径则会导致一旦替代材料出现,需求冲击就会给价格带来显著变化。在市场缺乏透明度的情况下,信息无法有效的在市场中传播,可能导致信息不对称决策和机会主义定价,也会造成更大的价格波动。

7 结论与研究展望

7.1 结论

本文从伴生程度测算、关键性评价、供给机制和可供性研究、全球贸易格局、价格理论等角度,对伴生性关键矿产资源安全的相关文献进行了梳理。通过对现有研究的分析总结,得到以下主要结论:

(1) 伴生性关键矿产因其对新兴技术、清洁能源技术和国防安全的重要价值,被多个国家提高到了关键矿产地位,且伴生程度开始作为一个重要指标被广泛应用于矿产关键性评价的研究中。

(2) 由于伴生性关键矿产的特殊供给机制,其资源安全面临着诸多挑战,它的供给往往不取决于

自己的需求变化,而是依赖于主矿山的供需变化,同时产能上限将伴生性关键矿山的可供性曲线划分为供给弹性区域和无弹性区域,在无弹性区域,伴生性关键矿产无法根据市场需求变化调整供给,市场机制失效。

(3)伴生性关键矿产对矿产供应的全球产业链提出了更高的安全要求,伴生性关键矿产不仅在资源端高度集中(既有储量分布的集中,也有冶炼产能的集中),而且其中后端产品从资源国向加工国转移,又集中在技术先进的发达国家,这可能会使得单个矿山或单个国家的影响在全球范围内蔓延,导致其在全球贸易中面临的贸易冲击高于其他非伴生性矿产。

(4)最后,在价格理论方面,由于伴生性关键矿产具有稀有金属的市场特性、市场缺乏透明度、用途较单一,因此相较于普通矿产,伴生性关键矿产的价格波动性更高,而且其价格变动与主矿产价格变动存在相关性。

7.2 研究展望

基于现有研究基础和亟待解决的问题,未来应重视和加强以下领域的研究:

(1)基于大数据技术缓解伴生性关键矿产研究的数据可得性和数据质量问题。以信息技术为代表的新技术革命正在深刻改变数据获取和数据处理方式,可以依托国际合作建立伴生性关键矿产的大数据中心,针对性地加强对行业大数据、机器学习、人工智能的技术开发,科学寻找伴生性关键矿产缺失数据的代理数据。

(2)定期开展中国关键矿产动态评价。中国是伴生性关键矿产的主要储量国,但目前关于伴生性关键矿产的研究较少,也没有开展中国关键矿产清单的定期更新工作。应将技术进步、社会和政策变化及经济周期波动等动态因素纳入关键性评价的指标体系中,动态地评估更新中国关键矿产名单(包括伴生性矿产),以增加关键性评价的科学性,准确认识中国伴生性矿产关键地位的变化。

(3)关注重点矿种的供应安全。稀土金属、铂族金属,以及镓、锗、铟、钴等伴生性关键矿产是欧盟、美国和中国都重点关注的矿种,这些矿种能实现清洁能源、军工技术发展。现有研究大多只分析了这些矿产的用途和供应潜力,而如何保障这些重

点矿产的持续可供性还有待进一步研究,特别是需要建立从产品设计到产品回收的伴生性关键矿产全生命周期回收体系。

(4)深入开展伴生性关键矿产全球贸易格局演变趋势研究。国务院发展研究中心课题组^[65]提出2020—2035年将是国际格局大调整期,中国也进入高质量发展阶段,这将深刻改变全球矿产的供需和贸易格局。需要在伴生性关键矿产全球贸易格局现状评价的基础上,科学分析其国际贸易格局的演变规律和发展趋势,提出伴生性关键矿产资源安全全球治理的中国方案。

(5)加强伴生性关键矿产的价格风险预测及管理研究。价格剧烈波动既影响了下游企业材料研发和应用,也影响了矿业企业的稳定经营,但又缺乏期货等常规避险手段。需要针对伴生性关键矿产的价格特性,基于矿产资源经济学的理论和方法,深化对伴生性矿产的价格理论研究,开发伴生性关键矿产的价格预测和风险管理模型,提出风险管理对策。

(6)对伴生性关键矿产资源安全作出阶段性规划。为了对抗环境变化和实现科技进步,对伴生性关键矿产的需求会持续增加,提出保障矿产资源安全的对策至关重要。在短期内,应注重分离、提纯和精炼等环节的技术创新,确保矿产供给可靠,实现矿产高效利用和资源循环;中期阶段,应培育矿业公司的国际竞争力,掌握伴生性关键矿产全球产业链的话语权,实现资源全球配置;而在长期规划中,应建立健全矿产保护机制,完善法律法规,实现伴生性关键矿产的可持续发展。

参考文献(References):

- [1] Clark A L, Jeon G J. Metal Consumption Trends in the Asia-Pacific Region: 1960–2015[C]. Manila: Pacific Economic Cooperation Conference, 1990.
- [2] 成金华, 朱永光, 徐德义, 等. 产业结构变化对矿产资源需求的影响研究[J]. 资源科学, 2018, 40(3): 558–566. [Cheng J H, Zhu Y G, Xu D Y, et al. Impact of industrial structure change on mineral resources demand[J]. Resources Science, 2018, 40(3): 558–566.]
- [3] Zhang L G, Xu Z M. A critical review of material flow, recycling technologies, challenges and future strategy for scattered metals from minerals to wastes[J]. Journal of Cleaner Production, 2018,

2020年8月

- 202: 1001-1025.
- [4] 王登红. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1189-1209. [Wang D H. Study on critical mineral resources: Significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(6): 1189-1209.]
- [5] 唐金荣, 杨宗喜, 周平, 等. 国外关键矿产战略研究进展及其启示[J]. 地质通报, 2014, 33(9): 1445-1453. [Tang J R, Yang Z X, Zhou P, et al. The progress in the strategic study of critical minerals and its implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(9): 1445-1453.]
- [6] 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.
- [7] Fortier S M, Nassar N T, Lederer G M, 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[R]. Virginia: U. S. Geological Survey Open-File Report, 2018.
- [8] Graedel T E, Barr R, Chandler C, et al. Methodology of metal criticality determination[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2): 1063-1070.
- [9] Erdmann L, Graedel T E. Criticality of non-fuel minerals: A review of major approaches and analyses[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(18): 7620-7630.
- [10] 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.]
- [11] Moss R L, Tzimas E, Kara H, et al. Critical Metals in Strategic Energy Technologies: Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies[R]. Luxembourg: EU-Scientific and Technical Research Reports, 2011.
- [12] Erdmann L, Behrendt S, Feil M. Kritische Rohstoffe für Deutschland[M]. Berlin: Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, 2011.
- [13] Graedel T E, Allwood J M, Birat J, et al. What do we know about metal recycling rates[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2011, 15(3): 355-366.
- [14] EC-European Commission. Critical Raw Materials for the EU[R]. Brussels: Report of the Ad-Hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials, 2010.
- [15] Green M A. Rare materials for photovoltaics: Recent tellurium price fluctuations and availability from copper refining[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2013, 119: 256-260.
- [16] Jordan B W, Eggert R G, Dixon B W, et al. Thorium: Crustal abundance, joint production, and economic availability[J]. *Resources Policy*, 2015, 44: 81-93.
- [17] Campbell G A. The role of co-products in stabilizing the metal mining industry[J]. *Resources Policy*, 1985, 11(4): 267-274.
- [18] Sprecher B, Reemeyer L, Alonso E, et al. How “black swan” disruptions impact minor metals[J]. *Resources Policy*, 2017, 54: 88-96.
- [19] Naumov A V, Grinberg E E. Several peculiarities in the analysis of the markets of rare and scattered metals after 2004[J]. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2009, 50(1): 61-68.
- [20] Sverdrup H U, Ragnarsdottir K V, Koca D. An assessment of metal supply sustainability as an input to policy: Security of supply extraction rates, stocks-in-use, recycling, and risk of scarcity[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 359-372.
- [21] Phipps G, Mikolajczak C, Guckes T, et al. Indium and Gallium: Long-term supply[J]. *Renewable Energy Focus*, 2008, 9(4): 56-59.
- [22] Fortier S M, Hammarstrom J M, Ryker S J, et al. USGS critical minerals review[J]. *Mining Engineering*, 2019, 71(5): 35-47.
- [23] 陆挺, 刘璇, 张艳飞, 等. 基于产业链分析的中国钢镓铟产业发展战略研究[J]. 资源科学, 2015, 37(5): 1008-1017. [Lu T, Liu X, Zhang Y F, et al. Development strategies for the Chinese indium, germanium and gallium industry based industry chain analysis [J]. *Resources Science*, 2015, 37(5): 1008-1017.]
- [24] Hagelüken C. International Economics of Resource Efficiency[M]. Heidelberg: Physica-Verlag HD, 2011.
- [25] Frenzel M, Tolosana-Delgado R, Gutzmer J. Assessing the supply potential of high-tech metals: A general method[J]. *Resources Policy*, 2015, 46: 45-58.
- [26] Fizaine F. Byproduct production of minor metals: Threat or opportunity for the development of clean technologies? The PV sector as an illustration[J]. *Resources Policy*, 2013, 38(3): 373-383.
- [27] Prasai D, Tuberquia J C, Harl R R, et al. Graphene: Corrosion-inhibiting coating[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(2): 1102-1108.
- [28] Raman R K S, Banerjee P C, Lobo D E, et al. Protecting copper from electrochemical degradation by graphene coating[J]. *Carbon*, 2012, 50(11): 4040-4045.
- [29] Ylä-Mella J, Pongrácz E. Drivers and constraints of critical materials recycling: The case of indium[J]. *Resources*, 2016, DOI: 10.3390/resources5040034.
- [30] Kral U, Kellner K, Brunner P H. Sustainable resource use requires “clean cycles” and safe “final sinks”[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 461: 819-822.
- [31] 何朋蔚, 王昶, 左绿水, 等. 基于废弃手机的高技术矿产可供性研究[J]. 资源科学, 2018, 40(3): 589-599. [He P W, Wang C, Zuo L S, et al. Availability analysis of high-tech minerals in waste mo-

- bile phones[J]. *Resources Science*, 2018, 40(3): 589–599.]
- [32] 张迎新. 欧盟将 14 类矿产确定为关键原材料[J]. 国土资源情报, 2011, (5): 35–39. [Zhang Y X. EU identifies 14 types of minerals as critical raw materials[J]. *Land and Resources Information*, 2011, (5): 35–39.]
- [33] Mudd G M, Weng Z, Jowitt S M, et al. Quantifying the recoverable resources of by-product metals: The case of cobalt[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 55: 87–98.
- [34] Sverdrup H U, Ragnarsdottir K V, Koca D. An assessment of metal supply sustainability as an input to policy: Security of supply extraction rates, stocks-in-use, recycling, and risk of scarcity[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 359–372.
- [35] 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, (5): 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, (5): 116–127.]
- [36] Frenzel M, Ketris M P, Seifert T, et al. On the current and future availability of gallium[J]. *Resources Policy*, 2016, 47: 38–50.
- [37] Mudd G M, Jowitt S M, Werner T T. The world's by-product and critical metal resources part I: Uncertainties, current reporting practices, implications and grounds for optimism[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 86: 924–938.
- [38] Werner T T, Mudd G M, Jowitt S M. Indium: Key issues in assessing mineral resources and long-term supply from recycling[J]. *Applied Earth Science*, 2015, 124(4): 213–226.
- [39] Schwarz-Schampera U, Gun G. *Critical Metals Handbook*[M]. Washington: American Geophysical Union, 2014.
- [40] 沈镛, 方兰. 矿产资源市场与贸易的变化格局及对中国经济的影响[J]. 资源与生态学报, 2010, 1(1): 83–86. [Shen L, Fang L. The changing patterns of mineral market, trade and their impact on China's economy[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(1): 83–86.]
- [41] 朱学红, 张宏伟, 李心媛. 中国稀土国际市场势力测度及政策有效性研究[J]. 国际贸易问题, 2018, (1): 32–44. [Zhu X H, Zhang H W, Li X Y. Measurement of the international market power of China's rare earth and the effectiveness of policy[J]. *Journal of International Trade*, 2018, (1): 32–44.]
- [42] Achzet B, Helbig C. How to evaluate raw material supply risks: An overview[J]. *Resources Policy*, 2013, 38(4): 435–447.
- [43] Glöser S, Espinoza L T, Gandenberger C, et al. Raw material criticality in the context of classical risk assessment[J]. *Resources Policy*, 2015, 44: 35–46.
- [44] 梁靓, 代涛, 王高尚. 基于供需视角的中国矿产资源国际贸易格局分析[J]. 中国矿业, 2017, 26(9): 53–60. [Liang L, Dai T, Wang G S. Analysis of China's international trade pattern of mineral resources based on the perspective of supply and demand[J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26(9): 53–60.]
- [45] Gulley A L, Nassar N T, Xun S. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(16): 4111–4115.
- [46] Serrano M A, Boguná M. Topology of the world trade web[J]. *Physical Review E*, 2003, DOI: 10.1103/PhysRevE.68.015101.
- [47] Mancheri N A, Sprecher B, Deetman S, et al. Resilience in the tantalum supply chain[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 129: 56–69.
- [48] Ge J P, Wang X B, Guan Q, et al. World rare earths trade network: Patterns, relations and role characteristics[J]. *Resources Policy*, 2016, 50: 119–130.
- [49] Tokito S, Kagawa S, Nansai K. Understanding international trade network complexity of platinum: The case of Japan[J]. *Resources Policy*, 2016, 49: 415–421.
- [50] Klimek P, Obersteiner M, Thurner S. Systemic trade risk of critical resources[J]. *Science Advances*, 2015, 1(10): e1500522.
- [51] Wang S, Chen B. Hybrid ecological network and flow-distance analysis for international oil trade[J]. *Energy Procedia*, 2016, 104: 209–214.
- [52] Kitamura T, Managi S. Driving force and resistance: Network feature in oil trade[J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 361–375.
- [53] Shi Y L, Chen W Q, Wu S L, et al. Anthropogenic cycles of arsenic in mainland China: 1990–2010[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(3): 1670–1678.
- [54] Nassar N T. Shifts and trends in the global anthropogenic stocks and flows of tantalum[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 125: 233–250.
- [55] Nansai K, Nakajima K, Kagawa S, et al. Global flows of critical metals necessary for low-carbon technologies: The case of neodymium, cobalt, and platinum[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(3): 1391–1400.
- [56] Mudd G M, Jowitt S M. A detailed assessment of global nickel resource trends and endowments[J]. *Economic Geology*, 2014, 109(7): 1813–1841.
- [57] Weng Z, Jowitt S M, Mudd G M, et al. A detailed assessment of global rare earth element resources: Opportunities and challenges[J]. *Economic Geology*, 2015, 110(8): 1925–1952.
- [58] Kim H, Heo E. Causality Between Main Product and Byproduct Prices of Metals Used for Thin-Film PV Cells[C]. Seoul: IAEE, 2012.
- [59] Afferbach P, Fridgen G, Keller R, et al. The by-product effect on metal markets: New insights to the price behavior of minor metals[J]. *Resources Policy*, 2014, 42: 35–44.
- [60] Shammugam S, Rathgeber A, Schlegl T. Causality between metal prices: Is joint consumption a more important determinant than

2020年8月

- joint production of main and by-product metals[J]. *Resources Policy*, 2019, 61: 49–66.
- [61] Jordan B W. Companions and competitors: Joint metal-supply relationships in gold, silver, copper, lead and zinc mines[J]. *Resource and Energy Economics*, 2017, 49: 233–250.
- [62] Slade M E. Market structure, marketing method, and price instability[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 1991, 106: 1309–1340.
- [63] Redlinger M, Eggert R. Volatility of by-product metal and mineral prices[J]. *Resources Policy*, 2016, 47: 69–77.
- [64] Fizaine F. Minor metals and organized markets: News highlights about the consequences of establishing a futures market in a thin market with a dual trading price system[J]. *Resources Policy*, 2015, 46: 59–70.
- [65] 国务院发展研究中心课题组, 李伟, 隆国强, 等. 未来15年国际经济格局变化和中国战略选择[J]. *管理世界*, 2018, 34(12): 1–12. [The Research Group of Development Research Center of the State Council, Li W, Long G Q, et al. The change of international economic pattern and China's strategic choice in the next 15 years [J]. *Management World*, 2018, 34(12): 1–12.]

Review of the by-product critical minerals resource security research and prospects

SHAO Liuguo^{1,2}, LAN Tingting¹

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

2. Institute of Metal Resources Strategy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In terms of individual elements, by-product minerals account for more than 60% of critical minerals in the United States and the European Union. Compared with the non-byproduct critical minerals, by-product critical minerals possess special geological and economic properties, which have a unique impact on their resource security. In recent years, as critical minerals have become the focus of the government and scientific research institutions, studies on the resource security of by-product critical minerals have increased gradually. This article presented a systematic analysis of criticality evaluation, supply mechanism, price theory, and international trade pattern of the by-product minerals. It is found that due to the important strategic position of the by-product critical minerals, the degree of companionship has become an important criticality evaluation index of minerals, so the security of supply of by-product critical minerals has been ensured to some extent. The supply of by-product critical minerals depends on the change of supply and demand of their main minerals, which leads to inelasticity of supply and faced with supply risk. At the same time, the geographic distribution of by-product critical minerals is highly concentrated, which causes higher trade risks in global trade. Compared with non-byproduct critical minerals, by-product critical minerals have higher price volatility and their price volatility is affected by that of their main minerals, and there is a risk to stabilize the supply and demand of by-product critical minerals. Finally, in light of the background and trend of future economic development, this study identified the research direction of the resource security of by-product critical minerals in the future.

Key words: by-product critical minerals; criticality evaluation; supply mechanism; global trade pattern; price theory