



面向全球战略新兴资源时代 探寻中国三稀矿产发展之路

□ 文 / 王登红

作者简介 王登红，研究员，博士生导师，政府特殊津贴获得者。长期从事重要矿产成矿规律研究及找矿勘查工作。主持完成和承担国家、省部级和企业项目36项；出版专著33部；先后获国家科技进步奖二等奖，省部级科技奖一等奖5项、二等奖1项。入选“首批新世纪百千万人才工程国家级人选”；获全国野外科技工作先进个人、自然资源部高层次创新型科技领军人才称号。





＞ 五彩湾 陈继宏 / 摄

“三稀矿产”是稀土、稀有金属和稀散元素矿产的统称，具体包括镧、铈、镨、钕、钐、铕、钆、铽、镱、铈、钐、铕、钆、铽、镱 17 种稀土元素；铍、钽、锂、铍、锆、钨、铪、铌、钨、铪、铌 9 种稀有金属；镓、锗、铟、铊、镉、汞、硒、碲 8 种稀散元素。这 34 个矿种产量不大，在国际市场上也被纳入小矿种之列，但其用途甚广、涉及领域众多。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。

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，因而也被称为高科技矿产或战略性新兴产业矿产。我国三稀矿产具有“稀土不土，稀有常有，稀散不散”的禀赋特征，只有在开发利用过程中做到“稀土管得着，稀有找得到，稀散用得好”，才能发挥其四两拨千斤的关键作用。这种在关键时刻、关键场合发挥关键作用的矿产，又称为“关键矿产”。

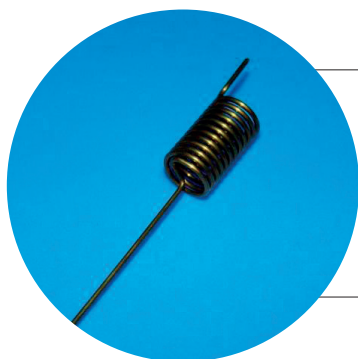
破解稀土管理的困境与前景

稀土常赋存于高岭土中，但与高岭土、硅藻土、膨润土等非金属矿物明显不同。稀土元素是标准的金属元素，而且用途十分广泛，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，具有“工业维生素”“农业激素”“军工宠才”等美称，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 4 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。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。

中国稀土目前拥有了三个世界第一：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，中国稀土的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继续提升。“中东有石油，中国有稀土”。因此，如何开发利用好这一与石油战略地位可相提并论的珍贵资源，至关重要。要破解稀土难题，就要在珍惜资源的基础上，推进军民融合可以极大提高我国稀土开发利用的整体水平，在科技先行的同时也反过来为稀土高端产品的研发创造新的机遇。同时要做到慎重贸易。中国出口稀土，但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“买卖”，必须另谋出路。不论国际市场如何变化，中国要有自己的战略定位和战略布局，从源头创新而非人云亦云。

若能另辟蹊径，或是中国稀土产业的最佳选择。稀土是珍贵的战略性矿产资源，利用资源优势，通过技术创新，是有可能实现弯道超车的。比如，2019 年 8 月，在轻稀土价格远远不如猪肉价格的同时，氧化铈的价格却高达 9 050 元 / 千克，接近轻稀土的 900 倍。这主要是由于国内外实验室开始了对铈新用途的深度研发，而纷纷



铍目前多用于军事工业，但铍铜合金在民用领域具有广泛的应用前途，如用铍青铜制成的弹簧可以压缩几亿次以上。



锆是一种很优秀的高科技生物材料。利用二氧化锆制作的义齿对牙龈无刺激、无过敏反应，避免了金属在口腔内产生的过敏、刺激、腐蚀等不良反应。

购入导致的。钪在 30 年前主要用于彩电显像管，可使阴极枪的电流密度增加 4 倍，使用寿命提高 3 倍，彩电画面清晰度倍增。1990 年初，钪（99.99%）的市价为 7.5 美元 / 千克，但随着液晶显示器等新产品代替显像管显示器，钪的价格狂跌到 0.81 美元 / 千克。近年来，随着高端装备制造业的发展，钪因其“轻巧”又“柔和”的特性在 3D 打印、Sc-Mg-Al 合金、Sc-Sb-Te 合金、相变随机存储器等方面广泛应用。全球钪的消费也从 20 世纪 80 年代初的只有 40 千克到近几年贸易量就达 10 ~ 15 吨左右，其价比金，一举跻身稀土家族中的“贵族”。这就是钪这一稀土元素从“丑小鸭”到“白天鹅”华丽转身的现实故事，也给其他“土豆价”稀土元素能否也华丽转身树立了样板。

突破中国稀有金属元素的找矿瓶颈

稀有金属元素在地壳中的含量甚至比稀土还低，但也可以“超常富集”到大型、超大型矿床的规模，如新疆的可可托海、四川的甲基卡、青海的柴达木盆地，等等。因此，稀有金属是有可能找得到高品质、大规模的工业矿床的。当然，不同的稀有金属元素其富集能力不同。

例如，我国的锑矿资源约占世界探明锑储量的 70%，中国也是世界锑产品的主要生产国，80% 以上产品供出口。

目前，稀有金属元素中的“热搜网红”要属锂，因为其在原子能、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“21 世纪的能源金属”，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。锂作为可控核聚变的基础原材料在民用发电方面的应用，是锂资源开发利用过程中难度最大、最具革命性意义的。据科学家计算，1 千克锂通过热核反应所放出的能量相当于 2 万多吨优质煤，而其质量数为 6 的同位素 ${}^6\text{Li}$ 又是可控核聚变的关键原材料。我国四川甲基卡恰恰是目前全球已知锂矿中最富集 Li-6 的地区，其战略意义非同小可。

铍是稀有金属中另外一种稀缺资源，主要以铍铜合金和铍金属的形式广泛应用于航空、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。铍具有良好的耐腐蚀性和高温强度，热导率大，具有良好的辐射透过性和对中子慢化、反射及红外线的反射性能。由于铍元素在地壳中的含量仅仅是锂的 1/10，其找矿难度也就大了 10 倍，市场价格也要高出一个数量级。中国铍矿虽然资源丰富，但寻找独立高品位铍矿是当务之急。铍矿以花岗伟晶岩型为主，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，主要产于新疆、四川、云南等地。中国已探明的铍以伴生矿产为主，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%）。分布在14个省（区），以新疆、内蒙古、四川和云南为主，但这些资源要么已经消耗，要么无法开发，以至于从出口国变为进口国，而且对外依存度越来越高。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，而西藏高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砂卡岩型或类砂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。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，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。

锆之所以被称为“稀有金属”，是因为纯锆的冶炼相当困难。在寻找高品位锆原材料的同时，需加大在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，探明储量不足全球锆资源的1%。国外大部分锆资源来自于滨海砂矿，而我国锆砂很少，因此资源结构也不利。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）。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。中国锆矿分布不均，富矿少，放射性偏高。这些特点导致我国锆矿资源不具备市场竞争力，其中硬岩型矿床几乎



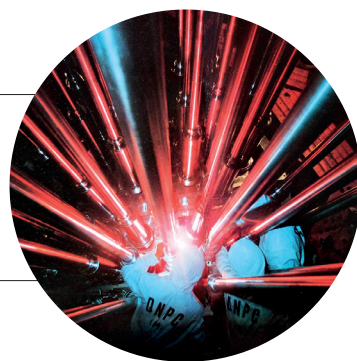
内蒙古白云鄂博稀土矿

全是低品位伴生矿，而海滨砂矿又主要分布在环境保护区。因此，为了从战略上保证国家安全，既要在滨海非环境保护区或基建区优先开展锆砂矿资源调查，按规定进行“压覆资源调查评估”，先回收资源再开展建设；也要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，要取得找矿突破是可能的；还要在成矿地质条件具备的地区探索风化壳型或残坡积砂矿的可能性；更要加强管理，“立足国内，适当进口，限制出口”，避免恶性竞争；并要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。

铪是稀有金属中的分散元素，或者是分散元素中的稀有金属，用量虽小，但在高技术领域必不可少。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。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。

铷、铯具有优异的光电性能，在新兴产业中应用前景广阔。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”。铷、铯也无独立矿山，一般从其他矿床中作为共伴生组分回收。中国铷矿的品质远不如国外，如加拿大伯尼克湖—坦科矿床中氧化铷的含量是 1.0%，而我国江西宜春 414 矿中铷的含

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心的控制棒。



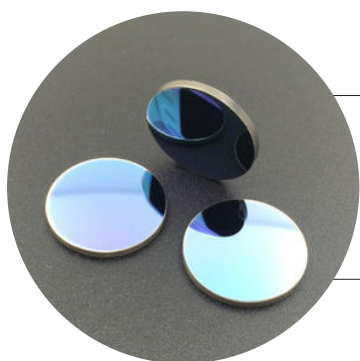
铟主要赋存于闪锌矿，但只有当锡、锌共伴生且铟也大规模富集时才能得到。预计铟将成为比稀土还紧缺的战略资源。



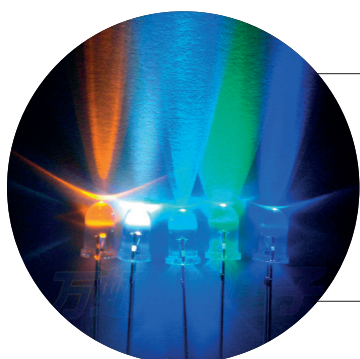
量只有 0.22%。铷矿的类型主要有锂云母钠长石花岗岩型、花岗伟晶岩及天河石花岗岩型和盐类矿床。花岗岩体中钨锡矿脉周围云英岩化作用所形成的白云母及锂云母中的铷有时也可达到工业要求。铯矿床的主要类型与铷相似，在盐湖和现代温泉中也有富集，目前可工业开采的主要为含铯伟晶岩，占总储量的 98%，主要分布于新疆阿尔泰地区和江西宜春。

聚焦稀散元素的本土化利用

我国稀散元素资源丰富，但距离“用得好”的目标还有很大差距。铟在自然界难以形成独立矿床，工业上主要从赤铁矿、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。近年来，铟以其在高精尖产业技术中优良的性能越来越受到重视。中国拥有全世界最大的铟地质储量，约占世界的 50% 左右，已查明铟资源储量 0.96 万吨。中国从 1954 年开始回收铟，到 2006 年铟的生产能力达到 657 吨，成为最大的铟生产国。



铟是具有战略性质的光信息材料，可以用于卫星上的太阳能铟电池、激光谐振腔的半透反射镜。



铟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。

铟资源比较贫乏，按照目前的用量，全世界只够用 40 年。铟在医疗保健方面的应用越来越受到关注，尤其是有机铟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，我国是全球第二大铟资源国，已探明铟矿产地约 35 处，保有储量约为 3 500 吨。我国的铟出口量占全球的 70% 以上，大部分是低附加值的初级原材料产品，如不加以限制，势必造成我国铟资源的匮乏，反而助长其他国家铟工业的发展。

铟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，且社会需求日益增加。铟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，工业上的铟主要从电解精炼铜和铅的阳极矿泥中回收。中国已发现铟矿产地约 30 处，探明铟储量处于世界第三位，主要集中于广东、江西和甘肃。中国铟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—特大型伴生铟矿床，三者占全国伴生铟储量的 94%。1991 年 8 月，全球第一例独立铟矿在中国四川省石棉县大水沟发现。中国作为一个铟资源较为丰富

的国家，必须重视铟资源的开发和利用，既要加强对铟资源的保护，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铟资源的利用水平，避免低端产品过度、无序出口。

镓是电子工业的新宠，被誉为“半导体材料的新粮食”，在液态金属冶金领域有着广阔的前景。截至 2008 年年底，我国镓的资源储量为 13.66 万吨，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%；之后是德兴铜矿，镓储量占全国的 15%。但无论是攀枝花还是德兴，镓都因为品位太低而基本上没有利用。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。因此，要从战略高度重视并且在政策上对镓的回收采取相应的措施，包括战略储备；要限制镓的低价出口，同时要提高我国镓高端产品的生产技术水平；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。

铊是地壳中典型的分散元素，主要呈类质同象、胶体吸附状态和独立铊矿物形式存在。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,如广东云浮黄铁矿、凡口铅锌矿、云南兰坪铅锌矿等等。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吨或以下。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,前者达每年225千克,后者年需求量达24千克。我国西南低温热液矿床分布区普遍含铊。风化过程中铊会进入水体、土壤、植被和空气中。因此,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;在矿山环境治理过程中,不能只是在尾砂库种草,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;粉尘中铊的迁移活性很强,要注意除尘。

我国镉资源较为丰富。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具有重

要用途,镉棒可以在核反应堆中调节连锁反应的速度。美国已将镉列为战略储备物资,储备目标高达5370吨。我国的镉主要集中在云南、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中有中国特大型伴生镉矿床;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,规模为大型;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。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释放出来,进入下游水环境可造成镉污染。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,包括其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,



也要降低其对环境排放。同时要加强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污染环境的机会。

无论是基础理论、成矿规律、市场跟踪、技术研发、资源保障还是相关政策的制定与执行都需要立足当前,从长计议。

聚焦我国的三稀矿产资源,前景可盼,大有可为。而着眼当前,兼顾长远至关重要,重点加强国家急需紧缺的优质稀有金属矿产的战略性调查,对稀土和稀散金属矿产的综合回收、有效利用技术开展研究。同时要加强协作、联合攻关,鼓励地勘单位专业技术优势与矿业企业资金管理

优势联合,促进成矿预测、找矿勘探、综合评价与有效利用等方面的突破。做到全面推进,重点突破,加强川西甘孜州、新疆阿尔泰、西准噶尔、柴达木盆地、南岭等地区稀有金属矿,华南离子吸附型稀土矿以及川西、川滇黔、南岭等地区稀散金属矿的重点调查和综合评价研究。大力推广新技术新方法的应用,加强成果集成和综合研究,深化成矿规律认识,指导区内找矿。

中国三稀矿产资源之路,任重道远。

本文由国家自然科学基金重大项目“国家战略性三稀矿产资源供给风险治理机制研究(编号:19ZDA111)”“锂能源金属矿产基地深部探测技术示范(编号:2017YFC0602700)”“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)”“大宗急缺矿产和战略性新兴产业矿产调查工程与川西甲基卡大型锂矿资源基地综合调查评价(编号:DD20160055)”和“中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务(矿产地质志)(编号:DD20160346)”项目联合资助。■

作者单位/中国地质科学院矿产资源研究所

(本文编辑:王依卓)



景观/李星瑶/摄