

翟明国, 胡 波. 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, 2021, 43(1): 1-11.

ZHAI Ming-guo, HU Bo. Thinking to State Security, International Competition and National Strategy of Mineral Resources[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2021, 43(1): 1-11.

DOI: 10. 19814/j. jese. 2020. 10018

· 庆祝长安大学建校七十周年专辑 ·

矿产资源国家安全、国际争夺与国家战略之思考

翟明国^{1,2,3}, 胡 波¹

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049; 3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘 要:在当前深刻变革和复杂调整的国际政治与经济形势下, 大国博弈的核心是争夺地球资源及其控制权。国际政治经济格局的变动导致全球资源配置和经济全球化进程发生巨大变化以及不可预计的风险。美国总统特朗普 2017 年底签署了《关于确保关键矿产安全和可靠供应的联邦战略》(13817 号) 总统行政命令, 2019 年发布以资源争夺为核心内容的战略行动方案, 欲确保美国对全球矿产资源的控制权。中国仍处于并将长期处于社会主义初级阶段, 和发达国家相比仍有一定差距, 对矿产资源的需求居高不下, 显示了小(人均矿产占有量小)、大(需求和消费量大)、高(对外依存度和安全风险相对较高)和降(国内资源供应能力和资源保障均有所下降)的特点。当前中国多种大宗矿产资源现有探明储量面临开发殆尽的局面, 新兴关键矿产家底不够清, 开采和选冶技术需要提高, 综合利用和绿色矿山的理念与制度需要加强完善, 国家有关矿产政策需要进一步调整。基于此, 本文将对矿产资源的国家安全、国际资源争夺进行简要分析, 提出对中国的矿产资源战略的思考和建设。

关键词:矿产资源; 关键矿产; 国家安全; 国际争夺; 科学问题; 基础研究; 战略思考

中图分类号: P612; P618. 2

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2021)01-0001-11

Thinking to State Security, International Competition and National Strategy of Mineral Resources

ZHAI Ming-guo^{1,2,3}, HU Bo¹

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Under the current international political and economic situation of profound changes and complex adjustment, the core of great power game is to fight for the resources and their control. Changes of the international political and economic landscape lead to great changes and unpredictable risks in global resources allocation and economic globalization. Donald Trump signed an executive order on a *Federal Strategy to Ensure the Safety and Reliable Supply of Critical Minerals* in late 2017, and released a strategic action plan focusing on resource competition in 2019, to ensure American control over the global mineral resources. China is still

收稿日期: 2020-10-13; 修回日期: 2020-10-27 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 中国科学院学部咨询项目(81721360); 国家自然科学基金重大研究计划项目(91962000)

作者简介: 翟明国(1947-), 男, 河南济源人, 中国科学院地质与地球物理研究所研究员, 长安大学兼职教授, 博士研究生导师, 理学博士, 中国科学院院士, E-mail: mgzhai@mail.iggcas.ac.cn.

in the primary stage of socialism and will remain so far a long time to come, and the gap between China and developed countries is still large. China's demand to mineral resources remains high, showing the characteristics of low (mineral possession per capita), large (demand and consumption), high (external dependence and security risks) and decline (domestic supply capacity and resource guarantee). At present, many kinds of large mineral resources in China are facing a situation of being used up. The metallogenic regularity, distribution, reserve and prospecting potential of emerging critical mineral resources are still unclear. Mining and metallurgy technologies need to be improved. The concept and system of comprehensive utilization and green mines need to be strengthened and improved. The relevant state mineral policies need to be adjusted. Based on above issues, the safety of mineral resources and the international resource competition were briefly analyzed, and the thinking and suggestion to China's mineral strategy were put forward.

Key words: mineral resource; critical mineral; state security; international competition; scientific issue; basic research; strategic thinking

0 引言

矿产资源是人类经济社会发展的物质基础,是工业、农业、国防和其他社会行业的“粮食”和主要动力来源。随着世界各国的发展,包括发达国家的持续高位需求、发展中国家工业化的不断推进和全球化程度的不断提高,预计未来数十年全球对矿产资源的需求将继续高速增长,如何应对和满足可持续发展的重大资源需求,一直是全球关注的焦点之一。资源争夺关系着世界政治格局,它们的持续安全供给关系着国计民生和国家安全。

纵观人类发展史,从石器时代、青铜器时代、铁器时代直至现代信息化时代,重要的文明时代都是以资源命名的,整部人类文明史就是一部利用、认识和再高效利用资源的历史^[1]。历史上一些国家间的战争甚至世界大战,剥下各种伪装,其实质就是资源争夺战。在生产实践中,人类学会利用矿产资源,推动了生产力的革命和科学技术的发展;而社会的发展进步又加大了人类对资源的需求,从而进一步推动矿产资源勘探提取技术、高效清洁利用技术以及替代产品的研发。

在当前深刻变革和复杂调整的国际政治与经济形势下,国际争夺加剧,政治经济格局的变动导致全球资源配置和经济全球化进程发生巨大变化以及不可预计的风险。美国总统特朗普 2017 年底签署了《关于确保关键矿产安全和可靠供应的联邦战略》(13817 号)总统行政命令,2019 年发布以资源争夺为核心内容的战略行动方案,欲确保美国对全球矿产资源的控制权。中国仍处于并将长期处于社会主

义初级阶段,和发达国家相比存在一定的差距,对矿产资源的需求居高不下,显示了小(人均矿产平均占有量小)、大(需求和消费量大)、高(对外依存度和安全风险高)和降(国内资源供应能力和资源保障双下降)的特点^[2-4]。因此,客观分析中国的矿产资源供应能力和国家资源安全状况,正确判断国际资源态势,并且对中国的矿业及其相关政策和法规提出建设性意见是当务之急,也是有关领域科学家的责任。

1 矿产资源的性质

1.1 什么是矿产资源

矿产资源是大自然赋予人类的一种馈赠品,是指经过地质成矿作用,使埋藏于地下或出露于地表,并具有开发利用价值的矿物或有用元素含量达到具有工业利用价值的集合体。矿床、煤田、油田等是矿产资源的实际载体,也是人类直接研究、寻找和开发利用的资源对象。矿产资源在人类生活中无处不在,几乎 90% 的生产生活用品都与之密切相关,其开发利用极大地促进了人类进步、经济发展和社会财富的积累,是人类文明的物质基础。

1.2 矿产资源的自然属性

矿产资源作为地球形成过程中地质作用的产物,除了自身的地质属性外,在人类经济和社会发展过程中还具有经济属性和环境属性,这些属性在人类可预见的发展历史阶段和国家间的政治格局中,还表现出明确的政治属性。

矿产资源是由自然地质作用形成于地壳中具有资源意义的地质体集合的总称,其地质属性主要涵盖 3 层意义:①它们是在地球约 45 亿年漫长、复杂

的形成、演化历史进程中,于不同时期由特殊地质作用形成的有用物质聚集体,非人力所能创造;②其时间和空间分布符合地质规律,并非均匀分布或遍及全球,不以人口、国家边界和不同人群的资源要求来分布;③以人类进化的历程为时间尺度,这种资源是不可再生的。也就是说,少则几百万年,多则几千万年或更长时间跨度,才能形成矿产资源,相对人类目前开发利用矿产资源的时间周期,这些资源的再生补充是无意义的。因此,人类需要有节制地开发利用这些空间分布不均匀、数量有限而又不能再生的矿产资源。

矿产资源经济属性的基本内涵是在当前经济技术条件下可以被经济利用,作为具有重要经济价值的自然财富。其既有品质问题,又有开发利用成本问题。其经济属性主要表现为提取技术和经济利用这两个核心要素与时俱进的可变性。一方面,这意味着过去和现在不曾被认为是矿产资源的地质体,随着经济水平的提高和科学技术的进步,将来可能成为矿产资源,其种类、数量和用途也因此会不断增加和拓展;另一方面,现有部分矿产资源随着科学技术水平的快速提高,有可能被新的更廉价和清洁的资源所取代而失去经济意义。此外,在经济全球化背景下,衡量矿产资源经济价值的尺度不再是某一国家的度量衡,而是国际市场的价格体系。矿产资源经济属性的内涵告知:人类没有必要为地球上矿产资源可能会枯竭而担忧和恐惧,也不能期待科技进步会在一夜之间大幅拓展矿产资源的种类,增加某种资源的数量而盲目乐观。目前的科技进步还不能弥补资源加速消费致使现有储量保障周期的不断缩短。矿产资源经济属性要求人类把握全球矿产资源消费的速率和资源科技的动向,统揽全球资源市场,科学配置所需资源,合理进出口优势资源。

大自然对人类的馈赠不是无代价的。矿产资源的环境属性是指矿产资源开发在极大地促进人类文明和社会经济发展的同时,也给人类赖以生存的环境造成改变、再平衡或者破坏。其破坏表现在:一方面,矿产资源开发造成水土流失、水系污染、地质灾害频发、生态环境扰动等;另一方面,人类从大自然中索取资源的同时,又在高强度生产和消耗这些资源的过程中将废弃物排入大自然,造成一定的负面环境效应。另外,部分矿产资源作为某种元素高浓度聚积的产物,在地表、近地表或接近潜水面时就开始自身的环境效应,并不同程度地影响人类现有的生产与生活。矿产资源的裸露、开发、生产、加工

和消费对人类赖以生存的地球环境构成了潜在威胁。因此,了解矿产资源的环境属性,科学、有效地预防、减轻和治理矿产资源开发、生产和消费过程中的负面环境效应是人类共同的任务和责任。

2 矿产资源的政治属性和国际争夺态势

2.1 政治属性

矿产资源的地质、经济和环境属性客观上决定了各国在开发利用资源、促进本国社会进步和经济发展时国家意志的定位以及全球资源理念与环境意识的形成。特别是矿产资源在地理和国家疆域中分布的客观性和局限性,以及各国和各种政治集团在经济不同阶段的需求和政治理念的差异性,使得资源成为人类历史上争夺与战争的根源。换言之,矿产资源在一定意义上具有政治属性。矿产资源的自然属性决定了全人类、发展中国家和发达国家需要资源的全球配置,但是国家和政治集团的利益决定对资源的“实力控制”是国家意志的体现。这是非常重要的一种社会现象和政治形态,在某种程度上是很难调和的。随着经济的发展以及越来越多国家工业化进程的加快,资源争夺空前激烈。此外,人类对环境治理以及环境品质的要求越来越高,环境治理的必要性与不同发展程度国家对矿产资源的需求之间产生了新的课题,即全球资源理念与环境理念问题。在人类文明发展历程中一直存在着冲突与战争,也存在着暂时的和解与合作。人类发展史相当大的篇幅是局部和世界范围的战争、战后新的政治格局和政治生态的形成以及这个平衡被打破后新的争夺与战争。这种现象和事实是被政治家们否认、粉饰、曲解的核心领域,这就为国际政治提出了严肃而又必须面对的问题。

从当前的国际形势和政治生态来看,资源争夺造成的国家之间和政治集团之间的争夺从来没有停止。苏联解体后,一些加盟共和国与俄罗斯、欧美等国家的冲突,两伊战争和中东问题等,都直接起源于资源问题。许多在人权、民主等口号掩饰下的颜色革命以及暴力与非暴力冲突,也是源于资源争夺。中国作为人口大国在经济发展过程中也需要矿产资源。中国用好国际国内两种资源的战略、资源全球化配置与国家利益和国家间的利益冲突不可避免地存在。中国对此需要有清醒的认识,为确保战略性新兴产业、国防军工产业保持全球领先地位,需要安全可靠的原材料供应。

2.2 国际争夺态势

美国已将中国视为资源争夺的首要竞争对手。美国多任总统都明确指出,中国发展需要使用地球资源,这将并已经对美国继续保持高的消费水平和高的经济水平造成威胁和挑战。美国媒体大肆渲染,如果中国人像美国人那样消费矿产资源,3个地球也不够中国人消费。美国高度重视关键矿产(Critical Mineral)供应安全,2008年以来已采取12项行动或措施,并将其提升为国家战略。从美国国家科学研究委员会、能源部、国家科学技术委员会对关键矿产清单厘定开始,2017年7月21日,美国总统特朗普签署了《评估和加强美国的制造业和国防工业基础与供应链弹性》(13806号)总统行政命令,要求评估原材料对制造业和国防工业的供应风险;2017年12月20日,又签署了《关于确保关键矿产安全和可靠供应的联邦战略》(13817号)总统行政命令;2018年5月18日,美国内政部公布35种关键矿产清单;2018年9月,美国国防部发布《评估并强化美国制造业和国防工业基础与供应链弹性》报告;2019年6月4日,美国商务部发布《确保关键矿产安全可靠供应的联邦战略》报告;2019年6月11日,美国国务院发布《能源资源治理倡议》,建立能源关键矿产国际联盟;2019年8月30日,美国白宫管理与预算办公室联合科技政策办公室发布“2021财年政府研发预算优先事项”备忘录,将关键矿产安全列入优先领域。同时,美国积极将这个理念在五眼联盟以及欧洲国家推广。欧盟以及某些发达国家从2008年起,与美国同步推行矿产资源供应形势和发展趋势的研究及战略研讨,并提出了各自的应对方案。2019年9月26日,美国国务卿蓬佩奥在联合国大会期间会晤九国外长,进一步强化了十国战略性关键矿产联盟,并做出“遏制”中国和应对中国“反制”的双重准备。

据中国海关和美国地质调查局数据^[5],2014~2018年美国稀土资源累计进口量与累计消费量相差 $(2\sim 3)\times 10^4$ t,推断近年来美国至少已经增加了一两年消费量的稀土储备。同时,美国还推动了澳大利亚莱纳斯(Lynas)公司在美国建立新的稀土分离工厂,西拉(Syrah)资源公司建立新的石墨提纯工厂,以打破中国对这两种战略资源的掌握。此外,美国主导的关键矿产国际联盟可能会成为对中国进行资源“遏制”的工具,不能排除美国说服更多资源供应国加入的可能性,一旦逼迫各国“选边站”,对中国资源、产业乃至经济安全具有较大影响。

除此之外,美国和一些国家还加强了对中国从国外进口矿产资源必经的海洋运输路线与军事要塞的控制。中国境外矿产资源安全供应脆弱性一直没有得到有效改善。马六甲海峡、巽他海峡和南海(“两峡一海”)运输通道是中国资源进口的交通咽喉。中国进口原油的70%以上,铁矿石、铝、锂、钴、镍等90%~99%的运输需经过“两峡一海”到达国内。一旦美国采取极端行动,中国境外资源运输通道将受制于人,对中国资源安全乃至经济安全造成冲击。模型测算^[5]表明,如果海上运输通道被封锁,中国石油、燃气、核燃料、天然气、黑色金属、有色金属、非金属矿物制品等很可能会减产,后果严重。

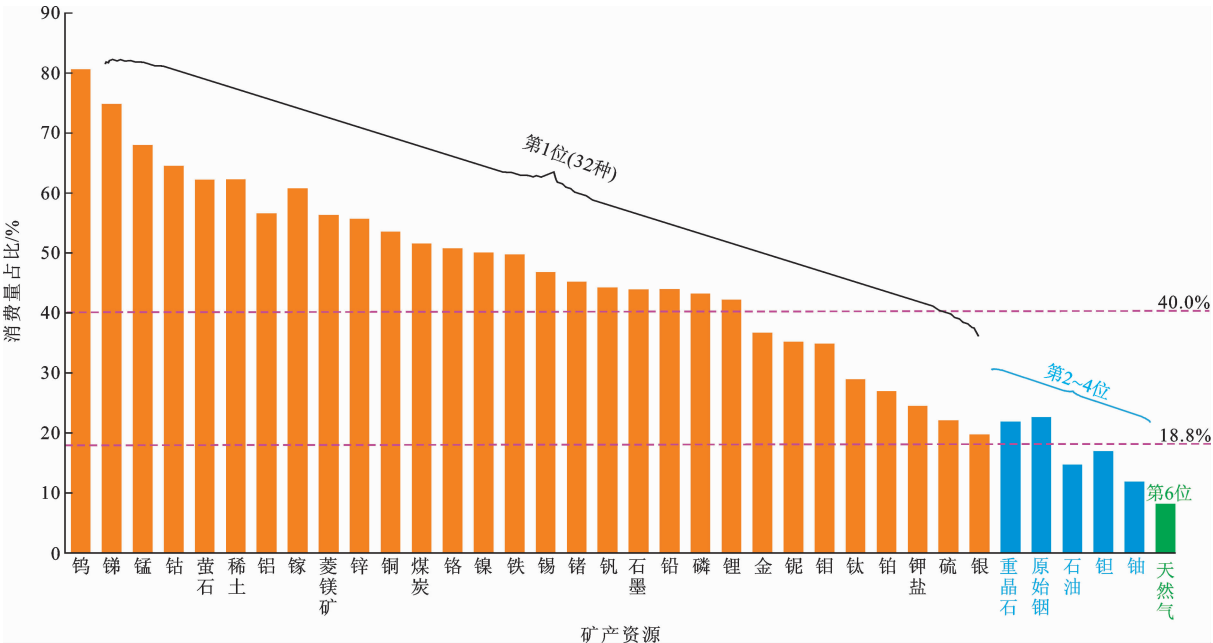
3 中国矿产资源的消费现状和供应形势

3.1 矿产供应安全已越红线

已有资料表明,中国矿产资源供需形势严峻^[4-8]。人均占有资源量低于世界平均水平的态势在短期内很难改变。43种主要矿产资源中,32种消费量居世界第一,24种消费量占比超过全球的40%(图1),18种大宗和关键金属矿产对外依存度(40%~99%)居高不下(图2),直接威胁国家经济安全。中国曾有优势的稀土元素和若干稀有、稀散元素矿产储量全球占比近年来也在下降,国际话语权有所减弱。扭转上述被动局面已刻不容缓。亟待加强矿产资源科技创新,理清中国矿产资源家底,把握全球矿产资源格局,解决资源形成、勘查和开发利用中的系列理论难题和技术瓶颈,大幅提升中国资源保障能力、对全球资源掌控能力和资源开发与生态环境协调发展能力,同时促进矿产资源学科的发展。因此,发展矿产资源学科具有至关重要的战略意义和经济价值。

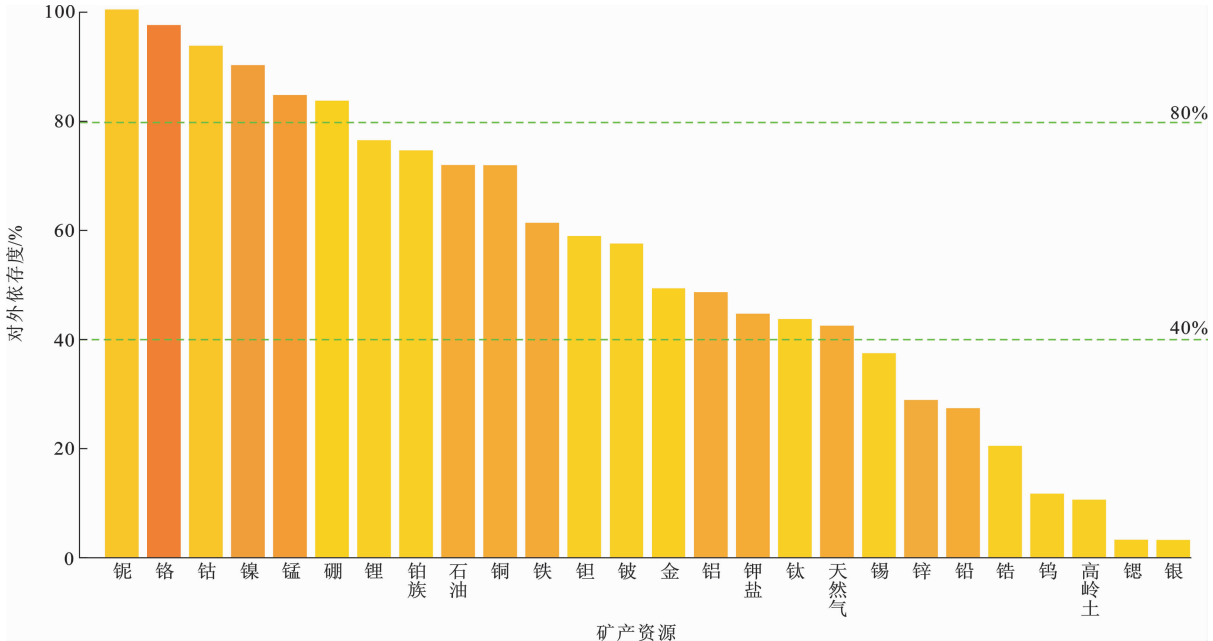
3.2 对矿产资源的短、中、长期需求需要科学判断

研究表明,资源消费与人均GDP显示“S”形规律^[5],随着经济的发展,即人均GDP的增加,人均能源和矿产资源消费会经历缓慢增长→快速增长→增速减缓→零增长或负增长的过程,并由此形成一条“S”形轨迹。这条“S”形轨迹有3个关键点,即矿产资源快速消费的起飞点、转折点(快速增长、增长减缓)和零增长点。经济发展过程中,人均能源和矿产资源消费增长遵循“S”形演变规律,当经济发展到一个较高水平时,人均能源和重要矿产资源消费达到顶点,之后不再增长或呈缓慢下降态势。不同种类资源由于功能和作用不同,到达顶点或峰值点的时间不同。比如,钢和水泥消费与一个国家的城市



图件引自文献[5]和[9]
图 1 2018 年全球主要矿产消费量的中国占比

Fig. 1 Share of Major Mineral Consumption in China Around the World in 2018



图件引自文献[5]和[9]
图 2 2018 年中国大宗和关键矿产对外依存度

Fig. 2 Foreign Dependence of Large and Critical Minerals of China in 2018

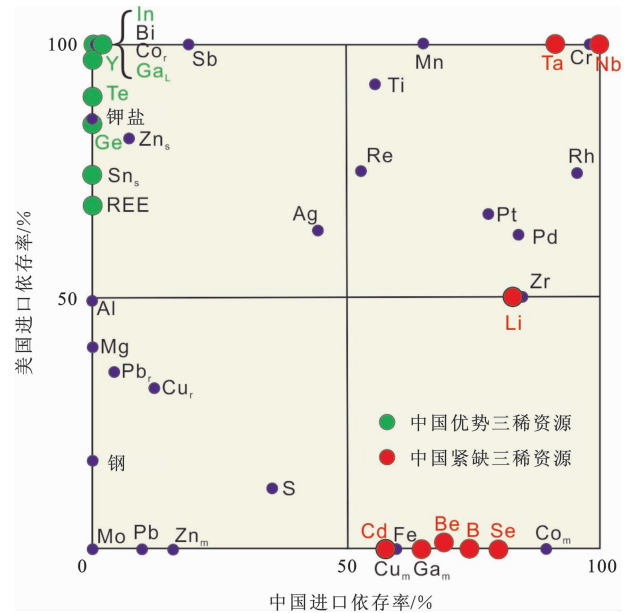
化水平和基础设施完备程度密切相关,其消费的零增长点主要集中在人均 GDP 10 000~12 000 美元;铜和铝由于其在国民经济建设中的作用更加广泛,其消费零增长点到来的时间稍晚,主要集中在人均 GDP 18 000~20 000 美元;能源作为经济社会发展的驱动力,其消费零增长点到来的时间与经济社会发展的重大转型期密切相关,大多发达国家一次能

源消费的零增长点集中在人均 GDP 20 000~22 000美元。由于国际货币之间汇率变动,以及受国际贸易战和新冠肺炎疫情的影响,中国这三年来的平均 GDP 为 8 000~10 000 美元。根据实际经济增长和实际购买力,预计中国主要需求的大宗矿产资源,如钢、铜、铝等将陆续达到需求峰值,但仍将处于持续高位的状态,这种状态将至少维持到 2035

年,铜和铝等大宗矿产进入高峰值的时间更迟。这里要说明的是,进入高峰值并不代表需求下降,而是在人均 GDP 20 000~30 000 美元或更大的区间延续高位,但没有继续增长。还需说明的是,目前统计比较常用的是 1990 年美元值(盖凯美元,即以 1990 年美元为度量标准),与英、美和欧洲主要发达国家进入工业化时的美元值相差甚远,大宗矿产需求到达拐点(零增长)的 10 000~12 000 美元,是 20 世纪四五十年代甚至更早的人均 GDP,与现在对比使用的 10 000~12 000 美元(以 1990 年美元为度量标准)购买力不可同日而语。即使与盖凯美元对比,现在的美元购买力也相差甚大,现在中国人均 GDP 8 000~10 000 美元与盖凯美元的 8 000~10 000 美元相比低很多。因此,对这些与经济发展和工业化有关的大宗矿产,中国的供应能力需要尽快提高。

3.3 关键矿产资源争夺及其对策

美国等发达国家把矿产资源的争夺作为“卡脖子”与“被卡脖子”战略的核心与推手。2019 年,由美国商务部提出,被国防部、联邦调查局和资源部等众多部门呼应的六大行动的“联邦战略”,名称是《确保关键矿产安全可靠供应的联邦战略》(A Federal Strategy to Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Mineral),主要瞄准中美争夺,以极为罕见的速度迅速得到特朗普总统批准,并以总统名义发布了行政命令。图 3 是美国发布的关键矿产清单,对手只有中国。关键矿产资源或战略性关键金属(简称“关键金属”,Critical Metal)是国际上近年新提出的资源概念,是指现今社会必需、安全供应存在高风险的一类金属元素及其矿床的总称,对新能源、新材料、信息技术等新兴产业和国防军工等行业具有不可替代的重大用途。这些元素绝大部分都属于稀有金属(如 Li、Be、Rb、Cs、Nb、Ta、Zr、Hf、W、Sn 等)、稀土金属(La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Sc、Y)和稀散金属(Ga、Ge、Se、Cd、In、Te、Re、Tl)。根据各自情况,各国提出的种属也略有差异。对中国而言,部分稀少稀贵金属(PEG、Co 等)也是关键矿产资源。关键金属具有极度耐热、难熔、耐腐蚀、优良光电磁等独特的材料性能,广泛应用于新能源、高新技术和国防军工。中美贸易摩擦持续升级,在核心技术和高新技术产品出口上,美国对中国“卡脖子”,对关键金属或关键矿产资源更是给予了空前重视。据预测,随着科技和新兴产业的发展,未来几十年全球对关键金属的需求将迅猛增长,供需矛盾将日益突出。但是,这些金属



图件引自文献[7]和[10],其中钾盐中国进口依存率应在 50%左右

图 3 美国发布的关键矿产清单以及与中国争夺图

Fig. 3 List of Critical Minerals Published by America and the Competition with China

在自然界的储量相对较少且分布高度不均,存在很大供应风险^[10-11]。因此,关键金属毫无疑问是重要战略资源。可以说,未来国际矿产资源和科技的竞争在很大程度上将集中于对关键矿产资源的博弈。但目前中国关键矿产资源家底不够清、政策不明、开发利用和统筹规划还存在诸多不足,缺乏有效的发展战略。例如,有些关键金属矿产由于赋存状态以及选矿的理论基础研究非常薄弱,所以其资源量只是元素的含量值,不能选冶,根本不是矿产;三稀元素经常共生,如何分离利用也处在研究的初步阶段。这些“卡脖子”与“被卡脖子”矿产的成矿规律、分布状态、储量与前景都还不够清晰,可以说是家底不够明。由于关键矿产是别国“卡脖子”与“被卡脖子”的矿产,所以急需厘清中国“卡脖子”与“被卡脖子”的矿产资源清单,为这些矿产资源的开发利用制定相应的政策,提出类似于美国“联邦战略”行动的建议,制定国家战略规划。这既需要专业人士、科学技术人员以及企业界的呼吁,更需要政府管理部门的主导,不然就会对未来的国家战略产生危害。

4 对中国矿产资源形势的基本判断和主要建议

4.1 矿产资源形势的基本判断

当前中国矿产资源形势严峻,资源战略准备不足^[11],需求居高不下,显示了小(人均矿产占有量

小)、大(需求和消费量大)、高(对外依存度和安全风险相对较高)和降(国内资源供应能力和资源保障均有所下降)的特点。

(1)中国仍处于并将长期处于社会主义初级阶段,大宗战略矿产资源是缩小东西部和城乡差异,基本实现社会主义现代化的物质基础。在较长时间内(至少到2035年经济发展的第一阶段),矿产资源需求仍将保持高位,而中国未来矿产资源储量总体增量不足,供需矛盾突出,长期大量依赖进口的局面难以得到根本改善。铁、铜、铅、锌、铝、锰、镍、钾盐等大宗矿产对外依存度多接近或超过50%的警戒线,受制于人的程度和安全风险不断增大。此外,国内大宗矿产资源分布非常不均衡,东西部差异明显,西部资源分布高度集中,但产业集中度低,开发利用条件差。

(2)关键矿产资源是支撑战略性新兴产业发展的重要原材料。其需求呈跳跃式增长,预计到2035年全球对以稀土、稀有、稀散、稀贵金属为代表的键矿产需求将有几倍到几十倍的增长,供需矛盾将十分突出。以美国为代表的西方发达国家针对高新技术产业发展的急需,纷纷提出了新的发展战略和计划。但目前中国关键矿产资源家底不够清、政策不明、开发利用和统筹规划还存在诸多不足,急需一系列有效的发展战略和规划。

(3)中国正在深入落实“一带一路”倡议,坚定推动构建人类命运共同体。但落实“一带一路”倡议还缺少良好的矿产资源合作,对境外地质矿业合作工作以及如何最大限度利用境外矿产资源等问题还缺少有效措施和政策法规保障,许多中国企业由于对国际规则(特别是矿业权运作等)不熟悉,可能导致较大损失。中国海外资源来源相对单一,存在重大潜在危机;海外资源供应系统脆弱,运输航道不畅。

(4)新时代中国现有的矿业相关政策急需调整。例如,环保、自然保护区划分与矿业政策缺乏科学衔接和有机协调,缺少地区差异化分析和因地制宜的管理方案,不利于经济发展与生态文明建设的有效实施。此外,作为中国优势矿产的稀土金属属于“卡脖子”的资源,但相比发达国家,中国对稀土资源的开发利用还缺乏完整、系统、成熟的战略抉择,始终处于争论不休状态。在全球一体化的市场经济条件下,如何突破不相符的旧有体制、机制、规章制度等羁绊,修改和完善相关法律、法规、行业标准等,已是当务之急。

4.2 矿产资源安全供应的主要建议

(1)在对新的国际政治经济形势以及中国目前经济发展瓶颈客观准确的分析下,重新对中国的矿产资源做短、中、长期战略性评估并制定发展战略。中国的大宗矿产资源(如铁、铜、铝、金、铀、钾盐等)多为紧缺矿产,主要资源的探明储量远低于世界人均水平,对外依存度高。而中国的关键矿产资源可分为3类:一是资源短缺型矿产,如钴、铼、铂族元素等;二是技术制约型矿产,如铍、钛、镓、铌等;三是能够调控国际市场的优势矿产,如稀土元素、铟、锗等。因此,急需制定与各自相对应的发展战略,开展勘查、评价和评估,确保资源安全,为中国经济可持续发展提供资源保障;构筑中国战略性矿产资源安全大数据信息情报中枢系统,集成综合研究、战略推演与会商平台,形成常态化预警机制,提升危机应对协同能力。

(2)建立国家层面统一的矿产资源勘查开发和商业行为的运行机构(类似中国海油、中国石油、中国石化等三大国有石油公司),迅速改变金属矿产中的不合理管理和无序竞争。为服务中国经济高速发展,要加快完善资源环境相关政策法规。在国家“五位一体”生态文明建设的大背景下,加快修订《中华人民共和国矿产资源法》等相关法律法规,建立矿产资源和环境保护的统一法规体系,约束各级管理机构 and 国内外企业的行为。加强绿色矿业和循环资源利用的研究与推广,守住中国矿业产业链和庞大工业体系源头的矿产资源供应安全底线,避免国内矿业过快萎缩,谨防国内出现矿业“空心化”,确保国内资源供应能力保持在安全水平之上。

(3)设立摸清关键矿产资源家底和需求的国家专项计划,为产业升级提供资源保证,提升中国对全球关键矿产资源的影响力。中国一方面关键矿产资源分布不够清、潜力不明,另一方面稀土金属及部分稀散金属资源虽然具有绝对优势,但尚未获得应有重视,开发利用技术水平不高。应将研究新兴关键矿产形成规律和超常富集机理、研发针对性的分析与勘查技术、寻找更多新兴关键矿产资源、增加战略储备、拓展关键矿产应用技术等作为重大国家任务。

(4)对用好国外矿产资源的政策法规进行修订、完善和设立示范区;建立健全矿产资源国家交易中心,调节国际和国内矿产交易;设立上海合作组织间矿产勘查多边合作基金,组建和完善国际矿业权交易机构,促进矿产品交易人民币结算业务。由于国际政治经济格局的变化和技术进步,全球资源配置

体系正在发生变化,所以应提前布局,加强地质调查工作并走向全球,掌握全球矿产资源真实详细信息。考虑到历史原因,中国目前在国际矿产资源市场还面临诸多不利因素,影响力亟待提高。中国在全球矿业信息、矿产品定价权、人民币结算等方面还远落后于西方发达国家,对全球矿产资源控制力不足。上海合作组织相关国家矿产资源丰富,互补性强。矿业也是上海合作组织相关国家重要的支柱产业。因此,加强上海合作组织国家间矿产资源供需合作,对于促进区域经济发展意义重大。建议在西安建立丝绸之路国际矿业权交易机构,培育上海合作组织国家间的信息畅通、金融互通和法律相通,助推各国经济社会稳定发展。

(5)建立南疆矿产资源产业园示范区,拉动新疆经济快速发展,以矿促稳,开矿兴疆,并发挥“一带一路”倡议核心区的带动作用。根据中国矿产资源东西部分布差异,有必要强化“西部大开发战略”。建议优先依托南疆丰富的资源优势,如近年来新发现的火烧云超大型铅锌矿、玛尔坎苏超大型富锰矿、大红柳滩大型超大型铍锂矿等,建成南疆大型金属矿产资源基地,形成特色的矿产开采与精深加工产业链,大力发展高端锰铁合金、特种钢、锂电池等高附加值产品,形成南疆脱贫攻坚的重要经济增长点,形成可持续发展的新兴工业化体系。西部地区作为中国丝绸之路经济带向西开放的前缘,“一带一路”倡议背景下整体开放水平的提高将有利于中国通过陆路与中亚、西亚等地区开展紧缺矿产资源开发合作。加强大宗矿产和关键矿产的国内外大型资源基地建设,制定国家战略规划和发展政策,完善市场勘查开发规范和政策法规。鼓励国内企业走出去,以多种方式参与全球矿产资源的勘查开发,尽可能在全球范围特别是“一带一路”倡议沿线国家,开展矿产资源开发合作,增强抵御各种风险的能力。

5 在中国开展关键矿产资源调查和基础研究的必要性

5.1 建议开展全国关键金属资源调查

1975 年秋,为了迅速恢复经济,国务院决策酝酿并在 1976 年掀起了地质、矿业、冶金系统以及中国科学院和高等院校等单位参加的全国富铁矿会战。富铁矿会战由高层决策、统一部署、协同作战,取得了很大成果,锻炼了队伍,摸清了家底,也提高了科研水平,是一次非常宝贵的实践。目前中国的地质勘探在矿产资源方面的布局与投入非常欠缺,

零星布局能够解决的问题有限,造成矿产资源特别是战略性矿产资源方面家底不清,很难给国家提出有效及时的战略建议,进而影响了科研水平和教育水平,甚至影响到高等院校的招生与学生就业。基于此,建议国家决策部门认真分析形势、听取意见,布局 and 开展类似富铁矿会战的重要项目,由中国地质调查局作为重要牵头单位,对中国关键矿产资源的现状、种类、分布、储量、赋存状态和开采状况进行全面调查;建议中国科学院和高等院校积极参与并主动立项,切实提高研究水平,科学是第一生产力,基础研究会极大地提高矿产调查与勘探水平;建议把矿产调查与选冶行业的接口作为重要突破点,带动全链条的攻关,解决关键金属(包括材料)的关键难题,积极调动企业积极性,让企业成为关键金属矿产资源调查的生力军。

5.2 深入开展关键矿产资源的基础研究

2019 年,国家自然科学基金委员会通过了“战略性关键金属超常富集成矿动力学”的重大研究计划项目,为开展关键矿产资源的基础研究奠定了基础^[12]。中国科学院和科学技术部也在基础研究和测试的突破方面有所立项。这里对重大研究计划项目做一个简单介绍。

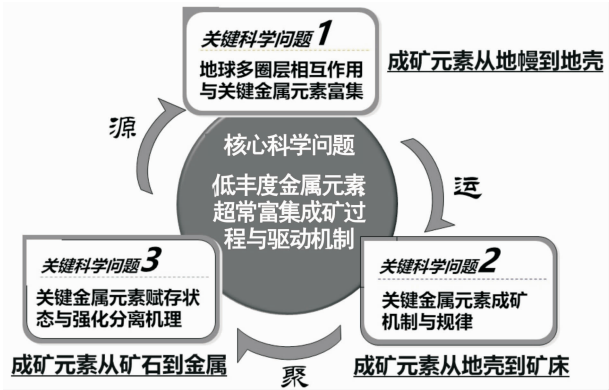
5.2.1 宗旨

以国家重大需求作为核心牵引,瞄准关键性矿产资源所拥有的战略价值和科学价值,提炼和把握关键金属成矿的重大科学问题,实现矿床学研究的新突破,推动地球科学发展。总体科学目标是:揭示关键金属元素超常富集成矿的苛刻条件,建立关键金属超常富集成矿理论,实现成矿理论突破;揭示关键金属成矿规律,确定关键金属元素矿床新类型,实现指导找矿突破;查明微观尺度关键金属元素赋存状态,攻克关键金属强化分离理论瓶颈,实现分离理论突破。

5.2.2 核心科学问题

关键金属元素有 3 个共性特征,可归纳为“稀、细、伴”。传统大宗金属(如铁、铝等)地壳丰度较高,正常富集几倍到几十倍即可成矿。而大多数关键金属元素的地壳丰度很低(一般为 10^{-6} 级以下),需要富集百倍甚至千倍才能形成可供开采的矿床,显而易见,关键金属成矿这一过程是“超常富集”。那么,到底是什么地质过程驱动和地球化学机制导致这些元素的超常富集? 关键金属元素在地幔和地壳中的含量差异很大,其成矿作用与多圈层物质循环过程有何关系? 目前,对关键金属元素的地球化学性质

及行为研究还较薄弱,成矿过程与机理争议极大。由于先天不足,许多关键金属元素多为共伴生产出或依附主元素成矿,难以形成独立矿床,是什么因素控制了这些元素的共生与分异行为?许多关键金属元素在自然界常以吸附、类质同象、固溶体和细小矿物形式存在,对其赋存状态认识的不足极大增加了其高效利用与强化分离的难度。因此,重大研究计划项目的核心科学问题是低丰度金属元素超常富集成矿过程与驱动机制。针对核心科学问题,凝练了 3 个关键科学问题(图 4)。



图件引自文献[12]

图 4 重大研究计划项目的关键科学问题

Fig. 4 Key Scientific Problems of Major Research Plan Project

5.2.3 关键科学问题

(1)地球多圈层相互作用与关键金属元素富集。关键金属元素在地壳的丰度非常低,关键金属矿床是元素超常富集的特殊地质体。目前关于关键金属元素地球化学行为的研究程度整体上偏低,因此,关键金属元素在多圈层相互作用过程中的地球化学行为和富集过程是亟待解决的首要科学问题,具体包括以下 3 个方面。①关键金属元素的地球化学行为:由于关键金属元素通常具有超低丰度,成矿通常经历复杂过程,深受其地球化学行为的制约。近年来,分析测试技术特别是原位微区分析技术的进步,为深入开展关键金属元素在复杂体系和复杂地质过程中的地球化学行为研究提供了可能。②关键金属元素的壳幔循环:壳幔循环是地球上最重要的元素加工过程。元素通过地幔岩浆活动进入地壳,然后通过板块俯冲、岩石圈拆沉等进入地幔,该过程导致不相容元素在地壳中不断富集,相容元素则在地幔中富集。但关键金属元素如何通过壳幔循环过程、在何种特定地质条件下才能富集的机制目前尚不清楚。③关键金属元素的表生循环:一些关键金属元

素在表生过程中得以富集而成矿。地球表面有很多氧化-还原界面,很多关键金属元素都是变价元素,对氧逸度的变化十分敏感,如钴、镍等关键金属元素在氧化-还原过程中可以高度富集;风化淋滤过程是另一个重要的表生循环过程,稀土、锂、镓、锆、钨、铋、钼等关键金属元素在这一过程中可以大幅度富集。但目前对大多数关键金属元素在表生过程中的循环研究尚处于起步阶段。

(2)关键金属元素成矿机制与规律。矿床的形成是多个地质-物理-化学作用的综合结果,查明关键金属矿床特征、分布规律及控制关键金属矿床形成的地质-物理-化学过程,是理解关键金属元素成矿规律与形成机制的关键。由于多数关键金属矿床品位低,分布高度不均一,成矿时限难以直接精细约束,所以全球范围内关键金属矿床成矿规律与机制研究还存在较多尚未解决的重要问题。如不同构造背景对关键金属矿种是否有控制作用?地球不同演化阶段是否存在不同关键金属矿种形成的专属性?控制不同关键金属矿床形成的关键地质过程有哪些?岩浆/热液演化过程中,关键金属元素的地球化学行为及分配系数是什么?关键金属元素迁移的络合物形式有哪些?不同性质流体中影响关键金属元素溶解度的主要因素有哪些?伴生的关键金属元素是否具有与主元素类似的沉淀机制?回答上述问题,需进一步开展两个方面的深入研究:一是由构造背景和物质基础等控制的关键金属元素时空分布规律研究;二是由岩浆/流体性质和物理化学条件、水岩反应等因素控制的矿化特征(元素组合、矿物类型、赋存状态、矿床类型、定位空间、成矿专属性等)研究。

(3)关键金属元素赋存状态与强化分离机理。关键金属元素常伴生主要成矿元素在一些特定矿床中相对富集而具有开采和综合利用价值,但需要揭示关键金属元素共生分异规律,明确不同关键金属元素共伴生富集成矿的主要控制因素。关键金属元素在矿物中的赋存状态既是揭示成矿机制的有效信息,也是影响矿床有效利用的重要因素。因此,需要系统解决关键金属元素在矿物中的微观赋存状态和赋存机制,查明不同关键金属元素在不同成矿条件下以何种形式在矿物中赋存,形成何种矿物,是否具备特殊材料开发意义,能否推动发现新的成矿类型。例如,中国稀土资源丰富,风化淋积型重稀土矿是中国最有特色和控制力的资源,为更高效开采和利用这一优势矿产资源,需要揭示稀土元素与风化壳黏

土的紧密关系,从离子、分子和矿物多尺度解决稀土元素在黏土矿物表面的赋存机制问题。战略性关键金属矿床品位低,分离提取难度大且条件苛刻,需要进行基于多元多相复杂体系的界面特征与功能调控理论和方法研究,进行基于分子识别的选冶药剂分子设计,建立关键金属元素界面性质差异性放大与关键金属组分富集新方法;应用新介质及外场的优异特性,开展非常规介质与外场强化新体系新方法研究,构建关键金属资源转化的非常规介质/外场原子经济性反应/分离新方法;通过多元金属组分物相与相结构转变规律及调控机制研究,揭示复杂多元冶炼体系中新相生成及长大、相分离热力学和动力学规律,建立相间化学势差异性放大的分离方法。

5.2.4 主要研究内容

(1)关键金属矿床的成矿背景与元素行为。查清关键金属矿床形成的大地构造背景以及成矿元素在壳幔相互作用过程中的富集机理,是理解关键金属成矿过程及成矿规律的基础。其主要包括以下 3 个方面:大陆演化中的重大地质事件及其构造环境;多圈层相互作用过程中关键金属元素富集机制;关键金属元素地球化学行为的实验模拟。

(2)关键金属矿床的成矿过程和富集机制。低丰度关键金属元素富集成矿需要非常苛刻的地质条件,通常是元素性状、源区演化、成矿驱动力、元素迁移沉淀条件、围岩性质与环境等要素最佳配合的结果。其主要研究内容包括以下 4 个方面:岩浆/热液演化对关键金属元素超常富集的控制;中低温热液成矿过程中关键金属元素的运移与富集机理;表生环境下关键金属元素成矿机理,矿床形成的最佳氧化-还原条件、古气候条件、古地理条件等;表生关键金属成矿的精细过程。

(3)关键金属重要成矿区带和矿床时空分布规律。厘定不同类型关键金属成矿省及成矿带尺度的时空分布,是查明区域成矿规律的关键。其主要研究内容包括以下 3 个方面:主要关键金属成矿带的时空分布规律;控制关键金属矿床时空分布的关键因素;主要关键金属矿床区域成矿模型。重点开展古亚洲洋成矿域、环太平洋成矿域和特提斯成矿域中典型成矿区带和典型矿床矿化特征及成矿规律对比研究,若干重要关键金属国外典型成矿区带的国际对比研究,重要关键金属矿床区域成矿模型研究。

(4)关键金属元素赋存状态和共生分异机制。关键金属元素的赋存状态是矿床成矿机制和矿床有效利用的基础,将从不同尺度加强成矿过程中稀有、

稀土、稀散和稀贵金属元素赋存状态的精细研究。其主要包括以下 3 个方面:在矿床尺度上,查明关键金属元素之间、关键金属元素与其他成矿元素之间的共生组合;在矿物尺度上,通过对不同类型矿床、不同成矿阶段中(含)关键金属元素的独立/非独立矿物的系统分析,揭示元素在矿物中的赋存状态和矿物结晶行为;在矿物表面尺度上,加强表生风化成矿过程中关键金属元素在矿物表面吸附特征研究。

(5)关键金属选冶基础理论。在关键金属矿物成相条件、元素赋存形态、矿物性质与元素分离关联性分析的基础上,开展基于元素赋存状态和矿物学的强化分离机理及调控机制研究,是实现关键金属复杂矿产资源高效清洁利用的基础与关键。其具体包括以下 3 个方面:多元多相复杂体系的界面特征与功能调控理论与方法;非常规介质及外场强化多元组分非均相反应;多元金属组分物相与相结构转变规律及调控机制。

5.2.5 目标

(1)预期在成矿理论、有效指导找矿实践、资源高效利用方面实现若干突破。

(2)预期对下列问题予以回答:①提出中国优势关键矿产资源清单;②在关键金属矿床新类型和关键金属元素强化分离理论瓶颈方面做出若干创新成果;③为建立若干关键金属资源基地提供理论支撑;④形成相关学科具有国际竞争力的人才队伍。

欣逢著名学府长安大学七十周年华诞,我和我的学生胡波博士撰写这篇论文以表达庆贺之意,祝长安大学秉持“弘毅明德,笃学创新”的校训,发扬“自强不息、求真务实、团结奋进、追求卓越”的精神,在教书育人和科学研究方面继续取得骄人成就!当年国家以西安地质学校为基础,从成都地质学院、长春地质学院和西北大学地质学系等高校院系抽调人马,组建了西安地质学院。我的老师郑兆中、于凤池、安三元、王战等以及我的大学同学魏刚锋、魏昇前等一批西北大学老师,都调到了西安地质学院,并由原西北大学副校长张伯声院士担任院长。一些基础地质学科包括构造、岩石、矿物和矿床等,西安地质学院和西北大学在教学和科研上一脉相承。在中国科学院地质与地球物理研究所工作期间,我遇到了很多毕业于西安地质学院以及后来的长安大学的优秀同仁,诸如孟庆任、肖举乐、张连昌、申萍、汤艳杰、张晓晖等;也有带的学生是长安大学毕业的,及毕业后到长安大学工作的,如张艳斌、胡波、吴佳林、周艳艳等。我与他们在科研的道路上亦师亦友、披

荆棘、共同前行。我与长安大学老师一起合作过很多研究课题,也应邀参加过长安大学有关项目的立项和评审工作,让我有机会向汤中立院士、彭建兵院士、李荣西教授等当面请教和学习。在这里,我还要感谢与我一起开展矿产资源咨询调查以及国家自然科学基金重大研究计划项目研究工作的各位同事和学生,特别感谢王安建、胡瑞忠研究员的讨论以及李文渊研究员的帮助。

参考文献：

References：

[1] 国家自然科学基金委员会,中国科学院. 中国学科发展战略:大陆成矿学[M]. 北京:科学出版社,2020.
National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences. China's Scientific Development Strategy:Continental Mineralogy[M]. Beijing:Science Press,2020.

[2] 王安建,王高尚,陈其慎,等. 矿产资源需求理论与模型预测[J]. 地球学报,2010,31(2):137-147.
WANG An-jian,WANG Gao-shang,CHEN Qi-shen, et al. The Mineral Resources Demand Theory and the Prediction Model[J]. Acta Geoscientia Sinica,2010, 31(2):137-147.

[3] 翟明国. 矿产资源形成之谜与需求挑战[M]. 北京:科学出版社,2016.
ZHAI Ming-guo. The Formation Mystery of Mineral Resources and Its Demand Challenge[M]. Beijing: Science Press,2016.

[4] 中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心. 2018 年全球矿产资源形势分析报告[R]. 北京:中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心,2019.
Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences. Analysis Report of Global Mineral Resources Situation in 2018[R]. Beijing:Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences,2019.

[5] 中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心. 2019 年全球矿产资源形势分析报告[R]. 北京:中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心,2020.
Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences. Analysis Report of Global Mineral Resources Situation in 2019[R]. Beijing:Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, Chinese Academy of

Geological Sciences,2020.

[6] 王安建,王高尚. 矿产资源与国家经济发展[M]. 北京:地震出版社,2002.
WANG An-jian,WANG Gao-shang. Mineral Resources and National Economic Development[M]. Beijing: Seismological Press,2002.

[7] 翟明国,吴福元,胡瑞忠,等. 战略性关键金属矿产资源:现状与问题[J]. 中国科学基金,2019,33(2):106-111.
ZHAI Ming-guo,WU Fu-yuan,HU Rui-zhong, et al. Critical Metal Mineral Resources: Current Research Status and Scientific Issues[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China,2019,33(2): 106-111.

[8] 毛景文,袁顺达,谢桂青,等. 21 世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展[J]. 矿床地质,2019, 38(5):935-969.
MAO Jing-wen,YUAN Shun-da,XIE Gui-qing, et al. New Advances on Metallogenic Studies and Exploration on Critical Minerals of China in 21st Century[J]. Mineral Deposits,2019,38(5):935-969.

[9] 翟明国,金之均,胡瑞忠,等. 矿产资源科学发展战略(2021~2035)[R]. 北京:中国科学院,2020.
ZHAI Ming-guo,JIN Zhi-jun,HU Rui-zhong, et al. Strategy for Scientific Development of Mineral Resources(2021-2035)[R]. Beijing:Chinese Academy of Sciences,2020.

[10] GULLEY A L,NASSAR N T,XUN S. China, the United States, and Competition for Resources That Enable Emerging Technologies[J]. PNAS,2018,115 (16):4111-4115.

[11] 翟明国. 新常态下中国矿产资源需求、安全和风险预判(咨询报告)[R]. 北京:中国科学院,2019.
ZHAI Ming-guo. Requirements,Safety and Risk Prediction of Chinese Mineral Resources in New Normal (Consulting Report)[R]. Beijing:Chinese Academy of Sciences,2019.

[12] 国家自然科学基金委员会. 战略性关键金属超常富集成矿动力学[R]. 北京:国家自然科学基金委员会, 2019.
National Natural Science Foundation of China. Super-normal Enrichment Metallogenic Dynamics of Strategic Critical Metal[R]. Beijing: National Natural Science Foundation of China,2019.