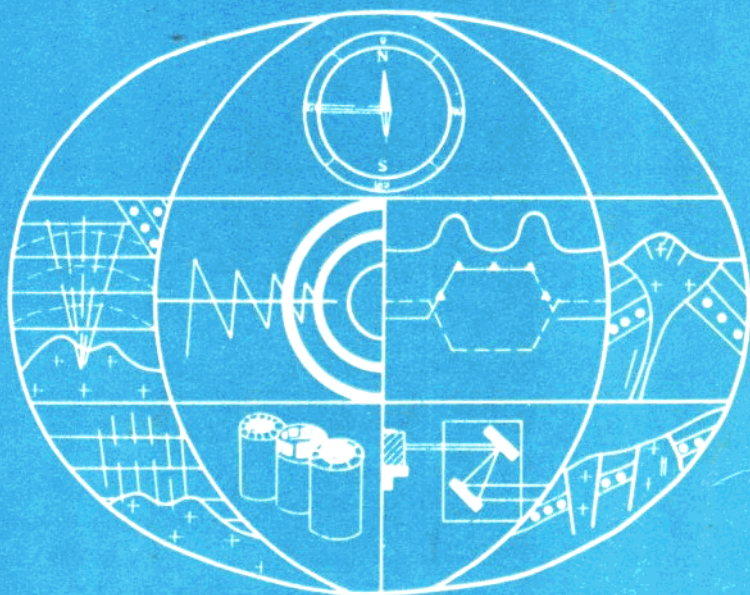




编号 010

矿产地质系列丛书

国内外稀有稀土矿床 找矿研究新进展



中国有色金属工业总公司地质勘查总局

前 言

现代科学技术的发展和成就离不开稀有元素生产和应用，稀有元素已成为新材料和新工艺的重要组成部分，因而其需求量一直呈稳定增长趋势。

锂作为一种超轻金属正进入航天和其它尖端领域。用铝锂合金制造的飞机，其载运量可提高20%。用锂或锂化合物制成的高能燃料常用作火箭、飞机、潜艇的燃料。在铝工业部门，在电解质中添加少量碳酸锂(2—8%)，不仅可大大节省能源，还可显著减少向大气排放有毒的氟。

铍主要以铍铜合金及氧化铍形式应用于电子工业和耐火材料、陶瓷材料方面。金属铍主要用于核工业和空间技术，可用作反应堆的防护材料和制备中子源，在航空航天方面被大量用来作制动装置、结构材料、飞船蒙皮等。此外，铍还是一种火箭喷气飞机的高能燃料添加剂。

铌的应用市场分为普通铌和优质铌两个方面。普通铌市场是指以标准级铌铁形式应用的产品，油气工业为其传统的应用领域，主要产品为输油管道和油井用套管等。此外，汽车工业、建筑业、水电站建设都需较多的铌钢。优质铌市场指以金属铌、铌合金、高纯铌铁、氧化铌形式应用的产品，主要应用领域为航空航天、电子工业和环保工程等。

钽的最大消费市场是电子工业，用钽制成的微电容器，由于其体积小、电容大、稳定性高被大量用于雷达、导弹、超音速飞机、电子计算机及电视机的电子线路中。其次，在冶金工业方面用钽做抗氧化热合金、难熔合金和超硬合金。

锆的主要用途可分为三类：矿物类、化合物类和金属类。锆矿物类(锆英石)是直接利用锆矿砂及其微细粉制造锆质耐火砖，应用于玻璃窑炉及钢铁冶炼，作为铸造型砂用于铸钢件，制成釉面材料用于陶瓷工业，磨成细粉用于制造彩电玻壳等。锆化合物类中的二氧化锆用作耐火材料、研磨、陶瓷材料以及玻璃添加剂、宝石材料等。金属锆

(原子能级) 主要用于核反应堆中核燃料的包套材料及堆芯结构材料等。

稀土用途很广，特别在石油、玻璃陶瓷、电子、照明、化学、农业以及核技术领域都有重要用途，而且新的应用领域仍在不断拓展中。催化剂是稀土主要的应用部门，在沸石催化剂中加入1—5%的氯化稀土，可提高催化活性，达到石油精炼裂化提高汽油产量的目的。作为合金钢添加剂是稀土又一个重要应用领域。在陶瓷玻璃工业方面，稀土化合物有抛光、脱色、着色等多种用途。稀土荧光粉广泛应用于彩电、X射线增光屏及荧光灯上。近年来，稀土磁性材料（永磁体）发展势头强劲，在电力设备、电机、机床、家电方面都有广阔的应用前景。稀土农用（稀土微肥）是我国首创的稀土应用领域，并在大力推广。

由上可见，稀有稀土金属与发展高新技术关系密切，是发展尖端技术不可缺少的原料。因此，近30年来，世界稀有金属工业发展迅速，目前在一些工业发达国家中，稀有金属的应用几乎进入所有的技术部门。可以说，广泛采用稀有金属可使21世纪的技术和经济发生重大变革，其地位不亚于石油。

正由于稀有金属在国民经济与国防上的极端重要性，近年来世界稀有金属资源迅速增长，许多国家相继找到一批大而富、易采选的稀有稀土矿床，其中包括一些新类型矿床。并研制出不少成本低、效率高的选冶工艺流程。据初步统计，自80年代以来，世界各国发现和勘探的超大型稀有稀土矿床不下于10个，主要分布在澳大利亚、加拿大、巴西、俄罗斯以及格陵兰等地。这些矿床的特点是：储量巨大、矿种多、品位富、超大型矿床的发现，不仅使世界稀有金属资源储量大幅增加，还将为目前正在开采的各国矿山带来竞争上的压力。我国拥有丰富的稀有稀土矿产资源，多年来在找矿勘探和科研方面都取得了显著成绩，找到了许多具工业价值的矿床，为我国稀有金属工业发展作出了重大贡献。但应看到，我国部分稀有金属资源现状并不理想，如某些急需的矿种储量仍不足，有些矿种虽有很大储量，但由于品位偏低或选冶困难而无法利用，这就直接影响我国稀有金属工业发展所必需的原料保证。我国要在国际稀土市场竞争中继续保持优势，在稀有金属市场竞争中占有一定份额，就不可不注意找寻更富、更易采选的矿石，更要注意研究和找寻新地区新类型稀有稀土矿。

为了及时收集和分析国外有关稀有稀土找矿新进展和开发方面的信息，促进国内稀有稀土矿床地质研究和找矿工作，我们于1994年向中国有色金属工业总公司矿产地质信息网申请了“稀有稀土金属大型超大型矿床找矿新进展及开发利用前景研究”项目。同年得到总公司地质勘查总局批准立项，参加本项目工作人员有林德松、朱桂田、罗宗端、李福春。从1995年下半年始，经过一年来的资料收集和综合分析工作，完成了项目计划任务书的各项要求，并达到预期的研究目的。

本汇编共分九个部分，重点是通过国外典型矿例按矿床类型分别叙述了近年来稀有稀土地质找矿方面取得的新进展和新动向，对某些国内报道很少或比较陌生的矿床类型（火山岩型、碱性交代岩型）从成矿地质背景、矿床分类、矿床特征、成矿机理等方面作了全面介绍。同时在此基础上，初步总结了国内外超大型稀有稀土矿床的主要特征。最后，根据我国的具体地质条件、矿山多年的生产实践和国外近年来找矿动向，提出了我国今后稀有稀土优质矿床的找矿类型及有望地区。

由于编者的水平、资料、时间等方面的限制，汇编中难免会有许多不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

一九九六年十月

国内外稀有稀土矿床找矿研究新进展

目 录

前 言

一、地质—经济分析	(1)
1. 资源政策	(1)
2. 资源现状	(2)
3. 生产和需求	(4)
二、找矿进展综述	(6)
1. 超大型矿床	(6)
2. 新类型矿床	(7)
3. 新型的矿物原料	(13)
三、与碱性超镁铁质岩和碳酸岩有关矿床	(13)
1. 韦尔德山碳酸岩风化壳型稀土铌钽磷酸盐矿床	(14)
2. 塞斯拉古斯碳酸岩风化壳型铌稀土矿床	(19)
3. 托姆托尔碳酸岩风化壳型铌稀土矿床	(19)
四、与碱性花岗岩、正长岩有关矿床	(26)
1. 概述	(26)
2. 皮廷加锡铌钽矿床	(29)
3. 怪湖铌钽矿床	(32)
4. 索尔湖铌钽矿床	(34)
5. 古雷亚铌钽矿床	(35)
6. 哈尔赞—布雷格提铌钽矿床	(35)

7. 莫茨费尔特中心铌钽矿床	(37)
五、与碱性交代岩有关矿床	(38)
1. 区域地质背景	(38)
2. 矿床类型及其特征	(39)
3. 碱交代作用的演化特征	(43)
4. 形成条件及成因	(44)
5. 找矿标志	(45)
六、花岗伟晶岩型和花岗岩型矿床	(46)
1. 花岗伟晶岩矿床	(46)
2. 花岗岩型矿床	(48)
七、与火山岩有关矿床	(51)
1. 稀有金属火山岩型矿床基本特征	(51)
2. 布罗克曼铌钽锆钇铍镨矿床	(58)
八、超大型稀有稀土矿床的某些特征	(61)
1. 规模界限	(61)
2. 矿床类型	(62)
3. 大地构造与超大型矿床关系	(63)
4. 成矿时代	(63)
5. 多期性成矿作用	(63)
6. 存在着较为还原的条件	(64)
九、我国稀有稀土找矿问题	(64)
1. 几点启示	(64)
2. 资源现状及保证程度	(65)
3. 找矿进展	(66)
4. 找矿方向	(67)
主要参考文献	(70)

国内外稀有稀土矿床找矿研究新进展

林德松 朱桂田 罗宗端 李福春

(中国有色金属工业总公司矿产地质研究院)

一、地质—经济分析

1. 资源政策

世界上最大的稀有金属矿物原料基地大多集中在对稀有金属产品需求水平较低的国家,如巴西是世界上铌的最大输出国,澳大利亚是锆(锆英石)的最大出口国。我国稀土资源极为丰富,是世界上稀土的最大出口国。一般来说,都以出口初级产品、半成品为主。巴西自1981年起主要出口铌铁,烧绿石精矿禁止出口。很多发达国家也是稀有金属出口国。但他们输出的产品往往是具有高额利润的纯金属和化合物,工艺加工程度高,可直接应用于工业技术部门,如美国是世界上最大的金属锂、铍及其化合物、合金的出口国。法国是世界上生产高纯稀土产品的主要国家之一,其稀土原料全部依赖进口。

美国将许多稀有元素列为战略物资,建立国家储存和战略储备。通过国家储备来调节市场价格。近年来,美国尽管经济衰退并削减了大多数有色金属普查的投资,但为了确保这些战略原料自给仍积极地对地质勘探计划投资。

日本是一个几乎没有稀有金属原料的国家,但十分重视稀有金属矿产调查,资助发展中国家的稀有金属地质勘查工作。日本生产高纯稀有稀土产品的原料也全部依靠进口。

在前苏联,稀有金属部门由于受中央计划分配经济政策制约,生产和需求部门几乎都是国防、原子能系统,民用方面微乎其微。稀有金属产品由中央主管部门管理,以生产指标作为经济杠杆抑制了前苏联国民经济对稀有金属的需求。在价格政策方面,中央制定的产品价格并不反映生产与需求之间的关系,很多生产部门属于计划亏损企业,尽管价格远远低于国际市场,但由于实行战略物资禁止贸易政策,其稀有金属产品难以进入国际市场,这是阻碍稀有金属工业发展的重要原因。苏联解体后,俄罗斯稀有金属工业仍沿袭原有体制,问题重重。由于经济混乱、市场的政策不稳定,使得原有管理体制问题更加突出。随着苏联解体,俄罗斯已失去了一半以上的稀有金属生产能力,尤其是产品的加工能力。为此,提出要采取应急措施来复苏稀有金属部门。这些措施包括组建俄罗斯稀有金属工业、完善矿物原料基地,改进现有的加工工艺并研制新的加工工艺。据预测,在未来一段时期内,对俄罗斯来说,许多稀有金属将长期紧缺。

2. 资源现状

从资源保证程度来看,世界稀有金属资源一般不存在短缺问题,特别是近年来发现一批大型超大型稀有稀土矿床,资源储量迅速增加,因此,现有资源可以保证未来一个较长时期的需求。

2.1 锂

根据美国矿务局1995年发表的“矿产品概览”资料,世界已探明的金属锂储量为220万吨、储量基础840万吨,主要集中在智利、澳大利亚、美国和加拿大等国家,这个储量数字未包括中国和前苏联。我国锂资源极为丰富,储量居世界首位。前苏联的锂储量不详,推测也是锂资源大国之一。锂矿资源可分为矿石锂和卤水锂两种类型。矿石锂主要为花岗伟晶岩型(锂辉石、透锂长石),著名的矿床有美国北卡罗来纳州的金格斯山锂矿床、津巴布韦的比基塔矿床等,其次为花岗岩型锂云母矿石,如我国江西宜春414矿床。卤水锂包括盐湖卤水和地下卤水,卤水型矿床有美国大盐湖、西尔斯湖、智利著名的阿塔卡马盐沼、玻利维亚的乌龙尼盐沼等,我国青海盐湖卤水锂的储量也非常可观。

2.2 铍

铍矿储量据《Mining Magazine》(1985)报道为41.9万吨(不包括中国)。而《Mineral Facts and Problems》(1985)报道为38.15万吨,这个数字可能未包括加拿大索尔湖矿床和澳大利亚布罗克曼矿床的铍储量。铍资源主要集中在巴西、印度、美国、加拿大、中国等国家。矿床类型主要有三类:含绿柱石花岗伟晶岩矿床、含羟硅铍石蚀变凝灰岩矿床和碱性花岗岩正长岩杂岩体中含硅铍石稀有稀土矿床。其次还有云英岩型、气成热液脉型等。

2.3 铌

世界铌矿资源丰富,储量巨大,据美国矿务局(矿产品概览)(1995)报道,世界铌储量为354万吨,储量基础420万吨。这个储量数字可以说既不包括中国、前苏联的铌储量,也没有包括近年发现的大型超大型铌矿储量,因此,实际储量将会远远超过美国矿务局发表的数据。目前,巴西是世界上最大的铌资源国,铌储量330万吨,占世界储量的93%,主要集中在阿拉萨(Araxa)矿和卡塔罗(Catalao)矿。矿床类型为碳酸岩风化壳型烧绿石矿床,矿石品位高,阿拉萨矿 Nb_2O_5 含量为2.5—3.5%。加拿大铌储量为14万吨,矿石类型主要为碳酸岩型烧绿石。前苏联铌储量68万吨,但由于部分储量品位低,按世界标准属于次经济资源。我国铌资源主要集中在白云鄂博铁矿,储量巨大,但品位低(Nb_2O_5 仅0.083—0.14%),铌矿物嵌布颗粒细(20 μm),与铁、稀土矿共生,目前尚未找到有效的选矿方法,只能随钢铁流程回收。

2.4 钽

钽的世界储量数字很不一致,美国矿务局(1995)报道为2.2万吨,储量基础3.5万吨,主要分布国家依次为泰国、澳大利亚、尼日利亚、扎伊尔、加拿大等。据俄罗斯学者估计,工

业发达和发展中的资本主义国家钽储量为 11 万吨，产于花岗伟晶岩及其有关砂矿中。以上储量数据均未包括近年各国发现的大型超大型钽矿储量，特别是格陵兰莫茨费尔特矿床钽储量巨大， Ta_2O_5 达 50 万吨，品位高达 0.5%。巴西皮廷加锡矿中钽储量可达 3 万吨，因此，我们估计，包括中国在内的世界钽储量可能在 60 万吨左右。从矿床类型来看，主要为蚀变正长岩型，其次有花岗伟晶岩型及花岗岩型。

2.5 锆

世界锆储量据美国矿务局 (1995) 报道为 3200 万吨 (ZrO_2)，储量基础 6200 万吨。主要集中在澳大利亚、南非、前苏联、中国、美国和印度等国家。美国矿务局公布的我国锆储量 (50 万吨) 数据明显偏低，实际储量远远超过此数。锆矿类型分内生矿床和砂矿两类，锆的工业储量主要集中在滨海砂矿中，锆英石品位一般为 $4-6kg/m^3$ ，少数超过 $10kg/m^3$ 。内生锆矿床均与碱性岩类有关。主要工业矿物为锆英石，其次有斜锆石，此外还有异性石和钠锆石。

澳大利亚锆英石砂矿资源最为丰富，主要分布在东、西海岸，沿海岸带砂矿成群连片分布，规模巨大。东海岸自新南威尔士州的悉尼以北至昆士兰州的克林顿角，延伸达千余公里，矿体靠近海边，以金红石为主，伴生锆英石、独居石、钛铁矿，锆英石储量 322 万吨，重矿物含量平均 0.6—0.7%。西海岸砂矿分布于西澳大利亚州的珀斯至埃尼巴，矿物组成以钛铁矿为主，伴生锆英石、独居石和金红石。重矿物含量比东海岸高，可达 15—17%。已探明锆英石储量 113 万吨，但其质量不及东海岸。此外，在 1987 年，澳大利亚又在维多利亚州发现一个矿石储量达 10 亿吨的砂矿，其中锆英石达 510 万吨，伴生独居石、磷钇矿、钛铁矿和金红石。

南非锆矿主要分布在东部德班市以北理查德贝及南部的理查兹湾。南非规模最大的理查德贝矿床位于印度洋沿岸长达 160 公里的高地砂丘中，矿石储量 7.5 亿吨，其中锆英石含量为 0.4%。理查兹湾锆英石储量 400—500 万吨，品位 0.3—0.7%。上述两矿床的有用矿物均以钛铁矿为主，锆英石和金红石为伴生矿产。

南非除了锆英石砂矿外，在德兰士瓦省的帕博鲁瓦碳酸岩型铜矿中伴生斜锆石 (ZrO_2) 矿床，露采部分斜锆石储量 36.1 万吨，平均品位为 0.15%。

美国锆英石资源较丰富，砂矿主要分布于东海岸，以佛罗里达半岛最为集中。前苏联锆英石矿床主要分布在乌克兰第聂伯河中段，属古滨海砂矿。此外在科拉半岛科夫多尔碳酸岩型铁矿中有伴生的斜锆石矿床。

2.6 稀土

世界稀土资源极为丰富，分布广泛。美国矿务局 1995 年公布世界 REO 储量为 1 亿吨，储量基础 1.1 亿吨。中国是世界上稀土蕴藏量最大的国家，占世界探明储量的 43% 以上，其次为前苏联 (19%)、美国 (13%)、澳大利亚 (5.2%)。

稀土矿床类型繁多，主要有沉积变质—热液改造型 (白云鄂博型)、碱性岩型—碳酸岩型、砂矿型以及风化壳离子吸附型等。我国白云鄂博是世界上最大的稀土矿床，稀土工业矿物为氟碳铈矿、独居石。美国蒙廷帕斯是世界上储量仅次于白云鄂博的碳酸岩型稀土矿床，稀土矿物以氟碳铈矿为主，独居石次之，矿石储量 2500 万吨，含 REO 5—10%，平均 7%。整个地区总储量推测为 1 亿吨以上，含 REO 5%。俄罗斯科拉半岛希比内 (Khibiny) 碱性杂岩体

富含磷灰石。据磷灰石储量估算,可回收的 REO 储量在 500 万吨以上,磷灰石中稀土平均含量为 1% 左右。

碱性花岗岩型矿床为人们所注目是 80 年代后期钇的需求开始上升之后的事。在加拿大怪湖 (Strange Lake) 和美国阿拉斯加的博坎山 (Bokan Mountain) 开始勘查这一类型矿床,怪湖碱性花岗岩含有大量烧绿石和硅铍钇矿。博坎山矿床富含重稀土以及铀、钍,推测矿石量约 4000 万吨,其中 REO 品位 1.0—1.5%。我国 80 年代后期在四川牦牛坪发现与碱性花岗岩类有关的大型优质稀土矿床,稀土工业矿物为氟碳铈矿。

砂矿床在 60 年代中期以前曾是稀土的主要来源,目前仍占有重要地位。澳大利亚、巴西、印度等国家的稀土主要产自独居石砂矿。阿拉斯加砂矿中伴生富 Eu 独居石。

风化壳离子吸附型是我国独特的稀土矿床类型,以重稀土为主,产自我国南岭地区。

其它稀土矿床类型有砾岩型(加拿大安大略省埃利奥特湖)、伟晶岩型、砂卡岩型以及元古宙氧化铁矿床(澳大利亚奥林匹克坝)等。

3. 生产和需求

3.1 锂

世界上目前大量生产锂矿的国家有美国、智利、中国、澳大利亚、津巴布韦和加拿大等。美国是世界最大的锂原料和产品的生产国,也是最大的消费国和出口国。锂矿物生产主要采自花岗伟晶岩,以美国金格斯山、澳大利亚格林布希斯、加拿大坦科和津巴布韦比基塔等矿床为主,前三个矿床生产锂辉石,比基塔矿床生产透锂长石。我国宜春 414 花岗岩矿床则生产锂云母。作为锂化学厂的原料,也从智利、美国内华达州的卤水中获得锂。1994 年世界锂产量为 5800 吨,预计需求将稳步增长,未来锂的年增长率将介于 5—15% 之间。

3.2 铍

1969 年以前,世界上所有的铍几乎都是从伟晶岩型绿柱石矿床中回收的,绿柱石生产国主要有美国、巴西、中国、前苏联等。1969 年美国斯波山羟硅铍石矿山投产后,结束了绿柱石“一统天下”的局面。锂还有一个潜在来源是硅铍石(如加拿大索尔湖矿)。1994 年世界铍产量为 291 吨,以美国产量最大,斯波山铍矿生产铍占世界产量的 50%。同时美国也是世界上最大的铍消费国,占世界消费总量的 2/3 以上。前苏联生产的铍绝大部分在国内消费了。

3.3 铌

在 1988 年至 1992 年之间,世界铌精矿年产量为 19970—23905 吨,平均年产量 21516 吨 (Nb_2O_5)。据美国矿务局 (1995) 报道,1994 年世界铌精矿产量为 18598 吨 (Nb_2O_5)。巴西是世界上最大的铌生产国,约占世界产量的 83%,1988 年至 1992 年平均年产 17924 吨 (Nb_2O_5),主要采自阿拉萨和卡塔罗两个碳酸岩风化壳型烧绿石矿床。加拿大是世界第二大铌原料生产国,1988 年至 1992 年平均年产 3149 吨 (Nb_2O_5),占世界产量的 15%,主要采自尼奥贝克碳酸岩型烧绿石矿床。巴西和加拿大合计占世界铌精矿总产量的 98%,处于绝对垄断地位。此外,巴西铌铁和氧化铌的生产也居世界主导地位。

尼日利亚、扎伊尔、马来西亚、泰国等从各种原料中平均年产 Nb_2O_5 453 吨 (1988—1992), 只占世界产量的 2%。

俄罗斯生产铌主要是利用低铌的原料—铌钽钙钛矿和烧绿石矿石, 矿石含 Nb_2O_5 在 0.25% 左右。

世界铌的消费量 1988 年至 1992 年之间平均为 19457 吨, 与产量基本平衡。美国、欧洲、日本的铌消费量占世界消费总量近 85%, 发展中国家只有 15% 左右。普通铌主要用于钢铁工业, 世界 80—85% 铌为钢铁工业所消费。优质铌用量占铌总消费量的 15—20%。

3.4 钽

世界钽原料生产由两部分组成, 一部分为钽精矿, 另一部分为处理含钽的锡炉渣。从近十多年来看, 两者产量 (见图 1) 比例变化很大, 1990 年以前炼锡炉渣生产钽的产量明显高于矿石中生产钽的产量, 1990 年以后则矿石中钽产量超过了炼锡渣生产的钽。

原生钽精矿生产来源于花岗伟晶岩和花岗岩型矿床。伟晶岩矿床主要包括澳大利亚的格林布希斯、加拿大的坦科等, 利用花岗岩型矿床生产钽的国家有中国、俄罗斯 (贝加尔湖沿岸) 以及法国。用炼锡炉渣生产钽的国家主要在东南亚, 特别是泰国。世界钽产量 1994 年为 320 吨, 日本和美国是世界上最大的钽消费国, 主要用于电容器工业生产。

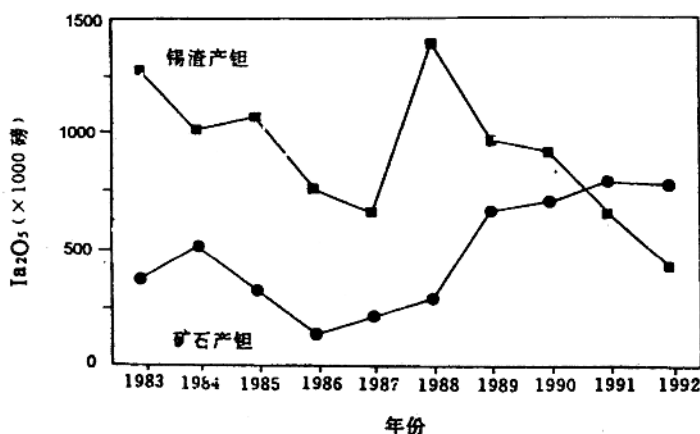


图 1 世界钽的年产量 (1983—1992 年)

3.5 锆

锆的生产和需求的主要形式是锆英石。80 年代前期锆英石产销基本平衡, 到 1985 年以后, 锆英石需求量不断增长, 出现货俏价高局面。近年来锆英石世界年产量在 80 万吨至 90 万吨之间, 预计到本世纪末全球锆英石产量超过 100 万吨。

锆英石主要采自滨海砂矿, 澳大利亚是世界上最大的锆英石生产国和出口国, 1990 年产锆英石精矿 60 万吨。南非 1990 年生产 15 万吨, 美国为 12 万吨, 其它国家 4.5 万吨。南非除了生产锆英石外, 在碳酸岩矿床开采中回收斜锆石, 其年产量为 1.8 万吨 (1988 年)。美国

锆英石年产量虽居世界第三位，但只能满足国内需求量的一半，每年需大量进口。苏联解体后，俄罗斯没有留下一个已开发的锆英石矿床，锆英石生产被乌克兰所垄断，虽然从科夫多尔铁矿中可以回收斜锆石副产品，但其数量远远不能满足那怕是最低的需求，更何况许多应用领域的生产技术是利用锆英石的。因此，俄罗斯目前正在加速开发已知的锆英石砂矿和评价俄罗斯中部、西西伯利亚等地的新矿源。在科拉半岛，异性石拥有巨大储量，现已勘探并在近期着手开采，异性石可以作为满足俄罗斯锆化学品需求的可靠来源。

锆英石的主要消费国是美国、日本和西欧。但在不同国家锆英石的主要应用领域有所不同：日本和法国以应用于耐火材料工业方面为主，美国和德国以应用于铸造业为主，英国和意大利则以在陶瓷方面应用为主。

3.6 稀土

世界稀土 (REO) 年总量达 6.2 万吨 (1994 年)，其中我国 2.2 万吨，美国 2 万吨，前苏联 0.8 万吨，澳大利亚 0.5 万吨，印度 0.25 万吨，其它国家 0.45 万吨。可见，世界稀土生产主要为中国、美国、前苏联和澳大利亚所左右。稀土主要采自氟碳铈矿硬岩矿床和独居石、磷钇矿砂矿床。氟碳铈矿占世界稀土总产量的 72%，产自我国白云鄂博和美国蒙廷帕斯两个矿床。作为稀土原料另一来源的独居石、磷钇矿来自钛砂矿、锡砂矿生产的副产品，生产国家有澳大利亚、印度、马来西亚、泰国、巴西、南非等。我国离子型矿床目前是稀土特别是钇的重要来源，已占世界钇产量的 30% 左右 (世界 Y_2O_3 年产量约千吨左右)。前苏联的稀土原料与其它国家不同，主要是铈铌钙钛矿和稀土磷灰石，此外还有独居石等。

我国自 80 年代以来已成为国际稀土市场上主要供应国和加工国。美国、日本、法国是世界上主要的稀土加工国，尽管日本、法国并不出产稀土。稀土的主要消费国是美国 (1991 年为 2.69 万吨)、中国 (0.76 万吨)、日本 (0.57 万吨)。消费的主要稀土产品为混合稀土化合物。最近几年来，对用于高新技术领域的单一稀土产品需求明显增长，据估计，在这方面需求每年以不低于 15% 的速度增长，需求增长最大的是钇、铈。

二、找矿进展综述

1. 超大型矿床

矿产勘查活动受世界经济形势的影响。近年来由于高新技术产业的迅速发展，产生某些新的应用领域，因而出现对某些矿物原料新的需求。在这方面，稀有金属往往是首当其冲，尽管这些金属材料的用量不可能与贱金属、钢铁相比，但它们却是单价要高得多的原料，从某种意义上来说，它们在本质上属于“高品位”的高获利矿产。

80 年代以来，由于稀有金属需求出现增长势头，世界各国竞相找寻更富的易采掘和易利用的稀有稀土矿，也找到了一批新的好矿、富矿，其中有些是超大型优质矿床。据我们初步统计，国外近十多年来发现和勘查的超大型稀有稀土矿床有 10 个之多 (有关超大型矿床规模界限在第八部分予以说明)。这些超大型矿床包括：澳大利亚布罗克曼 (Brockman) 火山凝灰

岩型铌钽铍矿床；澳大利亚格林布希斯 (Greenbushes) 花岗伟晶岩型铌钽铍锡矿床；澳大利亚韦尔德山 (Mount Weld) 碳酸岩风化壳稀土铌钽磷酸盐矿床；巴西皮廷加 (Pitinga) 与碱性花岗岩有关的冲积残积型铌钽铍锡矿床；巴西塞斯拉古斯 (Seis Lagos) 碳酸岩风化壳型铌矿床；加拿大索尔湖 (Thor Lake) 碱性花岗岩 (正长岩) 型铌钽铍矿床；加拿大怪湖 (Strange Lake) 碱性花岗岩型铍稀土铌矿床；俄罗斯托姆尔 (Tomtop) 碳酸岩风化壳稀土矿床；俄罗斯卡图金 (Катугин) 碱性交代岩型铌钽稀土矿床；格陵兰莫茨费尔特中心 (Motzfeldt Centre) 蚀变正长岩型铌矿床；埃及阿布达巴卜 (Abu Dabbab) 花岗岩型铌矿床等等。有关以上矿床的地质特征，将在下面有关章节分别予以介绍，这里不再多述。

这些超大型矿床的发现，不仅使世界稀有金属资源储量大幅增加，而且还将对目前正在开采的各国矿山带来了竞争上的压力。例如，韦尔德山矿床，稀土矿石储量 1.54 亿吨， RE_2O_3 (包括 Y_2O_3) 平均品位 11.2%，这比世界上已开发的稀土矿山的品位都富。此外该矿还拥有含 Nb_2O_5 0.9% 的矿石 2.73 亿吨，含 Ta_2O_5 0.034% 的矿石 1.45 亿吨。无疑，韦尔德山矿床的开发将使澳大利亚成为世界稀土生产大国。又如加拿大索尔湖矿床，一旦投产，将成为西方世界最大的铍矿山。

2. 新类型矿床

在近年国外发现的稀有稀土矿床中，有不少是十分奇特的新类型矿床 (矿化)，其中有的还形成超大型矿床规模。这无疑对开拓找矿思路或探讨成矿理论都很有意义。下面按矿床 (矿化) 类型分别予以叙述。

2.1 碱性花岗岩中新型铍矿

一般来说，碱性花岗岩中铍的含量较高，可达 0.2—1.0%，铍的赋存形式均为铍英石。但是，近年来在加拿大怪湖和蒙古科布多地区的哈尔赞—布雷格提发现的碱性花岗岩型铍矿床，铍不是呈铍英石形式存在，而是一种含水和钙钠的铍硅酸盐矿物，即斜钠铍石 ($\text{Elpidite Na}_2\text{ZrSi}_4\text{O}_{15} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 和硅钙铍石 ($\text{Gittinsite CaZrSi}_4\text{O}_7$)。它们是含矿岩体中最主要的铍矿物，而铍英石却非常少。经初步勘查，加拿大怪湖含矿岩体矿石储量 3000 万吨，其中含 ZrO_2 3.24%。蒙古哈尔赞—布雷格提岩体含 ZrO_2 相对较低，一般在 1.88—2.31% 之间。由于这类矿床往往都是综合性的，除了铍矿外，常还有稀土、铌、钽等矿化。有关碱性花岗岩型矿床的详细情况将在第四部分中予以详述。

2.2 喷发岩中的新型铍矿

1991 年在哈萨克斯坦中晚泥盆世火山沉积岩中发现一种新型的铍矿化。

在火山沉积岩风化壳内，二氧化铍的含量非常高；矿床的显著特征是矿化呈细浸染状和铍具有非寻常的矿物形式。铍矿化赋存在该区缓倾斜喷发岩层内，岩层剖面由含凝灰质砾岩、砂岩、粉砂岩夹层的岩屑凝灰岩、石英斑岩、霏细斑岩组成。矿化产于致密的硅化夹层内，其中 ZrO_2 含量可高达 5—7%。铍矿石是含有细小铍矿物浸染体的强烈蚀变酸性火山岩。含矿带内石英斑岩、霏细斑岩质的流纹岩和凝灰岩已转变为细分散状的石英—绢云母—水云母集合体。矿石中铍形成两种矿物形式：溶于酸的偏胶体变种—胶铍石和不溶于酸的铍英石。铍矿

物与绢云母、水云母、高岭石、石英、赤铁矿、针铁矿以及方解石紧密共生。锆英石为球粒状或等轴状，大小介于 $0.1-0.5\mu\text{m}$ 微米之间，具有不同的结晶程度，即从结晶差的物质到结晶程度高的微小晶体。胶锆石镜下呈浑圆形的细分散状不均匀集合体，或者呈强蚀变黑云母的包边，粒度一般小于 $1-10\mu\text{m}$ 。与锆英石相比，胶锆石中 P、Fe、Ca、F 和 H_2O 含量较高，而 Si 的含量则较低。

锆矿化伴随有强烈的含水硅—钾交代作用。根据含矿岩石胶结物成分可划分三种依次替换的矿物组合，即矿物组合形成的三个阶段：早期非晶质胶结物阶段、硅化阶段和水云母化阶段。

关于矿化成因问题可作如下设想：根据碎屑和胶结物中广泛发育浅色细粒（有时为胶状）的钾云母、结构不完全的高岭石、假象玉髓和胶锆石，初步认为矿化是在以胶体溶液为主的高温（ $100-180^\circ\text{C}$ ）热液作用条件下形成的。

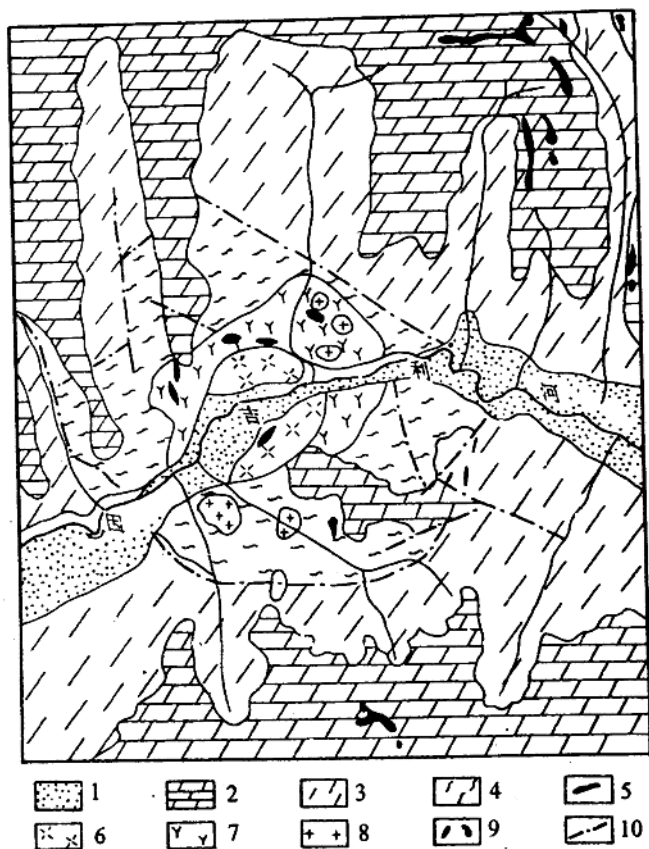
2.3 沉积白云岩中新型锆矿

最近在俄罗斯阿尔丹盆地晚元古代沉积白云岩中发现一种新型的大锆矿。锆矿体赋存于文德系尤多姆组沉积岩层内（图2）。尤多姆组主要由白云岩、含碳酸盐砂岩、砂岩组成，厚度 $200-500\text{m}$ ，近水平产出，其中含矿层有 $2-3$ 个，厚度分别为 $1.5-2.5\text{m}$ 不等，产状亦近于水平。矿区内可划分为 $7-8$ 个含矿地段。各含矿地段的规模为沿岩层走向延伸约数百米，垂直走向达数十至一、二百米，所有矿段呈半环状围绕碱性岩—碳酸岩体分布，与岩体相距 $4-16$ 公里。

锆矿物为斜锆石和锆石，后者多半为胶锆石或水锆石。锆矿物粒度细，从 $10-15\mu\text{m}$ 到 $0.15-0.25\text{mm}$ 不等，浸染于硅化白云岩中。蚀变含矿白云岩中石英不少于 $10-20\%$ ，除了锆矿物外，副成分矿物还有白钨矿、磷钨矿、磷灰石、黄铁矿、假象赤铁矿以及假象赤铁矿化磁铁矿等。含矿白云岩中锆含量变化很大， ZrO_2 平均含量从 3.36% 至 35.4% 不等（表1）。松散砂质矿石是白云岩在地表风化后形成的。 ZrO_2 含量高达 $50-55\%$ ，实际上这是斜锆石和锆石矿砂，仅掺杂着一些细小的白云石和石英亚砂土而言。有些地方，只要在树根下面挖一些浅沟，就能揭露出富矿，其中钨、铀、稀土含量也明显增高（表1）。

从外表上看，含矿白云岩与周围不含矿的白云岩没有什么区别，但根据含矿白云岩密度大和放射性偏高（铀矿物硅铀矿引起）就较容易同无矿白云岩区别开。

关于该矿床的成因和形成条件，巴格达萨罗夫（1994）作了以下叙述。从图2看出，矿区含矿白云岩是以半环状从北、东北和南三个方向包围着因吉利碱性岩—碳酸岩杂岩体，因吉利岩体的年龄比文德系尤多姆组白云岩系的年龄大约老 $60-70$ 百万年，显然正是该杂岩体提供了矿质来源。研究结果表明，在该区碱性岩—碳酸岩中锆的主要载体矿物是钛榴石，该矿物在岩体的某些碱性岩中的含量可达百分之几十，这是相当高的含量，钛榴石中 ZrO_2 含量也不低，可达 $0.25-0.6\%$ 。在表生带该矿物很不稳定，容易分解，其中锆以溶液（很可能是胶体溶液）或悬浮液形式迁移进入滨海沉积盆地内。随后，海浸不断扩大，沉积物厚度增大，含矿层位沉降至深处（ $1-2\text{km}$ ），并经历了固体作用和以后的热液改造（ $250-300^\circ\text{C}$ ），在这种情况下便发生了锆矿物的结晶作用。富矿是含矿白云岩在表生条件下由于碳酸盐矿物（白云石和方解石）淋滤，致使锆矿物强烈富集的结果。



1. 现代松散沉积；2. 文德系尤多姆组沉积白云岩；3. 晚元古宙砂质页岩及碳酸岩盐；4. 太古宙和早元古宙结晶岩；5. 白云岩中的含矿段岩体侵入岩；6. 霞石—辉石—石榴石岩；7. 方柱石—长石岩；8. 正长岩；9. 方解石质碳酸岩；10. 断层

图2 因吉利沉积白云岩中锆矿床地质示意图

从上述看出，这类矿床的地质特征和形成条件甚为特殊，是一种新型富矿，很值得我们重视，今后在有碱性杂岩体伴生的碳酸盐沉积岩广泛发育地区，应注意寻找这种具有混合成因（沉积—热液改造）特点的层状锆矿床。

表 1

含矿白云岩的化学成分 (%)

成 分	(1)	(2)	(3)	成 分	(1)	(2)	(3)
SiO ₂	57.23	49.51	37.52	P ₂ O ₅	0.28	0.50	1.95
TiO ₂	0.13	0.10	0.14	H ₂ O ⁺	0.89	0.60	0.96
Al ₂ O ₃	1.31	1.57	1.70	H ₂ O ⁻	1.74	1.76	3.03
Fe ₂ O ₃	1.84	1.77	5.05	Nb ₂ O ₅	0.025	0.105	未测
FeO	未测	0.07	—	ZrO ₂	3.36	12.22	35.4
MnO	0.05	0.06	0.04	RE ₂ O ₃	0.03	0.05	0.15
MgO	6.12	5.52	2.59	F	未测	未测	1.28
CaO	12.55	12.99	7.06	CO ₂	14.13	12.44	3.42
SrO	未测	0.005	未测	WO ₃	未测	痕	0.51
Na ₂ O	0.09	0.094	0.06	U ₃ O ₈	未测	未测	0.21
K ₂ O	0.26	0.22	0.11	总 量	100.04	100.49	100.64

注: (1) - 阿尔加姆两个异常带含矿岩石平均成分; (2) - 一个异常带内详细地段含矿岩石平均成分; (3) - 含矿白云岩冲积一坡积物中富矿石。

2.4 富含稀土铈钽的铝土矿矿床

多年来, 国内外不少学者对铝土矿中稀有元素矿化问题作过大量研究。目前, 在铝土矿中具有一定工业意义的成矿元素主要是钒和铈, 而其它稀有元素含量通常较低。在铝土矿中 V 的含量一般为 0.02—0.08%, Sc 为 0.002—0.005%, 它们主要是赋存于磁铁矿、钛铁矿、锐钛矿中置换 Fe 与 Ti, 或在勃姆石、三水铝石、赤铁矿、针铁矿中置换 Al 与 Fe, 一般可从铝土矿生产的尾矿中提取 V 与 Sc。

近年来在俄罗斯西伯利亚地台西南部恰多贝茨 (Chadobets) 隆起区发现两个高度富集稀土铈钽的铝土矿矿床, 即中央矿床 (Central) 和楚科图康矿床 (Chuktukon)。两矿床分别位于隆起中部两个穹隆的顶部。沉积铝土矿时代为白垩纪—老第三纪, 产于多种风化岩石顶面的侵蚀凹陷内, 这些风化岩石包括元古代石英—云母—长石板岩和砂岩以及三叠纪碱性超镁铁质岩 (苦橄岩、辉岩、金伯利岩和碳酸岩)。矿区的红土剖面在板岩上面厚度达 600m, 碳酸岩上面有 300m, 金伯利岩上面为厚 80m。最终风化产物是铝土矿、Al—Ti—Fe 红土和富含稀土铈钽以及钽磷铈的赭土。赭土中含 RE₂O₃ 高达 51% (其中包括 1% Y₂O₃)、含 Nb₂O₅ 可达 5%、TiO₂ 32%、ThO₂ 0.1—0.4%。

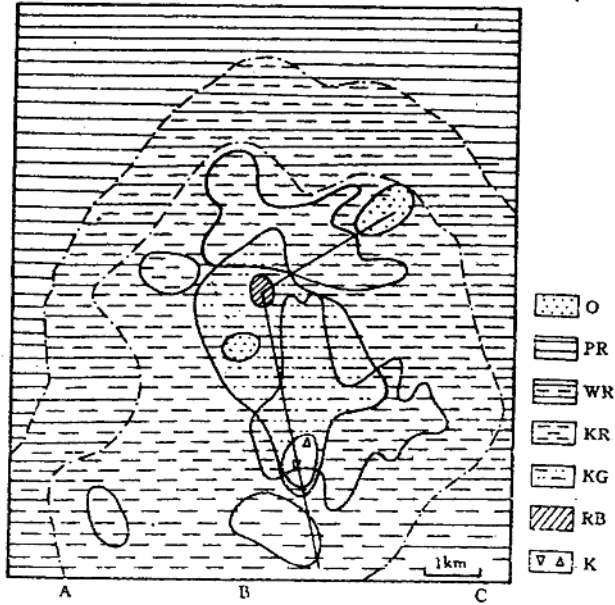
红土含三水铝石、针铁矿、赤铁矿、锐钛矿、Mn 氢氧化物、表生独居石、水磷铈石、磷铝铈矿、烧绿石、方铈石、细晶磷灰石等。

铝土矿呈层状、透镜状产出, 厚度 20m, 大多数铝土矿为红色、局部呈黑色。矿石类型为三水铝石型, 所有铝土矿均含有碎屑, 碎屑矿物有假象磁赤铁矿、锐钛矿、针铁矿、橄榄石、辉石、次生烧绿石、独居石、水磷铈石以及石英、高岭石、金红石等。

中央矿床铝土矿中平均含 TiO₂ 9.5%、RE₂O₃ 1.13—2.72%、Nb₂O₅ 0.26%、ThO₂ 0.31%, 此外还有 Ba、P、Sr 等。楚科图康铝土矿含 Nb₂O₅ 0.37—0.7%, RE₂O₃ 1.43—4.03%。

综上所述, 可以指出中央矿床和楚科图康矿床是目前世界上极为罕见的两个铝土矿矿床,

其独特之处在于成矿物质来源具有异常多样性。其物源是由红土化的碎屑和碱性超镁铁质岩、金伯利岩、碳酸岩进入堆积区，在铝土矿形成过程中，上述各类岩石都提供了自身的矿物和化学元素。红土化板岩和粉砂岩是铝的来源，红土化碱性超镁铁质岩（包括金伯利岩）提供了大量的Fe以及部分的Nb、P、Be、Sr、REE，红土化碳酸岩也是铝土矿中Fe、Mn、REE以及Th、P、Ba的来源。



O—粘土；PR—原生岩（板岩和碱性超镁铁质岩）；WR—风化岩石；KR—高岭土化岩石；KG—含高岭石—三水铝矿岩石；RB—残余铝土矿；K—金伯利岩

图3 中央铝土矿矿床地质略图

2.5 富含铈和稀土的煤层

多年来很多学者对含铈的煤和含铀的煤分别作过大量研究，而且这些煤矿在不少国家已作为工业提取铈和铀的原料。另外，在国外一些煤矿中发现铈的含量亦很高，部分已具有独立意义。经测定，在煤灰分中铈含量可高达0.5至1%以上。

近年来，在俄罗斯一些地区煤矿层中发现新型的稀土和铈的矿化。在滨海地区一个新生代凹陷内，含煤层中存在特殊的稀土矿化，富含稀土的煤层见于锡霍特山脉轴部4×15公里地堑内。地堑形成于始新世，是在粗面玄武岩—粗面流纹岩及随后的安山玄武岩的火山活动背景上发生的。含矿地堑的突出特征是新生代沉积物构造破坏强烈。

富含稀土的褐煤层出露面积约10km²，它们都是产生在经过热液蚀变的沉积岩和火山岩中，热液蚀变以石英沸石交代作用为主。由此可见，煤层中稀土矿化与火山活动、热液活动有关。

在煤层剖面中，稀土分布不均匀，在接触带明显富含稀土。煤层中稀土含量为0.03—