

中国战略性关键矿产目录厘定

李建武^{1,2)}, 李天骄^{1,2)}, 贾宏翔^{1,2)}, 王安建^{1)*}

1) 中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心, 北京 100037;

2) 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

摘 要: 关键矿产目录是各国制定国家资源安全战略和全球资源竞争策略的基础。我国是全球最大资源消费国、生产国和贸易国, 满足新时期自然资源综合管理、确保我国能源资源安全, 亟待建立一份符合中国国情和新时期国际形势的中国战略性关键矿产目录。本文根据我国所处发展阶段以及矿产资源的储量、生产、消费和贸易特征, 提出了“战略性关键矿产”的概念, 将其定义为对国家经济和国防安全至关重要、同时或者存在较大供应风险、或者对全球具有较强控制力、或对战略新兴产业发展不可或缺的矿产资源, 并据此构建了定量为主结合定性分析的评价筛选模型, 筛选出了包括 21 种短缺矿产和 10 种优势矿产在内的 31 种战略性关键矿产, 建立了我国的战略性关键矿产目录。

关键词: 战略性关键矿产; 评价方法; 目录

中图分类号: F426.1 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.112801

Determination of China's Strategic and Critical Minerals List

LI Jian-wu^{1,2)}, LI Tian-jiao^{1,2)}, JIA Hong-xiang^{1,2)}, WANG An-jian^{1)*}

1) Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: The list of critical minerals forms the basis for countries to formulate national mineral resource security strategies and global mineral resources competition strategies. China is the largest mineral resource consumer, producer, and trading country in the world. To meet the requirements of integrated mineral resources management in the new era and ensure the security of China's mineral resources, it is necessary to establish a list of China's strategic and critical minerals in line with the country's national conditions and the international situation in the new era. According to the development stage of our country and the characteristics of mineral reserves, production, consumption, and trade of mineral resources, this study proposes the concept of "strategic and critical minerals", which is defined as mineral resources that are critical to national economy, defense, and security, or have greater supply risks, strong control over the world, or are indispensable to the development of strategic emerging industries. Accordingly, an assessment and screening model combining quantitative analysis with qualitative analysis was constructed, and 31 strategic and critical minerals, namely 21 shortage minerals and 10 dominant minerals, were screened, and a list of strategic and critical minerals in China was established.

Key words: strategic and critical minerals; assessment method; list

本文由国家自然科学基金重大研究计划集成项目“中国关键金属矿产清单厘定与风险评估”(编号: 92162321)、国家自然科学基金基础科学中心项目“数字经济时代的资源环境管理理论与应用”(编号: 72088101)和国家自然科学基金重大项目“新时代战略性关键矿产资源安全与管理”(编号: 71991480)及其课题 5 “新时代中国战略性关键矿产资源全球治理体系研究”(编号: 71991485)联合资助。

收稿日期: 2022-10-06; 改回日期: 2022-11-24; 网络首发日期: 2022-11-28。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 李建武, 男, 1967 年生。博士, 研究员。主要从事矿产资源战略方面的研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: jwli67@126.com。

*通讯作者: 王安建, 男, 1953 年生。博士, 教授。主要从事矿产资源战略方面的研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: ajwang@cags.ac.cn。

第四次工业革命催生全球新一轮产业竞争,矿产资源国际竞争日趋激烈,已成为大国博弈的焦点(王安建等, 2019),其核心是争夺地球资源及其控制权(翟明国和胡波, 2021),尤其是关键矿产。新世纪以来,“关键矿产”(Critical Mineral)一词高频出现在许多西方国家政府和智库报告中,美国、英国、欧盟、日本、加拿大和澳大利亚等国家或地区相继公布并不断更新各自的关键矿产目录(NRC, 2008; EC, 2010, 2011, 2014, 2017, 2020; BGS, 2011, 2012, 2015; Hatayama and Tahara, 2015; NSTC, 2016; Nassar and Fortier, 2021; DISER, 2022)。关键矿产目录已成为主要经济体制定矿产资源国际竞争和国内发展战略的重要依据,对关键矿产的研究已上升到国家战略层面(翟明国等, 2019)。美国能源部、内政部、国防部、商务部和白宫预算办公室等部门多次涉及关键矿产相关战略和政策,在不足六年的时间里,特朗普和拜登 4 次签发总统令,强化关键矿产及其全球供应链和产业链安全问题,可见关键矿产的意义非同小可(王安建和袁小晶, 2022)。

我国是矿产资源消费大国,同时也是全球矿产资源大国、生产大国和供应大国,正处于工业化后期向后工业化发展的特殊阶段,传统产业叠加战略新兴产业的快速崛起使得我国处于大宗矿产资源消费高位运行、新兴矿产需求激增、多数矿产资源消费量位居世界第一,预计 2035 年前将有 38 种矿产资源处于增长态势(文博杰等, 2019)。受资源禀赋影响,我国矿产资源优势与劣势并存。短缺矿产供应严重不足,面临巨大供应缺口,高度依赖进口,存在一定的供应风险;优势矿产供应充足,但尚未形成资源竞争优势,市场控制力较弱。因此,2016 年我国提出的包括 24 种矿产资源在内的战略性矿产目录无法满足我国新时期自然资源综合管理和确保我国供应链、产业链安全的需求,亟待依据我国国情和新时期国际形势的不确定性,识别出部分重要矿产资源作为国家制定资源政策、进行宏观管理的重点关注对象,以便政府将管理资源集中于最需关注的矿产,进一步提高国家资源安全保障水平和参与全球资源治理的能力。

目前,国际主要经济体和学者对关键矿产没有形成统一、严格的定义,大都根据本国资源特点、产业结构、供需形势、贸易特征等给出不同的概念,通常是指既具有经济重要性,同时又存在较高的供应风险的矿产(全球矿产资源战略研究中心, 2006; 唐金荣等, 2014)。与之相比,由于我国“关键矿产”研究起步较晚(王登红, 2019),学术界对“关键矿产”的概念、内涵等方面的认识和研究不统一,研究内容过于分散、局部,现有研究以跟踪国外为主。如

前所述,我国正处于特殊的发展阶段,矿产资源开发利用的优势与劣势并存,亟需给出我国战略性关键矿产的定义。由于我国拥有在全球具有重要影响的优势矿产和以此为基础建立起的庞大矿产资源产业,不仅要关注短缺矿产的安全供应问题,也要关注优势矿产的产业健康发展和全球市场调控问题。

近年来,围绕关键矿产的学术研究快速增长(Gulley et al., 2018; Hayes and McCullough, 2018; 刘文浩等, 2021),关键矿产目录厘定的评价方法和指标体系日趋丰富。世界主要经济体和相关机构在关键矿产的研究方面主要围绕着矿产资源的关键性展开,大多数研究主要从供应风险和经济重要性两个方面及逆行评估(全球矿产资源战略研究中心, 2006, 2016; 唐金荣等, 2014)。在关键矿产目录的研究评价方式上可大致划分为定性研究(李建武等, 2018; 汪灵, 2019; 王春连等, 2022)、半定量研究(Galos et al., 2021; 姜雅等, 2021; DISER, 2022)和定量研究(BGS, 2015; 郭娟等, 2021; Nassar and Fortier, 2021),其中定量研究又可以细分为二维矩阵评价(Hatayama and Tahara, 2015; EC, 2017, 2020)和三维矩阵评价(Graedel et al., 2012, 2015; Calvo et al., 2017; Yan et al., 2021)。在评价指标体系的构建上主要围绕供应风险和重要性两个主要因素展开,环境影响和资源稀缺程度也是常见的评价指标。以往研究成果为我国战略性关键矿产评价提供了方法依据。

本文首先界定了我国战略性关键矿产概念,并建立了一套我国战略性关键性矿产评价的方法体系,通过构建定量为主、定性为辅的评价模型厘定出一份中国战略性关键矿产目录,以期为我国矿产资源战略的制定和学术界后续开展战略性关键矿产研究工作提供依据和方向。

1 战略性关键矿产概念的界定

在我国,“战略性矿产”、“关键矿产”的概念使用极为广泛,但却缺少一个明确的、被大家普遍接受的定义。即便专业人员和学者在使用这一名词时所表达的含义也不尽相同,非专业人员和媒体在应用这一概念时所表达的含义更是千差万别。近年一些与之相关的名词和概念如“战略性新兴矿产”、“新兴战略性矿产”和“关键矿产”、“危机矿产”等的出现与大量使用,其内涵和外延交叉重叠,进一步加剧了概念上的混乱。因此,理清和明确概念尤为必要。

“关键矿产”一词来源于 20 世纪 30 年代后期美国《战略和关键材料储备法》,该法案是最早提出有关战略性和关键性原料的文件之一,将矿物原

材料与国家安全问题联系起来(US Public Laws, 1939; Schulz et al., 2017; Hayes and McCullough, 2018)。随后, 美国国家科学委员会将关键矿产延伸到易受供应风险影响的非能源矿物(NRC, 2008)。与此同时, 欧盟委员会考虑到欧盟国家对高科技金属的进口依赖程度, 发起“原材料倡议”(EC, 2008), 提出关键矿产概念, 即当一种矿物原材料存在供应短缺风险及对经济的影响高于大多数其他原材料时, 可被界定为关键矿产(EC, 2010)。2017年12月, 美国总统特朗普发布了13817号行政命令, 并要求发布关键矿产清单, 将关键矿产界定为3个层次, 分别为: ①对美国经济和国家安全至关重要的非燃料矿物或矿物原材料; ②其供应链容易中断(包括与外国政治风险、需求突然增长、军事冲突、暴力动乱、保护主义行为以及供应链中其他风险相关的约束); ③在产品制造(包括能源技术、国防、货币、农业、消费电子、医疗等)中起着重要作用, 如果缺少这些材料, 将对美国的经济或国家安全产生重大影响(Nassar et al., 2020; Nassar and Fortier, 2021)。由于矿产资源本身的稀缺性特征以及在开发利用过程中会产生一定的环境问题, 部分学者也将环境影响、资源稀缺性等要素(Graedel et al., 2012, 2015; Calvo et al., 2017; Yan et al., 2021)纳入到关键矿产的概念界定中。

我国学者使用最多的是“战略性矿产”这一概念, 其定义主要有以下4个方面内涵: ①对经济社会发展必不可少、且存在一定供应风险的矿产或经济意义极其重大的矿产; ②国防军工领域不可替代的关键性矿产; ③影响国家经济发展的短缺矿产和我国资源储量丰富的优势矿产; ④战略新兴产业不可或缺的重要矿产。陈毓川(2002)认为战略性矿产资源是指对国家经济、社会发展、国防安全必不可少, 而国内不能保障的矿产资源及可影响国际市场的矿产资源。齐亚彬(2002)认为战略性矿产是指一定时期内对国防和经济社会发展具有重要影响或起到关键作用的矿产资源, 且存在一定供应风险或具有战略优势的矿产资源。王晓东(2005)认为战略性矿产是那些国防和经济建设必需的、国内供应无法满足需求并且国外供应脆弱、达到了急缺危险点或者国防和经济建设必需的、国内丰富、资源的控制权由我国掌握的矿产。中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心(2006)在我国矿产资源储备研究中, 结合我国矿产资源特点及资源市场的实际情况, 认为在经济社会发展中具有重要作用的矿产以及主要以伴生矿产形式产出的重要稀有、稀散金属矿产等当属战略性矿产并进行储备。胡存智(2009)将战略

性矿产定义为对国民经济和国防安全至关重要的, 由于受资源短缺或技术能力制约, 国内供应不能满足的、或发生供应中断、市场震荡时对重要产业和国防安全产生巨大影响的, 以及对世界市场具有调控能力的矿产资源。张新安和张迎新(2011)将“三稀”金属等地球上存量稀少, 因技术和经济因素提取困难, 现代工业以及未来伴随着技术革命所形成的新兴战略产业所必须的矿产资源界定为战略新兴矿产。李宪海等(2014)将一定时期内对我国国民经济安全和国防安全具有重大影响的矿产资源定义为战略性矿产。李建武等(2018)认为战略性关键矿产是指我国经济、高新技术和高端制造业发展至关重要、或者具有较高供应风险、或者对全球供应具有一定控制力的一类矿产资源, 并根据中国在全球供应和消费市场的地位, 将战略性矿产资源分为优势和短缺两类, 建立了一系列定量评价、筛选指标体系和模型, 厘定出共21个矿种的我国战略性关键矿产目录, 并对这些矿产的全球竞争格局进行了概略分析。王登红(2019)认为关键矿产是人类社会发展到关键阶段、在关键场合发挥关键性作用的矿产资源, 并提出根据我国战略性新兴产业发展的需要和国内外发展趋势, 将年需求量不超过20万t而应用领域十分广泛的稀有金属、稀土金属、稀散金属、稀贵金属、关键性的黑色和有色金属以及稀有气体、铀、部分非金属矿产资源归属于关键矿产。汪灵(2019)将影响或制约一个国家经济发展的紧缺矿种或者优势矿种认定为关键矿产。王安建和袁小晶(2022)认为战略性关键矿产是对国家经济发展至关重要、对战略新兴产业不可或缺, 同时又被赋予地缘政治色彩的一类矿产资源。

鉴于国内战略性矿产概念的多样、不统一, 同时为避免与西方普遍使用的“关键矿产”概念发生混淆, 本研究在王安建和袁小晶(2022)提出的“战略性关键矿产”概念的基础上, 进一步将其定义为“对国家经济发展和国防安全至关重要, 同时在供应方面或者存在较大风险, 或者可对全球具有较强控制力或对战略新兴产业发展不可或缺的矿产资源”。在这一定义中, 战略性矿产被界定为对国家经济发展和国防安全至关重要的矿产, 具有更为宽泛的外延, 而战略性关键矿产则是其中一部分(图1)。

2 中国战略性关键矿产评价

2.1 中国战略性关键矿产评价方法体系

根据定义, 战略性关键矿产包括短缺矿产和优势矿产两类, 分别采用不同的模型进行量化分析。同时, 考虑到量化模型的局限性, 设置战略新兴产



图1 战略性关键矿产涵盖范围示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the coverage of strategic and critical minerals

业的不可或缺性这一定性评价方法，建立了定量、定性分析相结合的评价筛选方法(图2)。

首先，根据每个评价对象的国内供应与需求形势，将其分为短缺矿产和优势矿产两类，并将这两类矿产同时进行战略新兴产业不可或缺性研判；其次，针对短缺和优势两类矿产资源运用不同的量化模型分别进行评价，将参与评价的所有矿产资源筛选出战略性关键矿产和未入选矿种；再次，将未入选的矿产资源进行更为细致的战略新兴产业不可或缺性分析，把定量模型淘汰出的矿种补充进战略性关键目录之中；最后，将上述筛选结果合并，获得我国战略性关键矿产目录。

由于战略新兴产业不可或缺性属于定性分析，本文着重介绍我国短缺战略性关键矿产和优势战略性关键矿产两类评价模型。

2.2 短缺战略性关键矿产评价

短缺战略性关键矿产是指对我国经济发展和国防安全至关重要，同时由于我国资源禀赋欠佳导致严重依赖国外资源供应，存在较大风险的矿产资源，这类战略性关键矿产目录的评价方法主要依据经济重要性和供应风险两个指标，通过构建二维矩阵筛选出短缺战略性关键矿产。

2.2.1 经济重要性评价模型

矿产资源是国家经济发展的物质基础，其重要性毋庸置疑。但不同种类的资源在国家经济中的作用不同，其重要性存在差异。如何判断不同资源重要性的高低，是资源重要性定量评价的核心问题。解决这一问题的关键，是确定经济重要性的含义及度量标准。

对矿产资源重要性的界定有多种不同观点，主要包括：①应用的广泛性，即某种矿产资源的应用范围越广泛，其经济重要性越高；②消费量及其价值规模，即某种资源的消费量越大，其总价值(价格与消费量之乘积)越高，则其重要性更高；③资源的不可替代性，即某种资源由于具有某种特殊物理化学性质，使其在某些应用领域无法被替代，则这种

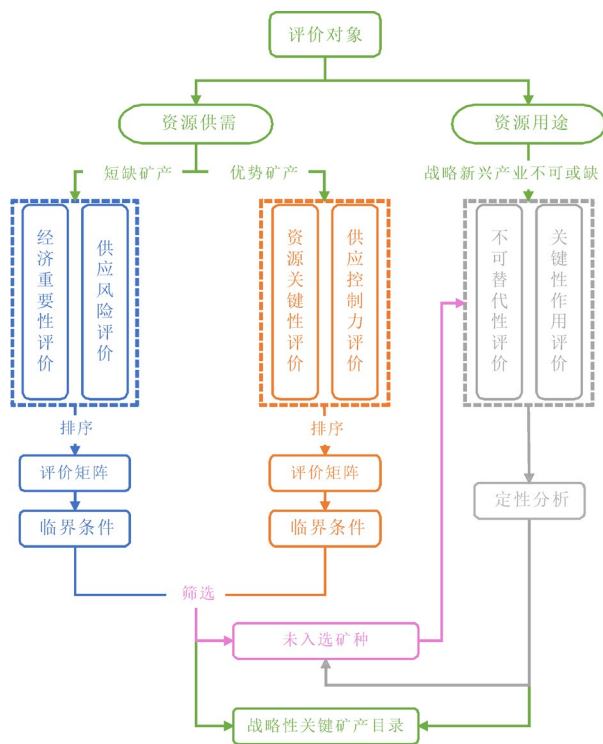


图2 战略性关键矿产评价方法体系

Fig. 2 Assessment method system of strategic and critical minerals

资源会被认为非常重要。

本文认为，矿产资源是物质生产的原料和能量来源，其意义在于支撑和保障下游产业的发展。从这一角度考虑，矿产资源对于经济发展的重要性应由其支撑和保障的下游产业(主要是制造业)的价值来衡量，而不是由该种资源本身的消费数量和价值来决定。因此，本文认为影响资源经济重要性首要因素为应用该资源的相关制造业的价值，即该资源所支撑的产业的价值。换言之，如果某种资源出现供应短缺或中断，所影响到的产业的价值。

影响资源经济重要性的另一个因素是资源在不同应用领域的消费占比。如果某种资源消费量的80%都应用于高价值产业，显然比另一种只有10%的消费量应用于高价值产业的资源具有更高的经济重要性。此外，资源的可替代性也是影响资源经济重要性评价的重要因素。例如，在某一产业中，如果某种资源不可替代，其供应短缺或中断将会对该产业造成重要影响；反之，如果该种资源很容易被替代，其供应短缺或中断对产业影响极小，重要性则大为降低。因此，可替代性应是重要性评价中的一个重要指标。

基于上述分析，本文利用矿产资源的消费结构、支撑产业的产值及其可替代性3个指标构建短缺战略性关键矿产经济重要性评价模型，详见公式(1)。通常，某种资源应用于多个产业，其所支撑的产业价值(通常用行业增加值来衡量)可用这些产业

的加权平均值来衡量, 权重为该产业在资源消费中的占比。由于我国的统计数据中仅有各行业的产值数据, 缺少行业增加值数据, 在此我们用产值代替增加值, 用以衡量产业的价值。

$$EI = \sum_s (C_s \times PV_s \times SUB_s) \tag{1}$$

式中: EI 代表经济重要性; C_s 为该矿种在 S 行业中的消费占比; PV_s 为 S 行业的产值; SUB_s 为该矿种在 S 行业中的可替代性。

资源的可替代性受应用领域、替代品技术指标、成本、供应保障程度等多方面影响, 度量难度极大, 因此本次研究未将其纳入评价模型, 本文实际使用的模型为:

$$EI = \sum_s (C_s \times PV_s) \tag{2}$$

2.2.2 供应风险评价模型

供应风险用于衡量资源供应不足或中断的可能性, 本文供应风险是指因供应方出现政治、经济、社会等问题而导致某种矿产资源供应不足或供应中断, 导致消费国对资源的需求无法在合理或可承受的价格范围内得到满足的可能性。特别需要说明的是, 本文供应风险不包括因战争而引起的禁运、运输通道中断等原因造成的供应中断。

分析风险来源、建立风险评价指标体系是构建供应风险评价模型的前提。为保障评价指标体系的系统性、完整性和逻辑性, 本文采用了全生命周期法, 将矿产资源从处于地下资源到制成品、再到产品报废形成二次资源回收的整个生命周期分为矿产资源、矿产品、原料、材料、零部件、产品、废旧产品回收利用等阶段, 分析每一阶段的风险来源, 各环节供应风险的影响因素见表 1。

供应风险评价指标体系的建立以风险因素识别为基础, 但并非所有风险因素都可纳入评价指标体系, 需要对其进行分析和选择。本文最终确定的供应风险评价指标体系包括供应集中度、生产国稳定程度、对外依存度、伴生产品供应占比、二次资源供应占比、生产环境影响指数、消费环境影响指

表 1 矿产资源供应风险影响因素
Table 1 Factors affecting the supply risk of mineral resources

生命周期环节	供应风险影响因素
地下资源	主要资源国政治、经济和社会稳定程度;
	资源分布集中程度;
	资源丰富程度;
矿产品	双边关系
	矿山生产集中度;
	生产国政治和社会稳定程度;
	矿产品对外依存度;
	矿产品进口集中度;
	总产量中伴生产品产量所占比例;
原料	矿山生产对环境影响程度;
	双边关系
	全球原料生产集中度;
	主要生产国政治、经济和社会稳定程度;
	原料产量中伴生产品所占比例;
	原料对外依存度;
材料	原料进口集中度;
	原料生产中二次资源占比;
	原料生产环境影响程度;
	双边关系
零部件和最 终产品	资源消费对环境的影响;
	资源可替代性(技术、成本、替代品供应风险);
	双边关系
	最终产品的社会蓄积量;
	最终产品的使用年限;
	资源回收利用的技术可行性;
	资源回收利用的经济合理性;
	双边关系

数、可替代性、双边关系等 9 个评价指标(表 2)。

基于评价指标, 供应风险的评价模型为以下公式:

$$SR=(CR \times ST \times RC) \times IR \times (1-EOL_{RIR}) \times CF \times EV_P \times (1-EV_C) \times SUB \tag{3}$$

在实际应用中, 供应集中度(CR)以赫芬达尔—赫希曼指数(Herfindahl-Hirschman Index, HHI)度量, 并用生产国国家稳定程度(在此用世界治理指数 WGI 来衡量)来修正, 组成一个复合指标(HHI_{WGI}), 以便更好地反映“供应集中于不稳定国家”这一主

表 2 供应风险评价指标
Table 2 Supply risk assessment indicators

评价指标	指标代码	指标说明	支撑指标
供应集中度	CR	全球国家层面生产集中度	全部生产国产量
生产国稳定程度	ST	生产国政治、经济和社会稳定程度	全部生产国稳定程度指数
对外依存度	IR	净进口量占消费量比例	净进口量、消费量
伴生产品供应占比	CF	伴生产品产量占总产量比例	直接获取
二次资源供应占比	EOL_{RIR}	旧废料社会回收量占总产量比例	直接获取
生产环境影响指数	EV_P	资源生产对环境影响程度	
消费环境影响指数	EV_C	资源消费对环境影响程度	
可替代性	SUB	资源消费阶段可被替代程度	在各应用领域可替代的技术可行性、经济性以及替代品的供应风险
双边关系	RC	资源生产国与我国关系程度	

要风险来源。

与前人学者研究不同,由于近年来国际局势趋于动荡,大国竞争日趋激烈,本次研究首次引入了双边关系(RC)这一指标,用于量化其他国家对我国海外矿产资源供应造成潜在的威胁程度,利用该指标来修正世界治理指数(WGI)。也就是说,即便生产国国家稳定程度很高,但与我国双边关系较差,那么仍然会对我国获取海外矿产资源带来一定程度的供应风险。双边关系是指我国与资源生产国之间的关系程度,将资源生产国与我国的双边关系分为三个层次,分别为优、良、差。其中,双边关系优是指与我国贸易往来密切,支持我国政策,与我国经济社会发展理念较为接近的国家;良是指与我国贸易往来较为密切,支持我国政策但与视我国为竞争对手的国家合作密切的国家;差是指该国官方已承认将我国视为竞争者的国家,并且已经采取了一系列措施的国家。

由于生产环境影响指数(EV_P)、消费环境影响指数(EV_C)和可替代性(SUB)三个指标数据可得性等原因,目前无法使用,因此实际使用的模型为:

$$SR = HHI_{WGI-RC} \times IR \times (1 - EOL_{RIR}) \times CF \quad (4)$$

式中:SR为供应风险;HHI代表某矿种的生产集中度;WGI为世界治理指数(用于评价国家治理水平),取值范围为[-2.5, -2.5],数值越大说明国家越稳定,政治风险越低;IR为某矿种的对外依存度; EOL_{RIR} 为二次回收率;CF为某矿种伴生产量占比;RC为资源生产国与我国的双边关系程度。

2.3 优势战略性关键矿产评价

优势战略性关键矿产是指我国资源禀赋优势突出,其他国家对我国资源较为依赖,使得我国在国际市场上具有潜在控制力的矿产资源。优势战略性关键矿产目录的评价方法主要依据境外资源关键性和供应控制力两个指标,通过构建二维矩阵筛选出优势战略性关键矿产的种类。

2.3.1 资源关键性评价模型

资源关键性指标用于测度我国的优势矿种在境外主要经济体的重要程度,是判断我国优势矿产能否对其他经济体经济发展产生重要影响的一个重要方面。

某种矿产资源对主要经济体的关键性取决于不同经济体的自身判断。Hayes and

McCullough(2018)认为可以根据不同国家和学者确定的关键矿产目录中各类元素出现的频次百分比来测算某种被公认的关键矿产重要程度。为此,本文采用目前已经公布了关键矿产目录的主要矿产资源消费经济体、生产经济体进行分析,主要包括美国、欧盟、日本、澳大利亚、加拿大等。依据我国优势矿产在上述主要经济体关键矿产目录的频次百分比来评价我国优势矿产对主要经济体的关键性分析。

据此,本文建立的我国优势矿产对主要经济体关键性评价模型为:

$$FC = \frac{QC}{QL} \times 100\% \quad (5)$$

式中:FC为对主要经济体的关键性;QC指除中国以外的被其他主要经济体列为关键矿产的频次;QL为主要经济体关键矿产清单数量。

2.3.2 供应控制力评价模型

供应控制力用于衡量国家对资源全球供应调控能力水平,供应控制力是指一个国家对其某种资源的全球供应(包括供应量、供应流向等)的调控能力,是一个国家在全球资源供应中地位的反映。

供应控制力代表国家调控资源供应与国际市场的能力,并非指单个企业对市场供应的垄断、控制程度,二者虽有联系,但并不相同。国家控制力是通过其所管辖的企业对市场影响力来实现的,但国家控制力强并不代表单个企业的市场影响力强。

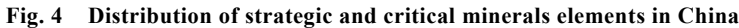
影响一个国家某种矿产资源供应控制力主要包括三个因素,分别是该矿产资源占全球出口市场的份额、该种矿产资源矿业生产在全球的地位、该种矿产资源禀赋在全球的地位。这三个影响因素逻辑关系紧密,相互支撑。储量是产量的支撑和基础,产量是储量在实际供应中的表现;同样,产量是出口量的支撑和基础,出口量是真正进入国际市场的供应量。另外一些因素也对国家资源供应控制力有重要影响,如矿业企业竞争力、资源品质等,但由于这些因素产生的影响已然体现在出口地位和生产地位方面,不再重复考虑。基于上述分析,构建的供应控制力评价指标见表3。

供应控制力的评价模型为:

$$MC = \frac{T_{ne}}{T_c} \times \sqrt{\frac{P_c \times R_c}{P \times R}} \quad (6)$$

表3 供应控制力评价指标
Table 3 Assessment indicators of supply control

评价指标	指标代码	指标解释	支撑指标
出口量全球占比	EX_r	在全球出口市场地位	本国出口量、本国进口量、全球总出口量
产量全球占比	PR_r	在全球生产中的地位	本国产量、全球总产量
储量全球占比	RS_r	查明经济可采资源在全球地位	本国储量、全球总储量



充分研究、借鉴国外相关机构方法的基础上,结合我国特殊的经济社会发展阶段、国际地缘政治局势、资源禀赋特征、矿产资源供需关系等要素,界定了中国战略性关键矿产的概念和内涵,通过定性分析与定量评价相结合的方式,构建了中国战略性关键矿产目录“经济重要性—供应风险性—战略新兴产

业不可或缺性/供应控制力”三维评价理论模型,对我国短缺矿产和优势矿产进行了评价(图 3)。其中,“经济重要性—供应风险性—战略新兴产业不可或缺性”理论模型对应我国短缺战略性关键矿产评价;“经济重要性—供应风险性—供应控制力”理论模型对应我国优势战略性关键矿产评价。需要指出的是,由于境外主要经济体关键矿产清单主要围绕着经济重要性和供应风险进行评价,因此在我国优势战略性关键矿产评价理论模型中的“经济重要性—供应风险性”相当于资源关键性评价,同时涵盖了战略新兴产业不可或缺性这一理念。

为使最终结果最大限度的符合实际,本文又通过咨询相关专家,对战略新兴产业不可或缺性的评价结果进行了修正。需要说明的是,我国对石油、天然气、铀三种矿产均高度对外依存,其供应不仅有市场因素,更大程度上受国际地缘政治的影响,供应风险很高。根据战略性关键矿产定义,石油、天然气、铀是典型的战略性关键矿产,最终确定的中国战略性关键矿产目录包括了 31 种矿产资源(铂族和稀土不做细分),涉及 49 种元素(表 4,图 4)。其中,能源矿产 3 种、金属矿产 25 种、非金属矿产 3 种;短缺矿产 21 种、优势矿产 10 种。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 92162321, 72088101, 71991480, and 71991485).

参考文献:

- 陈毓川. 2002. 建立我国战略性矿产资源储备制度和体系[J]. 国土资源, (1): 20-21, 5.
- 翟明国, 胡波. 2021. 矿产资源国家安全、国际争夺与国家战略之思考[J]. 地球科学与环境学报, 43(1): 1-11.
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 蒋少涌, 李文昌, 王汝成, 王登红, 齐涛, 秦克章, 温汉捷. 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题[J]. 中国科学基金, 33(2): 106-111.
- 郭娟, 闫卫东, 徐曙光, 崔荣国, 胡容波, 林博磊, 周起忠, 周舟, 杨玲. 2021. 中国关键矿产评价标准和清单的探讨[J]. 地球学报, 42(2): 151-158.
- 胡存智. 2009. 全国矿产资源规划研究[M]. 北京: 地质出版社.
- 姜雅, 王婷, 龙涛. 2021. 关于将重晶石列为战略性矿产的原则分析[J]. 地球学报, 42(2): 297-302.
- 李建武, 李天骄, 周艳晶, 李颖, 马哲, 李芳琴. 2018. 新时代中国战略性关键矿产目录厘定[R]. 北京: 中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心.
- 李宪海, 王丹, 吴尚昆. 2014. 我国战略性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, 23(4): 30-33.
- 刘文浩, 刘学, 郑军卫. 2021. 基于文献计量的国际关键矿产资

- 源研究态势评估[J]. 矿产综合利用, (5): 59-66, 58.
- 齐亚彬. 2002. 中国矿产资源储备问题研究[J]. 资源与产业, (6): 53-54.
- 全球矿产资源战略研究中心. 2006. 矿产资源储备战略研究[R]. 北京: 中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心.
- 全球矿产资源战略研究中心. 2016. 国家物资储备中长期储备品种、规模研究[R]. 北京: 中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心.
- 唐金荣, 杨宗喜, 周平, 施俊法. 2014. 国外关键矿产战略研究进展及其启示[J]. 地质通报, 33(9): 1445-1453.
- 汪灵. 2019. 战略性非金属矿产的思考[J]. 矿产保护与利用, 39(6): 1-7.
- 王安建, 王高尚, 邓祥征, 周凤英, 安海忠, 钟维琼, 李华姣, 刘刚, 马哲, 胡东滨, 成金华, 闫强, 代涛, 钟美瑞, 王小林. 2019. 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, 33(2): 133-140.
- 王安建, 袁小晶. 2022. 大国竞争背景下的中国战略性关键矿产资源安全思考[J]. 中国科学院院刊, 37(11): 1550-1559.
- 王春连, 王九一, 游超, 余小灿, 刘殿鹤, 颜开, 刘思晗, 薛燕, 刘延亭, 刘雪, 尹传凯. 2022. 战略性非金属矿产厘定、关键应用和供需形势研究[J]. 地球学报, 43(3): 267-278.
- 王登红. 2019. 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, 93(6): 1189-1209.
- 王晓东. 2005. 战略性矿产资源储备规模及其管理研究[D]. 长沙: 中南大学.
- 文博杰, 陈毓川, 王高尚, 代涛. 2019. 2035 年中国能源与矿产资源需求展望[J]. 中国工程科学, 21(1): 68-73.
- 张新安, 张迎新. 2011. 把“三稀”金属等高新技术矿产的开发利用提高到战略高度[J]. 国土资源情报, (6): 2-7.

References:

- BGS (British Geological Survey). 2011. British Geological Survey risk list 2011[R]. Nottingham: British Geological Survey.
- BGS (British Geological Survey). 2012. British Geological Survey risk list 2012[R]. Nottingham: British Geological Survey.
- BGS (British Geological Survey). 2015. British Geological Survey risk list 2015[R]. Swinton: National Environmental Research Council.
- CALVO G, VALERO A, VALERO A. 2017. Thermodynamic approach to evaluate the criticality of raw materials and its application through a material flow analysis in Europe[J]. Journal of Industrial Ecology, 22: 839-852.
- CHEN Yu-chuan. 2002. To establish a reserve system of strategic mineral resources in China[J]. Land & Resources, (1): 20-21, 5(in Chinese with English abstract).
- DISER. 2022. 2022 critical minerals strategy[EB/OL]. [2022-09-25]. https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2022-09/2022-critical-minerals-strategy_0.pdf.
- EC (European Commission). 2008. The raw materials initiative—meeting our critical needs for growth and jobs in Eu-

- rope[R]. Brussels: European Commission.
- EC (European Commission). 2010. Critical raw materials for the EU: Report of the Ad-hoc working group on defining critical raw materials[R]. Brussels: European Commission.
- EC (European Commission). 2011. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions tackling the challenges in commodity markets and on raw materials[R]. Brussels: European Commission.
- EC (European Commission). 2014. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions on the review of the list of critical raw materials for the EU and the implementation of the raw materials initiative[R]. Brussels: European Commission.
- EC (European Commission). 2017. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions on the 2017 list of critical raw materials for the EU[J]. Brussels: European Commission.
- EC (European Commission). 2020. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions on the critical raw materials resilience: Charting a path towards greater security and sustainability[R]. Brussels: European Commission.
- GALOS K, LEWICKA E, BURKOWICZ A, GUZIK K, KOT-NIEWIADOMSKA A, KAMYK J, SZLUGAJ J. 2021. Approach to identification and classification of the key, strategic and critical minerals important for the mineral security of Poland[J]. *Resources Policy*, 70: 101900.
- GRAEDEL T E, BARR R, CHANDLER C, CHASE T, CHOI J, CHRISTOFFERSEN L, FRIEDLANDER E, HENLY C, JUN C, NASSAR N T, SCHECHNER D, WARREN S, YANG Man-yu, ZHU C. 2012. Methodology of metal criticality determination[J]. *Environmental Science & Technology*, 46: 1063-1070.
- GRAEDEL T E, HARPER E M, NASSAR N T, NUSS P, RECK B K. 2015. Criticality of metals and metalloids[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(14): 4257-4262.
- GULLEY A L, NASSAR N T, XUN S. 2018. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(16): 4111-4115.
- GUO Juan, YAN Wei-dong, XU Shu-guang, CUI Rong-guo, HU Rong-bo, LIN Bo-lei, ZHOU Qi-zhong, ZHOU Zhou, YANG Ling. 2021. A discussion on evaluation criteria and list of critical minerals in China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 42(2): 151-158(in Chinese with English abstract).
- HATAYAMA H, TAHARA K. 2015. Evaluating the sufficiency of Japan's mineral resource entitlements for supply risk mitigation[J]. *Resources Policy*, 44: 72-80.
- HAYES S M, MCCULLOUGH E A. 2018. Critical minerals: A review of elemental trends in comprehensive criticality studies[J]. *Resources Policy*, 59: 192-199.
- HU Cun-zhi. 2009. Research on national mineral resources planning[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- JIANG Ya, WANG Ting, LONG Tao. 2021. Research on listing barite as a strategic mineral resource[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 42(2): 297-302(in Chinese with English abstract).
- LI Jian-wu, LI Tian-jiao, ZHOU Yan-jing, LI Ying, MA Zhe, LI Fang-qin. 2018. Determination of the list of China's strategic and critical minerals in the new era[R]. Beijing: Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- LI Xian-hai, WANG Dan, WU Shang-kun. 2014. 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*, 23(4): 30-33(in Chinese with English abstract).
- LIU Wen-hao, LIU Xue, ZHENG Jun-wei. 2021. Bibliometric evaluation of international critical mineral resources research trend[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, (5): 59-66, 58(in Chinese with English abstract).
- NASSAR N T, BRAINARD J, GULLEY A, MANLEY R, MATOS G, LEDERER G, BIRD L R, PINEAULT D, ALONSO E, GAMBOGI J, FORTIER S M. 2020. Evaluating the mineral commodity supply risk of the US manufacturing sector[J]. *Science Advances*, 6(8): eaay8647.
- NASSAR N T, FORTIER S M. 2021. Methodology and technical input for the 2021 review and revision of the US critical minerals list[R]. Reston, Virginia: US Geological Survey.
- NASSAR N, XUN S, FORTIER S, SCHOEERLEIN D. 2016. Assessment of critical minerals: Screening methodology and initial application[R]. Washington DC: The Office Science and Technology Policy.
- NRC (National Research Council). 2008. Minerals, critical minerals, and the U.S. economy[M]. Washington DC: National Academies Press.
- QI Ya-bin. 2002. Research on China's mineral resources reserve[J]. *Resources Industries*, (6): 53-54(in Chinese).
- RESEARCH CENTER FOR STRATEGY OF GLOBAL MINERAL RESOURCES. 2006. Research on the strategy of mineral resources stock[R]. Beijing: Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- RESEARCH CENTER FOR STRATEGY OF GLOBAL MINERAL RESOURCES. 2016. Research on the variety and scale of medium and long-term national material stock[R]. Beijing: Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- SCHULZ K J, DEYOUNG J H, SEAL R R, BRADLEY D C. 2017.

- Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply[M]. Reston, Virginia: U. S. Geological Survey: 797.
- TANG Jin-rong, YANG Zong-xi, ZHOU Ping, SHI Jun-fa. 2014. The progress in the strategic study of critical minerals and its implications[J]. Geological Bulletin of China, 33(9): 1445-1453(in Chinese with English abstract).
- US PUBLIC LAWS. 1939. Strategic and critical materials stock piling act (Chapter 190, enacted June 7, 1939)[EB/OL]. [2022-09-25]. <http://legcounsel.house.gov>.
- WANG An-jian, WANG Gao-shang, DENG Xiang-zheng, ZHOU Feng-ying, AN Hai-zhong, ZHONG Wei-qiong, LI Hua-jiao, LIU Gang, MA Zhe, HU Dong-bin, CHENG Jin-hua, YAN Qiang, DAI Tao, ZHONG Mei-rui, WANG Xiao-lin. 2019. Security and management of China's critical mineral resources in the new era[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 33(2): 133-140(in Chinese with English abstract).
- WANG An-jian, YUAN Xiao-jing. 2022. Security of China's strategic and critical minerals under background of great power competition[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 37(11): 1550-1559(in Chinese with English abstract).
- WANG Chun-lian, WANG Jiu-yi, YOU Chao, YU Xiao-can, LIU Dian-he, YAN Kai, LIU Si-han, XUE Yan, LIU Yan-ting, LIU Xue, YIN Chuan-kai. 2022. A study on strategic non-metallic mineral definition, key applications, and supply and demand situation[J]. Acta Geoscientica Sinica, 43(3): 267-278(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong. 2019. 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, 93(6): 1189-1209(in Chinese with English abstract).
- WANG Ling. 2019. Considerations on strategic non-metallic mineral resources[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 39(6): 1-7(in Chinese with English abstract).
- WANG Xiao-dong. 2005. Study on the scale and management of strategic mineral resources reserve[D]. Changsha: Central South University(in Chinese with English abstract).
- WEN Bo-jie, CHEN Yu-chuan, WANG Gao-shang, DAI Tao. 2019. China's demand of energy and mineral resources by 2035[J]. Strategic Study of CAE, 21(1): 68-73(in Chinese with English abstract).
- YAN Wen-yi, WANG Zhao-long, CAO Hong-bin, ZHANG Yi, SUN Zhi. 2021. Criticality assessment of metal resources in China[J]. IScience, 24: 102524.
- ZHAI Ming-guo, HU Bo. 2021. Thinking to state security, international competition and national strategy of mineral resources[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 43(1): 1-11(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Ming-guo, WU Fu-yuan, HU Rui-zhong, JIANG Shao-yong, LI Wen-chang, WANG Ru-cheng, WANG Deng-hong, QI Tao, QIN Ke-zhang, WEN Han-jie. 2019. Critical metal mineral resources: current research status and scientific issues[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 33(2): 106-111(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xin-an, ZHANG Ying-xin. 2011. The "rare, scattered, rare earth" metals and other high-tech minerals development and utilization have been raised to a strategic height[J]. Land and Resources Information, (6): 2-7(in Chinese).