

战略性关键矿产可供性评价方法研究现状及展望

成金华, 朱永光, 徐德义, 冯 银

摘 要: 战略性关键矿产在能源转型中扮演着关键角色, 是全球主要经济体在碳中和进程中争夺的原材料, 保障战略性关键矿产可持续供应是当前我国资源安全面临的重要问题。传统的矿产资源可供性评价方法主要分为微观尺度的财务模型、地质类比法和宏观尺度的 Hubbert 模型。传统的评价方法具有较强的主观性以及数据具有高度依赖性和敏感性。在实践中, 上述方法往往存在着数据获取成本高以及评价结果精度低的问题, 其适用性较差。与传统的大宗矿产相比, 锂、稀土、钴等典型关键矿产资源具有细、伴、精的地质特征, 亟需创新可供性评价方法。首先, 本文将战略性关键矿产可供性评价从地质、技术、经济、环境和突发事件五个维度分为市场机制、物理机制和外生机制三个部分, 指出了战略性关键矿产可供性评价的重点。其次, 本文分析了战略性关键矿产可供性评价实践中的难点。最后, 本文展望了战略性关键矿产可供性评价领域未来研究的议题。

关键词: 战略性关键矿产; 可供性评价; 市场机制

中图分类号: F205 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0169(2022)04-0038-12

DOI:10.16493/j.cnki.42-1627/c.2022.04.010

一、引 言

当前世界各国正在努力实现能源转型, 能源消费由传统化石能源向可再生能源过渡, 积极面对气候变化的严峻挑战。同时, 能源转型带动了全球新一轮的产业和技术变革, 新能源及其关联产业成为了当前世界主要发达国家和经济体布局的重要部门, 是全球新一轮产业竞争的主战场^{[1][2][3][4]}。支撑新能源及其关联产业发展的原材料也成为世界主要发达国家和经济体竞相争夺的对象^{[5][6]}, 先后被美国、欧盟、澳大利亚等西方发达国家定义为关键矿产或关键原材料^{[7][8]}。根据国际可再生能源署 (International Renewable Energy Agency, IRENA) 和世界银行 (World Bank) 预测, 部分关键矿产 2050 年将产生较大供需缺口, 全球锂、钴、铟等关键矿产需求量将分别是 2017 年产量的 9.65 倍、5.85 倍和 2.41 倍。关键矿产供需矛盾将加剧新一轮全球资源民族主义的恶化和地缘政治的紧张^[9], 保障关键矿产的可持续供给是世界各国面临的重要问题^[10]。美国、欧盟等西方发达国家和经济体也先后出台了相关国家战略, 应对面临的关键矿产或关键原材料短缺的问题^{[11](P5)}。So-

基金项目: 国家自然科学基金重大项目“新时代战略性关键矿产资源供给安全管理与政策”(71991482); 国家自然科学基金面上项目“共伴生关键矿产峰值预测及预警研究”(72074197); 国家社会科学基金重大项目“战略性矿产资源产业链供应链安全的国家战略研究”(21&·ZD106)

作者简介: 成金华, 中国地质大学 (武汉) 经济管理学院教授、博士生导师 (湖北 武汉 430074); 朱永光, 中国地质大学 (武汉) 经济管理学院副教授; 徐德义, 中国地质大学 (武汉) 经济管理学院教授、博士生导师; 冯银 (通讯作者), 湖北经济学院低碳经济学院讲师, fytddy@163.com (湖北 武汉 430205)

vacool 等指出气候变化等相关全球环境协议应当加入关键矿产全球治理的相关议程^[12]。确保全球实现能源转型,避免清洁能源地缘政治冲突,实现全人类环境公平与正义是全球人类命运共同体的应有之义^{[13][14]}。当前,新冠疫情等突发事件严重加剧了全球产业链供应链风险^[15],对关键矿产可持续供给也带来了极大挑战,科学评估关键矿产可供性是当前面临的重要科学问题。

十九大以来,生态文明建设对我国矿产资源安全提出了新要求。2020年9月,习近平总书记在联合国大会上庄严承诺我国将于2030年前实现碳达峰,2060年左右实现碳中和。党的十九届五中全会明确提出要把安全发展贯穿国家发展各领域和全过程,防范和化解影响我国现代化进程的各种风险,筑牢国家安全屏障,保障能源和战略性矿产资源安全。2022年中央工作会议指出,正确认识 and 把握初级产品供给保障,战略性关键矿产资源供给安全已成为我国迫切需要关注的问题。长期以来,我国与西方发达国家在矿产资源贸易领域长期博弈,为了保障我国的矿产资源资源安全在海外投资了大量的矿山^[16]。近年来,美国和欧盟等西方发达国家通过“冲突矿产”“能源资源治理倡议”等措施,成立相关的联盟和非政府组织,制定相关协议和制度,强化对我国在关键矿产全球话语权争夺中的遏制。去全球化等国际环境以及新冠疫情事件强烈冲击了全球产业链供应链^[17],对我国关键矿产贸易产生了深刻的影响。关键矿产可持续供给是保障我国双循环战略的重要前提,是我国产业安全的物质基础。基于国际国内两个背景,对战略性关键矿产可供性进行科学评价既是现实需要,也是当前亟待解决的科学问题。

二、现有研究综述

(一) 战略性关键矿产的概念

关键矿产(Critical Minerals)这一概念最早来自于美国政府的国家安全战略中,1938年美国内政部将用在军用设备上且关系国家安全的42种矿产定义为关键矿产^[11]。根据2018年美国内政部最新的定义,关键矿产是指供应链脆弱且能够威胁国家安全的非能源类矿产资源,并更新公布了包含35种矿产的关键矿产清单^[18]。欧盟也于2008年发布了《欧盟原材料新方案》,其中于2011年开始每三年更新一次关键原材料清单。日本也有相对应的国家稀有金属战略^[19]。与西方发达国家相比,我国矿产资源安全观也在逐渐完善,于2015年在《全国矿产资源规划(2016—2020)》中首次确立了战略性矿产资源的概念,并且提出了我国的战略性矿产资源清单,包括了能源、金属和非金属三大类24种矿产资源^[20]。我国战略性矿产资源清单中包含了能源类矿产,是一种总体资源安全战略。欧盟、美国等西方发达国家的清单则是非能源矿产,是一种与能源安全战略相对独立的资源安全战略。因此,对于战略性矿产资源或者关键矿产资源的定义没有一种明确的标准,是国家或者经济体结合自身国家经济发展需要和安全需求的一种动态调整的清单^[21]。综合比较美国、欧盟、日本等西方发达国家关键矿产清单以及中国的战略性矿产清单,结合相关学者的研究结论^{[22][23]},本文将战略性矿产和关键矿产进行综合定义。战略性关键矿产是国家统筹自身资源禀赋和国家安全的现实需要,影响一个国家战略性产业安全的矿产资源。当前战略性关键矿产主要聚焦于能源转型过程中铜、锂、钴、镍、稀土等低碳技术产业和新兴技术产业所需的矿产资源。

(二) 可供性的内涵

矿产资源可供性一般是指在特定市场价格下,特定国家或地区可以用来供应市场需求的矿产资源总量。以某特定矿山为例,当市场价格高于该矿山开发的矿产品单位成本时,则该矿山会进行生产行为,存在着获利空间,也就是该矿山是可供的。反之,当市场价格低于该矿山开发单位矿产品的成本时,则会停止生产活动,该矿山则是不可供的。可供矿山的储量称之为可供储量,产量称之为可供产量。将一定空间范围的矿山可供性情况汇总,则是一个国家或者地区的可供情况。将所有

矿山的成本汇总，依照从小到大进行排序，进而对矿产资源开发利用进行决策分析，上述过程被称之为可供性分析^{[24](P13-27)[25](P18)[26][27]}。以成本为核心的可供性分析主要依据的是经济学中的 Hotelling 模型^[28]。该模型基本原理是假定不可再生资源的两种产品功能上具有同质性，消费者在地理或产品特征空间中与卖方越远，则其购买的成本就越高。从矿产资源开发成本开看，资源开发利用的顺序则是一个由低成本到高成本的过程（如图 1 所示）。随着矿产资源开发规模的扩大，在技术条件等因素不变的情况下，资源开发成本是一种逐渐递增的过程。由于不同矿产资源的地质技术经济等条件的异质性，其成本曲线的变化也是不同的。当边际价格递减（增）时，该矿产则属于边际减（增）。部分矿产由于不同矿床开发成本的不同，可能存在着可供价格发生突然变化，属于结构突变型。还有部分矿产，其可供价格由于地质等因素带来成本极大不确定性，属于多变形。考虑到环境、技术等因素的多重作用和影响，许多学者也先后对该模型进行了改进和拓展，相继提出了 Hubbert 模型^[29]、广义 Herfindahl 模型^[30]。Hotelling 模型为可供性分析提供了理论基础，也揭示了可供性分析的重要作用机理。同时，理论上的假定往往具有很强的约束力，现实中环境治理行政因素干扰、技术研发的不确定性等因素对可供性有很大的影响，这也是当前困扰可供性分析的最重要因素，亟待开展相关理论创新和实践研究。

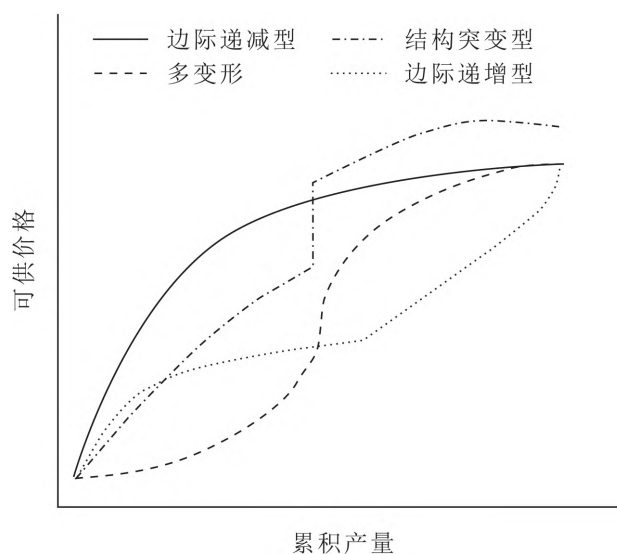


图 1 累积可供曲线

（注：不同曲线变化主要参考的是边际价格变化，随着累积产量增加，可供价格的变化不同）

资料来源：作者自己整理

（三）财务模型

美国地质调查局最早于 1969 年将可供性分析运用在矿山可供性评价上，主要使用的是基本财务模型^[27]。美国地质调查局的可供性系统由 MINSIN 子系统、CES 子系统和 SAM 子系统组成（如图 2 所示）。首先确定矿产品并选择相应的矿床，然后结合矿床的内部条件和外部条件确定其吨位和品位，接着估算工程及成本（经营成本），准备矿床报告形成矿床 MAP 永久性文件，根据前三个步骤得到的矿床、相应的吨位和品味以及估算的工程与成本数据形成矿产企业定位系统（MILS）数据，并录入 MAP 数据库。从 MAP 数据库和矿床 MAP 永久性文件中选择数据并进行验证，验证后的数据又计入 MAP 数据库和矿床 MAP 永久性文件，将验证得到的矿山数据加入税费成本和价格等指标一起从经济层面分析计算总成本，得到相应的分析数据、可供性曲线和分析报告；接着调整变量和参数进行敏感性分析得到相应的数据、可供性曲线和分析报告。

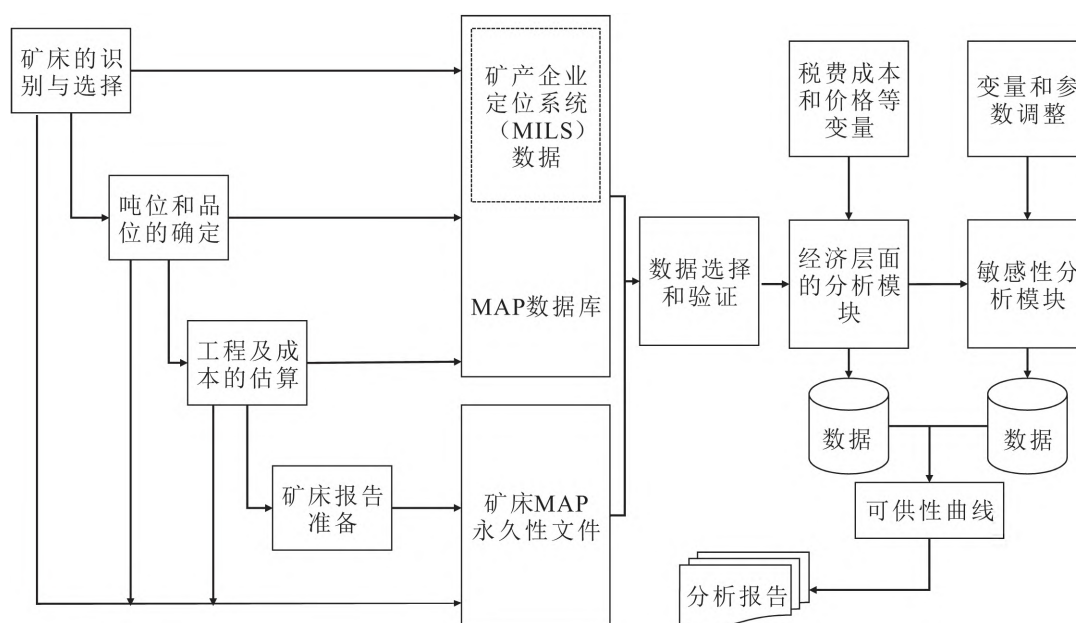


图2 美国矿山可供性评价流程

资料来源：作者自己整理

其中，MINSIN 子系统主要是通过现金流量贴现法（Discounted Cash Flow，简称 DCF）计算矿山成本，计算出来的成本称之为可供价格。如式 1 所示， NPV （*Net Present Value*）为净现值， n 为折现年序号， L 为矿山服务年限， P 为矿产品价格， M_n 为产量， CO_n 为广义成本，包括投资成本和经营成本， $P \times M_n - CO_n$ 为第 n 年的净现金流量， e 为自然常数， r 为折现率， r 为设置的内部收益率。令 NPV 为 0，即可求得可供价格 P ，当可供价格 P 小于市场价格时，认为此矿区的该矿产品可供，否则不可供。美国矿业局可供性系统除了 MINSIN 子系统，还有用来分析投资成本和经营成本的 CES 子系统以及矿产品供应分析的 SAM 子系统。

$$NPV = \sum_{n=0}^L (P \times M_n - CO_n) (e^r - 1/r e^m) \quad (1)$$

除此之外，还有一些动态评价方法，如总现值法（PV 法）、净现值法（NPV 法）等方法^{[31][32]}。目前美国、加拿大及欧洲等西方发达国家的矿产资源可供性分析是基于财务模型的构建一个分析系统，结合矿山层面的数据，计算评价区域内的矿山成本，结合不同情景下的市场价格，对研究区域的可供性进行评价分析^{[24][25][26][27]}。因此，财务模型是当前世界各国用来可供性评价的重要工具，也有很强的理论支撑。

（四）地质类比法

财务模型对于数据要求较高，往往需要矿山层面的财务、开发利用等相关数据，这些数据的完整性很难保证，同时获取成本很大。以美国地质调查局可供性评价系统为例，该系统中需要获取全球所有已知矿山的数据，缺少数据会给评价结果带来极大的不确定性。基于此，王安建等提出地质类比法来解决矿山数据获取的问题^[33]。地质类比法是以某些已开发矿山或矿区作为类比标准，通过地质、经济、关键参数的比较分析，对新矿山或矿区进行技术经济评价，从而预测矿床/矿区矿产资源可供性和可供资源储量的方法。如式 2 所示，其中 P_s 表示待估矿山或矿区矿种的可供价格， P_x 表示参照的矿山矿种可供价格， μ 表示规模调整参数， ϵ 表示品位调整系数， θ 表示差异要素调整系数。三个调整参数计算中， Q_{js} 为被评估矿区或矿山探明储量， Q_{js} 为参照的矿区或矿山探明储

量; C_{pb} 为被评估矿区或矿山平均地质品位, C_{ps} 为参照的矿区或矿山平均地质品位; A_b 为被评估矿区或矿山差异要素评判总值, A_s 为参照的矿区或矿山差异要素评判总值。

$$P_s = P_X \cdot \mu \cdot \varepsilon \cdot \theta$$

$$\mu = \frac{Q_{jb}}{Q_{js}}; \varepsilon = \frac{C_{pb}}{C_{ps}}; \theta = \frac{A_b}{A_s} \quad (2)$$

地质类比法在实践中往往对于待评估矿山和参照矿山之间的相似性有较大要求。该方法要求两者在地质成矿过程中的条件类似, 并且采选技术相差不大。同时, 该方法也要求两者在空间上相近, 不存在着较大的运输成本差异。该方法一定程度上解决了财务模型在数据缺失时无法计算的问题, 通过少数样本能够推估全部矿山的可供性也极大地降低了实践中的评价成本问题。在实践中, 该方法被用在我国矿产资源保障程度论证报告中, 取得了一定的效果, 能够一定程度上真实反映我国矿产资源的可供性。

(五) Hubbert 模型

无论是财务模型还是地质类比法, 两者均是适用于矿山层面的可供性评价, 所使用的数据均是矿山数据。除此之外, Hubbert 模型是从宏观层面对可供性评价的一种方法, 其原理是假定矿产资源的产量是一条正态分布曲线, 累计产量是一条 logistic 曲线^[29]。传统的研究主要是通过计量经济方法, 估计正态分布曲线或 logistic 曲线的参数, 利用最终可采资源量 (Ultimately Recoverable Resources) 作为相关参数, 进而预测矿产资源可供产量。早期该模型主要运用在能源峰值预测, 尤其是石油, 同时该模型也在不断创新。如现在常用到的循环多峰值模型等等^{[34][35]}。从现有文献来看, Hubbert 模型主要被用在全球或者特定国家的能源可供性预测上, 是一种空间尺度相对较大的宏观预测。由于石油等能源数量尺度大, 在宏观尺度上预测并不会带来较大异质性, 误差相对位于可接受范围。Hubbert 模型在非能源矿产领域的运用, 尤其是金属矿产起步较晚。Valero 等结合有效能理论首次运用 Hubbert 模型预测了 51 种能源和非能源矿产资源的峰值^[36]。Scholz 等指出由于数据尺度上的不同, Hubbert 模型在非能源类矿产的可供产量预测中存在较大误差^[37]。Xu 等结合 Copula 函数和 Hubbert 模型, 预测了全球铀产量的可供产量曲线^[38]。

在 Hubbert 模型中, 往往假定最终可采储量 (URR) 是一个已知的参数, 最终可采资源量的不确定性是影响 Hubbert 模型在可供产量预测中的重要因素。与能源矿产相比, 金属矿产往往具有共伴生、低品位等地质特征, 其数据量级小, 异质性强, 更易受到 URR 的不确定性影响。Mudd 等提出了基于矿山项目数据估算全球矿产资源最终可采资源量的方法, 以降低金属矿产可供性评价中 URR 不确定性带来的问题^[39]。无论结果精确度如何, Hubbert 模型在非能源矿产可供性评价中运用在宏观尺度上能够解决一定程度的问题。

(六) 现有研究述评

传统的可供性评价模型主要分为以微观矿山数据为基础的财务模型评价方法和以可供产量趋势拟合为主的 Hubbert 模型。以财务模型评价方法为基础的微观尺度评价对矿山数据有极高的要求, 理论上需要所有待评估矿山的相关数据。该方法在实际应用中成本极高, 无论是美国地质调查局还是我国的全国矿产资源保障程度论证, 在运用该方法时都投入了成本。由于矿山层面统计数据标准缺乏统一, 同时数据相对粗糙, 质量普遍不高, 也造成了及时较大投入也很难保证数据可靠性的问题。地质类比法在一定程度上解决了数据不足带来的问题, 但是其调整系数的设定往往过于主观, 无法精确评估其有效性和结果的可靠性。与此同时, 战略性关键矿产与传统大宗矿产相比也有其独特的地质特征和经济特征。在地质属性维度, 主要表现为共伴生、低品位和精细化; 在经济属性维度, 主要表现为高技术壁垒、高度寡头化市场以及商品技术混合贸易的特征^[40]。在现有研究基础上, 结合关键矿产的主要特征, 战略性关键矿产可供性评价在以下几个方面有待进一步加强。

第一,伴生性对关键矿产可供性评价的影响机制亟需理论创新。“伴、精、细”的地质特征往往会对伴生性关键矿产开发利用产生不确定性的成本变动,不同的成矿类型、不同矿种、不同的空间成矿带、不同的探明程度、深部资源开发、品位降低等因素也对伴生性关键矿产可供价格产生了不同的影响机制。由于伴生性关键矿产资源属性的多样性,传统可供性方法应用起来有很大的局限性。同时,伴生性关键矿产更易受到环境因素、突发事件、循环利用等的影响,很难获取相关变量。

第二,数据质量与规模是研究伴生性关键矿产可供性的难点。传统矿产资源可供性评价是高度依赖数据精度的方法。伴生性关键矿产基础地质数据往往具有很强的异质性,如稀土、铀等。无论是美国地质调查局还是我国矿产资源统计信息汇编,由于统计标准的不一致以及数据来源的不统一,基础地质数据往往差异很大,获得高精度高准确率的储量和资源量数据的成本极高。基础地质数据的获取是提升可供性测度精度的重要前提。如何获取可靠的数据,以及如何评价数据的可靠性,是可供性评价研究亟待突破的重要难点。

第三,伴生性关键矿产市场价格与可供价格间的预警机制更加复杂。传统的可供性预警机制是通过比较市场价格与可供价格之间的大小来进行预警,伴生性关键矿产市场价格波动性较小,定价机制往往存在着政府操控。由于市场交易规模较小,市场价格往往不具有很强的“市场”特征。因此,战略性关键矿产可供性不能仅仅比较可供价格与市场价格的大小,同时也要考虑市场价格的作用机制。传统的 Hotelling 模型对于可供价格的假定往往未考虑矿产资源储量的变化,关键矿产由于其总量较小,储量变动对其可供价格如何作用也有待进一步在理论上进行阐释。

三、战略性关键矿产可供性评价重点及难点

(一) 可供性评价重点

传统的矿产资源可供性以矿山成本为可供价格,比较可供价格与市场价格间的大小,进而判定矿山是否可供。矿山成本是可供性测度的重要指标,由于市场价格属于外生变量,往往是一种情景设定,无需进行计算。因此,可供价格成为可供性测度的关键指标。可供价格往往受到地质技术因素的影响,不同的矿山其可供价格往往存在较大异质性。宏观尺度的 Hubbert 模型往往是从国家层面对可供产量的粗糙估计,其本质也是一种刚性的判断,其影响变量主要从三个参数进行调整,无法体现具体影响变量的作用机制。因此,从可供性的定义来看,其本身是个包含了勘查、开发、加工到市场的全产业链过程。从可供价格和市场价格角度来看,影响可供性测度的主要分为内生机制和外生机制两个部分,其中内生机制包括了影响可供价格的物理机制以及影响市场价格的市场机制(如图3所示)。

传统的可供性模型中,地质因素是影响可供性评价的主要因素。财务模型中矿山的成本是矿山运营成本,是指矿山资源开发利用过程中形成各种成本的汇总。Hubbert 模型中,最终可采资源量是影响曲线的重要参数。因此,地质维度的物理机制是影响可供性的最重要的因素。由于矿产资源自然富集过程往往具有较强的异质性,无论是品位、成矿类型、矿种、地理位置等均会影响关键矿产的可供性。其中,品位这一指标在可供性研究中被提及的最多。由于矿产资源成矿过程较多,可乘性效应和存在零点下界往往会导致自然界中矿产资源品位呈现对数分布^{[41][42]}。Ahrens 研究成矿过程中发现地球化学元素在地壳中往往呈现对数正态的等级数量分布^{[43][44]}。以金矿为例,金块类型的矿床其品位可以达到 100%,斑点金类型的矿床其品位要小于 1%。品位上的差异导致其可供价格呈现了极大的差异。同时,矿产资源开采技术是影响可供性的另一个重要因素。Acemoglu 认为技术扩散的过程往往存在着较大的壁垒和成本,矿产资源开采技术往往具有很强的滞后效应^[45]。

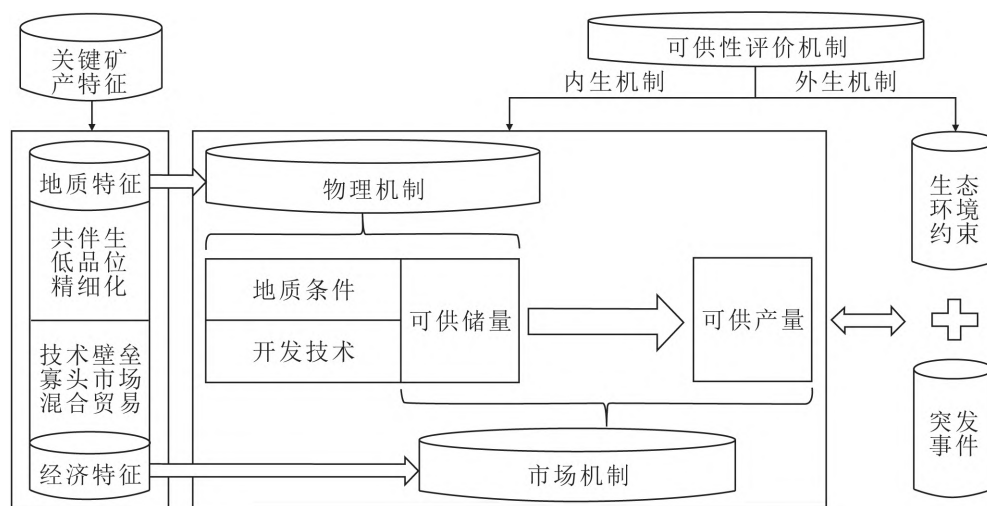


图3 耦合作用机制

资料来源：作者整理

在特定时间内，矿产资源开采技术在不同矿业企业扩散过程往往存在着较强的不确定性，技术替代成本往往在短期内高于矿产资源可供价格，进而使得技术对可供价格存在着抑制作用。伴随着技术的成熟，以及矿产资源开采品位的不断下降，技术成本也逐渐降低，进而对可供价格产生促进作用。但是，技术成本与可供价格之间影响机制变化往往存在着时间上的不确定性。因此，地质条件和开采技术对可供性的影响主要体现在资源储量和可供产量上，最终显现在可供价格上，是一种内生机制。从 Hotelling 模型角度来看，地质维度的内生机制对可供价格的影响往往体现在成本，但是其成本形成过程则是由于地质条件的异质性决定的。对于关键矿产来说，地质条件和技术影响更是如此。由于其在地壳中含量较小，资源储量的变动往往会有很大的波动，如新矿床的发现等。同时，关键矿产对于开采技术要求更高，比传统大宗矿产开采难度较大^{[46][47][48]}。在战略性关键矿产可供性测度中，地质条件和开采技术决定了可供储量。

可供性市场机制的主要作用是如何将矿产资源可供储量变为可供产量。当市场价格高于可供价格时，可供储量也就成为了可供产量。反之，当市场价格低于可供价格时，可供储量由于其开采不具有经济性，因此无法成为可供产量。决定市场价格的相关因素构成了影响可供性的市场因素，这些市场因素的作用机制则形成了市场机制。传统的经济学模型中，往往假定市场价格是由市场供需双方决定的，供需双方则由不同的影响因素决定。供需函数往往是一种指数函数形式，供给价格和需求价格与影响因素之间是一种对数线性关系。当供给价格与需求价格相等时，满足市场出清状态，也就是所谓的市场均衡状态，此时的价格则是市场价格。当出现寡头垄断等市场时，市场均衡状态也存在着福利损失。依据 Hotelling 模型，影响供给侧的变量主要包括了资源量、市场结构、地缘政治等因素^[49]，影响需求侧的变量主要是产业结构的变化^[50]。影响供需两侧的变量相互作用，最终形成了市场价格。因此，市场机制的核心是供需均衡状态，市场价格则是供需均衡下的市场指标^[51]。战略性关键矿产由于其独特的地质特征，导致其在经济属性上也展现了与传统大宗矿产不同的特征。因此，战略性关键矿产市场价格形成机制也有待进一步厘清。传统的矿产资源定价包括了长期协议定义、期货定价等多种方式^{[52](P155)}。战略性关键矿产由于其贸易规模小，在定价时部分影响因素作用机制与传统大宗矿产有很大不同，地缘政治等定性变量影响往往较大。资源国的政治经济社会环境对其市场价格影响充满了不确定性，因此体现出的价格波动也往往十分剧烈。

除可供价格和市场价格意外,仍然存在着外部性的影响因素,对矿产资源可供性产生较大的影响,是一种外生作用机制,可以概括为环境政策和突发事件^{[53][54]}。从作用机制来看,外生影响因素的作用机制基本上相同,主要通过影响矿山生产活动,进而影响其可供性。以我国生态红线矿业权退出为例,该环境政策导致了生态保护区内的矿山生产活动完全停止,无论市场价格如何变动,其无法影响该矿山的可供性。同样,当矿山发生突发事件,如崩塌等,矿山生产活动也会受到影响,进而影响其可供性。外生因素对可供性的影响往往会伴随着时间逐渐衰减,其恢复时间主要受到政策的灵活性以及事件的持续性影响。

(二) 可供性评价难点

现有的可供性评价方法是以矿山数据为基础,将单位矿产品的开发利用成本作为可供价格,通过与矿产品市场价格进行比较,进而判断矿山的储量是否可供,是一种线性静态刚性预警机制。该方法对于矿山数据有较大的依赖性,评价是否准确有效的关键在于每一个矿山成本数据的准确性和及时性。但是,由于地质成矿过程存在空间异质性,以及现实中微观数据获取成本极高,矿山层面的相关数据可靠性和及时性较差,其可供性评价结果精度也有较大提升空间。传统的矿山开发往往是以主矿种为主要开发对象,伴生矿种通常作为开采过程中附属产品的形式存在,其可供性与主矿种之间存在紧密相关关系。同时,很多伴生矿种的矿山规模小,往往存在相当程度的数据缺失,无法直接获取可供性评价的相关数据。如何在实践中通过采集少量矿山数据估计我国乃至全球层面的矿产资源可供性是可供性评价的难点和重点。

第一,传统战略性关键矿产可供性评价方法是高度依赖数据精度的方法。部分关键矿产,尤其是三稀矿产,由于其伴生性的地质特征,基础地质数据往往具有很强的异质性,如稀土、铟等。无论是美国地质调查局还是我国矿产资源统计信息汇编,由于统计标准的不一致,以及数据来源的不同,基础地质数据往往差异很大。获得高精度高准确率的储量和资源量数据往往需要耗费巨大的人力和时间成本。以铟为例,只在美国地质调查局公布的每年储量数据中,往往都存在着10%左右的变动。基础地质数据的获取是提升可供性测度精度的重要前提,如何获取可靠的数据,并对数据的可靠性进行评价是可供性测度研究亟待突破的重要难点。

第二,不确定性是战略性关键矿产可供性测度的重点。由于战略性关键矿产的地质成矿复杂性,以及市场因素影响的不可度量性,战略性关键矿产可供性测度充满了不确定性。“伴、精、细”的地质特征往往会对关键矿产开发利用产生不确定性的成本变动,不同的成矿类型、不同矿种、不同的空间成矿带、不同的探明程度等等也对关键矿产可供价格影响机制不同^[55]。由于战略性关键矿产资源属性的多样性,以至于传统可供性方法只能测度有限的矿山和矿种。同时,战略性关键矿产更易受到地缘政治等国际因素的影响,地缘政治等国际因素在战略性关键矿产可供性度量上往往很难进行定量描述,也很难获取相关的定量数据,定量度量也存在较大的主观性和不确定性。

第三,关键矿产市场价格与可供价格间的关联性更加复杂。传统的可供性测度是以市场价格与可供价格之间的大小来进行判别,战略性关键矿产市场价格波动性较小,定价机制往往存在着政府操控。由于市场交易规模较小,往往市场价格不具有很强的“市场”特征。因此,战略性关键矿产可供性不能仅仅比较可供价格与市场价格的大小,同时也要考虑市场价格的作用机制。传统的 Hotelling 模型对于可供价格的假定往往未考虑矿产资源储量的变化,关键矿产由于其总量较小,储量变动对其可供价格如何作用也有待进一步在理论上进行阐释。随着开发利用强度的逐渐增强,品位降低、深部资源开发等因素对于可供价格的作用机制也需要进一步的探究^[56]。

第四,可供性内涵的有待进一步延伸。传统的可供性往往是指一次资源的可供性,战略性关键矿产由于其相对稀缺性,循环利用往往是其可持续供应的重要手段。传统的可供性测度模型中,无论是 Hubbert 模型还是 Hotelling 模型,两者均未对循环利用进行设定,往往均是假定资源最终是

可耗竭的。事实上，循环利用是当前提升关键矿产资源利用效率的重要途径。部分关键金属的循环利用程度也在逐年提升，循环利用如何影响关键矿产的可供性也需要进一步在理论上创新研究。

第五，环境政策如何约束战略性关键矿产的可供性。我国自从实施生态红线以来，部分战略性关键矿产成矿带与自然保护区生态红线重叠。环境规制政策的出台一定程度上影响了战略性关键矿产的可供性，但是其背后的作用机制仍然需要进一步解释。环境政策的约束到底是影响可供价格还是市场价格，价格机制评判标准在此领域无法进一步得到应用，亟待建立新的评价标准和方法。

四、研究展望

伴随着全球碳中和议程，战略性关键矿产已经成为世界各国产业革命和技术革命的重要原材料。以锂、钴、稀土、铟等为代表的战略性关键矿产在产业演进过程中扮演着关键角色，战略性关键矿产可持续供应是当前和未来一个时期世界各国面临的重要国家安全问题。本文概括归纳了矿产资源可供性评价方法的研究现状，结合战略性关键矿产的主要特征，从“地质—技术—经济—环境—突发事件”五个维度出发，总结归纳了战略性关键矿产可供性的难点和重点。传统的可供性评价方法是以矿山数据为基础，采用财务模型以及地质类比法，对特定国家或区域进行可供性评价^[57]。传统的评价方法对于矿山数据具有高度的依赖性，需要采集研究区域的每一个矿山的相关数据，评价成本极高且效率较低^{[58][59]}。现有的可供性评价方法极度依赖矿山数据的可靠性及完整性，但是由于获取矿山数据的需要耗费极高成本，如何从少数样本中推算出全国乃至全球的矿产资源可供性具有重要的现实意义。因此，综合现有研究的难点以及战略性关键矿产的主要特点，未来矿产资源可供性研究中应当聚焦在以下几个方面：

第一，建立战略性关键矿产基础信息统计标准。基础地质信息数据是可供性测度的基础，无论是美国地质调查局还是我国自然资源部信息中心的基础地质信息数据，在进行统计时往往没有相关确定性标准。2006年，CRIRSCO（Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards）制定了第一套国际矿产资源储量管理标准，但是该标准在各成员国实施过程中仍然存在一定难度。无论是美国、欧盟等西方发达国家，还是我国，在进行信息统计时均存在一定的时间滞后性和空间异质性。战略性关键矿产中的部分矿产，由于其属于伴生性矿产，在统计上往往存在较大误差。建立统一标准，提高基础信息的准确度是进行可供性测度的重要前提。

第二，创新战略性关键矿产可供性评价的方法论体系。战略性关键矿产中有较多的伴生性矿产。伴生性矿产由于其独特的地质特征，不具有单独开发的经济价值，往往无法直接评价其可供性。但是，由于其伴生于主矿产，其可供性评价的影响因素及测算指标与主矿产具有高度关联性。目前关于国内矿产资源的数据，尤其是伴生性关键矿产，并不是很容易获得，自然资源部信息中心能够统计收集到数据质量参差不齐，且收集的数据完整性较差。同时，对于可供性评价相关变量和指标进行标注也存在一定的难度^[60]。在传统的评价方法上，结合现有机器学习、区块链等数字技术，创新战略性关键矿产可供性评价方法是未来研究的重要方向。

第三，一次资源与二次资源可供性的关系。共伴生是战略性关键矿产的主要地质特征，循环利用是当前世界各国提升资源利用效率保障资源安全的重要手段。传统的可供性测度主要是针对一次资源的评价，循环利用对矿产资源可供性有极大的影响。循环利用对于资源有限性的假定有一定程度上的容忍度。同时，二次资源成本相对一次资源较低，从可供性视角属于优先开采资源。未来的研究中，应当加大研究二次资源与一次资源在可供性系统中的相互作用机制，尤其是二次资源对于一次资源可供性的影响。

参考文献

- [1] Bleischwitz, R. Mineral resources in the age of climate adaptation and resilience[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2020(2).
- [2] 马丽梅, 史丹, 裴庆冰. 国家能源低碳转型与可再生能源发展: 限制因素、供给特征与成本竞争力比较[J]. *经济社会体制比较*, 2018(5).
- [3] 谢伏瞻. 论新工业革命加速拓展与全球治理变革方向[J]. *经济研究*, 2019(7).
- [4] 中国社会科学院工业经济研究所课题组. “十四五”时期中国工业发展战略研究[J]. *中国工业经济*, 2020(2).
- [5] 李鹏飞, 杨丹辉, 渠慎宁, 等. 稀有矿产资源的全球供应风险分析——基于战略性新兴产业发展的视角[J]. *世界经济研究*, 2015(2).
- [6] 王昶, 耿红军, 宋慧玲, 等. 智能制造关键新材料创新突破的研究框架与主要议题[J]. *资源科学*, 2019(1).
- [7] 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(2).
- [8] 徐德义, 朱永光. 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*, 2020(4).
- [9] Nassar, N. T., J. Brainard, A. Gulley, et al. Evaluating the mineral commodity supply risk of the U. S. manufacturing sector[J]. *Science Advances*, 2020(8).
- [10] Ali, S. H., D. Giurco, N. Arndt, et al. Mineral supply for sustainable development requires resource governance[J]. *Nature*, 2017(7645).
- [11] National Research Council of the National Academies. *Minerals, Critical Minerals, and the U. S. Economy* [M]. Washington, D. C.: The National Academies Press, 2008.
- [12] Sovacool, B. K., S. H. Ali, M. Bazilian, et al. Sustainable minerals and metals for a low-carbon future[J]. *Science*, 2020(6473).
- [13] Lee, J., M. Bazilian, B. K. Sovacool, et al. Reviewing the material and metal security of low-carbon energy transitions[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 124.
- [14] Vakulchuk, R., I. Overland, D. Scholten. Renewable energy and geopolitics: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 122.
- [15] Zhu, Y. G., S. H. Ali, D. Y. Xu, et al. Mineral supply challenges during the COVID-19 pandemic suggest need for international supply security mechanism[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 165.
- [16] 陈甲斌, 霍文敏, 冯丹丹, 等. 中国与美欧战略性(关键)矿产资源形势分析[J]. *中国国土资源经济*, 2020(8).
- [17] Guan, D. B., D. P. Wang, S. Hallegatte, et al. Global supply-chain effects of COVID-19 control measures[J]. *Nature Human Behavior*, 2020(6).
- [18] Fortier, S. M., N. T. Nassar, G. W. Lederer, 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]. Reston, VA: U. S. Geological Survey, 2018.
- [19] 曹庭语. 日本稀有金属保障战略[J]. *国土资源情报*, 2011(4).
- [20] Graedel, T. E., E. M. Harper, N. T. Nassar, et al. Criticality of metals and metalloids[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015(14).
- [21] 自然资源部. 全国矿产资源规划(2016—2020) [R]. 北京: 自然资源部, 2016.
- [22] Hayes, S. M., E. A. McCullough. Critical minerals: A review of elemental trends in comprehensive criticality studies[J]. *Resources Policy*, 2018, 59.
- [23] Graedel, T. E., R. Barr, C. Chandler, et al. Methodology of metal criticality determination[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012(2).
- [24] Tilton, J. E., B. J. Skinner. The meaning of resources[A]. McLaren, D. J., B. J. Skinner. *Resources and World Development* [C]. New York: Wiley, 1987.

- [25] Tilton, J. E. *On Borrowed Time ? Assessing the Threat of Mineral Depletion* [M]. Resources for the Future, 2003.
- [26] Yaksic, A. , J. E. Tilton. Using the cumulative availability curve to assess the threat of mineral depletion; The case of lithium[J]. *Resources Policy*, 2009(4).
- [27] 李裕伟. 矿产资源可供性分析的原理与方法[J]. 中国国土资源经济, 2015(28).
- [28] Hotelling, H. The economics of exhaustible resources[J]. *Journal of Political Economy*, 1931(2).
- [29] Hubbert, M. K. Energy from fossil fuels[J]. *Science*, 1949(2823).
- [30] Chakravorty, U. , D. Krulce, J. Roumasset. Specialization and non-renewable resources: Ricardo meets Ricardo[J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2005(9).
- [31] 徐曙光, 陈丽萍, 王威. 铁矿可供性分析模型的构建与思考[J]. 国土资源情报, 2009(5).
- [32] 鹿爱莉, 孙志伟, 张华. 我国铜矿资源可供性分析[J]. 资源与产业, 2010(1).
- [33] 王安建, 王高尚, 李建武, 等. 中国矿产资源保障程度论证报告[R]. 北京: 自然资源部, 2008.
- [34] Al-Jarri, A. S. , R. A. Startzman. US oil production and energy consumption: A Hubbert modeling approach to forecast long-term trends in various components of US energy consumption with an emphasis on domestic oil production[J]. *Advances in the Economics of Energy and Resources*, 1999, 11.
- [35] Wang, J. Z. , H. Y. Jiang, Q. P. Zhou, et al. China's natural gas production and consumption analysis based on the multicycle Hubbert model and rolling grey model[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53.
- [36] Valero, A. , A. Valero. Physical geonomics: Combining the exergy and Hubbert peak analysis for predicting mineral resources depletion[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010(12).
- [37] Scholz, R. W. , F. W. Wellmer. Approaching a dynamic view on the availability of mineral resources; What we may learn from the case of phosphorus ? [J]. *Global Environmental Change*, 2013(1).
- [38] Xu, D. Y. , Y. G. Zhu. A Copula-Hubbert model for co(by)-product minerals[J]. *Natural Resources Research*, 2020(5).
- [39] Mudd, G. M. , S. M. Jowitt, T. T. Werner. 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.
- [40] Zhu, Y. G. , D. Y. Xu, S. H. Ali, et al. A hybrid assessment model for mineral resource availability potentials [J]. *Resources Policy*, 2021, 74.
- [41] Blackwood, L. G. The lognormal distribution, environmental data, and radiological monitoring[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1992(3).
- [42] Limpert, E. , W. A. Stahel, M. Abbt. Lognormal distributions across the sciences: Keys and clues[J]. *BioScience*, 2001(5).
- [43] Ahrens, L. H. A fundamental law of geochemistry[J]. *Nature*, 1953(4390).
- [44] Ahrens, L. H. The lognormal distribution of the elements[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1954(2).
- [45] Acemoglu, D. Directed technical change[J]. *The Review of Economic Studies*, 2002(4).
- [46] Northey, S. A. , S. Mohr, G. M. Mudd, et al. Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, 83.
- [47] West, J. Decreasing metal ore grades[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2011(2).
- [48] Vieira, M. D. M. , M. J. Goedkoop, P. Storm, et al. Ore grade decrease as life cycle impact indicator for metal scarcity: The case of copper[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012(23).
- [49] Tilton, J. E. Long-term trends in copper prices[J]. *Mining Engineering*, 2002(7).
- [50] Henckens, M. L. C. M. , E. C. Van Ierland, P. P. J. Driessen, et al. Mineral resources: Geological scarcity, market price trends, and future generations[J]. *Resources Policy*, 2016, 49.

- [51] Reynolds, D. B. The mineral economy: How prices and costs can falsely signal decreasing scarcity[J]. *Ecological Economics*, 1999(1).
- [52] Tilton, J. E., J. I. Guzman. *Mineral Economics and Policy*[M]. Washington D. C. : RFF Press, 2016.
- [53] Northey, S. A., G. M. Mudd, T. T. Werner. Unresolved complexity in assessments of mineral resource depletion and availability[J]. *Natural Resources Research*, 2018(2).
- [54] 杨丹辉, 渠慎宁, 李鹏飞. 稀有矿产资源开发利用的环境影响分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014(11).
- [55] Dominy, S. C., A. N. Maek, E. A. Alwyn. Errors and uncertainty in mineral resource and ore reserve estimation: The importance of getting it right[J]. *GeoScience World*, 2002(1-4).
- [56] Fairhurst, C. Some challenges of deep mining[J]. *Engineering*, 2017(4).
- [57] 王安建, 肖克炎, 王全明. 国土资源评价若干构想——以矿产资源评价为例[J]. *中国地质*, 1999(6).
- [58] 徐曙光, 陈丽萍, 王威. 铁矿可供性分析模型的构建与思考[J]. *国土资源情报*, 2009(5).
- [59] 鹿爱莉, 孙志伟, 张华. 我国铜矿资源可供性分析[J]. *资源与产业*, 2010(1).
- [60] Prior, T., D. Giurco, G. M. Mudd, et al. Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management[J]. *Global Environmental Change*, 2012(3).

Research Status and Prospect of Strategic Critical Minerals Availability Evaluation Methods

CHENG Jin-hua, ZHU Yong-guang, XU De-yi, FENG Yin

Abstract: Strategic critical minerals, which play an important role in the energy transition, are important raw materials contested by major economies in the process of carbon neutralization. Ensuring the sustainable supply of strategic critical minerals is an important issue for China's resource security at present. Traditional evaluation methods of mineral resources availability are mainly divided into the micro-scale financial model, geological analogy method, and macro-scale Hubbert model, which are subjective and dependent on and sensitive to data. In practice, the above methods have the shortcomings of high cost of data acquisition and low accuracy of evaluation results, thus resulting in poor applicability. Compared with traditional bulk minerals, typical critical mineral resources such as rare earth and cobalt present geological characteristics of being fine and companioned, so there is an urgent need to innovate availability evaluation methods. First, this paper divides the availability evaluation of strategic critical minerals into three parts: market mechanism, physical mechanism, and exogenous mechanism from the five dimensions of geology, technology, economy, environment, and emergency. The key points of strategic critical mineral availability evaluation are then explained based on the division. Second, the paper analyzes the difficulties in practicing strategic critical mineral availability evaluation. Finally, the paper looks forward to the future research topics in the field of strategic critical mineral availability evaluation.

Key words: strategic critical minerals; mineral resource availability; market mechanism

(责任编辑 孙 洁)