

我国“三稀矿产”的资源特征及开发利用研究

王登红, 孙艳, 代鸿章, 郭唯明, 赵芝, 赵汀, 李建康, 王成辉, 黄凡, 于扬, 李德先

(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)

摘要: 我国“三稀矿产”总体上资源丰富, 既是资源大国, 也是主要生产国和出口国, 但往往因为深加工技术落后、环境代价太大、战略意识不强等原因而始终拿不到市场的话语权。中国已经进入科技创新引领社会发展的关键时期, “三稀矿产”恰恰具有无限的创新潜力。本文通过梳理 2011 年以来全国“三稀矿产”资源调查和找矿过程中积累的资料, 概略性地总结了我国稀有、稀土和稀散元素矿产的主要特点, 提出了一些开发利用建议, 进一步强调“稀土不土, 稀有常有, 稀散不散”的禀赋特征, 提出了开发利用过程中“稀土管得着, 稀有找得到, 稀散用得好”的基本思路。

关键词: 三稀矿产; 资源特征; 开发利用

中图分类号: F426; P618.6; P618.7 **文献标识码:** A

Characteristics and Exploitation of Rare Earth, Rare Metal and Rare-Scattered Element Minerals in China

Wang Denghong, Sun Yan, Dai Hongzhang, Guo Weiming, Zhao Zhi, Zhao Ting,
Li Jiankang, Wang Chenghui, Huang Fan, Yu Yang, Li Dexian

(Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Natural Resources of the PRC, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: China is rich in rare earth, rare metal, and rare-scattered element (RRR) minerals in general, and is a major producer and exporter. However, owing to backward deep-processing technologies, high environmental costs, poor strategic awareness, and other reasons, China still doesn't have a say in the global RRR mineral market. As China has entered a critical period where technological innovation drives social development, the RRR minerals become vital because of their unlimited potentials for innovation. In this paper, based on the data accumulated during the investigation and prospecting of the RRR minerals since 2011, we briefly summarize the main characteristics of the RRR minerals, propose some suggestions for their development and utilization, and further emphasize the basic idea that “rare earth should be regulated, rare metal should be found when needed, and rare-scattered elements should be well used.”

Keywords: rare earth, rare metal, and rare-scattered element minerals; resource characteristics; exploitation

收稿日期: 2019-01-05; 修回日期: 2019-01-12

通讯作者: 王登红, 中国地质科学院矿产资源研究所, 研究员, 博士研究生导师, 主要从事矿产资源研究工作;

E-mail: wangdenghong@vip.sina.com

资助项目: 国家重点研发计划“锂能源金属矿产基地深部探测技术示范”项目(2017YFC0602700)“我国锂能源金属成矿规律、靶区优选与重点查证”课题(2017YFC0602701); 中国地质调查局“大宗急缺矿产和战略性新兴产业矿产调查”工程项目“川西甲基卡大型锂矿资源基地综合调查评价”(DD20160055), “华南重点矿集区稀有稀散和稀土矿产调查”(DD20160056), “中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务”(DD20160346)

本刊网址: www.EnginSci.cn

一、稀有金属矿产资源的主要特点与开发利用

我国稀有金属除锶矿在世界资源储量中占优势地位外，其余矿种均因赋存状态、矿床类型等原因不具备竞争力。其贸易结构主要为低端出口，高端进口。加强找矿、调整产业结构、扩宽应用领域已迫在眉睫。

（一）锂（Li）的主要特点与开发利用

锂在冶金领域可用于制造各种合金，目前主要应用于原子能、特种合金、特种玻璃和新能源电池等领域，尤其是在锂电池方面的广泛应用而被称为“能源金属”，既是高科技新兴产业所必需的高端材料，也成为老百姓日常生活所必需的常规材料 [1]。

锂矿床按地质成因可划分为花岗伟晶岩型、卤水型、云英岩化花岗岩型和富锂黏土型四类。卤水型是锂矿床最重要的类型，但花岗伟晶岩型锂矿因常伴生多种稀有元素可作综合利用，黏土岩型锂矿也作为“潜在”资源应被高度重视。

对锂资源的开发利用，难度最大而具有革命性意义的是锂作为可控核聚变的基础原材料在民用发电方面的应用。据科学家计算，1 kg 锂通过热核反应放出的能量相当于两万多吨优质煤的燃烧。我国四川甲基卡地区的锂矿是全球已知锂矿中⁶Li富集度最高的，其战略意义非同小可，应予以高度重视。我国锂的主要成矿区带和找矿远景区主要有：青藏高原盐湖型锂成矿带、新疆阿尔泰伟晶岩型稀有金属成矿带、川西伟晶岩型稀有金属成矿带和华南钽铌锂成矿带（包括幕阜山—九岭—武功山一带和南岭、武夷山成矿带）。

从发展趋势看，随着新能源、新材料行业的快速发展，以电池级碳酸锂为代表的高端锂产品需求强劲，特别是动力电池、特种工程塑料等领域需求旺盛，成为锂产品行业的主要增长点。目前中国的锂产品主要集中于工业级碳酸锂、氢氧化锂等生产难度小、附加值低的传统锂产品。在高端锂产品加工方面，中国与国际先进水平还存在较大的差距，供应不足，需要大量进口。深加工技术水平的高低决定了企业的竞争力，也决定了中国锂行业在国际竞争格局中的定位。因此，加快中国锂资源的开发，丰富锂产品种类，进行产品结构升级换代，开发各

类高端锂产品，提升综合竞争力，成为中国锂行业的紧迫任务。

（二）铍（Be）的主要特点与开发利用

铍主要以铍铜合金和铍金属的形式广泛用于航空、航天和核反应堆等领域，是新兴产业发展必需的战略金属矿产资源。铍铜合金在民用领域具有广泛的前途，如用铍青铜制成的弹簧可以压缩几亿次以上。铍具有良好的耐腐性和高温强度，热导率大，具有良好的辐射透过性和对 neutron 慢化、反射及红外线的反射性能。

铍矿以花岗伟晶岩型最重要，储量也大，其余还包括接触交代型铍矿、火山热液型铍矿、云英岩型铍矿及石英脉型铍矿等。

中国铍矿产资源丰富，分布在 14 个省区。中国已探明的铍储量以伴生矿产为主，主要与锂、钽铌矿伴生（占 48%），其次与稀土矿伴生（占 27%）或与钨矿伴生（占 20%）。花岗伟晶岩型是我国最主要的铍矿类型，约占总储量的一半，主要产于新疆、四川、云南等地。热液石英脉型铍矿具有规模中等、品位较富、矿物结晶较粗等特点，主要分布在中南及华东地区。花岗岩型铍矿多见于地槽褶皱带，成矿时代以中生代为主，如新疆青河县阿斯喀尔特铍矿；另一种以钽铌为主，伴生铍等稀有金属，如江西宜春 414 矿。中国铍矿产资源具有分布高度集中、单一矿床少、共伴生矿床多、品位低、储量大等特点。

我国铍的对外依存度高，加强找矿乃当务之急。新疆阿尔泰和川西稀有金属成矿带中的铍矿仍然具有找矿前景，而西藏喜马拉雅与淡色花岗岩有关的岩体型铍矿及其接触带中的矽卡岩型或类矽卡岩型铍矿与湘鄂赣幕阜山地区的铍矿具有相似性，前者近年来取得了找矿进展，可作为资源储备对待 [2]。中国钨矿资源特别丰富，而铍是钨矿经常共伴生产出的资源，需要注意在钨矿区寻找独立的铍矿。这是具有现实意义的找矿新方向，至少在秦岭成矿带的雪宝顶，既有独立的钨矿脉也有共伴生的钨铍矿以及独立的铍矿体。东秦岭、滇西（如麻花坪）、滇东南（如麻栗坡）等钨锡铍多金属成矿带都有类似情况，找矿前景大。对于南岭钨锡多金属成矿带，可以根据矿床成矿系列的理论寻找其他类型。东南沿海霞浦大湾及新疆准噶尔盆地

西北边缘发现的火山岩型铍矿床,给近年来的铍矿勘查注入新的活力。

(三) 铌和钽(Nb、Ta)的主要特点与开发利用

铌和钽具有熔点高、延性好、蒸汽压低、耐腐蚀性强和热导率高等优良特性,是电子、原子能、宇航、钢铁、化工等工业的重要原料,在新兴产业发展中用途广泛。铌钽资源主要来自于碳酸岩风化壳型矿床、含铌铁矿-钽铁矿的花岗岩及花岗伟晶岩矿床和砂矿床,以碳酸岩风化壳型最重要。中国的钽资源禀赋差,大规模露采的矿山较少,尚未找到独立的铌矿。由于中国规定的花岗岩型和花岗伟晶岩型钽铌矿床的最低工业品位指标定得过低[3],因此,虽然钽储量和基础储量大,但实际上难以开发[4]。因此,我国的铌钽仍需大量进口。

中国铌钽矿资源有以下特点:①产地分布广泛,资源又相对集中。已探明的铌矿分布于全国17个省区,但高度集中在内蒙古和湖北两省区,其占全国铌资源量的95.5%;②中国已利用铌矿的铌钽品位低,与国外铌钽矿石品位相比大大偏低;③共生矿物复杂,选冶困难;④资源量很大,但可供利用的矿产地和储量却很少。因此,必须加大找好矿(品位高、易采选)的力度。一方面在江西宜春(414)、江西横峰葛源、福建南平等老矿区寻找优质资源、接替资源,另一方面也要加大对大兴安岭成矿带巴尔哲铌-稀土矿床、湖北竹山庙垭碳酸岩型铌-稀土矿、湖北通城断峰山伟晶岩型钽铌矿以及近年来新发现的稀有金属矿床(如内蒙古武川县赵井沟)的综合研究,争取在大吨位、高品位钽铌矿床方面有所突破。

铌钽最主要的特点是耐热,被称为稀有高熔点金属,高纯 Nb_2O_5 (>99.9%)主要应用于高科技领域;全世界60%以上的钽金属用于制造电子产品[5]。巴西是世界最大的铌矿产地,澳大利亚是最大的钽矿生产国。中国以东方钽业为代表的大型硬质合金集团和诸多钽铌及其合金应用企业,形成了从采矿、冶炼、加工到应用较完整的工业体系,生产规模、工艺技术、生产装备、检测手段、产品质量均跃上了新台阶,使我国跨进世界钽产品生产 and 钽产品应用的大国行列。

美国、俄罗斯和中国,对于铌钽的战略意义一直以来都非常重视,随着新兴产业的发展,对于铌

钽的重视程度将有增无减。我国对现有资源的管理还不到位,如海南的滨海砂矿曾经被乱采滥挖,不但损耗了资源也破坏了环境;另一方面是对成矿条件、成矿规律等基础地质工作重视不够,资源潜力不明,找矿进展不大,可持续发展问题比较突出。加强地质找矿,深入研究现有资源的合理开发利用技术方法,提高资源的保障程度,乃当务之急。

(四) 锆(Zr)的主要特点与开发利用

锆被称为“稀有金属”,是因为纯锆的冶炼相当困难。在寻找高品位的锆原材料的同时,需加大冶金方面的创新力度。中国锆矿资源可分为砂矿和硬岩型锆矿两大类,探明储量仅为 5×10^5 t,不足全球锆资源的1%。国外大部分锆资源来自于滨海砂矿,我国锆砂很少,因此资源结构十分不利。

中国锆石砂矿分布于东南沿海,以广东南部海岸和海南岛东海岸最为集中;硬岩矿则散布于内蒙古和南方各省区。探明储量在 1×10^5 t以上的省区有内蒙古、海南、广东、云南和广西,其储量合占全国的97.6%。砂矿以海南最多,储量占全国的67%,但大部分已消耗,剩余资源出于环境保护的需要而不再开发。

金属锆按用途分为原子能级和工业级两个级别。此外,一些具有一定重量、无色或色泽鲜丽、透明的优质锆石,可用作宝石级原料。

中国锆矿的资源特点为:分布不均,储量相对集中;富矿少,伴生矿产多;矿床类型较齐全,分布规律清晰;易采选,可综合开发利用;放射性偏高。

我国锆矿资源不具备市场竞争力,硬岩型矿床几乎全是低品位伴生矿,海滨砂矿则主要分布在环境保护区。而这两大类型又恰恰是中国锆矿的主要类型,为了从战略上保证国家安全,建议如下:①在滨海非环境保护区或基建区优先开展砂矿资源调查,必须按规定进行“压覆资源调查评估”,先回收资源再开展建设;②在低品位硬岩型原生矿分布区开展高品位锆矿的找矿工作,取得找矿突破是可能的;③在成矿地质条件具备的地区探索国际上最优质的风化壳型或残坡积砂矿的可能性;④加强管理,立足国内,适当进口,限制出口,避免恶性竞争;⑤加强技术创新和理论创新,充分提高已有资源的利用效率,改善产品结构。

(五) 铪(Hf)的主要特点与开发利用

铪是稀有金属中的分散元素,或者分散元素中的稀有金属。铪的用量小,却是高技术领域必不可少的原材料。世界85%的铪以金属形式用作核反应堆的控制棒和紧急停堆棒,3%用作合金添加剂。铪往往与锆共伴生,但作为原子能反应堆结构材料的锆必须除铪,以保证中子捕获截面达到0.18巴恩。中国海绵铪的生产始于1966年,主要用作核潜艇及原子能反应堆芯的控制棒。

中国铪矿床的类型包括海相沉积型(滨海型)、河流冲积型、风化壳及残坡积型、碱性花岗岩型和伟晶岩型,但难以形成独立矿床且品位低,工业原料主要是锆石。

开发利用建议如下:①加强铪的综合利用,尤其是要加强对伴生铪的综合查定和综合评价工作;②加强资源开发和综合利用基础学科、边缘学科的研究,开拓新领域;③改进和提高矿床物质成分研究的技术方法;④把有关科学和工业技术新进展运用到地质工作中,提高铪的回收率和工业利用率;⑤摸清资源家底,建立原料基地;⑥努力提高铪产品质量,实行保护性开发;⑦建立健全相应的科研机构,提高应用和研发水平;⑧在地质勘查工作中切实加强综合评价;⑨重视废杂金属的再生回收和环境保护。

(六) 铯(Sr)的主要特点与开发利用

工业上用于提取铯原料的主要是天青石和菱铯矿。截至2011年,中国天青石储量为 1.545×10^7 t,占世界探明铯储量的69.4%。已探明的天青石铯矿床以大型、特大型单一铯矿为主,储量约占总储量的87%。主要分布在7个省区,其中青海省约占全国天青石储量的95.6%,其次是重庆、江苏和云南。四川什邡磷矿中的硫磷铝铯矿、云南金顶铅锌矿中的伴生铯以及含铯卤水中的共伴生铯资源,在一定程度上也得到了综合利用。

中国是世界铯产品的主要生产国,2013年的产量约占世界产量的40%,其中80%以上供出口。铯产品中碳酸铯是最主要的铯化合物,其用量约占铯产品总量的80% [6]。目前全球的碳酸铯年产能约 4×10^5 t,中国约占 2.6×10^5 t。中国是铯资源大国,但目前在产业发展中也存在问题:①开发形势严峻。由于采富弃贫式开采,损失率较高,资

源浪费较严重。中国铯矿已开采多年,在采矿山纷纷进入了尾采期;②产品质量较低,高品质铯需进口。目前国内外均注重资源的综合利用,建议如下:①加强铯矿开采和铯化工生产管理,保护铯矿资源;②调整产业结构,限制矿石直接出口;③重视伴生铯矿的综合评价;④加强铯矿成矿理论研究及远景预测;⑤拓宽铯的应用领域,积极研发高端产品。

(七) 铷和铯(Rb、Cs)的主要特点与开发利用

铷和铯具有优异的光电性能,在新兴产业中的应用具有广阔前景。在自然界尚没有独立的铷矿物,铷主要从锂云母、铁锂云母和光卤石中提取,属于稀有金属中的“分散元素”。中国主要铷、铯矿床共有产地13处,其中特大型5处,大型2处,中型1处,小型5处。中国铷矿的品质远远不如国外,如加拿大伯尼克湖—坦科矿床中 Rb_2O 的含量是1.0%,而我国江西宜春414矿床只有0.22%。

铷矿床的主要类型包括:①锂云母钠长石花岗岩型;②花岗伟晶岩及天河石花岗岩型;③花岗岩体中钨、锡矿脉周围云英岩化作用所形成的白云母及锂云母中的铷,有时也可达到工业要求;④盐类矿床。铯矿床的主要类型包括:①锂云母钠长石花岗岩型;②伟晶岩型;③钨、锡矿脉及云英中的白云母及铁锂云母等矿物中的铯,有时也可达工业要求;④钾盐矿床;⑤盐湖型铯矿;⑥现代温泉。目前可工业开采的主要为含铯伟晶岩,占总储量的98%,主要分布于新疆的阿尔泰地区和江西的宜春。宜春锂云母中铯的储量占我国铯储量的40%以上,居全国第一。新疆冶金研究所从1958年开始,用阿勒泰铯榴石进行小批量氯化铯的生产,年产纯度为99%的产品2 t左右。铷铯无独立矿山,一般从其他矿床中作为共伴生组分回收。

中国铷、铯资源具有分布广,矿床类型多但资源集中,成矿时代集中,独立矿床少,开发利用难度大等特点。中国在开发铷矿时应注意:①充分利用已有矿山的尾矿资源;②加强低品位铷矿资源的选矿工艺研究,寻找高品位的云母型铷矿源;③对西藏盐湖铯资源开展可利用性评价;④加强铷、铯资源的综合利用研究;⑤完善中国铷、铯工业生产相关标准。中国的铯储量虽然在世界上也名列前茅,但多为锂云母中伴生铯,而铯榴石矿储量较少,资源禀赋不利。

二、稀土矿产资源的主要特点及开发利用

稀土具有“工业维生素”的美称，在当今信息技术、生物技术、能源技术等高技术领域和国防建设中不可或缺。对某些传统产业如农业、化工、建材等行业的改造、创新、转型升级也起着重要作用。

中国是稀土资源最为丰富的国家，但近些年由于过度开采和无限制的低价销售，中国稀土资源储量在世界排名中呈下降趋势。中国稀土为全球新兴产业的发展做出了不可磨灭的贡献，但中国却在世界贸易组织（WTO）体制下受到不公正待遇，而中国自身对于稀土资源的战略意义还认识不到位，非正常生产及走私十分严重。为此，中国不得不出台一系列保护性开采开发的政策措施。

中国稀土矿产地在地域分布上具有点多面广又相对集中的特点。目前已在全国 2/3 以上的省区发现了上千处矿床、矿点和矿化点，但全国稀土资源总量的 98% 分布在内蒙古、江西、广东、四川、山东等地，形成“北轻南重”的资源格局。其中，中、重稀土主要集中在江西、湖南、广东、广西四省区交界地带的南岭地区，以离子吸附型为主。该类型稀土矿易采、易提取，南岭也成为中国重要的中、重稀土生产基地，实际上也是全球中、重稀土的主要产地。2011 年以来，在离子吸附型稀土矿地质调查、矿政管理、资源评价、环境问题评估等方面取得了一系列进展 [7]。广西、广东、云南、福建、浙江等地也相继发现了一些稀土矿床，其稀土资源储量有可能超过江西。轻稀土矿产主要集中在华北（内蒙古的白云鄂博和山东的郟山），西南地区也有（四川凉山州及云南的楚雄州和德宏州）。

长期以来，我国稀土行业“小、散、乱、差”等问题十分突出。至 2013 年，我国有稀土分离冶炼企业 100 多家，年总产能约为 3×10^5 t，平均每家企业的年产能仅在 3000 t，低水平重复建设的问题突出。

值得注意的是，中国稀土目前拥有了三个世界第一，即储量世界第一，生产规模世界第一，加工和出口量世界第一。然而，中国的稀土深加工技术和应用技术却远远不是世界第一，高科技、高附加值稀土产品的生产及应用远远落后于美国、日本及其他发达国家。“中东有石油，中国有稀土”。开发利用建议如下：①稀土是珍贵的战略性矿产资源，

也是中国的资源，也是全人类的资源，保护好中国的稀土资源也就是保护好全人类的资源。建立全球性的“基于稀土的全人类命运共同体”意义重大；②中国出口稀土，但中国难以进口稀土深加工及其衍生产品的高端技术，不能只在自由市场做“买卖”，必须另谋出路。建议通过“技术+资源”的合作模式来谋求新突破，尤其要高度重视重稀土；③不管国际市场如何变化，中国一定要有自己的战略定位和战略布局，从源头创新而不是人云亦云；④加强开采总量的管控，规范出口 [8]；⑤加强军民两用产品的研发，尤其是把军用技术移植到民用，可以极大地提高我国稀土开发利用的整体水平，同时也反过来为稀土高端产品的研发创造新的机遇。

三、分散元素矿产资源的主要特点及开发利用

我国分散元素资源丰富，但存在研究程度低，资源家底不清，开发利用缺乏规范，产品单一，技术路线落后，环境污染压力大等问题，离“用得好的目标还有很大差距。

（一）铟（In）的主要特点与开发利用

铟的独立矿物在自然界非常稀少，难以形成独立矿床 [9]。工业上主要是从赤铁矿、铅锌矿及钨锡矿的冶炼过程中作为副产品回收。铟主要赋存于闪锌矿，但只有当锡、锌共伴生且锌也大规模富集时才容易得到。预计铟将成为比稀土还紧缺的战略资源，而且更加难以寻找。铟的富集具有矿床类型的专属性，主要富集在锡石硫化物矿床和富锡铅锌矿床这两种特定类型的矿床中，铝土矿中也可能有所富集。中国的铟主要分布于 15 个省区，其中，云南占全国铟总储量的 40%，广西占 31.4%。

近十几年来，铟以其在高精尖产业技术中优良的性能而越来越受到重视。中国拥有全世界最大的铟地质储量，约占世界的 50%，已查明铟资源储量为 9600 t。中国从 1954 年开始回收铟，到 2006 年铟的生产能力达到 657 t，成为最大的铟生产国。但铟产业链基本上停留在高纯铟以下的基础产品层次，国外核心技术的引进也一直没有突破。

从全球矿产资源战略的角度分析，建议如下：①国家层面上要重新认识铟的现实价值和战略价值。国家海关和税务总局把铟列在贱金属栏目，应

该重新定位；②国际商贸方面应取消铟的出口退税；③实行国家储备，鼓励民间储备，提高人民对稀有贵金属的认识与重视；④政府应该及时促进中国铟深加工产业的发展，特别是加强对新兴产业发展的支持力度；⑤各级政府应该实行铟的生产和出口许可证制度。

(二) 镓(Ga)的主要特点与开发利用

近年来，镓成为电子工业的新宠，被誉为“半导体材料的新粮食”。截至2008年年底，我国镓的资源储量为 1.366×10^5 t，约占世界总量的75%。广西、贵州、河南、山西和云南的查明资源储量合占全国的88.2%。四川攀枝花钒钛磁铁矿中的镓约占世界储量的41%~42%，占国内的54%~55%；其次是德兴铜矿，储量占全国的15%；但两矿都因为品位太低而基本上没有利用。目前，国内已成功制备出超纯镓，并建成了年产15 t的超纯镓生产线[10]。

我国镓产量虽然在全球占有重要地位，但大部分以原料性产品出口，是世界主要镓原料出口国同时又是世界镓高端产品和制成品的重要进口国。建议如下：①继续充分回收镓资源，必须从战略高度重视并且在政策上要有相应的措施，包括战略储备；②限制镓资源出口，同时提高我国镓高端产品的生产技术水平；③鼓励创新，研发新产品，给予政策、税收等方面的支持，变资源优势为经济优势、技术优势和人才优势。

(三) 锗(Ge)的主要特点与开发利用

世界锗资源比较贫乏，按照目前的用量全世界只够用40年。我国是全球第二大锗资源国，已探明锗矿产地约35处，保有储量约为3500 t。主要分布在广东、云南、内蒙古、吉林、山西、广西、贵州等12个省区，合占全国锗总储量的96%。国内含锗较高的铅锌矿床主要有砂铅矿床(如云南会泽、贵州赫章铅锌矿)、沉积改造型矿床(如广东凡口铅锌矿)和热液交代型矿床(如湖南水口山铅锌矿)。云南省锗资源丰富，主要分布在铅锌矿和含锗褐煤中，目前居全国第一。

锗是具有战略性质的光信息材料，可以用于卫星上的太阳能锗电池。锗在医疗保健方面的应用越来越受到关注，尤其是有机锗药物之所以能震惊医

学界，主要是因为其低毒(微毒或无毒)和对人体具有的抗癌和免疫等作用。目前，我国和美国基本上垄断了全球的锗资源，但我国的出口量却占到全球的70%以上，且大部分是较低附加值的初级原材料产品。这些初级产品成为了其他国家的战略储备资源或精、深产品加工的原料。如果再不加以限制，势必造成我国锗资源的匮乏，因此建议建立锗资源出口配额制度。

(四) 镉(Cd)的主要特点与开发利用

自然界中镉与锌有着共同的地球化学行为，因而主要伴生在锌矿中。中国的镉资源丰富，主要集中在云南、四川、广东、广西、湖南、甘肃、内蒙古、青海、江西等省区。云南兰坪金顶铅锌矿是中国特大型的伴生镉矿床。贵州都匀牛角塘锌矿床是目前已知镉含量最高的矿床，为世界上罕见的大型独立镉矿床。云南都龙富镉锡多金属矿床镉储量达数千吨。大厂矿田最具工业意义的镉主要赋存于铁闪锌矿中，整个矿田镉资源量达到万吨以上。

由单质镉和汞生成的镉汞剂在加热时软化，而在人体温度下却很硬。这种“液态金属”或“变形金属”在军用和民用两方面都受到关注。镉合金在国防工业中有重要用途，镉棒可以在核反应堆中调节连锁反应的速度。美国将镉列为战略储备物资，储备目标高达5370 t。

近几年，对重金属有毒元素镉所引发的环境问题也成为众多学者研究的热点。锌矿分布地区环境中镉的高含量将是一个普遍存在的问题，需要高度重视。采矿活动导致镉元素被释放出来、进入下游水环境可造成镉污染。在农业生产中，污水灌溉可引起土壤镉污染。

综上所述，对于镉既要地质背景查明其分布情况，包括在矿床中的赋存状态，也包括在一般岩石中的分布状态，争取在开采铅锌矿的过程中充分回收镉，既保证镉资源的综合利用，也降低对环境的排放。同时要加强对镉在高科技领域中的创新研究，拓展镉的应用领域，尤其是“液态金属”领域的研发，只有镉得以无害利用才能减少环境污染。

(五) 铊(Tl)的主要特点与开发利用

铊在地壳中是典型的分散元素，主要呈类质同象、胶体吸附状态和独立铊矿物形式存在[11]。铊

的独立矿床仅见中国报道, 已知有贵州滥木厂汞铊矿床、云南南华砷铊矿床和安徽香泉铊矿床。事实上, 铊广泛存在于铅锌矿等多金属矿床中, 如广东云浮硫铁矿、凡口铅锌矿、云南兰坪铅锌矿等。铅锌矿冶炼厂烟尘中的铊也是回收铊的主要来源。

中国铊储量居世界首位, 是中国的优势资源, 但需求量极少。2009 年, 全球铊的年消耗量基本保持在 15 t 或以下。我国铊产业应用技术相对滞后, 主要用在高新技术和化工领域, 前者年需求量达 225 kg, 后者年需求量达 24 kg。

我国西南低温热液矿床分布区普遍含铊, 通过风化作用, 铊会进入水体、土壤、植被和空气中。建议如下: ①要调查清楚铊在自然界的分布情况, 有些“毒瘤”必须挖掉才能断根; ②不能只是在尾砂库种上草皮, 还应该长期监测地下水的变化, 最好能通过综合回收利用的方式根除污染源; ③粉尘中铊的迁移活性很强。除尘是防治铊污染的关键, 应注意硫酸和水泥生产中铊的回收。

(六) 碲 (Te) 的主要特点与开发利用

碲是既稀有又分散的元素, 在地壳中的含量极低, 但用途却十分广泛而重要, 且社会需求日益增加。碲主要分散在硫化物矿床及含金石英脉矿床的黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等矿物中, 工业上的碲主要从电解精炼铜和铅的阳极矿泥中回收。

中国已发现碲矿产地约 30 处, 探明碲储量处于世界第三位, 主要集中于广东 (占全国总量的 42%)、江西 (41%) 和甘肃 (11%)。中国碲矿资源集中在热液型多金属矿床、矽卡岩型铜矿床和岩浆铜镍硫化物型矿床中。广东大宝山、江西城门山、甘肃白家嘴子为中国三个大型-特大型伴生碲矿床, 三者占全国伴生碲储量的 94%。1991 年 8 月, 全球第一例独立碲矿在中国四川省石棉县大水沟被发现 [12]。

碲产量一半以上用于冶金工业, 主要消费增长领域是光电仪器——激光器、光二极管、光接收器。中国作为一个碲资源较为丰富的国家, 必须重视碲资源的开发和利用, 既要加强对碲资源的保护, 加强对开发利用的管理和监督, 也要依靠科学技术进步, 提高碲资源的利用水平, 避免低端产品过度、无序出口。

(七) 铼 (Re) 的主要特点与开发利用

铼是地球上极为稀少的金属元素, 在各种地质过程中均不易富集。重要的含铼矿床包括: ①斑岩铜 (钼) 矿和斑岩钼矿; ②热液成因的铀-钼矿床; ③含钼、钒的含铜页岩及硫质-硅质页岩矿床; ④独立铼矿床 [13]; ⑤含铼的岩浆型铜镍矿床、铬铁矿床、铂矿床; ⑥含铼的黑钨矿床; ⑦铼铜砂岩、铀铼铜砂岩型矿床; ⑧铼铜炭质页岩型铜矿。

铼素有“战略金属”“航空金属”之称, 应用领域很广, 包括喷气发动机零部件、燃气涡轮引擎以及量子计算机等。铼在航空发电机方面的应用, 一直是我国高端装备制造业的短板, 使得我国不得不长期进口飞机发电机。

中国是铼的主要资源国且全部伴生于钼矿中, 集中分布在陕西金堆城、河南栾川等钼矿中, 合计占全国铼总储量的 90%。四川沐川地区发现有独立铼矿, 预测资源量为 50 t。

由于铼的稀散性极强, 独立矿物少见, 大多数矿山在开采主元素的同时, 很少对铼进行回收, 造成铼资源的浪费。建议如下: ①深入调查研究铼在自然界的赋存状态, 尤其是加强对伴生铼资源的勘查和评价; ②研究铼的富集成矿机制; ③加强含铼矿床成矿规律的研究; ④加强对现有金属矿山开采地段和正在勘探的金属矿床内铼的查定; ⑤提高综合利用水平, 研发不同类型铼矿的回收技术; ⑥加强对铼深加工产品的研发; ⑦加强铼资源战略研究。

(八) 硒 (Se) 的主要特点与开发利用

硒是半金属, 性质与硫相似, 但金属性更强。硒在碳质硅质岩中的含量较高, 最高可达到 8590×10^{-6} [14]。自然界中硒的超常富集与成矿仅发生在玻利维亚的帕卡佳克和中国的渔塘坝。硅质岩建造中也往往有硒的富集。目前所探明的硒矿资源主要包括四种类型: “远成”硒化物脉状矿床; 不整合面型矿床; 砂岩型铜铀矿床; 陆相火山岩型低温金银矿床。

截至 2007 年年底, 全国保有硒资源储量达到 15 600 t。全国 18 个省区有硒的资源储量, 主要分布在甘肃、广东、黑龙江、湖北、青海 5 省 (合占全国总量的 79.3%)。在已探明的硒储量中, 岩浆型铜镍硫化物矿床约占硒总储量的一半以上, 主要是伴生资源 [1]。

硒的最显著特性是其在光照下的导电性比在黑暗中可成千倍地增加,在玻璃、电子、光学和冶金工业中具有广泛的用途。硒是生态环境中重要的微量元素,环境中硒过量或缺乏均会导致机体产生疾病。高浓度硒危害作物的生长发育,降低产量,导致动物胚胎畸形发育甚至死亡。硒是人体必需的微量元素,缺硒或过量摄入硒都不利于健康。

我国高硒土壤较发育,但分布极不均匀。应根据景观地球化学特点、高硒土壤特征及不同状态硒的分布规律,遵循“因地制宜,综合开发”的原则对各高硒土壤地区进行分片重点研究与开发。

四、结语

早在1950年,美国国会就通过了《国防生产法》,要求政府将稀有金属转换为军需生产和储备。后来俄罗斯、韩国、日本、欧盟等也都将主要“三稀矿产”划定为战略性资源,以确保稳定供应。我国近几年也出台了一系列的文件和政策,支持“三稀资源”的开发和综合利用,并且着重加强了对稀土的储备和保护。但是,对“三稀矿产”的战略定位仍不够清晰,创新动力不足,处于出卖原材料或初级产品的状态。为此,建议进一步全面系统、深入深刻地研究我国“三稀矿产”的战略问题,重视资源勘查与储备,加强资源提取的选冶技术和高端应用新产品的研究与开发。

就稀土而言,鼓励民营企业也参与到稀土相关产品的研发中来,同时采取措施保护好我国的稀土资源尤其是离子吸附型稀土,做到“稀土管得住”。就稀有金属而言,锂资源近年来在四川甲基卡等地取得了可喜的找矿突破,但铍、钽、锆等更加紧缺的稀有金属却并没有根本性的找矿突破,对外依存度居高不下,迫切需要加大找矿力度,要从我国“稀有常有”的规律出发精心部署,科学立项,加大投入,做到“稀有找得到”。就分散金属而言,我国无论是共伴生资源还是独立可采的资源,都比较丰富,甚至可以找到国外都没有的独立碲矿、独立铈矿、独立硒矿,即“稀散不散”。但我国对稀散元素的研究程度很低,资源家底不清,开发利用缺乏规范,因此,一方面要加强规范管理,另一方面要创新引领,切实以稀散金属在高科技领域的产品创新为引领,做到“稀散用得好”。稀散元素的产品

研发创新点最多,但我国产品较为单一,技术路线落后,尤其缺乏原创性、革命性的研发思路,导致铈、镓、锗、铟、碲这样的既分散又稀有的原材料既被过度消耗,又造成环境污染,在大量出口的过程中也没有产生良好的经济效益。

参考文献

- [1] 王登红,刘丽君,刘新星,等.我国能源金属矿产的主要类型及发展趋势探讨[J].桂林理工大学学报,2016,36(1):21-29.
Wang D H, Liu L J, Liu X X, et al. Main types and research trends of energy metallic resources in China [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2016, 36(1): 21-29.
- [2] 邵厥年,陶维屏,等.矿产资源工业要求手册[M].北京:地质出版社,2011.
Shao J N, Tao W P, et al. Requirements manual for mineral resources industry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [3] 陈其慎,于汶加,张艳飞,等.关于加强我国矿产资源储备工作的思考[J].中国矿业,2015,24(1):20-24.
Chen Q S, Yu W J, Zhang Y F, et al. Considerations on the strengthening of the mineral resources reserve [J]. China Mining Magazine, 2015, 24(1): 20-24.
- [4] 何季麟.中国钽铌工业的进步与展望[J].中国工程科学,2003,5(5):40-46.
He J L. Progress of tantalum and niobium industry in China [J]. Strategic Study of CAE, 2003, 5(5): 40-46.
- [5] 李淑文.钽铌资源与生产现状[J].中国有色冶金,2008(1):38-47.
Li S W. Tantalum niobium resources and production status [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2008(1): 38-47.
- [6] 王俊卿.青海省锶资源的开发与利用[J].无机盐工业,2004,36(1):15-16.
Wang J Q. Exploration and application of strontium resource in Qinghai Province [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2004, 36(1): 15-16.
- [7] 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.
Wang D H, Wang R J, Sun Y, et al. A review of achievements in the three-type rare mineral resources (rare resources, rare earth and rare scattered resources) survey in China [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2016, 37(5): 587-598.
- [8] 黄小卫,李红卫,王彩凤,等.我国稀土工业发展现状及进展[J].稀有金属,2007,31(3):279-288.
Huang X W, Li H W, Wang C F, et al. Development status and research progress in rare earth industry in China [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2007, 31(3): 279-288.
- [9] 涂光焯,高振敏,胡瑞忠,等.分散元素地球化学及成矿机制[M].北京:地质出版社,2004.
Tu G Z, Gao Z M, Hu R Z, et al. Geochemistry and metallogenic mechanism of dispersed elements [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004.
- [10] 范家骅.超纯镓的研制和产业化[J].广东有色金属学报,2006,16(2):92-99.
Fan J H. Research and industrialization of super pure gallium [J].

- Journal of Guangdong Non-ferrous Metals, 2006, 16(2): 92–99.
- [11] 李德先, 高振敏, 朱咏焯, 等. 铊矿物及铊的植物找矿 [J]. 地质与勘探, 2003, 39(5): 44–48.
Li D X, Gao Z M, Zhu Y X, et al. Thallium-bearing minerals and vegetaiont prospecting for thallium [J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(5): 44–48.
- [12] 陈毓川, 银剑钊, 周剑雄, 等. 四川石棉县大水沟独立碲矿床地质特征 [J]. 地质科学, 1994, 29(2): 165–167.
Chen Y C, Yin J Z, Zhou J X, et al. Geological characteristics of Dashuigou tellurium ore deposit in Shimian County, Sichuan Province, China [J]. Scientia Geologica Sinica, 1994, 29(2): 165–167.
- [13] 宾智勇, 刘景槐, 冉俊铭. 铼的生产、应用与市场 [J]. 湖南有色金属, 2005, 21(3): 7–10.
Bin Z Y, Liu J H, Ran J M. Production, application and market of rhenium [J]. Hunan Nonfreeous Metals, 2005, 21(3): 7–10.
- [14] 郑宝山, 洪业汤, 赵伟, 等. 鄂西的富硒碳质硅质岩与地方性硒中毒 [J]. 科学通报, 1992 (11): 1027–1029.
Zheng B S, Hong Y T, Zhao W, et al. Selenium rich carbonaceous siliceous rocks and endemic selenium poisoning in Western Hubei [J]. Chinese Science Bulletin, 1992 (11): 1027–1029.