

关键矿物的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向

王登红

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

内容提要:自工业 4.0 和第四次科技革命开始以来,关键矿物的重要性越来越显著。2017 年底,特朗普以总统令的方式要求美国对 35 种危机矿物实现“自给”,进一步提升了国际社会对于关键矿物的关注度。中国作为世界上最大的发展中国家,但矿产资源的自给能力远不如美国,不但大宗矿物需要大量进口,锂铍铌钽等稀有金属的对外依存度也是居高不下,而中国社会对于这些“小矿种”的重视程度也远不如美国。因此,加强对关键矿物的调查研究与找矿勘查已经迫在眉睫。在当前形势下,为了保障战略性新兴产业的发展,为了实现伟大复兴的中国梦,也为了国民经济和国家的长治久安,提出将 9 种稀有金属、17 种稀土金属、8 种稀散金属、6 种稀贵金属、3 种稀有气体矿物、12 种关键黑色和有色金属矿物和 8 种非金属矿物及铀作为中国的关键矿物。这 8 个大类 41 个矿种(组)与美国的 35 个矿种(组)大致对应。自 2011 年以来,中国以稀有稀土稀散金属(三稀)矿物为重点开展了调查评价工作,在成矿理论、潜力评价、找矿突破、环境保护、物理选矿、找矿方法、分析测试、矿政管理等方面不断取得新进展,尤其是通过对四川甲基卡及可尔因等地的找矿工作,新增资源储量相当于 10 个大型锂辉石矿床,为川西大型锂矿资源基地的建设提供了资源保障。但是,我国铌钽铍等长期短缺的稀有金属仍然没有取得找矿突破,以往探明的资源往往品位低、难选冶而实际上有相当一部分资源属于“呆矿”;即便是以往具有优势的锡、锑、汞等有色金属也已经开始进口,湖南锡矿山等世界闻名的大型超大型矿床纷纷进入资源枯竭阶段,接替资源难以为继,需要高度重视。建议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、新类型的关键矿产资源(如沉积型锂矿)加强研究、勘查与开发利用的攻关,从关键矿物的关键应用方面寻找突破口,让关键矿物在关键时刻发挥关键作用。

关键词:稀有稀土稀散金属矿物;战略性新兴产业;关键矿物

关键矿物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。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。中国面临深刻变革、深度调整的中国特色社会主义新时代,需要新的关键矿物来支撑战略性新兴产业的发展。这些关键矿物大致包括了稀有、稀土、稀散金属(简称“三稀”金属)、稀贵金属(铂族金属)和部分在我国被称为有色金属而国际上公认属于稀有金属的 Sb、Sn、Co、Ti、V 等,稀有气体和部分非金属矿物也涵盖在内。

1 关键矿物的种类

哪些矿产资源属于关键矿物? 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、采取的国家发展战略不同,所需要的关键矿物自然不同。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,会被认定为关键矿物。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”两种状况(具有“杀手铜”

注:本文为国家重点研发计划“我国锂能源金属成矿规律、靶区优选与重点查证”课题(编号 2017YFC0602701);中国地质调查局“战略性新兴产业矿产调查”工程“松潘-甘孜成锂带锂铍多金属大型资源基地综合调查评价”项目(编号 DD20190173)、“大宗急缺矿产和战略性新兴产业矿产调查”工程“川西甲基卡大型锂矿资源基地综合调查评价”,“中国矿产地质志”等(编号 DD20160055、DD20160056、DD20160346、DD20190379)资助成果。

收稿日期:2019-05-05;改回日期:2019-06-07;网络发表日期:2019-06-07;责任编辑:周健。

作者简介:王登红,男,1967 年生。研究员,博士生导师,主要从事矿产资源研究。Email: wangdenghong@vip. sina. com。

引用本文:王登红. 2019. 关键矿物的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向. 地质学报, 93(6):1189~1209, doi: 10. 19762/j. cnki. dizhixuebao. 2019186.

Wang Denghong. 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. Acta Geologica Sinica, 93(6):1189~1209.

效应),在国内则是维系国民经济正常运行的关键性矿种、支撑高新技术和战略性新兴产业发展的小矿种(发挥“四两拨千斤”的作用)。

1.1 关键矿产与大宗矿产的关系

要严格区分关键矿产和大宗矿产是不容易的,因为二者的分类不符合严格的逻辑要求。“关键”指的是“作用”,不针对产能大小,而“大宗”一般指的是产能和需要量,即产量很大的支柱性矿种归属于大宗矿产,但并不是说产量大的矿种不是关键矿产,也不是说关键矿产的产能一定小。如果一定要用产量来区分,大致可以以年需求量 20 万吨为界线,稀有、稀土、分散金属等的年需求量一般在 20 万吨以下,而铁、锰、铜、铅锌、铝的需求量都在百万吨以上甚至超过十亿吨。

关键矿产与大宗矿产都是国民经济的支持性自然资源,但二者明显不同,比如:①产能不同。大宗矿产的产量、从业人数、经济总量等都远远大于关键矿产,关键矿产显然属于“小矿种”,在产能上无法与大宗矿产相比。②大宗矿产的有无往往决定着一个国家或地区某一工业门类甚至产业部门是否存在及其存在的级别。比如,煤、石油、铁和以石灰岩为代表的建材,在我国都曾经设立有专门的国家级部门——煤炭工业部、石油工业部、冶金工业部和建材工业部。关键矿产则不可能有如此大的产业体量和社会影响力。③大宗矿产涉及到的往往是长线产业,国内外技术路线相对成熟且稳定,矿山、工厂及下游产业一旦建设则不容易改变。关键矿产则具有总量小、涉及面广、技术路线变更快的特点。也正是船小调头快的特点,决定了关键矿产可在关键时刻发挥“四两拨千斤”之关键作用。比如,第一次世界大战期间,美国发现钨作为钢的强化剂在战争中能够发挥特殊作用,以至于美国将向敌国出口钨视为叛国。美国当局以间谍罪逮捕了 3 个人,因为他们向德国走私了 200 磅钨。而英国同样认为钨这样的稀有金属对战争极其关键,将对德出口钨宣布为非法。德国由于得不到钨的供应保障,转而研发钼在钢铁中的应用,钢铁在第一次、第二次世界大战已经属于“成熟”产业,但钼的重要性尚未“普及”,属于高度机密。德国克虏伯大炮公司的工程师发现,将稀有金属钼加入钢中,可以提高炮筒的耐热性能,从而重新设计了“大贝尔塔”巨型炮,在第一次世界大战初期就直接轰垮了比利时的“铜墙铁壁”,震慑了法国首都巴黎,几乎动摇了协约国的军心;在第二次世界大战期间又通过“古斯塔夫轨道炮”直接命中了位

于克里米亚塞瓦斯托波尔要塞 30 m 深、10 m 厚防弹墙的地下工事,并引爆弹药库,摧毁了苏军的军事堡垒。显然,钢铁工业由于在美国、英国和德国得到了钨和钼两种不同关键金属的“支持”而影响到战争的走向以及战后科学技术的发展战略。

1.2 国外对关键矿产种类的选择

正是第二次世界大战之后,德国、日本等战败国意识到大宗矿产由于资源供应的困难(即便可以到殖民地国家或到占领国去开采——掠夺他国的矿产资源也是侵略国发动战争的目的之一),即便是获得矿石之后要运回国内也困难重重(笔者 2009 年在菲律宾多地看到日本人在 1945 年之前开采的铁矿石至今存放在原地而没有运走),于是在战后改变了策略,高度重视“小金属”的关键作用,无论是德国还是日本,不但很快恢复了经济,而且在电子、冶金、信息等领域占据了主动地位。

1.2.1 美国:战略高技术矿产

美国在 2018 年挑起了新一轮贸易战,主要针对中国,并且列出了针对中国的 35 种“关键矿产”,要求美国要保障自我供应。其实,美国在 20 世纪 30 年代就将矿产资源的危机性(critical)与战略性(strategic)这两个名词引入到官方正式文件中。如,美国政府 1939 年制订了《战略性和危机性原材料储备法》,并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明智之举,而且上升为国家意识。20 世纪 30 年代后期,为了限制日本不断膨胀的军国主义,美国总统富兰克林·德拉诺·罗斯福要求美国制造商限制向日本出口飞机零件以及一系列稀有金属,如钼、钨和钒。战争正式打响后,华盛顿向拉美邻国施压,不能将资源卖给敌国,又运用美国的石油出口作为杠杆敦促西班牙和葡萄牙停止与德国进行钨贸易。同时,美国又花费了 20 亿美元在全球购买稀有金属,积极开展与德国的价格战,从而将某些材料的价格推高至和平时期的 10 到 20 倍。到战争末期,盟军成功切断了希特勒的铬、钨供应,从而“停止了纳粹的战争机器”(里根政府的国防部官员事后评述,转引自 Abraham,2015)。随后,杜鲁门总统在 1951 年组建了材料政策委员会并制定出一个框架以保障美国军工企业有充足的资源保障;到 20 世纪 80 年代,美国又成立国家危机原材料委员会(NCMC),将危机矿

产定义为:影响到国家经济健康和安全的矿产资源,认为危机矿产比战略矿产的范围更宽泛,危机原材料包括民用的、工业的、军事的原材料,其供应对国家经济健康和国家安全产生影响;危机矿产可能是、也可能不是战略矿产,但战略矿产必然是危机矿产(Yu Yun et al., 2017)。

进入 21 世纪,美国对于关键矿产的研究与管控丝毫没有懈怠,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》,认为:战略性和危机性原材料,是指在美国国家紧急情况下军事、工业和民用所必需的原材料,这些原材料在美国国内没有足够的产量来满足自身的需求。美国国防部从 2006 年开始加强了钴、镓、铟、碲和钇等资源的战略储备,美国地质调查局及相关机构研究确定了 11 种关键的战略高技术矿产:稀土金属、锂、铂族金属(特别是铂、钯、钌)、铌、钽、钒、钛、镓、铟、锰、铜。2010 年底,美国科技政策办公室牵头组建了专门的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,加强了对美国及全球“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)发布研究报告,认为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,而国内并不能提供足够数量来满足需求的矿产。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路径》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(Yu Yun et al., 2017)。2017 年 12 月 20 日美国总统特朗普发布第 13817 号行政命令——《确保关键矿产安全和可靠供应的联邦战略》;随即,美国内政部发布了《危机矿产清单草案》的概要版本,美国地质调查局同时发布《危机矿产清单草案》的详细版本。将美国危机矿产的矿种界定为 35 个:铝土矿、锑、砷、钡、铍、铋、铌、钽、镉、镓、锗、萤石、天然石墨、钬、氦、铟、锂、镁、锰、镍、铂族金属、钾、稀土元素组、铯、铊、铪、铌、钽、碲、锡、

钛、钨、铀、钒和锆。

1.2.2 欧盟:关键矿产原材料

欧盟的关键矿产资源虽然并不丰富,但对关键矿产的利用技术一直走在世界前列。比如德国制造的医药用“MR 造影剂”,实际上是稀土产品(钆喷酸葡胺),长期垄断国际市场。中国虽然是稀土大国,也只能在以低价向德国出口钆(Gd)这一重稀土资源的同时,高价进口钆喷酸葡胺(MR 造影剂)。1980 年中国出口 1 吨 99.9%纯度的氧化钆的价格是当时人民币的 17.9 万元,而 2011 年的出口价是每吨 18 万元人民币。

欧洲委员会 2010 年 6 月发布了题为《欧盟关键矿产原材料》的初步报告,将 14 种重要矿产确定为关键原材料,包括:稀土金属、铂族金属、钨、锑、镓、锗、铍、钴、镁、铈、钽、铟、萤石、石墨。该报告还建议:关键矿产原材料清单应每年更新一次,同时增加“关键性”评价的范围;欧盟委员会应组建专门的原材料供应小组以确保战略的实施;推动关键矿产的地质勘查;研究老矿山废石堆的选矿和开采技术,鼓励深部矿床开发;加强循环回收;鼓励代用,推动关键矿产原材料替代品的研发等。

1.2.3 日本:战略稀有金属

日本政府 2009 年 7 月出台了《稀有金属保障战略》,考虑不同矿种的勘查开发状况、技术研发进展、工业需求动向等,将锂、铍、硼、钛、钒、铬、锰、钴、镍、镓、锗、硒、铷、铯、锆、铌、钼、钯、铟、锑、铈、钽、铪、钨、铼、铂、铑、铈、稀土元素等 31 个矿种作为优先考虑的战略矿产。日本目前已有的保障稀有金属稳定供应的战略重点包括:保障海外资源、回收利用、开发替代材料、储备等 4 方面,以综合战略解决稀有金属供求两方面的问题。

1.2.4 澳大利亚:关键矿产

澳大利亚是矿业大国,不但是大宗矿产的富有国,也是关键矿产的重要出口国。但是,澳大利亚联邦政府在发布《澳大利亚关键矿产 2018》(Critical Minerals in Australia: A Review of Opportunities and Research Needs)之后,2019 年 4 月又高调推出《澳大利亚关键矿产战略 2019》,明确提出要发展多元矿产,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。不仅如此,澳大利亚在其西北部传统的铁矿区,连续取得锂辉石找矿突破,并且很快在 4 年内就实现了出口,包括向中国出口高品质的锂辉石精矿粉

因此,相对于我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,我国关键矿产的种类实际上要超过上述 41 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”中唯一的金属元素就是钆(Gd,重稀土之一)。未列入其中的铝土矿、锰和钾在我国属于大宗紧缺矿产,砷和钼在我国有一定的资源优势。锑、汞、锡等我国具有资源优势的矿种,以往被称为“有色金属”,但近年来已经开始大量进口,需要高度重视。另外,钼在我国属于优势矿产,但铼需要从钼矿中回收,因此钼也不可或缺(Huang Fan et al., 2011, 2014a, 2014b, 2019a, 2019b)。

2 关键矿产的定性定位(自然属性、经济属性和环境属性)

关键矿产资源和其他矿产资源一样,都是地球演化过程中元素聚集的产物,且在当今经济技术条件下和工业 4.0、第四次科技革命的大背景下不但可以被人类利用,而且具有极高的经济价值和非凡的科技价值。同时,在人类开发利用关键矿产资源时,其金属元素在重新迁移富集过程中会以不同的赋存状态进入地壳表层各种载体,如:土壤、河流、湖泊等,从而对生态环境造成影响,这就是一般意义上我们所说的矿产资源三大属性:自然属性、经济属性和环境属性。

2.1 关键矿产资源的自然属性

关键矿产也是地球演化过程中巨量关键矿产堆积的产物;在时间和空间分布上也具有不均一性,找矿难度大;与大宗矿产一样仍然是不可再生的,是人类必须珍惜、保护的资源;在地球上的分布具有规律性,是可知的。

2.2 关键矿产资源的环境属性

关键矿产的开发利用有助于保护环境。矿床是有用物质大规模聚集形成的矿物集合体,往往有益元素和有害元素共存,既是有用地质体,也可能成为污染源。如铀矿,不开采掉就是一个“毒瘤”;铅锌矿中的镉,如果不回收利用,同样会通过自然风化作用等地质过程排放到环境中。自然界中物质的迁移过程是不以人的意志为转移的,而对有害元素矿床的开采,只要科学合理地管理,对环境的负面影响是可以控制的。国外把采矿过程认定为人类文明的组成部分,因而矿山也是人类进步的历史记录。废弃的矿山往往当作工业遗迹加以保存。采矿的过程实际上也是去除“毒瘤”的过程,是有助于保护环境的。

关键矿产的开发利用总体上对环境的扰动不大。虽然稀有金属等关键金属在矿石中的含量很低(一般不到 1%),获取少量的金属就需要挖掘大量的矿石(99%是“废弃物”),对环境会产生一定的扰

动。但由于关键矿产都是小矿种,开采总量不大(中国最大的稀土矿——内蒙古的白云鄂博,也是在开采铁矿的过程中同时回收稀土的),因而对环境的影响远不如大宗矿产。2017 年中国原煤产量达到 34.45 亿吨,全世界则达 77.3 亿吨。中国金矿 2019 年第一季度的产量就达到 92.78 吨,按 3g/t 的品位估算,开采的矿石量约 0.3 亿吨。而全世界全年需要氧化锂按 15 万吨计算,开采品位按 1% 计,需要开采的矿石量为 0.15 亿吨,仅相当于中国金矿一个季度开采矿石量的一半,相当于中国年采原煤的矿石量的 1/230。

在工业 4.0 和第四次科技革命的过程中,关键矿产开发利用的目的之一就是降低碳排放,实现绿色产业革命。高强度消耗矿产资源过程中 CO₂ 气体的大量排放是海平面上升、气候变暖的原因之一,而关键矿产的利用恰恰是为了减少排放的。比如,一旦可控核聚变实现商业化,1g 锂发电产生的能量就相当于 3.7 吨标准煤,部分替代煤电,其降低碳排放的效益是十分显著的。

2.3 关键矿产资源的经济属性

跟大宗矿产资源一样,关键矿产具有一般商品的基本属性,可以通过市场交换,具有可供性,其价值和价格在经济全球化背景下,受国际市场价格体系的制约。但是,关键矿产多数是小金属,全世界的年需求量往往不到 20 万吨,受国际市场的影响更大,供应链更容易断裂。

矿产资源本身就是一个动态的概念,过去和现在不曾被认为是矿产资源的地质体,随着科学技术的进步和经济可利用性的变化,将会成为新的矿产资源,矿产资源的种类、数量和用途也将因此而不断的增加和拓展。关键矿产的“动态可变性”特点更加显著,一方面作为“高科技矿产”,技术上的创新突破往往会瞬时改变某一矿种的供需平衡;另一方面,先期掌握对关键矿产“利用秘密”的科学技术,更容易占据市场乃至国际战略的主动权和制高点。比如,美国因为最先掌握了锗用于制造微型集成电路芯片的秘密,也就最先制造出了 CPU,以至于在过去的半个多世纪,美国一直处于计算机及其相关领域的全球领先地位。而我国虽然拥有极为丰富的锗资源(全球最大的生产国、出口国),锗资源储量占全球的 41%,产量占全世界的 71%(Zhao Ting et al., 2019),但至今还要进口 CPU。我国进口芯片所支付的费用已经超过了进口原油。

矿产资源在人类社会发展的整个历史进程中是

具有可替代性的。比如,从获取热能的角度,在使用石油之前,人类使用煤炭,在使用煤炭之前,人类使用的是木材,使用木材之前,人类只能靠天吃饭即使用太阳能。德国鲁尔工业区的煤炭在工业化开采之前,人们宁愿砍树来当燃料,而不愿意烧煤,因为燃煤产生“烟雾”而污染环境。直到 1374 年,控制鲁尔区的利西公爵威廉二世才开始向从田地里拾捡煤块的农民征税(Bai Mengchen,2019)。随着人类认识和科学技术水平的快速提高,原来意义上的矿产资源可能被新的更“经济”、更“清洁”的矿产资源所取代,如天然气取代石油,核能(铀和锂)取代化石能源。但取得“可替代性”资源之前,关键矿产往往显示出“不可替代性”。谁先掌握了关键矿产,谁就掌握主动权。仍以德国为例,鲁尔工业区虽然煤炭资源丰富,但缺乏铁矿资源,第一次世界大战时,大部分铁矿石来自于原属法国的洛林铁矿。但第一次世界大战之后,法国收回了洛林铁矿,德国只好从瑞典进口铁矿石。瑞典因为基鲁纳铁矿品位高、储量大而幸免于德国的入侵,成为“矿石换和平”的实例。进入 21 世纪,稀土的使用范围越来越广,而特定的稀土金属往往有特定的优先使用领域。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 用于制造光通讯器件;Tm 用于临床诊断和治疗肿瘤;Yb 用作电脑记忆元件添加剂;Lu 用于能源电池技术。中国由于重稀土资源丰富,供应较充分,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“杀手铜”的作用。因此,资源为王,技术为“王后”(虽然在幕后,但作用绝对不可忽视)。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。稀散金属也如此,中国目前大量出口锗、铟、镓、铋等的初级产品,而用锗、铟、镓、铋等关键金属制造的最先进的计算机芯片、红外扫描仪等精密仪器仍然需要进口,研发技术仍然落后于美国、日本、德国。

3 当前加强关键矿产研究的历史意义

西方科学技术先进的国家,对稀土、稀有和稀散

金属的工业化研究已经有了 100 多年的历史,而我国才起步不久。鉴于大宗矿产的工业化生产技术比较成熟,在我国也形成了成熟、配套的工业化体系,无论是钢铁工业、煤炭工业、石油工业还是有色金属、建材、化工,都形成了规模宏大、门类齐全的生产力,为我国国民经济的建设奠定了扎实的基础,为我国成为世界第二大经济体作出了巨大贡献。但是,我国在很多领域仍然落后,仍然受制于人,仍然被别人卡脖子,其中就包括关键矿产的资源保障和开发利用。比如,钢铁工业中关键的添加剂——铌(Nb),中国 90%以上靠进口。因此,加强对关键矿产的研究意义重大。

3.1 关键矿产是世界各国争夺的重要战略性资源

(1)关键矿产是维系国家经济安全和可持续发展的重要物质基础:关键矿产对国家的发展、稳定和提升国际竞争力具有重要战略意义,对国家经济安全以及可持续发展有着重要的影响力和制约力,和平时能够稳定、持续供应,并保持适度储备,能够应对国内外突发事件。拥有战略性关键矿产资源的多少是体现一个国家综合国力的重要指标。如果一个国家在某种关键矿产资源上占有绝对优势,并能控制该资源的国际市场价格和走势,对于提高其国际地位也具有重要的战略性意义。

(2)关键矿产同样具有自然属性和商品属性:战略性关键矿产和战略性物资是两个完全不同的概念,前者属于自然资源的范畴,而后者是劳动成果或产品。石油、天然气、水资源是战略性矿产资源,粮食和钢材则是战略性物资。战略性矿产资源还必须具有可供性,它既可以国内拥有,也可以从国际市场上购买或通过境外勘查活动获取。

(3)战略性关键矿产资源是一个动态的、与时俱进的概念。不同历史时期战略性矿产资源具体矿种的确定受下列因素的影响:①经济建设和社会对矿产资源的需求;②国内矿产资源开发利用状况及其对国民经济建设的保证程度;③国际市场价格关系及其繁荣、稳定程度;④国际环境影响,与境外资源供应国和境外矿产勘查国的政治、经济、军事关系等。

3.2 关键矿产资源是我国“稳增长、调结构”的基础保障和历史机遇

战略性新兴产业的发展是我国目前和今后相当长一段时期面临的新机遇,而高新技术的发展是一个国家国际竞争力的现实体现,在传统产业稳步增长的同时要大力发展战略性新兴产业。据中国工程

科技发展战略研究院在第二十二届中国国际高新技术成果交易会(2018年11月14日至18日,深圳)上发布的《2019中国战略性新兴产业发展报告》,2016年和2017年,我国战略性新兴产业工业增加值同比增长分别为10.5%和11.0%,高于同期规模以上全国工业增加值增速40%以上;2018年上半年,战略性新兴产业工业增加值同比增长8.7%,比同期规模以上工业增加值增速快2个百分点。因此,在经济新常态下,战略性新兴产业成为中国经济新引擎,而战略性新兴产业的发展对关键矿产资源的需求无疑将日益增加。随着高新技术产业将在我国经济结构和产业布局中的地位、作用越来越大,关键矿产资源对目前我国“调结构,保增长”经济发展方针的意义也将日益凸显。

3.3 关键矿产在当前国际竞争中的特殊意义

自1988年中国稀土产品产量超过美国、尤其是离子吸附型稀土大量开采,1993年中国稀土出口超过万吨开始,1994年国外一些重要公司改从中国进口稀土,稀土在国际政治、经济格局的话语权越来越受到关注。邓小平就有“中东有石油,中国有稀土”的著名论断。美国也注意到,对于美国来说,中国一直是非常重要的危机矿产的主要进口来源国。因此,美国对于危机矿产的进口要努力实现进口来源的多元化,以摆脱“对中国的依赖性”。

实际上,即便同样从1993年算起,中国对于美国的高科技技术和产品的高度依赖早已众所周知,而中国对于美国矿产资源尤其是“关键性矿产资源”的进口依赖性却是鲜为人知的。中国人总是“不好意思”。比如,作为稀有金属之一的铍,广泛用于航空、航天和核反应堆,在国防领域被用作原子能反应堆的防护材料和制备中子源的原料;在宇航和航空工业中,用以制造火箭、导弹、宇宙飞船的转接壳体 and 蒙皮,用作大型飞船、空间渡船的结构材料,用以制作飞机制动器和飞机以及飞船、导弹的导航部件,用作火箭、导弹、喷气飞机的高能燃料的添加剂等等。但美国掌握了全世界2/3以上的资源储量、2/3以上的产量和2/3以上的出口量,在全世界处于垄断地位。中国同样从美国进口铍。再比如,作为“拯救生命气体”的氦,中国年需求量在2200万立方米,也主要从美国或美国企业进口。一旦停止进口,中国的高端装备制造业、中国各大研究机构及高校的实验室、医院等等都将面临窘境。

为此,自2007年起,中国将稀土的生产计划由指导性调整为指令性。2010年,国务院发布《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》,关键矿产资源获得国家专项资金的支持,旨在通过“以奖代补”奖励资金重点支持关键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的目的。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《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》。

在中国《全国矿产资源规划(2016—2020)》中,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)被列为战略性矿产,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”,同时还可以根据社会经济的发展以及战略性新兴产业发展的趋势补充一些矿种,如铍、铌、钽、钪、锆、铟、铋、碲、镱、钼族金属、氦、膨润土、金刚石等。

应该说,美国也不是严格按照对外依存度来界定其“危机矿产”的属性。如,铍是美国的优势矿产,也一直在出口铍及其产品,但铍仍然是美国的“危机矿产”,即“多多益善”,可以发挥“卡别人脖子”的作用。因此,中国也不能因为稀土、钨、锡、锑等资源丰富而不再作为“关键矿产”,或者从“保护性开采名录”中去掉。

矿产资源,国家所有。关键矿产,当然也是国家所有。由于这些关键矿产资源与煤、石油、铁、铜、金等大宗矿产资源不同,其市场需求不大,直接产生的经济总量不大,社会影响面也不大,导致我国一直未重视找矿,以至于资源保障程度很低,长期依赖于国外,而且对外依存度居高不下。而且,随着新兴产业

的发展,高科技领域对稀有、稀土和分散金属及其他关键矿产资源的“依赖”将越来越明显。据美国统计,2/3 的高科技产品都要用到作为关键矿产主体的三稀金属矿产,因此,稀有、稀土和分散金属矿产也被称为高科技(High-Tech)矿产(Wang Denghong et al., 2002, 2016c)。

3.4 关键矿产在第四次科技革命中的战略意义

第四次工业革命是继蒸汽技术革命(第一次工业革命)、电力技术革命(第二次工业革命)和计算机及信息技术革命(第三次工业革命)以来的又一次科技革命,也被认为是“第四次科技革命”,是以人工智能、清洁能源、机器人技术、量子信息技术、可控核聚变、虚拟现实以及生物技术为主导的技术革命。2013 年 4 月 7 日至 11 日,在德国汉诺威工业博览会上,全球 65 个国家和地区的 5000 多家厂商参展,中国也有近 600 家参展商,规模仅次于东道主德国。会议期间提出的“工业 4.0”概念受到普遍关注,该博览会也被认为推动了“第四次工业革命”。

以往的三次工业革命,第一次工业革命开创了“蒸汽时代”(1760—1840),标志着农耕文明向工业文明的过渡;第二次工业革命进入了“电气时代”(1840—1950),使得电力、钢铁、铁路、化工、汽车等重工业兴起,石油成为新能源,并促使交通的迅速发展,世界各国的交流更为频繁,并逐渐形成一个全球化的国际政治、经济体系;两次世界大战之后开始的第三次工业革命,更是开创了“信息时代”(1950 年以来),全球信息和资源交流变得更为迅速,大多数国家和地区都被卷入到全球化进程之中。这前三次工业革命使得人类发展进入了空前繁荣的时代,但也造成了巨大的能源、资源消耗,付出了巨大的环境代价和生态成本,扩大了人与自然的矛盾。进入 21 世纪,人类面临空前的全球能源与资源危机、全球生态与环境危机、全球气候变化危机的多重挑战,由此引发了第四次工业革命——绿色工业革命。如果说以往的工业革命尤其是第二次工业革命以“烟囱如林”为标志的话,这第四次工业革命则是“去烟囱化”,让雾都伦敦这样的大都市不再浓烟滚滚,让德国的鲁尔工业区变成文化休闲的绿色公园,让加拿大萨德伯里这样的世界最大的镍矿山变成了旅游胜地,因而人们更愿意将第四次工业革命直接称为“第四次科技革命”,工业二字都不愿意使用了。的确,刚刚拉开序幕的第四次工业革命将是一场全新的绿色工业革命,其实质和特征,就是大幅度地提高资源的生产率,经济增长与不可再生资源要素将全面脱

钩。那么,对于中国这样一个全球最大的发展中国家来说,人口多、底子薄、基础差的现状没有根本性改变,人民生活水平、社会文明程度、物质积累程度都无法与美国、欧洲及日本等资本主义国家相比,核心技术如 CPU 仍然掌握在国外企业手中,但既然已经与世界强国站在了同一起跑线上,如何提高资源效率尤其是矿产资源的使用效率,关系到中国能否抓住历史机遇,扭转落后挨打的被动局面,通过弯道超车实现中华民族的伟大复兴,则是第四次科技革命带给中国地质者的现实而迫切的新命题。显然,提高稀有、稀土、分散、稀贵金属及稀有气体矿产资源的保障程度并科学合理地开发利用好这些关键性矿产资源,对于中国的第四次科技革命是具有战略性意义的。

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”。比如,会不会使用石器是人类区别于猿的关键之一,而铜的使用、铁的使用、煤的使用、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。第二次世界大战之后尤其是到了第三次工业革命,大宗矿产资源的工业化技术基本成熟而且规范化、标准化甚至模块化,而对于稀有金属、稀土金属及分散金属的使用,却异军突起,而且更加易于“保密”,对于不同国家能否掌握后工业化的主动权具有非同寻常的意义。比如,锆这一分散金属对于 Jack Kilby 在 1958 年发明集成电路时起到的关键作用堪称经典,而集成电路无疑开启了 20 世纪以来的微电子时代、信息时代!不仅如此,美国在 1984 年就把锆矿列为国防储备矿种,为其后在红外光学设备(占 65% 的消费量)、光导纤维(占 15%)、宇宙空间探测器(占 5%)等高端装备制造等工业领域的崛起和军事装备的更新换代提供了保障。其中,红外扫描仪(夜视镜,锆是必需的)装备部队之后,美军在伊拉克战争中不但占据压倒性优势,也为现代战争的“夜间化”样式提供了模板。可见,锆虽然属于分散元素,但在第三次、第四次科技革命的进程中起到了不能被忘却的关键作用,具有特定的历史意义,因而被认为是战略性关键金属之一,当属无疑。

再比如,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矿(Liu Lijun et al., 2017a, 2019)。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”,将锂作为战略性关键矿产,也理所当然(Wang Denghong et al., 2016a, 2016b, 2017d, 2018b)。

4 国内外找矿勘查的新进展

自 2011 年起,中国地质调查局设立“三稀金属矿产战略调查”等项目至今,在中国地质科学院矿产资源研究所的组织实施下,在全国 33 个单位 220 多人共同努力下,对我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,在四川甲基卡、江西赣州、福建永定等发现了一批新矿产地,实现了从战略研究到战略侦查再到找矿突破的三跨越;首次建成了全球和国内“三稀调查成果数据库”;编制《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(Wang Denghong et al., 2016b; Tu Qijun, 2019);坚持“资源调查与矿山环境监测空-天-地-人一体化”;“赣南钽”获得发明专利,可成倍加大离子吸附型稀土矿的勘查深度,提升资源潜力数倍;提出了离子吸附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;创新了我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;形成了被国土资源部领导称为“三稀别动队”的团队,为矿政管理提供支撑服务。

4.1 重点省份三稀资源家底初步摸清,实现从战略研究到战略侦查再到找矿突破的跨越

初步查明我国重点省份(内蒙、福建、江西、湖南、广东、广西、四川、云南、青海、新疆等 10 省(区))三稀矿产资源家底与开发利用状况,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,提出了我国在三稀资源领域的应对措施,及时服务了矿政管理工作,为我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,如甲基卡工作区经后期查证,至 2015 年底新增 334 级别资源量 88.55 万吨氧化锂,2016—2018 年间又新增 334 级别资源量 25.77 万吨,合计新增 334 级别氧化锂 114.32 万吨。再如,在云南发现黑妈钽云母型的锂矿,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、离子吸附型稀土矿产地多处(Wang Denghong et al., 2012b, 2013a, 2013c, 2016d, 2016e, 2017e; Liu Yongchao et al., 2017; Li Jiankang et al., 2017a; Lu Lei et al., 2019)。

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(Pi Qiaohui et al., 2014; Tao Yan et al., 2019)。比如,四川牦牛坪矿区堆放在河道中的稀土尾砂,不但堵塞了河道,阻碍泄洪,而且尾砂中的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 含量可超过 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 达到了边界品位(磁选后的尾砂 Mo 含量达到 2.275%),足以重新加以利用(Liu Lijun et al., 2013)。对采自不同矿区的稀土精矿粉也进行了地球化学方面的研究(Zhao Zhi et al., 2013),为后期利用稀土精矿粉配制稀土溶液研究反射波谱特征以及遥感技术监控离子吸附型稀土矿山的开采(Dai Jingjing et al., 2014b, 2014c, 2017a)、不同类型三稀矿石及矿产品的现代仪器测试全新方法的建立(Qu Wenjun et al., 2019)奠定了基础。

4.2 “三稀调查成果数据库”信息丰富,大数据平台首次搭建并不断充实

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,对今后我国三稀资源调查和管理具有重要意义(Zhao Ting et al., 2016)。在此基础上研究了全球三稀资源分布特征及我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,为我国战略性新兴产业发展布局提供了依据,有助于增强我国矿产资源的国际竞争力,有利于积极参与全球资源优化配置,对于我国在WTO体制下三稀矿产品贸易政策的制定及相关研究工作也具有重要的参考价值。

4.3 通过对关键矿产调查选区的部署,为找大矿、找好矿提供了决策依据

完成了设证 100 多个稀土矿区及其他重要三稀矿产地的野外调研工作,研发了新的技术方法,如离子吸附型稀土样品野外现场快速定性定量评价稀土原矿品位方法在川西及江西赣州取得良好效果。开展了我国三稀资源调查部署选区研究,提供了一批重要的三稀矿产资源战略接续区,为找矿突破战略行动的实施、国家规划矿区的设立、三稀矿产地储备体系的建立作好了技术准备(Zhao Zhi et al., 2017, 2019)。

4.4 矿山环境监测“空-天-地-人”一体化,全方位服务矿政管理

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,基于最新高空间分辨率遥感数据,结合矿权资料建立了离子吸附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(Dai Jingjing et al., 2013, 2014a, 2014b, 2014c, 2017a, 2017b)。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(Liu Xinxing et al., 2016, 2019)。

4.5 风化壳型稀土矿勘查技术方法更新换代,加大勘查深度

随着稀土勘探工作难度的不断加大,要想获得真实动态的信息,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(Deng Maochun et al., 2013)。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。

4.6 离子吸附型稀土矿实现单元素圈矿,稀缺矿种精准定位

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,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矿圈成非矿(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(Deng Maochun et al., 2013; Zhao Ting et al., 2014)。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、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现实意义。

4.7 离子吸附型稀土资源储量动态计算方法与时俱进,真正体现“经济地质”

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”。以往在离子吸附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及人力投入。赵汀等以赣州某稀土矿为例,详细研究了克里格法在矿体顶底板圈定、品位插值计算、矿体三维模型建立等方面的应用,并引入矿产品市场价格数据进行敏感性分析,提出了不同价格条件下动态估算储量的新方法,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(Zhao Ting et al., 2014)。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动态设置边界品位,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的各种经济参数,帮助矿山选择合理的采矿工程布置,为稀土资源的合理利用提供了技术支撑。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,取得了初步成效。

4.8 构建了离子吸附型稀土矿山环境评价模型, SMAIMA 工作法自成体系

为了弄清我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,于扬等人选择赣南地区流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,6 年持续采样(共 552 件),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)三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 and 对策,并取得实效(Yu Yang et al., 2017, 2019)。该工作方法可以推广运用到其他矿山环境的调查与治理。

4.9 深化离子吸附型稀土成矿理论研究,内生外成机制关联找矿标志

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 $F-CO_2-REE$ 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、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,当风化蚀变指数 $65\% < CIA < 85\%$ 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,从而厘定了离子吸附型稀土矿成矿的最佳风化条件(Zhao Zhi et al., 2017, 2019)。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。

4.10 提高三稀矿政管理科技含量,助力行业健康可持续发展

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“稀土管得住,稀有找得到,稀散用得好”的矿政管理模式。出版的《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》两部专著及发表的系列论文,即便是对非地质专业人员也具有实用的参考价值(Wang Denghong et al., 2012a, 2013d, 2019; Wang Ruijiang et al., 2015; Yuan Zhongxin et al., 2016; Liu Chao et al., 2016; Zhao Ting et al., 2019)。通过综合研究和实地调查,对稀土、锂、铍等 34 种矿产资源的资源家底、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我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,为我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可持续健康发展提供了支撑服务。2011 年,根据《国务院关于促进稀土行业持续健康发展的若干意见》,工信部牵头组织了“开展全国稀土生产秩序专项整治行动”。项目组成员参加了对广西、云南等地的专项检查,其研究成果和高分辨率遥感图像等资料对检查工作起到了积极作用(Song Yang et al., 2013)。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,认为要从此类磷块岩中独立分离出稀土金属,成本太高,技术难度大,还不如直接当作“稀土磷肥”开发利用(Duan Kaibo et al., 2014)。该建议已经得到贵州西南能矿集团股份有限公司的高度重视,并上报贵州省政府。

4.11 分析测试技术手段日新月异,技术要求和行业规范不断完善

传统的、常规的分析测试技术难以解决类型多样、基体复杂、含量变化大的三稀矿石及矿产品的测试要求,而基于 ICP-MS、ICP-AES 和 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证书),不但测试元素多而且工作效率高,为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(Qu Wenjun et al., 2019)。此外,X 粉晶衍射、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、查明稀有稀土稀散元素的赋存状态、评价其开发利用的价值、为采选冶工艺流程的制定提供了现代化的测试手段,为四川大水沟碛矿中未知矿物相“Bi₅Te”、甲基卡锂矿及陕西镇安等地祖母绿等罕见矿物的鉴定作出了贡献(Dai Hongzhang et al., 2017, 2018a, 2018b, 2019; Xiong Xin et al., 2019; Tan Xijuan et al., 2019; Feng Yonggang et al., 2019)。锂同位素的分析测试,为“以锂找锂”方法的建立奠定了基础(Wang Denghong et al., 2016a, 2018b; Liu Lijun et al., 2017b)。

4.12 找矿方法和勘查技术不断更新,绿色勘查取得新进展

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,并且申请了新的发明专利——“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(Dai Jingjing et al., 2019)。面对环境保护的新要求,类似于甲基卡这样的重点工作区不能施以槽探等常规的地表勘探工程,深部钻探验证也要求越来越严苛。项目组通过多年的努力,摸索出一套包括“牛粪找矿”在内的生物探矿技术(Yu Yang et al., 2019)和水化学找矿方法(“一种基于牛粪锂元素含量寻找隐伏矿体的方法”和“一种基于植物中铍元素含量预测隐伏铍矿的方法”等,正在申请专利)。钻探工作也创新了岩芯钻探工作部署的技术思路,以进口钻机为主,每天进尺可达 100 m,效率高;钻探设备实现模块化集成,容易搬家,机动灵活,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“吸食泥浆”而死亡的事件,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。

4.13 通过物理选矿(物),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矿产,往往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,要充分利用好现有的三稀及其他关键性矿产资源(包括铂族金属),不但需要通过化学分析、仪器分析测试的手段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,岩矿鉴定是必须的工作,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而难以制备高质量的光薄片样品。2018 年,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、LA-ICP-MS 等原位分析测试奠定了良好的基础),而且提高了工作效率,可以更快更多地提供光薄片。在此基础上,矿产资源研究所王裕先研究员利用其自有的发明专利,根据锂辉石物性参数不同于其他矿物的基本特点(密度 3.13~3.2g/cm³;介电常数 8.42>7),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 Li₂O 含量达 6.394%(国际锂辉石精矿标准 yb836-75 一级品要求>6%),远高于融达锂矿公司的传统选矿指标(5.48%),而成本要低得多。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。

4.14 攻深找盲,川西大型锂矿资源基地取得新突破

在川西大型锂矿资源基地甲基卡工作区,2016-2018 年间共施工钻孔 12 个,总进尺 2800m,共获 Li₂O 资源量 257659 吨、伴生 BeO(334)资源量 8978 吨, Ta₂O₅(334)资源量 2015 吨, Nb₂O₅(334)资源量 3017 吨。3 年新增锂资源量相当于发现 3 个大型矿床,另外还圈定 7 个找矿靶区,落实 2 个矿产地。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(表 1),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,形成了一个川西找锂的高潮(Liu Lijun et al., 2016; Liu Shanbao et al., 2019)。

4.15 幕阜山大型稀有金属基地基本成型,为湘鄂赣革命老区脱贫作出贡献

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

表 1 川西大型锂矿资源基地国家出资探获的锂资源储量

Table 1 Resources of lithium proved by the state in the large Li mining bases, western Sichuan

重点工作区	靶区	矿体编号	资源量级别	氧化锂品位(%)	矿石量(t)	氧化锂资源量(t)
甲 基 卡	X03 南	X03-I	334	1.41	63995755	899514
		X03-II	334	1.15	53182	610
		X03-III	334	1.47	3376223	49696
		X03-IV	334	1.41	1105342	15597
		X16	334	0.94	2909153	27264
	C 靶区	X06	334	1.56	1884621	29410
	哲西措	DI	334	0.96	1023301	9803
		DII	334	0.82	418158	3436
	鸭柯柯	YI	334	1.00	6957473	69325
		YII	334	0.97	2018229	19577
		YVI	334	0.92	4165637	18917
	合计		334		87907074	1143149
可 尔 因	原三稀项目		334		63210257	885490
	大型基地项目新增		334		24696817	257659
		19	334	1.63	93706.00	1527.41
		20	334	1.88	728177.70	13689.74
		22	334	1.08	193538.65	2090.22
		23	334	1.38	159625.39	2202.83
		35	334	1.00	156107.53	1561.08
		36	334	1.00	1318698.49	13186.98
		37	334	1.00	39294.50	392.95
		38	334	1.00	36104.51	361.05
		合计	334		2725252.77	35012.25

属、贵金属、铀矿以及萤石等非金属矿产资源丰富的矿集区,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。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。宜春四一四矿床目前是我国最重要的稀有金属生产矿山,但资源危机。因此,近年来,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 8.5km 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,也助力湖南核工业 311 地质队在仁里取得特大型铌钽矿的找矿突破(Zhou Fangchun et al., 2019;Li Peng et al.,2019)。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):BeO 为 1.616 万吨,Li₂O 为 1.128 万吨,(Ta,Nb)₂O₅ 为 0.345 万吨,均达到大中型规模(表 2)。

实际上,幕阜山与江西境内的九岭和武功山地区都是以花岗岩类大面积出露为特点的稀有金属找矿远景区,但不同地段的成矿条件不同,找矿方向也不一样。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(Wang Chenghui et al.,2018),也对湖北和湖南有指导作用。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、铌钽矿物等金属有用矿物。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 Li₂O 资源量达 38.26 万吨(Wang Chenghui et al., 2019)。更有意义的是,此类岩体型稀有金属矿床,类似于铜矿中的“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、但十分重要的意义。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。

表 2 华南稀有稀土稀散金属矿产调查 2016—2018 年间重点工作区新增资源量估算表

Table2 Estimation of newly discovered resources of rare metal, rare earth and rare dispersed elements by geological survey in key working areas, South China, from 2016 to 2018

工作区	类型	靶区名称	矿段编号	Li ₂ O(%)	Li ₂ O 资源量(t)	共伴生资源(t)
江西九岭	含磷锂铝石岩体型	尖山岭靶区	V1	0.484	51110.4	
			V2	0.567	27280.64	
			V3	0.8975	100547.86	
		狮子岭靶区	V4	0.7495	59360.4	
			V5	0.51	30294.0	
		黄岗上靶区	V6	0.475	45269.4	
			V7	0.651	68745.6	
		合计			382608.3	
江西谷寨	伟晶岩型				5188	Nb ₂ O ₅ 328,Ta ₂ O ₅ 262
云南黑妈	伟晶岩型锂云母			0.13%~1.73%, 平均 0.95%		仅槽探揭露,深部产状未查明,未算资源量
湖南连云山	伟晶岩型				11280	BeO 16160,(Ta,Nb) ₂ O ₅ 3450

注:江西九岭地区根据地表网格化采样推断 100m 以浅资源量;湖南连云山钻探圈矿,孔深 201.2m;江西谷岭通过钻探圈矿,预测主矿种 100m 以浅可达中型。离子吸附型稀土矿产地多,按照有关保密要求此不罗列资源储量。

5 存在问题和主攻方向

在关键矿产领域,我国存在的理论难题和技术瓶颈包括:①优势矿种只有稀土和部分稀散金属矿产。稀有金属高度依赖进口,难以保障战略性新兴产业的快速发展甚至可能影响到国家安全,尤其是美国对伊朗制裁自 2018 年 11 月生效之后,连带影响到中国原油的进口。这一杀鸡儆猴的策略,意味着在石油之外的关键矿产资源,美国也可能采取类似的手段。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”,包括最著名的白云鄂博、攀枝花、个旧,也包括新疆的可可托海。成矿物质从何而来的问题一直未解决,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。尤其是最著名的一些矿床,如云南会泽、广东大宝山等著名的稀有稀散金属矿床,以往认为是层控,现在发现延深 1km 仍然成矿很好。⑤探测技术手段有限,主要是矿山企业通过“边采边探”增加资源量,如广西大厂 100[#] 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。比如,我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并没有充分利用而实际上浪费了资源(Sheng Jifu and Wang Denghong, 2018),要么是四川雪宝顶这样虽然质量好但位于高海拔、保护区而难以正规化开采的类型。

因此,需要研发的关键技术,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、甘肃的金川),争取在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 3000m 深度、2000m 深度、1000m 深度、500m 深度和 50m 深度的系列化探测技术),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。

创新切入点包括:①查明不同类型关键矿产的空间分布规律。比如,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(Wang Denghong et al., 2004, 2017a; Wang Denghong, 2018)。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 年期间,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三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、硅钙界面的等等),取得了很好的效果(Wang Denghong et al., 2018a)。③查明典型矿床的精细结构(或者叫透明化)与精准探测技术(层脉识别),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(Wang Denghong et al., 2010, 2017b, 2017c)。④查明锂等稀有金属的立体分带机制和离子吸附型稀土矿的垂向富集机制(Li Jiankang et al., 2013, 2014, 2017b; Wang Denghong et al., 2014, 2018c, 2018d; Zhao Zhi et al., 2017, 2019)。⑤对新类型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,如铝土矿中高含量钨和锂的发现(Wang Denghong et al., 2012c, 2013b),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了高度关注(Gao Juanqin et al., 2019a, 2019b),我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 983mg/L,一般也有几十 mg/L(Tan Hongbing et al., 2007),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(Sun Yan et al., 2017)。

6 结语

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。根据我国战略性新兴产业发展的需要和国内外发展趋势,可以将年需求量不超过 20 万吨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。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,其技术属性更加凸显,作为高科技矿产已经成为世界各国抢占战略制高点的重要战略资源,也是我国保障战

战略性新兴产业发展与国家安全的基本保障,因而无论是在国际竞争还是国内发展中都具有十分重要的战略意义。

通过近 10 年来的努力,我国在部分省份初步摸清了以三稀矿产为重点的关键矿产的资源家底,也实现了硬岩型锂矿等部分矿种的找矿突破;建立了三稀矿产的数据库,设立了专门的调查评价工程,为地质找矿工作部署提供了依据;在应用遥感技术、新一代分析测试技术、绿色勘探技术等方面取得了一批新进展,也获得了“赣南钴”等一批发明专利并得到了实践应用;在生物找矿、环境综合评价、资源储量动态计算、物理选矿技术等方面取得了一系列独创性成果,获得了发明专利;在川西甲基卡-可尔因矿集区、湘鄂赣交界处的幕阜山-九岭矿集区以及武夷山南段-南岭等地取得了一批找矿成果。但是,总体上看,我国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,对原有探明资源的快速消耗,自我保障能力越来越差,对外依存度却越来越高。因此,必须高度重视关键矿产在社会发展尤其是对于保障我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。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,应成为我国当前和今后相当长时期内关键矿产领域的主攻方向。

致谢:本文尽管因为部分观点属于个人看法、本着文责自负的原则而个人署名,但实际上也是中国地质科学院矿产资源研究所稀有稀土贵金属研究室“三稀”项目组集体工作的成果。对审稿专家以及裴荣富、陈毓川、郑绵平、邹天人、杨岳清、王瑞江、许建祥等专家和多年来一起参与三稀矿产调查评价工作的屈文俊、付小方、冯文杰等非矿产资源研究所的同行们表示衷心的感谢。

References

Abraham D S. 2015. The Elements of Power. Yale University Press.

Bai Mengchen. 2019. Rise of Ruhrdistrict; from coal mine to blast furnace, and then “German weapon factory”. National Humanity History, (5): 86~91 (in Chinese).

Dai Hongzhang, Wang Denghong, Wang Chenghui, Chen Zhenyu. 2017. Preliminary study and discussion on the unknown mineral phase “Bi₅Te” in the Dashuigou tellurium deposit, Shimian County, Sichuan Province. Gold Science and Technology, 25 (5):11~17 (in Chinese with English abstract).

Dai Hongzhang, Wang Denghong, Liu Lijun, Yu Yang, Dai Jingjing. 2018a. A study on the emerald in the Jiajika rare metal mining area, Sichuan Province, China. Acta Mineralogica Sinica, 38(2): 135~141 (in Chinese with English abstract).

Dai Hongzhang, Wang Denghong, Liu Lijun, Huang Fan, Wang Chenhui. 2018b. Study on emerald-level beryl from the Zhen’an W-Be polymetallic deposit in Shaanxi Province by electron probe microanalyzer and micro X-ray diffractometer. Rock and Mineral Analysis, 37(3): 336~345 (in Chinese with English abstract).

Dai Hongzhang, Wang Denghong, Liu Lijun, Huang Fan, Wang Chenghui. 2019. Metallogenic epoch and metallogenic model of the Hetaoping W-Be deposit in Zhen’an County, South Qinling. Acta Geologica Sinica, 93(6):1342~1358 (in Chinese with English abstract).

Dai Jingjing, Wang Denghong, Chen Zhenghui, Yu Yang. 2013a. Application of IKONOS remote sensing data in environmental pollution investigation of ion adsorption type rare earth mining area. Acta Geoscientia Sinica, 34(3):354~360 (in Chinese with English abstract).

Dai Jingjing, Wang Denghong, Wang Runsheng, Chen Zhenghui. 2013b. Quantitative estimation of concentrations of dissolved rare earth elements using reflectance spectroscopy. Journal of Applied Remote Sensing, 7(1): 073513.

Dai Jingjing, Wang Ruijiang, Wang Denghong. 2014a. Application of high spatial resolution remote sensing data in the investigation of ion-adsorbed rare earth mines. Remote Sensing Technology and Application, 29(6):935~942 (in Chinese with English abstract).

Dai Jingjing, Wang Denghong, Li Qingting, Chen Zhenghui. 2014b. Study on the reflection spectrum characteristics of rare earth solutions with different concentrations. Spectroscopy and Spectral Analysis, 34(5):1158~1162(in Chinese with English abstract).

Dai Jingjing, Wang Ruijiang, Wang Denghong, Chen Zhenghui. 2014c. Monitoring of illegal mining of Weinan ion-adsorbed rare earth ore based on IKONOS data. Journal of Earth, 35(4):503~509 (in Chinese with English abstract).

Dai Jingjing, Wang Denghong, Chen Zhenghui. 2017a. Research on the reflection spectrum characteristics of rare earth solution prepared by rare earth concentrate powder in South Anhui. Journal of Earth, 38(4):523~528 (in Chinese with English abstract).

Dai Jingjing, Wang Denghong, Dai Hongzhang, Liu Lijun, Wu Yanan. 2017b. Application of remote sensing technology in prospecting and mapping of Mikaka large-scale lithium mine base in western Sichuan. China Geology, 44(2):389~398 (in Chinese with English abstract).

Dai Jingjing, Wang Denghong, Wang Haiyu. 2019. A review of the three type rare mineral resources survey in China using remote sensing. Acta Geologica Sinica, 93(6):1270~1278 (in Chinese with English abstract).

Deng Maochun, Wang Denghong, Zeng Zailin, Zhang Yongzhong, Zhao Zhi, Zou Xinyong, Chen Binfeng. 2013. Evaluation on delineation methods for ion-adsorption type rare earth ore body. Rock and Mineral Analysis, 32(5): 803~810 (in Chinese with English abstract).

Duan Kaibo, Wang Denghong, Liu Qiuying, et al. 2014. Feasibility study on REE-bearing phosphate ore directly used for production of REE phosphate fertilizer in Zhijin, Guizhou. Resources & Industries, 16(5): 42~50.

Feng Yonggang, Wang Yiqian, Zhang Ze, Liang Ting, Zhou Yi, Gao Jinggang. 2019. Geochemistry of triphylite in Dahongliutan lithium pegmatites, Xinjiang: implications for pegmatite evolution. Acta Geologica Sinica, 93(6):1405~1421.

Gao Juanqin, Wang Denghong, Wang Wei, Yu Feng, Yu Yang. 2019a. Current status and prospects of lithium extraction in major domestic and foreign oil (gas) field waters. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1489~1500 (in Chinese with English abstract).

Gao Juanqin, Yu Yang, Wang Denghong, Liu Lijun, Dai Hongzhang, Guo Weiming. 2019b. Distribution characteristics and implication of rare metal elements in surface water of Jiajika

- mine in western Sichuan Province. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1331~1341 (in Chinese with English abstract).
- Guo Weiming, Ma Shengchao, Sun Yan, Zhao Zhi, Zhong Hairan, Yao Leishan. 2019. Characteristics and significance of rare metal mineralization in hot-springs Tengchong area, Yunnan. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1321~1330 (in Chinese with English abstract).
- He Xianjie, Zhang Fuliang. 2014. Thoughts and suggestions on early planning strategic emerging minerals development. *Natural Resource Economics of China*, 30(5): 4~8 (in Chinese with English abstract).
- Huang Fan, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Yuan Zhongxin, Chen Zhenghui. 2011. A discussion on the major molybdenum ore concentration areas in China and their resource potential. *Geology in China*, 38(5): 1111~1134. (in Chinese with English abstract).
- Huang Fan, Wang Denghong, Chen Yuchuan, Wang Chenghui, Tang Juxing, Chen Zhenghui, Wang Liqiang, Liu Shanbao, Li Jiankang, Zhang Changqing, Ying Lijuan, Wang Yonglei, Li Lixing, Li Chao. 2014a. Trace elements characteristics of molybdenites from endogenous molybdenum deposits in China. *Mineral Deposits*, 33(6): 1193~1212 (in Chinese with English abstract).
- Huang Fan, Wang Denghong, Wang Chenghui, Chen Zhenghui, Yuan Zhongxin, Liu Xinxing. 2014b. Resources characteristics of molybdenum deposits and their regional metallogeny in China. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2296~2314 (in Chinese with English abstract).
- Huang Fan, Wu Xishun, Wang Denghong, Sun Yan. 2019a. Rhenium raising throughout the ages -uncovering the mystery of 'supermetal' rhenium. *Cultural and Science Popularization of Land and Resources*, (2): 10~15.
- Huang Fan, Wang Denghong, Wang Yan, Jiang Biao, Li Chao, Zhao Hong. 2019b. New progress and guides to prospecting of rhenium deposits and their metallogenic regularity in China. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1252~1269 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Wang Denghong, Chen Yuchuan. 2013. The ore-forming mechanism of the Jiajika pegmatite-type rare metal deposits in western Sichuan Province: evidence from isotope dating. *Acta Geologica Sinica*, 87(1): 91~101.
- Li Jiankang, Liu Xifang, Wang Denghong. 2014. The metallogenic regularity of lithium deposit in China. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2269~2283 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Wang Chenghui, Feng Wenjie, Wang Denghong, Zou Tianren. 2017a. Discovery of granitic pegmatite-type zinnwaldite deposit in northwest Yunnan. *Mineral Deposits*, 36(6): 1453~1455 (in Chinese).
- Li Jiankang, Zou Tianren, Wang Denghong, Ding Xin. 2017b. A review of beryllium metallogenic regularity in China. *Mineral Deposits*, 36(4): 951~979 (in Chinese with English abstract).
- Li Peng, Liu Xiang, Li Jiankang, Huang Zhibiao, Zhou Fangchun, Zhang Liping. 2019. Petrographic and geochemical characteristics of Renli-Chuanziyuan No.5 pegmatite, NE Hunan, and its metallogenic epoch. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1374~1391 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chao, Zhao Ting, Wang Denghong, Li Jiankang. 2016. Strontium industry development status and future development strategy of China. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(1): 29~35 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lijun, Zhao Zhi, Fu Xiaofang, Ren Xijie, Fang Yiping, Hou Liwei, Wang Denghong. 2013. Geochemistry of rare earth and trace elements in rare earth tailings from Sichuan Province and the significance of the exploitation and utilization. *Rock and Mineral Analysis*, 32(5): 817~824 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lijun, Wang Denghong, Yang Yueqing, Fu Xiaofang, Hao Xuefeng, Pan Meng, Tang Yi, Chen Zhenyu. 2016. Metallogenic characteristics of X03 rare metal vein in Jiajika of Sichuan. *Journal of Guilin University of technology*, 36(1): 50~59 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lijun, Wang Denghong, Liu Xifang, Li Jiankang, Dai Hongzhang, Yan Weidong. 2017a. The main types, distribution features and present situation of exploration and development for domestic and foreign lithium mine. *Geology in China*, 44(2): 263~278 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lijun, Wang Denghong, Hou Kejun, Tian Shihong, Zhao Yue, Fu Xiaofang, Yuan Linping, Hao Xuefeng. 2017b. Application of lithium isotope to Jiajika new No. 3 pegmatite lithium polymetallic vein in Sichuan. *Earth Science Frontiers*, 24(5): 167~171 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lijun, Wang Denghong, Gao Juanqin, Yu Feng, Wang Wei. 2019. Breakthroughs of lithium exploration progress (2017~2018) and its significance to China's strategic key mineral exploration. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1479~1488 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shanbao, Yang Yueqing, Wang Denghong, Dai Hongzhang, Ma Shengchao, Liu Lijun, Wang Chenghui. 2019. Discovery and significance of granite type lithium industrial orebody in Jiajika orefield, Sichuan Province. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1309~1320 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xinxing, Wang Denghong, Chen Yuchuan, Zhao Zhi, Huang Fan. 2019. The research on metallogenic prediction of ion-absorption type rare earths ore in eastern Nanling region. *Chinese Rare Earths*, 40(2): 1~13 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xinxing, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Huang Fan, Zhao Zhi. 2016. The metallogenic geomorphic condition analysis of the ion-absorbing type rare earths ore in the eastern Nanling region based on DEM data. *Acta Geoscientia Sinica*, 37(2): 174~184 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongchao, Li Jiankang, Zou Tianren, Jiang Shanyuan, Hu Mingyue, Chen Zhenyu. 2017. Enrichment characteristics of Nb and Ta of Daping granite porphyry in Yongding, Fujian Province. *Mineral Deposits*, 36(1): 143~157 (in Chinese with English abstract).
- Lu Lei, Wang Denghong, Wang Chenhui, Zhao Zhi, Feng Wenjie, Xu Xiaochun, Yu Feng. 2019. Mineralization regularity of ion-absorption type REE deposits on Lincang granite in Yunnan Province. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1466~1478 (in Chinese with English abstract).
- Pi Qiaohui, Wang Denghong, Miao Bingkui, Zhang Qingwei, Chen Yun, Jing Yuan, Wang Chan, Xia Zhipeng. 2014. Research on the distribution rule and evaluation of dispersed element resources in tailings storage of the Dachang mine, Guangxi. *Geology and Exploration*, 50(2): 291~302 (in Chinese with English abstract).
- Qin Jinhua, Wang Denghong, Chen Yuchuan, Zhao Ruiyi, Wang Chenghui, Jiang Biao. 2019. Discussion on the relationship between Hengyang basin and mantle plume and its implication for the deep prospecting of key minerals. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1501~1513 (in Chinese with English abstract).
- Qu Wenjun, Wang Denghong, Zhu Yun, Fan Xingtao, Li Cao, Wen Hongli. 2019. Establishment of new method for critical elements determination using modern analytical instruments. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1514~1522 (in Chinese with English abstract).
- Shao Juenian, Tao Weiping. 2010. *Handbook for Industry Use of Mineral Resources*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Shen Jifu, Wang Denghong. 2018. *Geology of Mineral Resources in China, Volume of Tungsten Ore*. Beijing: Geological Publishing House, 1~799 (in Chinese).
- Song Yang, Wang Ruijiang, Wang Denghong, Zhao Zhi, Yu Yang, Wang Chenghui, Li Xiaomei. 2013. Remedies of China's overlapped ore resources. *Resources & Industries*, 15(5): 56~60 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yan, Gao Yun, Wang Denghong, Dai Hongzhang, Gu

- Wenshuai, Li Jian, Zhang Lihong. 2017. Zircon U-Pb dating of “mung bean rock” in Tongliang, Chongqing and its geological significance. *Rock and Mineral Analysis*, 36(6):668~677 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yan, Wang Denghong, Wang Chegnhui, Li Jiankang, Zhao Zhi, Wang Yan, Guo Weiming. 2019. Metallogenic regularity, new prospecting and guide direction of rubidium deposits in China. *Acta Geologica Sinica*, 6(93):1231~1244 (in Chinese with English abstract).
- Tan Hongbing, Cao Chengdong, Li Tingwei, Fan Qishun. 2007. Hydrochemistry characteristics and chemical evolution of oilfield brines of the Paleogene and Neogene in western Qaidambasin. *Journal of Palaeogeography*, 9(3): 313~320(in Chinese with English abstract).
- Tan Xijuan, Liang Ting, Zhang Ze, Zhou Yi, Wang Yiqian, Feng Yonggang, San Jinzhu. 2019. Quantification accuracy study of lithium in spodumene between ICP-MS and ICP-AES. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1543~1549 (in Chinese with English abstract).
- Tao Yan, Hu Ruizong, Tang Yongyong, Ye Lin, Qi Huawen, Fan Haifeng. 2019. Types of dispersed elements bearing ore-deposits and their enrichment regularity in Southwest China. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1210~1230 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chenghui, Sun Yan, Yang Yueqing, Chen Zhengyu, Xie Guogang, Fan Xiujun. 2018. Discovery of amblygonite and other Li, Be, Sn, Ta minerals in the Jiuling area, Jiangxi. *Rock and Mineral Analysis*, 37(1):108~110.
- Wang Chenghui, Wang Denghong, Chen Chen, Liu Shanbao, Chen Zhenyu, Sun Yan, Zhao Chenhui, Cao Shenghua, Fan Xiujun. 2019. Progress of research on the Shiziling rare metals mineralization from Jiuling-type rock and its significance for prospecting. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1359~1373 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong. 2018. Metallogenic regularity, prospecting and material circulation of key mineral resources (2018-12-8, Chengdu Shuangqing Forum).
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Zhigang, Li Tiande, FuXujie. 2002. *Metallogenic Series and Regularity of Altay Metallogenic Province*. Beijing: Atomic Energy Press, 1~493 (in Chinese).
- Wang Denghong, Zou Tianren, Xu Zhigang, Yu Jinjie, Fu Xiaofang. 2004. Advance in the study of using pegmatite deposits as the tracer of orogenic process. *Advance in Earth Sciences*, 19(4):614~620 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Tang Juxing, Ying Lijuan, Chen Zhenhui, Xu Jianxiang, Zhang Jiajing, Li Shuiru, Zeng Zailin. 2010. Application of “Five levels + Basement” model for prospecting deposits into depth. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(4):733~738 (in Chinese).
- Wang Denghong, Li Lixing, Li Jiankang, Li Xiaomei, Zhen Guodong, Yu Yang, Zhao Zhi. 2012a. Marine rare earth resources and their possible impact on China’s rare earth industry. *Mineral Deposits*, 31(supplment):1109~1110 (in Chinese).
- Wang Denghong, Wang Ruijiang, Li Jiankang, Zhao Zhi, Yu Yang, Zhen Guodong, Li Xiaomei, Sun Yan, Li Dexian, Zhao Ting. 2012b. Basic characteristics and research status of rare earth, rare metal and rare-scattered elements mineral resources in China. *Mineralogy Deposits*, 31(Supplment): 41~42 (in Chinese).
- Wang Denghong, Li Peigang, Qu Wenjun, Yin Lijuan, Zhao Zhi, Lei Zhiyuan, Wen Shenfu. 2012c. Discovery and preliminary study of the high tungsten and lithium contents in the Dazhuyuan bauxite deposit, Guizhou, China. *Science China, Earth Sciences*, 55(1): 1~8.
- Wang Denghong, Fu Xiaofang. 2013a. Breakthrough of lithium prospecting on the periphery of Jiajika, Sichuan. *Rock and Mineral Analysis*, 32(6):987~987 (in Chinese).
- Wang Denghong, Li Peigang, Qu Wenjun, Lei Zhiyuan, Liao Youchang. 2013b. Discovery and comprehensive evaluation of tungsten and lithium in bauxite, Dazhuyuan, Guizhou. *Scientia Sinica Terrae*, 43(1): 44~51 (in Chinese).
- Wang Denghong, Wang Ruijiang, Li Jiankang, Zhao Zhi, Yu Yang, Dai Jingjing, Chen Zhenhui, Li Dexian, Qu Wenjun, Deng Maochun, Fu Xiaofang, Sun Yan, Zhen Guodong. 2013c. The progress in the strategic research and survey of rare earth, rare metal and rare-scattered elements mineral resources. *Geology in China*, 40(2): 361~370 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Zhao Zhi, Yu Yang, Zhao Ting, Li Jiankang, Dai Jingjing, Liu Xinxing, He Hanhan. 2013d. Progress, problems and research orientation of ion-adsorption type rare earth resources. *Rock and Mineral Analysis*, 32(5):796~802 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Xu Zhigang, Sheng Jifu, Zhu Mingyu, Xu Jue, Yuan Zhongxin, Bai Ge, Qu Wenjun, Li Huaqin, Chen Zhenhui, Wang Chenghui, Huang Fan, Zhang Changqing, Wang Yonglei, Ying Lijuan, Li Houmin, Gao Lan, Sun Tao, Fu Yong, Li Jiankang, Wu Guang, Tang Juxing, Feng Chengyou, Zhao Zheng, Zhang Daquan. 2014. Progress on the study of regularity of major mineral resources and regional metallogenic regularity in China: a review. *Acta Geologica Sinica*, 88(12):2176~2191(in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Liu Lijun, Liu Xinxing, Zhao Zhi, He Hanhan. 2016a. Main types and research trends of energy metallic resources in China. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(1): 21~28 (in Chinese with English Abstract).
- Wang Denghong, Wang Ruijiang, Fu Xiaofang, Sun Yan, Wang Chenghui, Hao Xuefeng, Liu Lijun, Pan Meng, Hou Jianglong, Dai Jingjing, Tian Shihong, Yu Yang. 2016b. A discussion on the major problems related to geological investigation and assessment for energy metal resources base: a case study of the Jiajika large lithium mineral resource base. *Acta Geoscientia Sinica*, 37(4): 471~480 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Wang Ruijiang, Li Jiankang, Zhao Zhi, Sun Yan, Yu Yang, Zhao Ting, Dai Jingjing, Wang Chenghui, Huang Fan, Liu Lijun, Dai Hongzhang. 2016c. The development of new high-tech industries and the investigation of three rare (rare earth, rare metal and dispersed element) mineral resources. *Geological Review*, 62(supplment):423~425 (in Chinese).
- Wang Denghong, Wang Ruijiang, Sun Yan, Li Jiankang, Zhao Zhi, Zhao Ting, Qu Wenjun, Fu Xiaofang, Jiang Shanyuan, Huang Huagu, Feng Wenjie, Xu Ping, Li Shengmiao, Huang Xinpeng, Zhou Hui, Zhu Yongxin, Tu Qijun, Li Xinren, Fang Yiping, Zhou Yuanyuan. 2016d. A review of achievements in the three-type rare mineral resources (rare resources, rare earth and rarely scattered resources) survey in China. *Acta Geoscientia Sinica*, 37(5):587~598 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Zhao Ting, He Hanhan, Liu Xinxing, Liu Xiang, Huang Huagu. 2016e. Review of three rare mineral resources investigation and progress in central-south China. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(1):1~8(in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Liu Lijun, Dai Hongzhang, Liu Shanbao, Hou Jianglong, Wu Xishun. 2017a. Discussion on particularity and prospecting direction of large and super-large spodumene deposits. *Earth Science*, 42(12):1~15.
- Wang Denghong, Liu Lijun, Hou Jianglong, Dai Hongzhang, Yu Yang, Dai Jingjing, Tian Shihong. 2017b. A Prime Review on Application of “Five Levels + Basement” Model for Jiajika-Style Rare Metal Deposits. *Earth Science Frontiers*, 24(5): 1~7 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Wang Chenghui, Sun Yan, Li Jiankang, Liu Shanbao, Rao Kuiyuan. 2017c. New progresses and discussion on the survey and research of Li, Be, Ta ore deposits in China. *Geological Survey of China*, 4(5):1~8(in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Wang Denghong, Wu Xishun. 2017d. 21st Century energy metals—the mystery of lithium. *Scientific and Cultural Popularization of Land and Resources*, (4):22~27 (in Chinese).
- Wang Denghong, Zhao Zhi, Yu Yang, Wang Chenghui, Dai Jingjing, Sun Yan, Zhao Ting, Li Jiankang, Huang Fan, Chen Zhenyu, Zeng Zailin, Deng Maochun, Zou Xinyong, Huang Huagu, Zhou Hui, Feng Wenjie. 2017e. A review of the achievements in the survey and study of ion-absorption type REE deposits in China. *Acta Geoscientia Sinica*, 38(3):317~325 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Li Jiankang, Li Jianguo, Zhao Bin, Zhou Sichun, Liang Ting, Wang Rucheng, Qu Wenjun, Wei Biao, Liang Huaying, Xu Yiming, Zhou Xinpeng, Zhang Ronghua, Wang Yonglei, Qin Yan, He Hanhan, Li Chao, Gong Shuqing, Zhang Yijun, Shan Qiang, Wei Longming, Lin Jinfu, Wang Linfeng. 2018a. Theory and Practice of Deep Detection in Nanling Metallogenic Belt. Beijing: Geological Publishing House. 1~471 (in Chinese).
- Wang Denghong, Sun Yan, Liu Xifang, Tian Shihong, Dai Jingjing, Liu Lijun, Dai Hongzhang. 2018b. Deep exploration technology and prospecting direction for lithium energy metal. *Geological Survey of China*, 5(1):1~9 (in Chinese with English Abstract).
- Wang Denghong, Zhang Shaohua, Xiong Xianxiao, Wang Yonglei, Wang Chenghui, Wang Zhiqiang, Wang Shuli, Fu Yong, Liu Yuqin, Liu Lijun, Liu Xinxing, Jiang Biao, Sun Xiaohong, Sun Yan, Sun Tao, Li Lixing, Li Jiankang, Li Chao, Yang Gang, Wu Xianbing, He Hanhan, Ying Lijuan, Zhang Changqing, Chen Zhenhui, Chen Zhenyu, Zhen Yuqin, Zhen Houyi, Meng Fan, Zhao Zheng, Zhao Zhi, Hou Jianglong, Guo Chunli, Huang Fan, Cao Chengli, Cao Ye, Liang Ting, Zhan Jianhua, Yan Linya. 2018c. China Minerals and Geology Annals • Typical Deposits. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang Denghong, Zhao Zhi, Yu Yang, Dai Jingjing, Deng Maochun, Zhao Ting, Liu Lijun. 2018d. Exploration and research progress on ion-adsorption type REE deposits in South China. *China Geology*, 3(3):415~424.
- Wang Denghong, Su Yan, Dai Hongzhang, Guo Weiming, Zhao Zhi, Li Jiankang, Wang Chenghui, Huang Fan, Yu Yang, Li Dexian. 2019. Characteristics and exploitation of rare earth, rare metal and rare-scattered element minerals in China. *Engineering Sciences*, 21(1):119~127 (in Chinese with English Abstract).
- Wang Ruijiang, Wang Denghong, Li Jiankang, Sun Yan, Li Dexian, Guo Chunli, Zhao Zhi, Yu Yang, Huang Fan, Wang Chenghui, Liu Jiajun, He Hanhan, Zhen Guodong, Huang Wenbin, Zhou Yuanyuan, Li Xiaomei, Liu Lijun, Cai Xiao, Zhao Ting, Song Yang. 2015. Mineral Resources and Development of Rare Earth, Rare Metal and Rare-Scattered Elements Mineral Resources. Beijing: Geological Publishing House. 1~429 (in Chinese).
- Xiong Xin, Li Jiankang, Wang Denghong, Liu Lijun, Dai Hongzhang. 2019. A study of solid minerals in melt inclusions and fluid inclusions from the Jiajika pegmatite-type lithium deposit. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(2):241~253 (in Chinese with English abstract).
- Yu Yang, Wang Denghong, Tian Zhaoxue, Huang Fan, Zhao Zhi, Sun Yan, Li Dexian, He Hanhan, Deng Maochun. 2017. Establishment and application of SMAIMA working method system and environment evaluation model for rare earth elements mine: a case study of ion-absorption type ree mines in southern Jiangxi Province. *Acta Geoscientia Sinica*, 38(3):335~344 (in Chinese with English abstract).
- Yu Yang, Wang Denghong, Gao Juanqin, Liu Lijun, Wang Wei, Zhang Sai. 2019. A review of “three-type rare resources” biological methods for mineral exploration and its application in China. *Acta Geologica Sinica*, 93(6):1533~1542 (in Chinese with English abstract).
- Yu Yun, Chen Jiabin. 2017. Summary and enlightenment of research of USA critical minerals. *Land and Resources Information*, (2):45~51 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Zhongxin, He Hanhan, Liu Lijun, Wang Denghong, Zhao Zhi. 2016. Foreign rare metal and rare earth deposits. Beijing: China Science Press (in Chinese).
- Zhao Ting, Wang Denghong, Wang Ruijiang, Deng Maochun, Chen Weiguang. 2014. Application of the Kriging method in reserves estimation of the ion-adsorption type rare earth ore. *Rock and Mineral Analysis*, 33(1):126~133 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ting, Wang Denghong, Huang Wenbin, Li Xiaomei, Zhen Guodong, Sun Yan, Yu Yang. 2016. Construction and application of rare earth, rare metal and rare-scattered elements mineral resources database. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(1):36~41 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ting, Wang Denghong, Liu Chao, Li Dexian, Zhou Fengying. 2019. Metallogenic and utilization status of Ge deposit in China. *Acta Geologica Sinica*, 93(6):1245~1251 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhi, Fu Xiaofang, Ren Xijie, Fang Yiping, Hou Liwei, Wang Denghong, Liu Lijun. 2013. Geochemistry of rare earth and trace elements in rare earth concentrate from Sichuan Province and the significance of the exploitation and utilization. *Rock and Mineral Analysis*, 32(5):810~816 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhi, Wang Denghong, Chen Zhenghui, Chen Zhenyu. 2017. Progress of research on metallogenic regularity of ion-adsorption type REE deposits in the Nanling Range. *Acta Geologica Sinica*, 91(12):2814~2827 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhi, Wang Denghong, Wang Chenghui, Wang Zhen, Zou Xinyong, Feng Wenjie, Zhou Hui, Huang Xinpeng, Huang Huagu. 2019. Progress in prospecting and research of ion-adsorption type REE deposits. *Acta Geologica Sinica*, 93(6):1454~1465 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Fangchun, Li Jiangkang, Liu Xiang, Li Peng, Huang Zhibiao, Shi Weike, Su Junnan, Chen Hu, Huang Xiaoqiang. 2019. Geochemical characteristics and genetic significance of ore bodies in Renli Nb-Ta deposit, Hunan Province. *Acta Geologica Sinica*, 93(6):1392~1404 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 白孟宸. 2019. 鲁尔区的崛起——从煤矿到高炉再到“德国的武器工厂”. *国家人文历史*, (5):86~91.
- 代鸿章, 王登红, 王成辉, 陈振宇. 2017. 四川石棉大水沟碛矿床未知矿物相“Bi₅Te”初步研究及讨论. *黄金科学技术*, 25(5):11~17.
- 代鸿章, 王登红, 刘丽君, 于扬, 代晶晶. 2018a. 四川甲基卡稀有金属矿区祖母绿的矿物学特征. *矿物学报*, 38(2):135~142.
- 代鸿章, 王登红, 刘丽君, 黄凡, 王成辉. 2018b. 电子探针和微区 X 射线衍射研究陕西镇安钨-铍多金属矿床中祖母绿级绿柱石. *岩矿测试*, 37(3):336~345.
- 代鸿章, 王登红, 刘丽君, 黄凡, 王成辉. 2019. 南秦岭镇安核桃坪钨铍矿床成矿时代及成矿模式探讨. *地质学报*, 93(6):1342~1358.
- 代晶晶, 王登红, 陈郑辉, 于扬. 2013a. IKONOS 遥感数据在离子吸附型稀土矿区环境污染调查中的应用研究. *地球学报*, 34(3):354~360.
- 代晶晶, 王瑞江, 王登红. 2014a. 高空间分辨率遥感数据在离子吸附型稀土矿山调查中的应用. *遥感技术与应用*, 29(6):935~942.
- 代晶晶, 王登红, 李庆亭, 陈郑辉. 2014b. 不同浓度稀土溶液的反射波谱特征研究. *光谱学与光谱分析*, 34(5):1158~1162.
- 代晶晶, 王瑞江, 王登红, 陈郑辉. 2014c. 基于 IKONOS 数据的赣

南离子吸附型稀土矿非法开采监测研究. 地球学报, 35(4):503~509.

代晶晶, 王登红, 陈郑辉. 2017a. 赣南稀土精矿粉配制的稀土溶液反射波谱特征研究. 地球学报, 38(4):523~528.

代晶晶, 王登红, 代鸿章, 刘丽君, 吴亚楠. 2017b. 遥感技术在川西甲基卡大型锂矿基地找矿填图中的应用. 中国地质, 44(2):389~398.

代晶晶, 王登红, 王海宇. 2019. 我国三稀矿产资源遥感调查综述. 地质学报, 93(6): 1270~1278.

邓茂春, 王登红, 曾载淋, 张永忠, 赵芝, 邹新勇, 陈斌锋. 2013. 风化壳离子吸附型稀土矿圈矿方法评价. 岩矿测试, 32(5): 803~809.

段凯波, 王登红, 熊先孝, 连卫, 高鹏, 王英林, 张杨. 2014. 贵州织金磷矿床中离子吸附型稀土的存在及初步定量. 岩矿测试, 33(1):118~126.

风永刚. 2019. 稀有金属伟晶岩中常见含锂矿物及其对成岩成矿的指示作用. 地质学报, 93(6): 1405~1421.

高娟琴, 王登红, 王伟, 于泓, 于扬. 2019a. 国内外主要油(气)田水中锂提取现状及展望. 地质学报, 93(6): 1489~1500.

高娟琴, 于扬, 王登红, 刘丽君, 代鸿章, 郭唯明. 2019b. 川西甲基卡稀有金属矿田地表中稀有金属元素分布特征及意义. 地质学报, 93(6):1331~1341.

郭唯明, 马圣钊, 孙艳, 赵芝, 钟海仁, 姚全珊. 2019. 云南腾冲热泉中稀有金属矿化特征及其意义. 地质学报, 93(6):1321~1330.

何贤杰, 张福良. 2014. 关于及早谋划战略性新兴产业发展的思考与建议. 中国国土资源经济, 30(5):4~8.

黄凡, 陈毓川, 王登红, 袁忠信, 陈郑辉. 2011. 中国钼矿主要矿集区及其资源潜力探讨. 中国地质, 38(5): 1111~1133.

黄凡, 王登红, 陈毓川, 王成辉, 唐菊兴, 陈郑辉, 王立强, 刘善宝, 李建康, 张长青, 应立娟, 王永磊, 李立兴, 李超. 2014a. 中国内生钼矿床辉钼矿的微量元素特征研究. 矿床地质, 33(6): 1193~1212.

黄凡, 王登红, 王成辉, 陈郑辉, 袁忠信, 刘新星. 2014b. 中国钼矿资源特征及其成矿规律概要. 地质学报, 88(12):2296~2314.

黄凡, 吴西顺, 王登红, 孙艳. 2019a. 古往今“铼”, 以小博大. 国土资源科普与文化, (2):10~15.

黄凡. 2019b. 中国铼矿的成矿规律、找矿方向与新进展. 地质学报, 93(6):1252~1269.

李建康, 刘喜方, 王登红. 2014. 中国锂矿成矿规律概要. 地质学报, 88(12):2269~2283.

李建康, 王成辉, 冯文杰, 王登红, 邹天人. 2017a. 滇西北发现花岗伟晶岩型铁锂云母矿床. 矿床地质, 36(6):1453~1455.

李建康, 邹天人, 王登红, 丁欣. 2017b. 中国铍矿成矿规律. 矿床地质, 36(4):951~979.

李鹏, 刘翔, 李建康, 黄志彪, 周芳春, 张立平. 2019. 湘东北仁里-传梓源矿床 5 号伟晶岩矿物学、地球化学特征及成矿时代. 地质学报, 93(6):1374~1391.

刘超, 赵汀, 王登红, 李建康. 2016. 中国铟产业发展现状与未来发展战略思考. 桂林理工大学学报, 36(1):29~35.

刘丽君, 赵芝, 付小方, 任希杰, 方一平, 侯立玮, 王登红. 2013. 四川稀土矿尾砂的稀土元素和微量元素地球化学特征及开发利用意义. 岩矿测试, 32(5):817~824.

刘丽君, 王登红, 杨岳清, 付小方, 郝雪峰, 潘豪, 唐屹, 陈振宇. 2016. 四川甲基卡新三号稀有金属矿脉成矿特征的初步研究. 桂林理工大学学报, 36(1):50~59.

刘丽君, 王登红, 刘喜方, 李建康, 代鸿章, 闫卫东. 2017a. 国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状. 中国地质, 44(2):263~278.

刘丽君, 王登红, 侯可军, 田世洪, 赵悦, 付小方, 袁茜平, 郝雪峰. 2017b. 锂同位素在四川甲基卡新三号矿脉研究中的应用. 地学前缘, 24(5):167~171.

刘丽君, 王登红, 高娟琴, 于泓, 王伟. 2019. 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. 地质学报, 93(6):1479~1488.

刘善宝, 杨岳清, 王登红, 代鸿章, 马圣钊, 刘丽君, 王成辉. 2019. 川甲基卡矿田花岗岩型锂工业矿体的发现及意义. 地质学报, 93(6):1309~1320.

刘新星, 陈毓川, 王登红, 黄凡, 赵芝. 2016. 基于 DEM 的南岭东段风化壳离子吸附型稀土矿成矿地貌条件分析. 地球学报, 37(2):174~184.

刘新星, 王登红, 陈毓川, 赵芝, 黄凡. 2019. 南岭东段离子吸附型稀土矿成矿预测研究. 稀土, 40(2):1~13.

刘永超, 李建康, 邹天人, 江善元, 胡明月, 陈振宇. 2017. 福建永定大坪花岗岩斑岩体的铌钽富集特征研究. 矿床地质, 36(1):143~157.

陆雷, 王登红, 王成辉, 赵芝, 冯文杰, 徐晓春, 于泓. 2019. 云南临沧花岗岩离子吸附型稀土矿床的成矿规律研究. 地质学报, 93(6): 1466~1478.

皮桥辉, 王登红, 缪秉魁, 张青伟, 陈云, 荆元, 王婵, 夏志鹏. 2014. 大厂矿区尾矿稀散资源分布规律与潜力评价研究. 地质与勘探, 50(2):291~302.

秦锦华, 王登红, 陈毓川, 赵如意, 王成辉, 江彪. 2019. 试论湖南衡阳盆地与地幔柱的关系及其对关键矿产深部探测的意义. 地质学报, 93(6): 1501~1513.

屈文俊, 王登红, 朱云, 樊兴涛, 李超, 温宏利. 2019. 稀土稀有稀散元素现代仪器测试全新方法的建立. 地质学报, 93(6):1514~1522.

邵厥年, 陶维屏. 2010. 矿产资源工业要求手册. 北京:地质出版社.

盛继福, 王登红. 2018. 中国矿产地质志·钨矿卷. 北京:地质出版社, 1~799.

宋扬, 王瑞江, 王登红, 赵芝, 于扬, 王成辉, 李晓妹. 2013. 我国压覆矿产资源“抢救性”开发策略研究. 资源与产业, 15(5):56~60.

孙艳, 高允, 王登红, 代鸿章, 顾文帅, 李建, 张丽红, 等. 2017. 重庆铜梁地区“绿豆岩”中碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 岩矿测试, 36(6):668~677.

孙艳, 王登红, 王成辉, 李建康, 赵芝, 王岩, 郭唯明. 2019. 我国铷矿成矿规律、新进展和找矿方向. 地质学报, 93(6):1231~1244.

谭红兵, 曹成东, 李廷伟, 樊启顺. 2007. 柴达木盆地西部古近系和新近系油田岗水水资源水化学特征及化学演化. 古地理学报, 9(3):313~320.

谭细娟, 梁婷, 张泽, 周义, 王一茜, 风永刚, 三金柱, 等. 2019. 锂辉石单矿物 Li 元素 ICP-MS 和 ICP-AES 分析方法准确性对比研究. 地质学报, 93(6): 1543~1549.

陶琰, 胡瑞忠, 唐永永, 叶霖, 戚华文, 樊海峰. 2019. 西南地区稀散元素伴生成矿的主要类型及伴生富集规律. 地质学报, 93(6):1210~1230.

王成辉, 杨岳清, 王登红, 等. 2018. 江西九岭地区三稀调查发现磷锂铝石等铍铝锡钽矿物. 岩矿测试, 37(1): 108~110.

王成辉, 王登红, 陈晨, 刘善宝, 陈振宇, 孙艳, 赵晨辉, 曹圣华, 凡秀君. 2019. 九岭式岩体狮子岭稀有金属成矿作用调查研究的进展及其找矿意义. 地质学报, 93(6): 1359~1373.

王登红. 2018. 关键矿产资源的成矿规律、找矿勘查与物质循环(2018-12-8, 成都双清论坛多媒体).

王登红, 陈毓川, 徐志刚, 李天德, 傅旭杰. 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律研究. 北京:原子能出版社, 1~493.

王登红, 邹天人, 徐志刚, 余金杰, 付小方. 2004. 伟晶岩矿产示踪造山过程的研究进展. 地球科学进展, 19(4):614~620.

王登红, 唐菊兴, 应立娟, 陈郑辉, 许建祥, 张家菁, 李水如, 曾载淋. 2010. “五层楼+地下室”找矿模型的适用性及其对深部找矿的意义. 吉林大学学报(地球科学版), 40(4):733~738.

王登红, 李立兴, 李建康, 李晓妹, 郑国栋, 于扬, 赵芝. 2012a. 海洋稀土资源及其对中国稀土产业的可能影响. 矿床地质, 31(增刊):1109~1110.

王登红, 王瑞江, 李建康, 赵芝, 于扬, 郑国栋, 李晓妹, 孙艳, 李德先, 赵汀. 2012b. 我国三稀矿产资源基本特征与研究现状. 矿床地质, 31(增刊): 41~42.

王登红, 付小方. 2013a. 四川甲基卡外围锂矿找矿取得突破. 岩矿测试, 32(6):987.

- 王登红, 李沛刚, 屈文俊, 雷志远, 廖友常. 2013b. 贵州大竹园铝土矿中钨和锂的发现与综合评价. 中国科学: 地球科学, 43(1): 44~51.
- 王登红, 王瑞江, 李建康, 赵芝, 于扬, 代晶晶, 陈郑辉, 李德先, 屈文俊, 邓茂春, 付小方, 孙艳, 郑国栋. 2013c. 中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述. 中国地质, 40(2): 361~370.
- 王登红, 赵芝, 于扬, 赵汀, 李建康, 代晶晶, 刘新星 何哈哈. 2013d. 离子吸附型稀土资源研究进展、存在问题及今后研究方向. 岩矿测试, 32(5): 796~802.
- 王登红, 徐志刚, 盛继福, 朱明玉, 徐珏, 袁忠信, 白鸽, 屈文俊, 李华芹, 陈郑辉, 王成辉, 黄凡, 张长青, 王永磊, 应立娟, 李厚民, 高兰, 孙涛, 付勇, 李建康, 武广, 唐菊兴, 丰成友, 赵正, 张大权. 2014. 全国重要矿产和区域成矿规律研究进展综述. 地质学报, 88(12): 2176~2191.
- 王登红, 刘丽君, 刘新星, 赵芝, 何哈哈. 2016a. 我国能源金属矿产的主要类型及发展趋势探讨. 桂林理工大学学报, 36(1): 21~29.
- 王登红, 王瑞江, 付小方, 孙艳, 王成辉, 郝雪峰, 刘丽君, 潘蒙, 侯江龙, 代晶晶, 田世洪, 于扬. 2016b. 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. 地球学报, 37(4): 471~480.
- 王登红, 王瑞江, 李建康, 赵芝, 孙艳, 于扬, 赵汀, 代晶晶, 王成辉, 黄凡, 刘丽君, 代鸿章. 2016c. 新兴产业的发展与三稀矿产的调查. 地质论评, 62(增刊): 423~425.
- 王登红, 王瑞江, 孙艳, 李建康, 赵芝, 赵汀, 屈文俊, 付小方, 江善元, 黄华谷, 冯文杰, 徐平, 李胜苗, 黄新鹏, 周辉, 朱永新, 涂其军, 李新仁, 方一平, 周园园. 2016d. 我国三稀(稀有稀土分散)矿产资源调查研究成果综述. 地球学报, 37(5): 587~598.
- 王登红, 赵汀, 何哈哈, 刘新星, 刘祥, 黄华谷. 2016e. 中南地区三稀矿产资源调查研究及开发利用进展综述. 桂林理工大学学报, 36(1): 1~8.
- 王登红, 刘丽君, 代鸿章, 刘善宝, 侯江龙, 吴西顺. 2017a. 试论国内外大型超大型锂辉石矿床的特殊性与找矿方向. 地球科学, 42(12): 1~15.
- 王登红, 刘丽君, 侯江龙, 代鸿章, 于扬, 代晶晶, 田世洪. 2017b. 初论甲基卡式稀有金属矿床“五层楼+地下室”勘查模型. 地学前缘, 24(5): 1~7.
- 王登红, 王成辉, 孙艳, 李建康, 刘善宝, 饶魁元. 2017c. 我国锂铍钽矿床调查研究进展及相关问题简述. 中国地质调查, 4(5): 1~8.
- 王登红, 吴西顺. 2017d. 21世纪的能源金属——锂的奥秘. 国土资源科普与文化, (4): 22~27.
- 王登红, 赵芝, 于扬, 王成辉, 代晶晶, 孙艳, 赵汀, 李建康, 黄凡, 陈振宇, 曾载淋, 邓茂春, 邹新勇, 黄华谷, 周辉, 冯文杰. 2017e. 我国离子吸附型稀土矿产科学研究和调查评价新进展. 地球学报, 38(3): 317~325.
- 王登红, 李建康, 李建国, 赵斌, 周四春, 梁婷, 王汝成, 屈文俊, 魏彪, 梁华英, 许以明, 周新鹏, 张荣华, 王永磊, 秦燕, 何哈哈, 李超, 龚述清, 张怡军, 单强, 韦龙明, 林锦富, 汪林峰. 2018a. 南岭成矿带深部探测的理论与实践. 北京: 地质出版社, 1~471.
- 王登红, 孙艳, 刘喜方, 田世洪, 代晶晶, 刘丽君, 代鸿章. 2018b. 锂能源金属矿产深部探测技术与找矿方向. 中国地质调查, 5(1): 1~9.
- 王登红, 章少华, 熊先孝, 王永磊, 王成辉, 王志强, 王淑丽, 付勇, 刘玉芹, 刘丽君, 刘新星, 江彪, 孙小虹, 孙艳, 孙涛, 李立兴, 李建康, 李超, 杨刚, 吴先冰, 何哈哈, 应立娟, 张长青, 陈郑辉, 陈振宇, 郑玉琴, 郑厚义, 孟凡, 赵正, 赵芝, 侯江龙, 郭春丽, 黄凡, 曹承立, 曹焯, 梁婷, 詹建华, 颜玲亚. 2018c. 中国矿产地质志·典型矿床总述卷. 北京: 地质出版社, 1~1177.
- 王登红, 孙艳, 代鸿章, 郭唯明, 赵芝, 李建康, 王成辉, 黄凡, 于扬, 李德先. 2019. 我国“三稀矿产”的资源特征及开发利用研究. 中国工程科学, 21(1): 119~127.
- 王瑞江, 王登红, 李建康, 孙艳, 李德先, 郭春丽, 赵芝, 于扬, 黄凡, 王成辉, 刘家军, 何哈哈, 郑国栋, 黄文斌, 周园园, 李晓妹, 刘丽君, 蔡肖, 赵汀, 宋扬. 2015. 稀有稀土分散矿产资源及其开发利用. 北京: 地质出版社, 1~429.
- 熊欣, 李建康, 王登红, 刘丽君, 代鸿章. 2019. 川西甲基卡花岗岩伟晶岩型锂矿床中熔体、流体包裹体固相物质研究. 岩石矿物学杂志, 38(2): 241~253.
- 于扬, 王登红, 田兆雪, 黄凡, 赵芝, 孙艳, 李德先, 何哈哈, 邓茂春. 2017. 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. 地球学报, 38(3): 335~344.
- 于扬, 王登红, 高娟琴, 刘丽君, 王伟, 张塞. 2019. 中国三稀矿产生物找矿技术方法及其应用综述. 地质学报, 93(6): 1533~1542.
- 余韵, 陈甲斌. 2017. 美国危机矿产研究概况及其启示. 国土资源情报, (2): 45~51.
- 袁忠信, 何哈哈, 刘丽君, 王登红, 赵芝. 2016. 国外稀有稀土矿床. 北京: 中国科学出版社, 170.
- 赵汀, 王登红, 王瑞江, 邓茂春, 陈为光. 2014. 克里格法在离子吸附型稀土矿勘查储量估算中的应用. 岩矿测试, 33(1): 126~133.
- 赵汀, 王登红, 黄文斌, 李晓妹, 郑国栋, 孙艳, 于扬. 2016. 三稀战略调查成果数据库建设与应用. 桂林理工大学学报, 36(1): 36~41.
- 赵汀, 王登红, 刘超, 李德先, 周凤英. 2019. 中国锆矿成矿规律与开发利用现状. 地质学报, 93(6): 1245~1251.
- 赵芝, 付小方, 任希杰, 方一平, 侯立玮, 王登红, 刘丽君. 2013. 四川稀土精矿的稀土元素和微量元素地球化学特征及开发利用意义. 岩矿测试, 32(5): 810~816.
- 赵芝, 王登红, 陈郑辉, 陈振宇. 2017. 南岭离子吸附型稀土矿床成矿规律研究新进展. 地质学报, 91(12): 2814~2827.
- 赵芝, 王登红, 王成辉, 王臻, 邹新勇, 冯文杰, 周辉, 黄新鹏, 黄华谷. 2019. 离子吸附型稀土找矿及研究新进展. 地质学报, 93(6): 1454~1465.
- 周芳春, 李建康, 刘翔, 李鹏, 黄志飏, 石威科, 苏俊男, 陈虎, 黄小强. 2019. 湖南仁里钽铋矿床矿体地球化学特征及其成因意义. 地质学报, 93(6): 1392~1404.

Study on critical mineral resources: significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation

WANG Denghong*

MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resource, CAGS, Beijing, 100037

** Corresponding author: wangdenghong@vip.sina.com*

Abstract

Since the start of the industrial 4.0 and the fourth technological revolution, the importance of critical mineral resources has become increasingly prominent. At the end of 2017, Trump, by presidential decree, demanded that the United States “be self-sufficient” of 35 kinds critical minerals. Further increased international attention to critical mineral resources. As the largest developing country in the world, China is far less self-supporting than the United States in terms of mineral resources. Not only do large quantities of minerals need to be imported, but the externaldependence of rare metals such as lithium, beryllium, niobium, tantalum and other rare metals is also high. And Chinese society attaches less importance to these “little minerals” than the United States. Therefore, the investigation and research of critical mineral resources should be strengthened. Exploration and prospecting are imminent. Under the current situation, in order to ensure the development of strategic emerging industries, in order to achieve the great rejuvenation of Chinese Dream, and for the long-term stability of the national economy and the country, this paper proposes that 9 kinds of rare metals, 17 kinds of rare earth metals, 8 kinds of scattered metals, 3 kinds of rare gas, 12 kinds of traditional metals (black and non-ferrous), 8 kinds of non-metallic minerals and uranium, should be put forward and determinated as the critical mineral resources in China. These 8 groups of 41 kinds of mineral resources correspond roughly to the 35 kinds of minerals in the United States. Since 2011, China has focused on rare metals, rare earths and rare scatted metals (so called as rrr metals or 3R) minerals. New progress has been made in the fields of metallogenic theory, potential evaluation, ore prospecting breakthrough, environmental protection, mineral processing by physical methods, ore prospecting methods, analysis and testing, and mining administration, etc. In particular, through the prospecting of Jiajika and Keyin in Sichuan Province, the potential of new resources is equal to 10 large spodumene deposits, which provides a resource guarantee for the construction of large lithium ore resource base in western Sichuan. However, China’s long-term shortage of rare metals, such as niobium, tantalum and beryllium, has not yet made a breakthrough in prospecting. In the past, proven resources are often of low grade and difficult to be cleaned and smelted. In fact, a considerable portion of resources belong to “dull ore”; even tin, which used to have advantages in the past, Non-ferrous metals such as antimony, mercury and other non-ferrous metals have also begun to import, the Xikuangshan Sb mine and other world-famous large-scale and super-large-scale deposits have entered the stage of resource depletion, it is difficult to replace resources, and needs to be attached great importance. It is suggested that while strengthening the deep prospecting of existing mines, we should not only continue to overcome the difficult problem of comprehensive utilization of co-associated resources, but also strengthen the research and exploration of unconventional and new types of critical mineral resources (such as the lithium resources associated with sedimentary rocks). We should strengthen the basic research, find a breakthrough in the critical application of the critical mineral resources, and let the critical mineral resources play a critical role at the critical moment.

Key words: rare metal-rare earth-scattered mineral resources; strategic emerging industries; critical minerals