



王登红, 矿床地质专家, 二级研究员, 李四光地质科技奖获得者。现任中国地质科学院矿产资源研究所所长, 自然资源部深地资源成矿作用与成矿预测重点实验室首席科学家, 《中国矿产地志》总主编, “稀有稀土稀贵战略性矿产研究团队”自然资源部创新团队带头人。主要研究方向为重要矿产成矿规律及三稀资源调查评价。

# 中国战略性关键矿产勘查开发进展与新一轮找矿的建议

王登红, 代鸿章, 刘善宝, 王成辉, 于扬\*, 赵芝

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** 面向国家重大需求, 从矿种、政策等方面梳理了战略性关键矿产的国内外研究新动向, 总结了战略性关键矿产勘查开发中成矿理论、找矿方法、勘查技术、采选冶技术、矿山环境监测等方面的现状指出了目前存在优势矿产少、好矿少、品位低、探明程度低、矿床成因机制不明、独立矿床少、样测手段有限等问题, 分析了战略性关键矿产的资源潜力, 在此基础上提出了对战略性关键矿产找矿勘查与管理的建议如加强相关法律制度建设、鼓励民间储备并严格管理控进口、加快推进新一轮找矿突破战略行动等。

**关键词** 战略性矿产; 关键矿产; 新兴矿产调查; 勘查开发进展; 找矿突破

## 1 战略性关键矿产的国内外动向

自特朗普政府和拜登政府上台以来, 美国遏制中国发展的战略昭然若揭并不断升级, 矿产资源尤

其是战略性矿产资源成为一种“战略武器”。日本、韩国及其他西方国家亦步亦趋, 跟中国唱起对台戏。美国在2018年挑起新一轮贸易战, 主要针对中国, 并列出了针对中国的35种“关键矿产”, 要求

收稿日期: 2023-08-16; 修回日期: 2023-12-23

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20230034, DD20230290, DD20221695); 国家重点研发计划项目(2021YFC2901900, 2021YFC2901905)

作者简介: 王登红, 研究员, 研究方向为重要矿产成矿规律及三稀资源调查评价, 电子信箱: wangdenghong@vip.sina.com; 于扬(通信作者), 副

研究员, 研究方向为三稀矿产资源调查评价, 电子信箱: yuyang\_cags@sina.com

引用格式: 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 等. 中国战略性关键矿产勘查开发进展与新一轮找矿的建议[J]. 科技导报, 2024, 42(5): 7-25; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.05.001

美国要保障自我供应,企图导致中国产业与国际产业“脱钩断链”,在全球一体化的大背景下将中国“孤立”出去。我们必须知己知彼,才能从容应对。

### 1.1 矿种对比

战略性矿产一般指战略性新兴产业所必需的矿产资源,包括用量巨大的大宗矿产和用量较小但不可或缺的关键矿产。无论是战略性矿产还是关键矿产,都是从战略层面来界定的,并没有严格的学术定义,也不是矿产资源本身的种类划分,但最终都必须落实到具体矿种。不同历史时期、不同的国家,对于战略性矿产、关键矿产、战略性关键矿产并没有统一的定义,也不太可能取得一致的意见。国外还常用“危机矿产”一词。美国、日本、英国及欧盟等国家和组织,对于战略性矿产及关键矿产的理解和定义也不相同,其中,美国发布的《危机矿产清单草案》将美国危机矿产的矿种界定为铝土矿、锑、砷、钒、铍、石墨等35种。中国学术界有时也将“危机矿产”等同于“关键矿产”,国内媒体报道也往往将战略性矿产与关键矿产等同看待,这是因为中国正处于战略性新兴产业快速发展的上升期,既需要铁、铜、石油、煤等大宗矿产作为基础产业的支撑,也需要稀土、钨、锂、镍、锑等关键小金属的加持,而稀土、钨、锑等中国具有资源优势以及锂、钴、镍等中国不具有资源优势的关键小金属又成为国际关系的试金石,被社会大众和战略性新兴产业高度关注。例如,中国对澳大利亚铁矿石的进口量很大,近年来又从澳大利亚大量进口锂精矿,而澳大利亚是美国“伙伴”,矿产品成为衡量两国关系的试金石和博弈品。中国的商务部和海关总署在2023年7月3日发布关于对镓、锗相关物项实施出口管制的公告,就在国内外引起了“轩然大波”。因此,小金属也具有战略性意义,也可以被当作战略性矿产。

从字面理解,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作用的矿产资源<sup>[1]</sup>。具体哪些矿产资源属于关键矿产,这是一个在不同国家、不同时段、不同场合会给出不同界定的动态概念。因为不同国家或者同一国家所处的经济、技术发展阶段不同,采取的发展战略不同,所需要的关键矿产自然也不同。一般来说,影响或制约一个国

家经济发展的紧缺矿种或者优势矿种,会被认定为关键矿产。通常也被形象地描述成在国际上“被别人卡脖子”或“卡别人脖子”2种状况(具“杀手锏”效应)。因此,无论是维系国民经济正常运行的支柱性矿种还是支撑高新技术和战略性新兴产业发展的小矿种都可归属战略性矿产。如,铜和锡开启了青铜时代,铁开启了农耕文明时代,锗和硅开启了微电子时代和信息时代,铁属于大宗矿产,而锗属于稀散金属,但毫无疑问都具有战略性意义。当前,中国面临深刻变革以及极为复杂的国际形势,也面临一系列的战略机遇,需要新的关键矿产来支撑战略性新兴产业的发展。严格来说,只有在人类社会历史进程中发挥过显著的、关键性作用的矿产资源才可能算得上“战略性关键矿产”。例如,会不会使用石器是人类区别于猿的关键之一,而铜、铁、煤、石油的使用,都在人类社会历史发展上起到过关键作用,铁、煤、石油一起可以作为近现代工业化国家必需的战略性的矿产资源。在第四次科技革命中,一部分金属矿产华丽转身,由“用处不大”“用量很小”变成了不可或缺,甚至会改变技术格局、产业格局和经济格局。例如,锂属于稀有金属,在20世纪70年代还主要以配角的身份用于“拜耳法”炼铝等冶金工业,到了2010年之后,随着新能源汽车和个人电器用充电锂电池的普及化,锂在储能设备制造领域异军突起,需求量猛增,并在整个地勘行业不景气的大背景下带来了一抹亮色,尤其是2017、2018年几乎全世界都在找锂<sup>[2-3]</sup>,而2021年下半年以来,全球又进入“抢锂”阶段,“卖汽车不如卖电池,卖电池不如卖锂矿”。但是,在“工业4.0”或第四次科技革命的大趋势中,人们的目标是实现可控核聚变的商用化,即把“氢弹爆炸的基本原理应用于商业发电”,从而达到“从根本上改变能源结构”的目的,而这一目标正是第四次工业革命的标志之一。因此,将锂作为“21世纪的能源金属”以及战略性关键矿产,也是理所当然的。

### 1.2 国内外相关政策与战略策略的对比

鉴于战略性矿产、战略性关键矿产、关键矿产或者危机矿产,都不是单纯地质专业的术语,而更多地带有浓厚的政治色彩,因此,国家政策对于矿



产,使澳大利亚成为世界领先的关键矿产勘查、开发、生产和加工大国,成为支撑农业、航天、国防、可再生能源和通信等产业发展所需矿产的供应大国。

5) 联合国环境保护署(UNEP)发布《未来持续技术用关键金属及其循环回收潜力》的调研报告,其要点是未来可持续发展技术,包括可再生能源及节能技术。这些技术必须利用铟、锗、钽、铂族金属(特别是钌、铂、钯)、碲、钴、锂、镓、稀土金属及其他一些“高技术金属”。这些金属被归类为“绿色稀有金属”,它们是清洁技术创新的基础。

6) 中国的战略性关键矿产种类齐全,但资源禀赋不佳,大部分资源难以满足快速发展的需要。《全国矿产资源规划(2016—2020)》将石油、天然气、页岩气、煤炭、煤层气、铀、铁、铬、铜、铝、金、镍、钨、锡、钼、锑、钴、锂、稀土、锆、磷、钾盐、晶质石墨和萤石这24个矿种(组)列为战略性矿产,但没有明确指出其中的哪些属于“战略性关键矿产”。一般认为这24个矿种(组)中的铀、铬、镍、钨、锡、锑、钴、锂、稀土、锆和萤石符合“用量不大但关键”的内涵,可以界定为“战略性关键矿产”。其实,类似石墨这样的非金属矿产资源并不是因为其资源本身越来越稀少,或者像铌这样被巴西冶金和采矿公司(CBMM)绝对掌控(世界上85%的铌都产自阿腊夏一个矿床,产能最大,成本最低,可以垄断上百年的世界需要),而是由于“石墨烯”新材料及相关产业的兴起而再度引起重视的。结合中国的实际情况,笔者<sup>[4]</sup>认为,没有必要固定化、模式化地给出一个“关键矿产清单”,需要高度关注的恰恰是关键矿产的新用途。美国能源部2023年8月初首次将铜加入美国关键材料清单,依据《通胀削减法案》获得税收减免。只有不断地发现其新用途,只要政府主管部门和社会各界能够意识到“关键矿产资源是在关键的时刻发挥关键的作用,在关键的时刻是买不来的,在关键的场合是无法替代的”这样的理念,中国在第四次科技革命中抓住机遇、实现“择道超车”是有可能的。

相对于中国门类比较齐全的工业部门以及蓬勃兴起的战略性新兴产业,中国关键矿产的种类实际超过《全国矿产资源规划(2016—2020)》中的24

种,甚至超过笔者<sup>[4]</sup>提出的64种,而每个矿种在战略性新兴产业中都能起到“关键作用”,如前文提到的“MR造影剂”中唯一的金属元素钆(Gd,重稀土之一)。未列入其中的铝土矿、锰和钾在中国属于大宗紧缺矿产,砷和钼在中国有一定的资源优势。锑、汞、锡在中国具有传统优势,以往被称为“有色金属”,但近年来已经开始进口,优势地位有可能失去,需要高度重视。另外,钼在中国属于优势矿产,但铌需要从钼矿中回收,因此钼也不可或缺。

相对于国外尤其是美国,不断通过修改法律来加强对战略性矿产尤其是关键矿产的管控,中国在这方面的管控还是十分薄弱的。尽管中国的商务部和海关总署于2023年7月3日发布关于对镓、锗相关物项实施出口管制的公告,但相对于美国从立法的角度来强化关键矿产的重要性,几乎是小巫见大巫。中国在这方面的研究十分薄弱,无法在法理上占据先机,以至于无论是2011年就有关稀土问题与WTO申诉的失败,还是在铁矿石定价方面的“一败涂地”,或是当今在锂、钴、镍等关键金属进出口方面的很多被动,都迫切需要国内健全法律制度,以应对复杂的国际形势。

美国政府1939年制订了《战略性和危机性原材料储备法》,将矿产资源的危机性与战略性收入联邦法典。该法认为,战略性和危机性原材料,一般指在战争或者国家紧急情况时需要的原材料。这是基于美国在第一次、第二次世界大战中对于战争走向及关键金属发挥的关键作用而得出的结论,而且上升为国家意识。进入21世纪,美国对于关键矿产的研究与保供丝毫没有懈怠,包括加紧立法。如,2005年,美国修订了《战略性和危机性原材料储备法》。2010年底,美国科技政策办公室牵头组建了专门的关键和战略矿产供应链委员会,负责关键材料研究和相关政策的协调;美国地质调查局则加强了关键矿产信息的采集与分析,以及对美国及全球“未发现矿产资源”和“高技术矿产”的调查评价;美国国防部启动了关键矿产供应链分析项目,重点是稀土。2010年,美国国家科学技术理事会(NSTC)成立了危机矿产和战略矿产供应链委员会(CSMSC),并与美国白宫科学技术政策局

(OSTP)一起发布研究报告,强调危机矿产是一些为制造业提供最基本服务的矿种产业链,这个产业链一旦脆弱乃至中断,将会对国民经济或国家安全带来严重后果;战略矿产是一系列危机矿产,是国防安全的重要支柱。2013年,美国国防部认为,战略矿产和危机矿产是指在国家紧急状态期间,需要供军事、工业和平民所需,而国内不能满足需求的矿产。2015年,美国国会研究部(CRS)发布《中国资源产业政策背景下美国获取战略性和危机性矿产资源的途径》的研究报告,认为过去20多年,美国从中国进口危机矿产的数量在不断增加。

在中国,国务院2010年发布了《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》。2011年,财政部和国土资源部联合发布了《2011年矿产资源节约与综合利用专项资金申报指南的通知》,战略性矿产资源获得国家专项资金的支持,旨在通过“以奖代补”奖励资金重点支持战略性矿产资源企业运用新技术、采用新工艺、提高矿产资源“三率”,达到矿产资源节约与综合利用。这是国家层面上第一次将三稀资源作为一个整体概念提出来而不再作为其他矿种的“附属品”。同年,国务院下发了《国务院关于促进稀土行业持续健康发展的若干意见》。在2016年4月发布的《国土资源“十三五”规划纲要》中明确要“加强稀有稀散金属等战略性新兴产业矿产的保护”“以能源、紧缺及战略性新兴产业矿产为重点”深入实施找矿突破行动、“加强油气、页岩气、铀矿、战略性新兴产业矿产等调查评价”,而《全国矿产资源规划(2016—2020)》将石油等24个矿种列为战略性矿产,并进一步明确要“保障战略性新兴产业矿产的供应”。2016年底,国家发布《“十三五”战略性新兴产业发展规划》,相关部门也制定了《战略性新兴产业重点产业和服务指导目录》。2020年10月20日,国务院发布了《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》,明确指出中国将进入新能源汽车加速发展新阶段。

### 1.3 意义

战略性矿产尤其是与战略性新兴产业密切相关的关键矿产具有十分重要的意义,其不但是经济技术转型升级的基础保障,在第四次科技革命尤其

是保障战略性新兴产业高质量发展方面具有突出的战略意义,在当前复杂的国际竞争及地缘政治关系中也具有特殊意义。例如,中国在传统汽车制造业方面始终落后于国际先进水平,但在新能源汽车领域异军突起,很快成为全球领头羊,而要保障新能源汽车产业链的安全,锂资源将成为决定新能源汽车领域战略发展成败的关键。国外很可能通过掐断锂资源的供应来打压中国新能源汽车的发展。类似操作,屡见不鲜。例如,美国打着“粮食贸易自由化”的幌子搞垮了苏联农业,使得苏联在1991年陷入“无处购粮”的窘境。美国孟山都转基因公司利用大豆种子打压阿根廷政府,收割阿根廷农民乃至全球农民的“韭菜”。同理,美西方试图利用锂资源来打压中国,而锂资源一旦断供,中国不但新能源汽车制造业将被“卡脖子”,就连传统汽车制造业也难以发展。届时,无论是新能源汽车还是传统燃油车,都将受制于人。因此,锂作为21世纪的能源矿产,锂资源的供应能否得到安全保障成为战略性新兴产业发展的关键要素。

自2022年2月24日俄乌冲突爆发以来,矿产资源的战略意义更加凸显<sup>[9]</sup>,已经不仅仅是“卡脖子”的利器,甚至直接变成了“战争武器”“战略资源”。假如没有天然气,俄罗斯何以能对抗西方世界的围攻?而没有天然气,欧洲如何过冬都成为难题。对于任何一个上亿人口的大国,一旦没有了天然气,人民群众如何保证日常生活都难以想象,更何况要保障产业链的安全乃至国家的安全。因此,一定要高度重视矿产资源的战略意义,当前迫切需要在加强已有矿山深部找矿的同时,不但要继续攻克共伴生资源综合利用的难题,还要对非常规的、新类型的战略性关键矿产资源(如硅酸盐型镍矿、沉积型锂矿)加强研究与勘查,从战略性关键矿产的关键应用方面寻找突破口,让战略性关键矿产在关键时刻发挥关键作用。

## 2 战略性关键矿产勘查开发现状

### 2.1 十年来进展概要

2011年起,中国地质调查局设立了“三稀金属

矿产战略调查”“大宗紧缺矿产和战略性新兴产业矿产调查工程”“战略性新兴产业矿产调查工程”“战略新兴产业矿产地质调查工程”等项目或工程,在全国 33 个单位 220 多人共同努力下,由中国地质科学院矿产资源研究所牵头,对中国的三稀金属矿产资源进行了迄今为止“最全面、最深入”(《中国矿业报》2016 年 12 月 31 日的评价)的一次调查研究<sup>[6-8]</sup>,在四川的甲基卡和加达、新疆砂锂沟以及攀西等地发现了一批以锂、稀土为主的战略性矿产资源基地,实现了从战略研究到战略侦查再到找矿突破的三跨越。无论是新疆的砂锂沟(瓦石峡南)还是四川的加达都已经由自然资源主管部门组织了探矿权的招拍挂,达到了“公益先行,商业跟进”的目的;首次建成了全球及国内“三稀调查成果数据库”;编制了《全国三稀矿产调查工作部署方案》,基本选定了三稀矿产调查评价的工作部署选区,包括华南幕阜山、西昆仑大红柳滩,川西甲基卡上升为国家规划区;坚持“资源调查与矿山环境监测空-天-地-人一体化”,实现了绿色勘查;“赣南钻”获得发明专利,可成倍加大淋积型稀土矿(原称离子吸附型稀土矿)的勘查深度,提升资源潜力数倍;提出了淋积型稀土矿单元素圈矿的方法;提出了三稀矿产资源储量动态计算的方法与技术,发明了“离子吸附型稀土矿快速经济评价方法”(专利);构建了离子吸附型稀土矿山环境评价模型和 SMAIMA 工作方法体系<sup>[8]</sup>;创新了中国独特的离子吸附型稀土矿产的“八多两高一深”成矿理论和大型伟晶岩型锂矿“多旋回深循环内外生一体化”成矿理论,建立了综合评价模型、“层脉组合勘查模型”及找矿标志;组建了被国土资源部领导称为“三稀别动队”的调查团队和自然资源部“稀有稀土稀贵战略性矿产研究”创新团队,为矿政管理提供了支撑服务。一些主要成果概述如下。

1) 初步摸清了全国战略性矿产的时空分布规律,实现从战略研究到战略侦查再到找矿突破的跨越,尤其是空白区取得找矿突破。

开展了对未查明三稀矿产资源勘查开发利用潜力和典型矿床的调查研究,提出了中国在三稀资源领域的应对措施,及时服务了矿政管理工作,为

中国制定三稀资源勘查开发战略和新兴产业发展战略提供了理论依据和资源保障,如在甲基卡大型锂矿资源基地,自 2011 年以来由国家出资、中国地质调查局项目累计施工 38 个钻孔,除了 2 个钻孔未见矿,8 个钻孔见到伟晶岩但锂不够品位之外,其余 28 个钻孔均钻遇矿体,验证了靶区,为国家提交了相当于 11 个大型锂辉石矿床的资源储量。四川马尔康加达矿区 8 个钻孔全部见矿,在 2023 年 8 月 13 日结束的探矿权招拍挂中,该成果的一部分探矿权(另外一部分在保护区内)拍出了 42 亿元的“天价”,为川西大型锂矿基地的建设提供了资源保障,同时也带动了四川省地方财政以及民营企业的投入,形成了川西找锂的高潮。再如,在云南发现黑妈锂云母型的锂矿,在福建发现永定大坪超大型花岗斑岩型钽矿,在江西九岭发现岩体型以磷锂铝石为主的锂多金属矿,共发现矿(化)点 23 处、找矿靶区 34 处、淋积型稀土矿产地多处。

期间还对一些重要矿区的尾砂资源进行了调查,为资源综合利用、矿山环境整治和绿色矿业可持续发展提供了依据。例如,四川某矿区堆放在河道中的稀土尾砂,稀土氧化物含量很高(0.78%~2.12%),均超过了现行工业指标的边界品位(0.5%~1.0%),且老尾砂的稀土含量高于新尾砂,尾砂中 Ba 含量可达 1.8%,Sr 含量超过 10%,Mo、Bi、Pb、Ag 等有用元素也发生了不同程度的富集,尤其是 Mo 达到边界品位(磁选后的尾砂 Mo 含量达到 2.275%),足以重新加以利用。

2015 年初步建成了涵盖国内外 3889 个矿产地的空间数据库和“三稀调查成果数据库”,集成了长周期矿产品价格数据库、采样测试分析数据库、文献数据库、进出口贸易数据库、全国稀土矿区遥感数据库,对今后中国三稀资源调查和管理具有重要意义。在此基础上研究了全球三稀资源分布特征及中国在全球资源格局中的地位,分析了全球三稀资源需求、利用技术和应用领域,探讨了与三稀金属资源有关的高新技术发展方向、动态和趋势,为中国战略性新兴产业发展布局提供了依据,有助于增强中国矿产资源的国际竞争力,有利于积极参与全球资源的优化配置,对于中国在 WTO 体制下三

稀矿产品贸易政策的制定及相关研究工作具有重要的参考价值。

2) 稀有稀土成矿理论、找矿方法和勘查技术不断更新,绿色勘查取得新进展,全力保障中国稀土的战略优势。

随着稀土勘查工作难度的不断加大,要想获得真实可靠的信息,需要不断创新,迫切需要在找矿勘探过程中引进新技术、新方法,以求达到效果最大化。为此,在赣南开展了典型离子吸附型稀土矿区赣南钻、浅钻、小圆井等勘查方法的对比研究,认为赣南钻为最佳的勘查技术手段,获国家实用新型专利1项。该技术的推广应用将显著增大对风化壳型矿床的勘查深度,新增资源潜力若干倍,具有重要的现实意义和战略意义。

在赣南、滇西某些离子吸附型稀土矿区开展了稀土总量和稀土浸取量圈矿方法的对比研究,创新提出了稀土单元素圈矿方法。以往以稀土总量为主要评价对象的圈矿方法存在不合理性,即当稀土浸取率高时把圈矿成非矿(即漏矿),当浸取率较低时又把非矿圈成矿。本次提出以稀土浸出量为主要评价对象的圈矿方法,不仅与当今的采矿工艺相符,圈定的矿体和计算的储量更有利于指导离子吸附型稀土矿床的开采。与稀土总量、稀土浸取量圈矿相比,稀土单元素圈矿更为精细、更加准确地反映出稀土单元素的资源分布状况,有利于进一步体现不同稀土矿床的经济价值,对稀土资源尤其是Eu、Dy等最关键稀土资源的寻找、管理与开发具有重要的意义。

除了将遥感找矿的方法继续运用于华南离子吸附型稀土矿区的调查评价、取得新发现之外,利用高光谱、雷达等多种遥感技术手段寻找伟晶岩型稀有金属矿床,在川西甲基卡、南疆大红柳滩等地也取得了新进展,获得多项发明专利——“基于高光谱的含锂辉石伟晶岩识别方法”和“基于多源遥感数据的伟晶岩型锂矿的找矿方法”等。面对环境保护的新要求,类似甲基卡这样的重点工作区不能实施槽探等常规的地表勘探工程,对深部钻探的验证要求也越来越严苛。通过多年努力,摸索出一套包括“牛粪找矿”在内的生物探矿技术和水化学找

矿方法<sup>⑨</sup>。钻探工作也创新了岩心钻探工作部署的技术思路,以进口钻机为主,日进尺可达100 m,效率很高;钻探设备实现模块化集成,容易搬家,机动灵活,还不用修路;采用清水钻进,不产生泥浆污染环境或导致牛羊因为“误食泥浆水”而死亡的社区事件,从而改变了钻探工作的被动局面,初步实现了高原绿色勘探。

在系统总结南岭地区花岗岩、火山岩和变质岩区离子吸附型稀土矿床内生矿化机制和外生成矿因素的基础上,提出了从“内生外成”的角度重新认识成因机制,认为富F-CO<sub>2</sub>-REE(REE为稀土元素)的流体交代作用是稀土内生矿化的重要因素,从而在理论上解释了成矿母岩的多样性,并根据交代作用的复杂性和不均一性解释了矿化类型的多样性和成矿强度的差异性。利用大数据统计了南岭花岗岩-风化壳的风化程度(风化蚀变指数CIA、烧失量LOI)与稀土元素富集程度之间的内在联系,指出了影响外生成矿的主要因素,当CIA为65%~85%时,风化程度与稀土含量呈正相关性,当85%<CIA<100%时,风化程度与稀土含量呈反相关,从而厘定了淋积型稀土矿成矿的最佳风化条件。利用大数据统计了风化壳中轻稀土和重稀土的分布规律,重点指出了重稀土的找矿空间。

3) 加强资源储量、矿山环境监测,提高稀土行政管理水平。

创新了稀土储量动态评价的技术方法,获软件著作权1项和国家发明专利“离子吸附型稀土矿快速经济评价方法”。以往在淋积型稀土矿储量计算过程中普遍使用的是水平投影地质块段法,但该方法对于矿体厚度、面积、品位的变化控制需要较高的探矿工程网度和较大的资金人力投入。以赣州某稀土矿为例,详细研究了采用克里格法对矿体顶底板和品位进行插值计算、建立矿体三维模型,引入矿产品市场价格数据进行敏感性分析,动态估算不同价格条件下的储量新方法,其结果与传统块段法估算结果基本相符,但工作效率更高,可以快速、经济地获得更合理的资源量数据。随着离子吸附型稀土矿山开采方法的改变,原地浸矿工艺得到推广,为了最优化设计采矿方案,在以“离子吸附型稀

土矿快速经济评价方法”为基础的三维估算系统中调整边界品位,可以随时根据市场价格的变化,动态地圈定矿体边界,迅速地计算出所圈定矿块各种经济参数,帮助矿山布置合理的采矿工程,为稀土资源的充分利用提供技术支撑。该方法在浙江、云南等地离子吸附型稀土矿区的调查评价过程中得到了应用,成效显著。

针对稀土矿山开采过程中的乱采滥挖现象,以赣南寻乌及定南地区为试点区域,基于最新高空间分辨率遥感数据,结合矿权资料建立了淋积型稀土矿山非法开采解译标志,开展了矿山非法开采遥感调查及监测研究,提出了今后监测的预警区域,获国家发明专利多项。针对离子吸附型稀土矿存在的土地荒漠化及水体污染问题,基于高分辨率遥感数据,提取了土地荒漠化较为严重的区域,评估了稀土矿开采周边河流的污染程度,基于稀土光谱特征提出了一套全新的评估河流中稀土浓度的技术方法,也获得国家发明专利。高空间分辨率遥感数据处理与分析,为离子吸附型稀土矿山快速、准确、动态监测提供了良好的技术手段。在赣州市针对离子吸附型稀土矿山的执法检查等矿政管理工作中,高分辨率遥感技术发挥了重要作用,提高了政府执法的公信力。同时,应用遥感技术在南岭东段开展了成矿预测,也取得了初步成果,圈定的靶区都得到了验证<sup>[6-7]</sup>。

为了弄清中国离子吸附型稀土矿区在开采过程中是否对周边水体造成了环境污染及其严重程度,项目组选择流经典型稀土矿区的桃江、濂江(赣江上游)和寻乌河(东江源头)作为研究对象,开展了12年持续采样,采用多学科多方法协同,对离子吸附型稀土矿区淋滤废水、矿区山泉水、生活用井水、近矿支流、矿区下游、矿区上游等地表水及地下水的地球化学特征、成矿岩体-地表水的相互转化关系以及离子吸附型稀土资源开采的水资源-环境效应进行了系统研究。建立了对采矿过程中的环境效应进行调查、检测、评估的工作方法,即:野外调查(S)—实验测试(M)—特征分析(A)—指标体系构建(I)—模型研究(M)—综合评价(A)的SMAIMA方法,分析了离子吸附型稀土矿区及周边

地表水中REE及理化指标的时空变化特征,查明了污染的原因和路径,指出矿区尾水、渗滤水和淋滤水是矿区下游水体污染的源头,构建了稀土矿区水环境质量评价的指标体系,提出了针对离子吸附型稀土矿区水环境的模糊综合评价模型,通过隶属函数权重计算,对研究区水环境状况进行了综合研究。在此基础上,构建了基于支持向量机(SVM)的离子吸附型稀土矿山环境效应定量评价模型,并运用该模型,对龙南(重稀土)、安远(中稀土)、寻乌(轻稀土)3种不同类型的稀土矿山环境进行了综合评价分级,为离子吸附型稀土矿区的环境管理及其生态环境风险评价提供了科学依据,为政府部门在该区开展精准扶贫和环境修复提供了建议和对策,并取得实效<sup>[8]</sup>。该工作方法可以推广运用到其他矿山环境的调查与治理。

4) 不断创新分析测试技术、找矿方法、勘查手段,技术要求和行业规范日臻完善。

传统的、常规的分析测试技术难以满足类型多样、基体复杂、含量变化大的三稀矿石及矿产品的测试要求,基于电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)、电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)和X射线荧光光谱(XRF)的现代仪器分析测试技术大有取代重量法、容量法、比色法等经典化学分析方法的趋势。通过2011年以来的努力,一套涵盖10种新方法、针对49种不同类型地质样品的全新的测试方法体系得以建立(已经申请到发明专利),不但测试元素多而且工作效率高,为战略性关键矿产的战略侦查、调查评价、理论研究与找矿突破提供了技术支撑。此外,X粉晶衍射、激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)原位分析、单个包裹体分析测试及新一代电子探针等技术,为查明矿床成因、查明稀有稀土分散元素的赋存状态、评价其开发利用的价值、采选冶工艺流程的制定提供了现代化的测试手段,为四川大水沟磷矿中未知矿物相“Bi<sub>5</sub>Te”、甲基卡锂矿及陕西镇安等地祖母绿等罕见矿物的鉴定做出了贡献。锂同位素的分析测试,为“以锂找锂”方法的建立奠定了基础。

5) 采选冶技术不断创新,尤其是通过物理选矿,探索非药剂绿色矿山建设的新路子。

以稀有稀土稀散金属矿产为代表的战略性矿产,由于元素的赋存状态复杂,品位又低,矿物粒度细小,开发利用的难度很大。因此,要提高现有的三稀及其他关键性矿产资源(包括铂族金属元素)的综合回收率、利用率,不但需要通过化学分析、仪器分析等测试手段来获得样品中金属元素的含量参数,更要查明金属元素的分布规律及赋存状态,岩矿鉴定工作必不可少,而常规的岩矿样品制备不但耗时费力,而且由于矿物颗粒之间硬度等物理性质差异大不容易获得高质量的光薄片样品。2018年以来,通过反复实践,初步完成了“全自动数控岩矿样自动化制片系统”,不但提高了样品质量(为电子探针等原位分析测试奠定了良好的基础),而且提高了工作效率,可以更快更多地制作光薄片。在此基础上,利用锂辉石物性参数不同于其他矿物的基本特点,项目组采用三磁法(聚磁永磁超强磁,场强3T)全物理技术路线,对四川甲基卡的锂辉石矿石和江西九岭的磷锂铝石矿石进行了选矿实验。在不采用化学药剂的前提下,甲基卡样品选矿后的 $\text{Li}_2\text{O}$ 含量达6.394%(国际锂辉石精矿标准YB836—75一级品要求 $>6\%$ ),远高于某锂矿公司的传统选矿指标(5.48%),而成本仅为浮选法的1/3。其社会环保效益显著,且不使用选矿药剂,可实现清洁生产,为节能环保型产业化提供了示范。

6) 一批大型矿产资源基地逐步落实,为战略性新兴产业的高质量发展和产业链安全提供了资源保障。

近10年来,中国在新疆西昆仑大红柳滩、阿尔金、青海柴达木盆地北缘、川西甲基卡、马尔康、江西宜春等地都取得了找矿突破,形成了一批新的大型战略性关键矿产资源基地<sup>[10]</sup>。其中,幕阜山大型稀有金属基地位于湖北、湖南和江西三省交界处,既是革命老区也是稀有金属、有色金属、贵金属、铀矿以及萤石等非金属矿产资源非常丰富的矿集区,在20世纪80年代就发现了断峰山、传梓源等大中型稀有金属矿床,但一直没有正规开发。而周边地区的武汉、长沙、南昌及九江、宜春等大中小城市工业发达,对稀有金属的需求十分旺盛。宜春四一四稀有金属矿床目前是中国最重要的生产矿山,但资

源危机。因此,近年来,“战略性新兴产业矿产调查工程”项目组通过对140多条矿脉的野外调查研究,查明了伟晶岩的区域分带性(微斜长石型→微斜长石+钠长石型→钠长石型→钠长石锂辉石型),建立了“大型构造控制大型矿脉”的找矿模型,在距离幕阜山岩体8.5 km的外带发现了锂辉石伟晶岩,大大拓展了伟晶岩型锂矿的找矿空间,也助力湖南仁里特大型铌钽矿的找矿突破。与此同时,项目组在连云山地区通过钻探探获资源量估算(334级别)均达到大中型规模。

7) 坚持绿色矿业和创新发展的理念,助力全行业全产业链转型升级。

三稀矿产调查研究不只是一个普通的地质项目,还需要直接为矿政管理和战略性新兴产业的发展提供地质依据和资源保障。基于“稀土不土,稀有常有,稀散不散”的认识,提出了“稀土管得住,稀有找得到,稀散用得好的”矿政管理模式,出版了《稀有稀土稀散矿产资源及其开发利用》和《国外稀有稀土矿床》2部专著,即便是对非地质专业人员也具有实用的参考价值。通过综合研究和实地调查,对稀土、锂、铍等34种矿产的资源家底、在新兴产业中的应用状况、可持续发展的资源保障等方面的问题进行了深入研究,总结了三稀资源分布规律及中国在全球资源格局中的地位,探讨了与三稀金属资源有关的高新技术发展方向、动态和趋势<sup>[6-8]</sup>,通过三稀矿产资源绿色调查及环境综合评价技术创新获批国家发明专利3项,为中国战略性新兴产业布局提供了重要依据,为矿政管理和相关产业的绿色可持续健康发展提供了支撑服务。例如,通过对贵州织金新华磷矿床中离子吸附型稀土存在与否及初步定量研究,认为要综合利用此类磷块岩中的稀土则成本太高、技术难度大,还不如直接当作“稀土磷肥”开发利用。

## 2.2 存在的问题

除了前述政策方面的差距之外,中国在战略性新兴产业矿产调查研究领域或技术层面还存在不少的理论难题和技术瓶颈。(1) 优势矿种只有稀土和部分稀散金属矿产。主要的、关键的稀有金属高度依赖进口,有的还不能正常进口,时常因为种种原因

“被卡一下脖子”,难以保障战略性新兴产业的快速发展,甚至可能影响国家安全,尤其是美国对伊朗制裁自2018年11月生效之后,连带影响中国原油的进口。这一杀鸡儆猴的策略,意味着在石油之外的战略性关键矿产资源,美西方也可能采取类似的手段,事实上已经在采取行动了。例如,2022年11月2日,加拿大政府以“国家安全”为由,命令中矿资源、藏格矿业及盛新锂能等中国上市公司撤出对加拿大关键矿产的投资。(2) 好矿少,品位低,难选冶,缺乏国际竞争力,如铌和铍。(3) 探明程度低尤其是典型矿床的深部均未封闭或“来历不明”,包括著名的白云鄂博、攀枝花、个旧,也包括新疆的可可托海。成矿物质从何而来等基础问题一直未解决,制约了找矿方向的确定和勘查技术手段的选择。(4) 成因机制不明。尤其是著名的一些矿床,如云南会泽等著名的稀有分散金属矿床,以往认为是层控,现在发现延深1 km 仍然成矿很好。(5) 探测技术手段有限,主要是在矿山企业通过“边采边探”以增加资源量,如广西大厂100号矿体。(6) 共伴生资源为主,独立矿床少,需要加强采选冶技术的研发。例如,中国的铍矿要么是新疆可可托海这样的复杂类型,要么是江西画眉坳这样伴生在钨矿中但在钨矿的开采过程中没有充分利用而浪费了,要么是四川雪宝顶这样虽然质量好但位于高海拔、保护区而无法开采的。

### 2.3 突破口和创新点

毫无疑问,面对巨大的需要和市场潜力,中国在战略性矿产领域需要创新的理论与研发的技术还很多,包括:(1) 成矿机制的实验研究(尤其是地壳中高度分散的三稀金属是如何高度聚集成矿的,包括湖南的锡矿山、广西的大厂、云南的金顶等世界著名的矿床),争取在战略性关键矿产成矿理论方面有所创新;(2) 采选冶技术和助推新兴产业发展的相关技术(包括锂同位素作为高端产品的可能性实验),争取在第四次科技革命中取得一定的主动权;(3) 深部探测的技术(包括深度为3000、2000、1000、500和50 m的系列化探测技术),争取为矿山企业以及相关产业的可持续发展提供资源保障。

理论和技术的创新切入点如下。(1) 查明不同

类型战略性关键矿产的空间分布规律。例如,为什么国外的硬岩型锂矿集中分布在地台区,而中国的硬岩型锂矿却分布在造山带。(2) 查明重点矿集区(或者大型资源基地)不同层次的深部结构,为深部找矿提供技术支撑。2008—2013年,通过对南岭成矿带地壳岩浆系统结构的探测实验(SinoProbe-03-01课题),将南岭成矿带分为以花岗岩为主、沉积岩为主及其过渡型3类浅表地壳结构并进一步细分不同类型的矿集区(如沉积岩区又可分为岩溶的、硅钙界面的等),取得了良好的效果。(3) 查明典型矿床的精细结构(也称“透明化”)与精准探测技术(层脉识别技术),尤其是“五层楼+地下室”勘查模型的建立,不但适合于华南地区的石英脉型钨矿区,也适合于川西甲基卡、可尔因等大型锂矿资源基地,不但为深部找矿提供了理论依据,也为人工地震等深部地球物理探测技术手段的使用指明了方向。(4) 查明锂等稀有金属的立体分带机制和淋积型稀土矿的垂向富集机制。(5) 对新类型战略性关键矿产尤其是三稀矿产资源的调查研究,有助于弥补传统资源之不足,还可以带动理论创新<sup>[9,11-14]</sup>,如铝土矿中高含量钨和锂的发现,不但可以提升铝土矿的资源价值,也对如何利用好此类沉积型或者其他非传统战略性关键矿产提出了新的科技命题。近年来,国内外对于卤水、油田水及砂岩中赋存的锂等稀有金属的开发利用价值给予高度关注,中国柴达木盆地西部古近系和新近系油田卤水中的Li含量最高达983 mg/L,一般也有几十mg/L,而四川盆地多个层位的绿豆岩有可能为深部卤水中锂的富集提供成矿物质来源<sup>[14]</sup>。塔里木盆地、准噶尔盆地乃至中东部地区的江汉盆地、南阳盆地等也值得探索。(6) 从矿床成矿系列理论的角度,建立“全位成矿+缺位找矿”的模型,将不同类型、不同矿种的战略性矿产综合起来,通过系统化研究,互为找矿标志,举一反三,开拓思路,实现理论创新引领找矿突破。例如,湖北和湖南境内幕阜山一带的稀有金属矿产,与江西境内的九岭和武功山地区的稀有金属成矿特点相似,构成同一个矿集区,但不同地段的成矿条件不同,找矿方向也不一样。其中,仁里大型层状钽矿的发现对江西和湖北

的找矿是有启发意义的,而江西九岭含磷锂铝石浅色花岗岩型稀有金属矿床的发现,也对湖北和湖南的找矿有指导作用。在江西九岭同安等地的浅色花岗岩中,磷锂铝石的含量可达4%~5%,实际上已经是造岩矿物了,同时还含有绿柱石、锡石、铌钽矿物等有用金属矿物。岩体的岩相分带性也与宜春四一四矿床有一定的相似性。2017年,对7个区块进行了系统采样;2018年,估算 $\text{Li}_2\text{O}$ 资源量达 $38.26 \times 10^4 \text{ t}^{[12]}$ 。更有意义的是,此类岩体型稀有金属矿床,类似铜矿中的“斑岩铜矿”,虽然品位不是很高但规模很大,具有“低品位大吨位”的特点,对改变锂矿资源格局具有潜在的、十分重要的意义。目前正在开展选矿研究工作,一旦经济可行,将是一种新的工业类型。

### 3 战略性关键矿产潜力分析

根据《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》和《战略性矿产国内找矿行动纲要(2021—2035年)》,自然资源部、国家发展改革委员会、科技部、工业和信息化部、财政部会同有关方面研究编制《战略性矿产国内找矿行动“十四五”实施方案》,旨在通过科学谋划实施找矿行动,强化基础地质工作,优化找矿布局,突出紧缺战略性矿产,大力推进科技创新,加大勘查特别是精查力度,全面推进绿色勘查,深化矿产资源管理改革,充分发挥各类市场主体作用,支撑战略性新兴产业发展,不断增强国家能源和战略性矿产资源保障能力。要增强保障能力,必须进一步摸清资源家底,查明资源潜力,才能有针对性地部署找矿工作。

#### 3.1 战略性关键矿产成矿预测和潜力评价现状

2006年1月20日,国务院发布《国务院关于加强地质工作的决定》并批准实施《找矿突破战略行动纲要(2011—2020)》。在这10余年中取得了丰硕的找矿成果,包括发现一批亿吨级大油田和千亿立方米级大气田,新形成几十处非油气矿产资源基地;老矿山深部和边部找矿取得重大突破,一批危机矿山重新焕发生机。但是,由于各种原因,新发

现矿产地不尽如人意,矿业权的投放与交易寥落晨星,新增固体矿产储量十分有限,极大地影响中国作为一个世界人口第二的第二大经济体的可持续发展与长治久安。2006—2013年,国土资源部组织实施了全国性重要矿产的潜力评价工作,对铁、铜、稀土、萤石等35种重要矿产的资源潜力进行了全面评价,圈定了找矿远景区和靶区,为新一轮找矿突破战略行动的实施奠定了基础。但是,还有相当一部分矿种没有开展潜力评价工作,如8种稀有金属只有锂作了潜力评价,而且只是在已知矿区的深边部开展了“就矿找矿”,并没有涵盖2013年以来发现的新的锂矿区,尤其是一些重要的锂矿资源基地,包括新疆南部的大红柳滩和阿尔金锂成矿带<sup>[15]</sup>。此外,2006—2013年,全国重要矿产潜力评价工作并没有从战略性新兴产业发展的角度来开展潜力评价,对于矿产资源尤其是关键矿产在高科技领域的新用途,几乎没有评价,包括锂在新能源汽车领域、石英在芯片领域、叶蜡石在光纤领域、稀散元素在光伏领域、萤石在电子级氟化工领域等。这就脱离了当前国家强调的“高质量发展”的新要求,也脱离了“保障全产业链安全”的新要求。因此,有必要从新的角度对战略性新兴产业的资源潜力进行补充性评价,以便为国家提供决策依据<sup>[16]</sup>。

#### 3.2 战略性关键矿产成矿预测必须坚持的原则

当前国内战略性矿产勘查开发遇到了一系列新的难题,包括找矿难度大、矿业权交易风险高等,因此,要强调科技创新引领。成矿预测和靶区圈定可谓是“最省钱”的工作,也最能体现科技含量与创新性;但要准确地圈定远景区、靶区,并不是一件容易的事。

回顾上一轮找矿突破战略行动所取得的成果,很大一部分找矿成果只达到预测、预查、普查程度,属于详查和勘探程度的成果并不多。新发现矿产地按照招拍挂的矿业权出让方法来实现成果转化,但矿业权市场交易除了锂矿、锰矿等部分矿种之外,总体上没有形成理想的矿业权交易市场。同时,一些老矿山虽然探明了新增资源储量(探获了高级别资源储量或者可信度较高),但考虑到“缴费”问题,找到的矿越多、规模越大,需要交的“权益

金”越多,在没有产生新增经济效益之前,有的矿山企业为了规避“权益金”问题采取“不上报”“少上报”“只采不报”等方式,以至于主管部门很难掌握矿山生产的实际情况(为此,自然资源部中国地质调查局专门设立了“矿产资源国情调查”项目)。

中国强调要坚持社会主义市场经济改革方向,包括培育矿业权交易市场。但是,市场交易是有风险的,而计划经济时期的地质找矿工作并不强调“风险”。也就是说,老前辈们找到的矿,那是控制程度很高、风险较小的实实在在的“矿床”,而不只是“矿产地”。无论是上一轮还是新一轮的找矿突破战略行动,都强调“公益先行、商业跟进”,实际上强调的都是国家出资的公益性找矿成果具有风险性,需要通过市场行为、加大资金投入,由非公益性行为来提高勘探程度,满足矿山生产或新建矿山的资源需求。这与计划经济年代的找矿成果是不同的。例如,上一轮找矿行动中在新疆某地发现了一个锰矿,据报道达到3000万t富锰矿、前景达5000万t。该矿权通过招拍挂出让之后,近年来通过进一步的勘探,查明锰矿石的资源储量连原先的1/10都不到,而且品位低于一般工业要求。可见,找矿的风险是非常大的。那么,如何降低找矿的风险(实际上也是降低矿业权交易的风险)?科学的成矿预测,显然是降低成本、降低风险、提高收益的最简单途径。

科学研究是找矿突破战略行动的重要环节,而且投入相对少,但要保证其科学性以及预测的准确性,否则容易误导投资。也就是说,科学的成矿预测可以降低风险,提高收益;非科学的预测不但会误导投资人而且会误导政府;出资人重视科学预测,可以降低投资风险,收益高。例如,内蒙古白云鄂博是一个世界著名的铁、稀土、萤石等多种矿产资源共伴生的超大型矿产资源基地,已经生产半个多世纪。中国地质科学院矿产资源研究所在陈毓川院士等的指导下,在包钢集团白云矿区建立科学研究基地,通过5年多的科学预测与攻坚克难,不但成功预测了深部的铁矿,新增铁矿石数亿吨,而且首次系统查明了萤石的赋存状态、分布特征与资源储量,为增储上产提供了科学依据。包钢集团于2022年1月17日在北京专门开会致谢。显然,矿

产资源研究所的年轻科技人员得到了历练,而最大的受益者还是企业、政府和国家。这是产学研紧密结合、提高成矿预测成功率的典型实例。

关于矿产资源潜力评价与预测的原则性问题,国内外均有不少的探讨、论述和成果。如何在“就矿找矿”的基础上,把矿产资源预测工作的水平提高一个层次,是当前迫切需要解决的理论技术问题,也是找矿现实问题。要科学地评价矿产资源的“有与无”“好与坏”,并预测出可开发利用矿体的空间位置,需要把握“物质不灭”“能量守恒”和“时空无限但有序”这3个基本原则。

所谓“物质不灭”,不仅仅是哲学术语,也是现代矿床学研究新进展的体现。在一定时空范围内,物质只能从一种状态向另外一种状态转变或者从某个部位向另外一个部位转移,而不可能“空穴来风”地从无到有,也不可能无缘无故地“不翼而飞”。因此,利用地质学、矿床学、同位素地球化学、微量元素地球化学、稀土元素地球化学等方面的示踪技术探索成矿物质的来源,找到其“源头”远比仅仅发现“原生晕”或“次生晕”意义重大。澳大利亚奥林匹克坝世界级铜-铀-金-稀土矿床的成功发现即是一例。

所谓“能量守恒”,是指成矿物质在地球不同层圈中的分布、迁移、富集与贫化,是需要“能量”和“动力”的,包括热液的搬运、热量的传导、构造的驱动等。搬运千万吨的铜需要多大的能量、将一百万t的锂聚集在一起需要多大的能量,实际上并不清楚。

所谓的“时空无限但有序”,是指成矿作用虽然极其复杂、人类认识自然的能力又非常有限,但成矿规律本身是客观的,不以人的意志为转移,因此,总会有办法去认识成矿作用发生的机制,反演成矿作用发生的过程,探究成矿物质在四维时空中的迁移轨迹,从而为找到成矿物质最终富集的空间位置提供科学依据。

成矿物质从初始状态演化到最终状态(目前所见)的整个过程,也就是“成矿动力学”的本质,始态可理解为“矿源”,终态即“矿体”、矿床或矿田、含矿地质体等,而过程即成矿作用发生、发展的全部历史,这一历史(时间)又是离不开特定的空间的,而

所谓的“始态”与“终态”也都是有一定历史时期、一定空间支持下的物质状态。

关于矿产资源潜力评价的原则性问题,目前仍然处于探索阶段。中国的科学家始终走在成矿预测科研领域的前沿。但是,中国的地质构造十分复杂,成矿条件多种多样,虽然借助于现代科学技术手段(包括同位素年代学技术解决成矿的“时间问题”),在“时空无限但有序”这方面开展了积极的尝试,初步构筑了中国的成矿体系,并提出了“全位成矿与缺位找矿”的新思路,但对“物质不灭”和“能量守恒”的问题,还只是处于摸索阶段。因此,这不仅需要从理论上加以总结和研究,更需要在实践中不断修正,使“原则”变成可操作性的“规则”“细则”。尤其是在大比例尺成矿预测中贯彻“三原则”,对于新一轮找矿突破战略行动的实施将是十分有益的。可以预想,在实际工作中将不可避免地会遇到至少3个问题:(1)不同矿种的“三原则”如何体现?(2)不同地区的“三原则”如何体现?(3)不同成矿时代的“三原则”如何体现?对这些问题的深入研究,并通过地质找矿的实践来修正、完善,无疑有助于矿产资源的评价与预测工作,并使之向更加科学化和理性化的方向发展。

### 3.3 战略性关键矿种的矿种选择与主攻方向

#### 1) 主攻矿种及类型。

在新一轮找矿突破战略行动中,将目标矿种分为紧缺能源矿产(包括石油、天然气、页岩气、煤层气和铀矿)、紧缺金属矿产(包括铁、锰、铬、铜、铝、金、镍、钴、锂、锆、钨、钼、铍、铌、钽、铪、铯)、紧缺非金属矿产(包括钾盐和硼矿)、优势矿产(包括煤炭、钨、钼、锡、锑、钒、稀土、铟、锗、镓、晶质石墨、萤石和磷矿)。显然,这样的分类是基于当前中国探明矿产资源的禀赋特征来界定的,也是相对的,尤其是相对于产能的需求来界定的,并不体现其全部的自然属性,也不完全体现其当今和未来的经济属性。例如,水泥灰岩、地下水、建筑用砂石料等用量巨大的矿产资源,并没有被考虑在内,而铌这样的小金属无论是用量还是经济价值均不能与水泥灰岩、地下水、建筑用砂石料这样的矿种相提并论,只是因为其在某些特定高端技术装备制造业领域的特定用

途而被列为“紧缺金属矿产”,其实是起到了提醒大家重视战略性矿产资源的作用,并不是真的稀缺。实际上,在践行绿色生态文明发展的过程中,在某些特定情况下,即便是水泥灰岩、地下水、建筑用砂石料等矿产资源也可能变得“紧缺”,以至于影响重大工程的建设进度和人民群众的生活。

2) 战略性关键矿产的特殊性及其对高质量发展的战略意义。

在《战略性矿产国内找矿行动“十四五”实施方案》中给定的36个目标矿种中,既有石油、天然气、煤炭、铁、锰等大宗矿产,也有锂、锆、钨、钼、铍、铌、稀土、铟、锗、镓等用量不大的“小宗矿产”。实际上,中国急缺的小宗矿产,还应该包括铂族金属和惰性气体。也就是说,从资源的稀缺性和中国战略性新兴产业发展的趋势来分析,稀土金属、稀有金属、稀散金属、稀贵金属和稀有气体,这5大类带“稀”的矿产,可以统称为“五稀矿产”。其共同特点是,用量不大,一般年消耗量不超过20万t甚至只有几吨,但其“四两拨千斤”的意义非常大。以往也把该矿产资源称为“工业的味精”,起到提升附加值的作用;但从战略性新兴产业的现状与发展趋势来说,其意义远远不是经济价值所能涵盖的。

以稀土为例,无论是轻稀土还是重稀土,其市场流通领域中的经济总量无法与铁、煤炭、石油相比,但中国要想实现“跨越式”发展与“弯道超车”,只把煤、铁、石油做大做强是远远不够的(实际上,这些领域的技术和产能,中国已经处于世界先进行列),还离不开“五稀矿产”。“五稀矿产”起到的是“画龙点睛”“四两拨千斤”的作用,而不仅仅是锦上添花、味精的作用。也就是说,“五稀矿产”不只是具备矿产资源所共有的自然属性、经济属性、环境属性,能够形成一系列的产品、产业、产能基地,能够构成相对独立的工业体系,还具备“药引子”的作用。一旦这些矿产资源的供应链被切断,不但其自身的工业体系将面临崩溃,也必然牵连到相关的其他行业。例如,俄乌冲突一爆发,氮气的供应就紧张,因为中国也从俄罗斯、乌克兰进口氮气,也大量地从美国进口,而没有了氮气,许多先进仪器设备、精密加工工业甚至国防尖端工业都将受到致命打

击,连需要在隔绝空气条件下进行的科学实验、医疗卫生等关乎民生的日常工作也难以展开,或者只能降低标准、精度、效果。

3) 科学评价战略性关键矿产的资源潜力与综合价值。

由于“五稀矿产”属于“小宗矿产”,也是“小众矿产”,不为广大人民群众所熟悉,即便是地质勘查的专业人员,也不一定熟悉此类矿产的禀赋特征、成矿规律、评价手段及找矿方法,甚至连采样方法都没有现成的规范,对应的资源储量如何计算也尚未有现成技术标准,或者是现有的技术规范、行业标准、管理范式都已经落后了,不适合战略性新兴产业快速发展的新要求。如氦气的采样,没有特定的仪器设备与严格的技术要求,是很难采集到具有代表性的样品的。再例如,铂族金属,以往曾经出现过令人疑惑不解的情况。在重庆某地的黑色页岩中发现有铂族矿物,但化学分析测试的结果是低于检测限。究竟是真的有铂矿,还是有人造假?长期争论,导致铂矿的找矿工作也停滞不前。后来才发现是实验室的分析测试所采用的方法,虽然本身是有规范的,“有法可依”的,但没有“对症下药”。实际工作中此类现象屡见不鲜,例如用测定微量元素含量的办法来测定矿石中稀有金属的含量,而全然不顾其基体效应。

又例如,铷矿近年来成为“明星”矿产,不断出现新闻效应。但目前中国还没有制定铷矿地质勘查的规范或相应的技术要求,如何科学评价其经济价值,尚在探索之中,但“第一本独立铷矿的采矿证”已然颁发。铷,虽然价格很高,但目前主要是实验室使用,实验室的购买量一般不会太大,因此总的市场需求量也不大,全世界一年也很少超过10 t。因此,中国仍然将其作为伴生矿产对待,一般是在开采稀有金属的过程中从含铷矿物(如云母)中顺便回收,在《矿产资源工业要求手册》中给出的也是其作为伴生矿的“品位”(边界品位0.04%~0.06% $\text{Rb}_2\text{O}$ ),而不是独立矿床的工业要求。但有的单位就用0.04%来圈定所谓的铷的矿体,其实是概念性错误。显然,将伴生资源的品位要求作为独立开采矿床的工业要求,势必闹笑话,甚至要承担法律责任。

此外,实验室的选冶试验结果与工业化生产不能等同看待。实验室不但可以分离矿物,甚至可以提取某种金属单元素,这是实验室的“本职工作”。为了达到选出矿物、提取金属元素的目的,往往是不计成本的。因此,对于一些“新类型矿产”,只有实验室选冶结果而没有半工业试验、工业试验的选矿结果,无论资源储量如何巨大,原则上是不能作为工业设计依据的。对于传统矿产,所谓的“储量”,其前提就是与已知矿床可以类比,现有的技术是完全可以解决采选冶问题的,是可以工业化开采利用的。如石英脉型的黑钨矿,即便是不开展实验室选矿试验,也是可以接受的,因为其地质特征、矿石特征是具有共性的,选矿技术是成熟的。而对于“黏土型锂矿”“云英岩型铷矿”这样的“新类型关键金属矿产”,需要开展一系列的试验,重新制定边界品位和工业品位,不能直接套用《矿产资源工业要求手册》中的“标准”。即便是开展了试验,也要意识到实验室的小试结果与工业化、规模化生产的结果可能不是一回事,而这一点往往被有意无意地“忽视”了。

习近平总书记在给山东省地矿局第六地质大队的回信中明确指出,要“积极践行绿色发展理念,加大勘查力度,加强科技攻关,在新一轮找矿突破战略行动中发挥更大作用”。因此,在对“五稀矿产”进行找矿评价时,同样不能忘了环境评价。例如,中国西南已经发现若干规模“巨大”的黏土型锂矿,频频产生轰动性的新闻效应,甚至影响对伟晶岩型锂矿的勘查。因为伟晶岩型锂矿的规模往往不大,10万t的氧化锂就是大型规模了,而黏土型锂矿动不动就是100万t以上甚至500万t以上。其实,姑且不论其规模大小,黏土型锂矿如何开发利用?实验室可以用强酸、强碱来破坏黏土矿物的晶格以“释放”出其中的锂,但田间作业如何使用强酸、强碱?环保部门允许吗?即便是允许,按其一般不到0.5%的含量,99.5%的废渣如何处理?能实现无尾矿生产吗?因此,尽管有的地方政府投入很大,招商引资,甚至写入政府工作报告,但“绿水青山”是万万不能忘的。学术界也要实事求是地把开采黏土型锂矿的环境代价公之于众(不能只强调其

规模之大),以便于集思广益,更好更快地解决相关技术难题。实际上,黏土型锂矿并不是什么新类型,20世纪70年代就已经知道了,但也正因为“环保不过关”而被弃置,甚至把这一类型都排除在外(随着锂价的疯涨而可能“起死回生”)。也就是说,在新一轮找矿突破战略行动中,不能因为是“战略性紧缺矿产”,就忽视了环境保护,其后果将是再一次把地勘工作置于被动。

总之,新一轮找矿突破战略行动突出“紧缺战略性矿产”,突出重点,破解难点,专注痛点,是从满足中国工业、农业及其他相关行业的现实需要来考虑的,无可厚非,但也应该兼顾其他矿种,从“总体国家安全观”的角度来找矿,不是说没有被列入“战略性矿产‘十四五’找矿目标”中的矿种就不用去找了。对于中国这么大的发展中国家来说,没有哪种矿产资源是不需要的。何况,在构建人类命运共同体的过程中,中国也在向全世界供应矿产资源,如稀土、钨、锡、钼、锑及其制品,大部分是出口的,也是在满足全世界的需求。因此,只强调“对外依存度”是不够的,还不能忘记“对外贡献度”。

### 3.4 战略性关键矿产的工作区选择及与大型资源基地的关系

新一轮找矿突破战略行动将突出中国紧缺和大宗战略性矿产,以重要含油气盆地和重点成矿区带为重点,根据地质工作程度区分为4种类型的区域,即基础调查区、重点调查区、重点勘查区和重要矿山深部“四区”,分类施策,实施勘查找矿,推动增储上产。

#### 1) 不同类型的勘查选区。

基础调查区是指在重要盆地和重点成矿区带中工作程度较低,有一定资源前景,尚未开展或较早开展过基础地质调查的区域,通过区域地质调查、矿产地质调查和有关技术方法应用,提高调查程度,提升地质认识水平,提交找矿远景区、找矿靶区和油气有利区。

重点调查区是指基础地质调查、矿产地质调查确定的战略性矿产资源成矿有利区域,区内已有矿床、矿(化)点、蚀变和物化探异常等信息反映有较大找矿潜力,通过开展必要的物化探和钻探验证,

提交探矿权出让区块建议。

重点勘查区是指资源潜力大的已设探矿权集中区,通过加大勘查力度,有望实现找矿新突破,提交一批资源量,对油气来说要探明地质储量。

重要矿山深部是指深部具有较好资源潜力的已设采矿权区,通过攻深找盲,新增资源储量要达到大、中型矿床规模,稳定和扩大矿山产能,也是增储上产的主要“区”。

#### 2) 找矿勘查选区与大型资源基地的关系。

显然,上述“四区”是按照工作程度来区分的,也是基本符合当前国内地质找矿与资源勘查的实际情况的。但是,找矿工作是一项系统性的复杂工程,甚至还包括各种各样的偶然性,而新一轮找矿突破战略行动的最终目的是资源保障和国家能源资源安全。可以分为2个层次,一是“大型资源基地”,二是“区块出让”。显然,只有大型资源基地才能保障产业链的稳定、矿业的可持续发展以及国家能源资源的安全。“区块出让”的目的,在于“商业跟进”,在于“活跃矿业权市场”,也在于为地方政府增加财政收入,有点类似“土地财政”。在出让的矿业权区内,有没有矿、有什么矿、矿的质量和规模怎样,存在极大的风险性,需要通过“科技引领”来“快速突破”。2019年10月28日,新疆阿克陶县的穆呼锰矿和和田县的大红柳滩锂铍多金属矿床2个区块招标出让,中标总价28亿元。经过3年多的勘探,大红柳滩的资源储量得以有效控制,而穆呼锰矿(玛尔坎苏锰矿)的规模不及当初的1/10,而且入选品位低于一般工业要求。也就是说,出让的区块与“大型资源基地”之间并不存在一一对应关系,50%的成功率已经非常了不得了。但无论如何,短期关心的是区块出让得到的“现金收益”,对于大型资源基地的建设及国家能源资源的安全保障,则不那么直接了。因此,新一轮的找矿突破战略行动要以“大型资源基地”为国家目标,不能满足于“区块出让”<sup>[17]</sup>。

#### 3) 不同类型工作区之间的内部关系。

基础调查区、重点调查区、重点勘查区和重要矿山深部这“四区”,表面上看,似乎是4类不同的区块,空间上不重叠,国土资源空间规划时也一般是分别设置的。实际上,这“四区”是按照工作程度

来区分的,并不取决于有没有矿或者有什么矿,即不是根据“成矿条件”来区分的。这就给中国地质调查局提出的“大会战”带来了部署上的困难。从地质条件和成矿规律的角度分析,结合以往的找矿与勘探经验,基础调查区也不排除新发现大型资源基地的可能性(如四川的甲基卡锂矿在2013—2014年取得找矿突破时,连1:5万的区调、矿调工作都没有全覆盖),重点调查区、重点勘查区及重要矿山深部也可能一无所获。因此,大会战部署是“农村包围城市”还是先攻打“中心城市”,需要具体问题具体分析。

此外,“四区”强调的是空间规划,四区与矿种尤其是战略性新兴产业所必需、对外依存度过高的矿种之间是什么关系,并不十分明确。尽管在《战略性矿产国内找矿行动“十四五”实施方案》中有专门的叙述,但实际操作中还是矛盾重重。例如,铅锌矿并没有列入“新一轮找矿突破战略行动”的关键矿种中,但美国2022年已经将锌补列为关键金属。实际上,中国拥有世界上最大的铅锌采冶炼加工产业、产能,在某种程度上也是拥有对全球有色金属产业链的安全产生制约力的关键金属,也大量进口矿石原材料。同时,从铅锌矿矿石中回收锗、镉等关键稀散金属,中国是具有话语权的<sup>[16-17]</sup>。但由于铅锌矿不在新一轮找矿突破战略行动的矿种目录中,中国约5000处铅锌矿矿产地就不容易进入“四区”,需要变换花样,甚至连辽宁青城子铅锌矿这样的找矿前景看好的“危机矿山”也未能列入。其实,从中国矿产资源普遍共伴生的成矿规律及矿床成矿系列理论等角度出发,青城子矿集区、云南金顶矿集区、云南与贵州交界处的会泽矿集区乃至新疆的火烧云矿集区也都是铅锌为主但明显可以带动其他关键金属取得找矿突破的、适合于“大会战”的产业基地,也会带动周边地区铜、金等紧缺矿产的找矿行动。大会战是要将“正规军”与“杂牌军”一起歼灭的。

#### 4) 与区域经济发展的关系。

习近平总书记在二十大报告中强调要促进区域协调发展。显然,在深入实施区域协调发展战略、区域重大战略、主体功能区战略、新型城镇化战

略的过程中,大型矿产资源基地是可以在“优化重大生产力布局”中发挥重要作用的<sup>[17]</sup>。例如,南疆区域经济发展,离不开矿产资源,除了已经围绕塔里木盆地建成了轮南等油气能源基地之外,以火烧云为主的有色金属资源基地,以大红柳滩为主的稀有金属资源基地,也是当前最为现实的可转化为产业基地、产能基地的资源基地,只要科学地制订“国土空间体系”,完全可以成为带动区域经济发展的新的经济增长点,有助于南疆也成为矿业的“核心区”“枢纽地带”,而不再是“边远地带”。

区块出让是调查评价成果的阶段性目标,产能产业基地才是找矿突破的战略目标。由于危机矿山的找矿突破是需要企业出资的,国家财政往往因为其他原因需要“回避”,导致危机矿山的找矿突破缺乏“基础性”“公益性”工作的支撑与指导(如辽宁的青城子铅锌矿),而“基础性”“公益性”调查取得的成果,往往难以很快形成产业基地(如西藏西北部的铜矿)。这在国家层面上是不利于保障能源资源安全的,也不利于产业基地的可持续发展。例如,湖南的衡阳盆地,以水口山铅锌矿为核心,形成了集铅锌与钨锡、铜、铀、重金属及盐类矿产于一“盆”的“大型资源基地”,也是湖南最重要的有色金属产能基地、产业基地、产业链基地。尽管在20世纪就完成了衡阳盆地的基础性、公益性区域地质调查和矿产调查,但新的发现、新的问题尤其是深部找矿的问题不断涌现,“柏坊式铜铀矿”的成因机制问题一直悬而未决,找矿前景不明,迫切需要通过“政府主导”等方式来协调各方工作部署,通过“先找矿,再填图”等途径来解决采矿权范围之外的资源潜力问题,通过“科技创新”来探明采矿权范围内的资源储量,既解决矿山的燃眉之急,也实现“增储上产”的目标。

## 4 对战略性关键矿产找矿勘查与管理的建议

1) 加强与战略性关键矿产相关法律制度的建设。美国拜登政府执政以来,美国国会涉矿立法活动异常频繁。仅美国第117届国会(2021年1月至

2023年1月)和第118届国会(2023年1月至今)就提出涉矿法案百余项,其宗旨是要加强美国国内的矿产资源勘查开发,以结束在关键矿产方面对中国等的依赖。其中,《美国2022年关键矿产独立法案》的立法宗旨就是要在2027年实现关键矿产供应链的独立,摆脱对中国包括稀土在内的矿产资源的依赖<sup>[18]</sup>;而中国无论是稀土等优势矿产还是锂、钴、镍等短缺矿产,均没有相应的、对等的、国家层面的法规。《2022年保障美国矿产供应链安全法案》则明确要改革美国国内矿业权许可证制度,提出了包括指定牵头机构负责协调加快采矿许可(审批)程序等在内的一揽子政策措施;而中国在探矿权、采矿权审批等方面的状况依然没有明显好转,民间资本对于进入找矿市场仍然在观望。没有相应的鼓励政策,中国矿业权市场就不可能良性运转。因此,建议在修改《中国矿产资源法》的同时,也要对关键矿产开展立法研究,完善矿产资源的法规体系。例如,1990年中国颁布《稀土行业国家秘密及其密级具体范围的规定》(1990年5月17日生效),但已经不适应现在的形势。其他关键矿产基本上没有专门的法规来管理,应该及时弥补。

2) 加快推进新一轮找矿突破战略行动。中国作为制造业大国,随着现代化建设的快速推进,对矿产资源的需要日益增长,尤其是战略性矿产的需求较以往成倍增长。为此,2021年3月12日,中国颁布了《新一轮找矿突破战略行动纲要》;2022年12月15—16日召开的中央经济工作会议指出,加强重要能源、矿产资源国内勘探开发和增储上产,加快规划建设新型能源体系,提升国家战略物资储备保障能力;2023年1月11日举行的全国自然资源工作会议指出,要围绕加强重要能源矿产资源国内勘探开发和增储上产,全面启动新一轮战略性矿产国内找矿行动;2023年5月22日,财政部等五部委印发了《战略性矿产国内找矿行动“十四五”实施方案》,标志着新一轮找矿行动全面启动。新一轮找矿行动强调“政府主导”,各级政府在以保障各地能源资源的安全为己任的同时,及时部署关键矿产的地质找矿工作,加强对Li、Co、Ni、Ga、Ge、In、Cr、Zr、Hf、Nb、Ta、V、Re及REE等关键金属矿产的综

合评价、勘探及利用研究,促进增储上产和战略性新兴产业的高质量发展。

3) 制订每种矿产资源的相关政策,务必精细化管理。中国曾经对萤石、锑等实行过开采总量控制政策,后来取消了。其取消就带来了乱采滥挖等问题。事实证明,矿产资源领域不能完全放开,全由“市场”说了算,因为矿产资源由国家所有。即便是企业拥有采矿证,也并不是“矿产资源企业所有”。当前对矿产资源的精细化管理十分欠缺,即便是制订了矿产资源规划,并提出了24种战略性矿产,但比起美国的精细化管理以及随着情况变化而及时调整政策的做法,中国的确还很欠缺。例如,美国已经将镓、铽等元素作为独立矿种列到关键矿产清单中,而中国虽然是稀土大国,但无论是政府还是学术界,都把15个稀土元素笼统地放在一起,没有要求单独计算储量,也没有分矿种管理。这与中国稀土大国的地位极不相称,也与新兴产业的发展不相称。实际上,稀土的使用范围越来越广,可谓日新月异,特定的稀土金属往往又有其特定的优先使用领域。例如,La用于合金材料和农用薄膜;Ce大量用于汽车玻璃;Pr广泛用于陶瓷颜料;Nd广泛用于航空航天材料;Pm为卫星提供辅助能量;Sm应用于原子能反应堆;Eu用于制造镜片和液晶显示屏;Gd用于医疗核磁共振成像;Tb用于飞机机翼调节器;Er在军事上用于激光测距仪;Dy用于电影印刷等照明光源;Ho用于制造光通信器件;Tm用于临床诊断和治疗肿瘤;Yb用作计算机记忆元件添加剂;Lu用于能源电池技术。中国由于重稀土资源丰富,供应充分,在某些工业领域占有先机,因为轻稀土在某些领域还难以取代重稀土。但是,日本、德国和美国等缺乏重稀土的国家,都在研发轻稀土或其他关键金属代替重稀土的技术,一旦取得突破,中国的“重稀土”就难以起到“杀手锏”的作用。只掌握资源而不研发新技术,是难以维持“稀土王国”的可持续发展的。稀散金属情况类似,中国目前还只能出口锗、铟、镓、铋等关键金属原材料,最先进的计算机芯片、红外扫描仪等精密仪器仍然落后于美国、日本、德国。因此,建议在强调资源为王的当下,也要注意技术的“王后”效

应。在充分利用现有矿产资源的前提下,加大创新技术的研发力度,拓展关键金属的应用领域,带动高附加值高端产品及装备制造业的发展。通过技术的创新引领,反过来带动资源的精细化管理与高值化应用。

4) 鼓励民间储备,但严格管控出口,包括民间储备物项的出口。黄金储备,已经司空见惯。其他小金属是否可以作为有价物项允许民间保值储备,笔者认为完全应该鼓励。政府也可以探索各种机制,“藏富于民”作为小金属民间储备的方式之一,值得探索。例如,稀土氧化物或者其他产品,有的也就是10元/kg(老百姓完全具备购买力),完全可以制造成各种工艺品或者简单的储藏物品,允许老百姓自我采购,但限制出口(只要海关设置相应的检测设备就可以控制)。钨、锑、锡、铋等小金属也可以允许民间储备。

5) 在制定中国的“战略性关键矿产名单”时,要结合中国的实际情况,既要重视短缺资源,也要重视优势资源,而且要根据国内外形势变化随时调整。例如,钨一直是中国的优势矿产资源,一百年来都如此,但在不同年份发挥着不同的作用。在国内革命战争年代尤其是中华苏维埃政府时期,中国共产党领导中国工农红军主动地、积极地开发赣南的钨矿资源并开展对外贸易,为中华苏维埃政府提供了经济保障。改革开放之后,钨矿一度成为换取外汇的重要手段,但在进入21世纪以来,中国的钨矿资源已经成为国内高端装备制造业的重要原材料,中国钨业也从低端的、小作坊式的“粉末冶金”逐渐成为国际市场上离不开的战略性新兴产业,掌握了一定的话语权。因此,建议将优势小金属也列为具有“卡脖子”意义的关键矿产,不能因为其国内资源丰富而廉价“甩卖”或者放松管控。稀土就曾经是一个沉痛的教训。锡、锑、汞等优势矿产,目前反而要依赖进口。因此,在制定政策措施时,要尽可能避免“一管就死,一放就乱”的局面一而再、再而三地出现。建议加强优势矿产的勘查与管理,达到强者更强,强者恒强,始终牢牢把握优势矿产资源的话语权。

## 5 结论

战略性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作用具有战略性意义的矿产资源。根据中国战略性新兴产业发展的需要和国内外发展趋势,可以将年需求量一般不超过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战略性矿产,将其中在战略性新兴产业中发挥关键作用的“小矿种”称为“战略性关键矿产”。战略性关键矿产与大宗矿产一样具有自然属性、经济属性和环境属性,但战略性关键矿产在进入第三次工业革命尤其是第四次工业革命以来,已经成为世界各国抢占战略制高点的重要战略资源,成为中国保障战略性新兴产业发展与国家安全的基本保障,具有十分重要的战略意义。

通过十多年的努力,中国战略性矿产调查研究方面取得了一系列进展,但总体看,中国战略性关键矿产资源紧张的局面尚未改变,并随着社会经济的快速发展,尤其是以新能源汽车为代表的战略性新兴产业的快速发展,对原有探明资源快速消耗,自我保障能力越来越差,对外依存度却越来越高,因此,必须高度重视战略性关键矿产在社会发展尤其是对于保障中国战略性新兴产业发展、保障国家能源资源安全方面的重要意义。按照成矿预测物质不灭、能量守恒、时空无限但有序的三原则,在新一轮找矿突破战略行动中加强对基础调查区、重点调查区、重点勘查区和重要矿山深部等不同类型工作区的成矿预测与勘查工作,重点加强老矿山的“就矿找矿”,加强新类型和非传统类型矿产资源的探查,加强对已有资源的综合利用,加强关键技术的研发,应成为中国当前和今后相当长时期内战略性关键矿产领域的主攻方向。

鉴于战略性关键矿产与地缘政治和国家政策关系十分密切,在矿政管理方面,中国除了要加快推进新一轮找矿突破战略行动、加大财政投入之

外,还迫切需要加强与战略性关键矿产相关法律制度的建设,加大矿业权改革力度,尤其是要加强对每一种战略性矿产资源的精细化、专业化管理,加强战略性矿产及其制品的进出口管理并鼓励民间储备,鼓动民间资本投入找矿勘查中,鼓励科技力量投入创新引领找矿实践的活动中。矿业企业也要珍惜矿产资源,避免原材料低端出口,充分发挥优势矿产的资源优势,构建稳固的产业链并实现高质量发展,积极融入全球一体化的人类命运共同体中,以弥补部分矿种将来被断供而造成的可能缺陷。

### 参考文献(References)

- [1] 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.
- [2] 刘丽君, 王登红, 刘喜方, 等. 国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状[J]. 中国地质, 2017, 44(2): 263-278.
- [3] 刘丽君, 王登红. 国外锂矿找矿的新突破(2017—2018)及其对我国关键矿产勘查的启示[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1479-1488.
- [4] 王登红. 战略性关键矿产相关问题探讨[J]. 化工矿产地质, 2019, 41(2): 65-72.
- [5] 王登红. 从俄乌冲突看战略性矿产资源与矿产资源的战略意义[J]. 自然资源科普与文化, 2022(3): 4-9.
- [6] 王登红, 王瑞江, 孙艳, 等. 我国三稀(稀有稀土稀散)矿产资源调查研究成果综述[J]. 地球学报, 2016, 37(5): 587-598.
- [7] 王瑞江, 王登红, 李建康, 等. 稀有稀土稀散矿产资源及其开发利用[M]. 北京: 地质出版社, 2015.
- [8] 于扬, 王登红, 田兆雪, 等. 稀土矿区环境调查SMAIMA方法体系、评价模型及其应用——以赣南离子吸附型稀土矿山为例[J]. 地球学报, 2017, 38(3): 335-344.
- [9] 于扬, 王登红, 高娟琴, 等. 中国三稀矿产生物找矿技术方法及其应用综述[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1533-1542.
- [10] 代鸿章, 王登红, 刘善宝, 等. 国外锂矿找矿新进展(2019—2021年)及对我国战略性矿产勘查的启示[J]. 地质学报, 2023, 97(2): 583-595.
- [11] 谭红兵, 曹成东, 李廷伟, 等. 柴达木盆地西部古近系和新近系油田卤水资源水化学特征及化学演化[J]. 古地理学报, 2007(3): 313-320.
- [12] 王成辉, 王登红, 陈晨, 等. 九岭狮子岭岩体型稀有金属成矿作用研究进展及其找矿意义[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1359-1373.
- [13] 何贤杰, 张福良. 关于及早谋划战略性新兴矿产发展的思考与建议[J]. 中国国土资源经济, 2014, 30(5): 4-8.
- [14] 孙艳, 高允, 王登红, 等. 重庆铜梁地区“绿豆岩”中碎屑锆石U-Pb年龄及其地质意义[J]. 岩矿测试, 2017, 36(6): 668-677.
- [15] 王登红. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
- [16] 赵汀, 王登红, 刘超, 等. 中国锆矿成矿规律与开发利用现状[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1245-1251.
- [17] 王登红, 王瑞江, 付小方, 等. 对能源金属矿产资源基地调查评价基本问题的探讨——以四川甲基卡大型锂矿基地为例[J]. 地球学报, 2016, 37(4): 471-480.
- [18] Abraham D S. The elements of power[M]. New Haven: Yale University Press, 2015.

## Progress in strategic critical minerals exploration and production and proposals for a new round of prospecting in China

WANG Denghong, DAI Hongzhang, LIU Shanbao, WANG Chenghui, YU Yang\*, ZHAO Zhi

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

**Abstract** Facing the national needs, the author reviews the new research trends of strategic critical minerals at home and abroad, summarizes the current situation and existing problems in exploration and development of strategic critical minerals, and analyzes the resource potential of strategic critical minerals. On this basis, the author puts forward some proposals for the new round of prospecting and management of strategic critical minerals in China, which the author believes are of great strategic significance for ensuring the development of domestic strategic emerging industries and national security.

**Keywords** strategic minerals; critical minerals; mineral exploration emerging; progress in exploration and production; prospecting breakthrough ●



(责任编辑 王丽娜)