

点石成金的传奇 ——稀土元素的应用

DIANSHI CHENGJIN DE CHUANQI
——XITU YUANSU DE YINGYONG

邓玉良 编著



河北科学技术出版社

点石成金的传奇 ——稀土元素的应用

DIANSHI CHENGJIN DE CHUANQI
——XITU YUANSU DE YINGYONG

邓玉良 编著

河北科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

点石成金的传奇：稀土元素的应用 / 邓玉良编著
石家庄：河北科学技术出版社，2015. 7
ISBN 978 - 7 - 5375 - 7847 - 9

I . ①点… II . ①邓… III . ①稀土族 - 研究 IV .
①O614. 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 158673 号

点石成金的传奇——稀土元素的应用

邓玉良 编著

出版发行	河北科学技术出版社
地 址	石家庄市友谊北大街 330 号（邮编：050061）
印 刷	石家庄燕赵创新印刷有限公司
开 本	787 × 1092 1/16
印 张	11. 75
字 数	280 000
版 次	2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷
定 价	28.00 元

前 言

稀土元素是包括钪、钇和全部镧系共十七种元素的总称，其原子核外特殊的电子构型使其具有优异的电、磁、光、热等特性，能与其他元素组成种类繁多、功能各异、用途广泛的新型材料，被誉为“万能之土”“工业维生素”“新材料之母”，世界上新的专利和新的发明中，每4~5个就有一个和稀土有关。西方发达国家早已将其列为重要的战略元素，不仅在稀土新材料研发上投入大量人力、物力和经费，积极利用专利战略保持领先的技术优势，还将从中国进口的一部分稀土原材料或初级产品作为战略储备，以备将来之需。

一个多世纪以来，稀土相继在冶金、机械、石油化工、电力、电子、能源、国防、交通、通讯、建材、家电以及医疗、环境保护、农业等领域得到应用，用于生产发火合金、刀具、特种钢、球墨铸铁、优质镁铝合金、石油裂解催化剂、电视机和计算机显示器用荧光粉、光学玻璃及玻璃抛光粉、陶瓷色料和各种添加剂等。从20世纪60年代起，稀土开始在发光材料、稀土金属氢化物电池材料、电光源材料、永磁材料、储氢材料、催化材料、精密陶瓷材料、激光材料、超导材料、磁致伸缩材料、磁致冷材料、磁光存储材料、光导纤维材料和庞磁电阻材料等领域获得应用，在新能源汽车、风力发电、新型显示与照明、机器人、电子信息、航空航天、国防军工、节能环保及高端装备制造等战略性新兴产业中发挥着不可或缺的核心基础材料的作用，成为名副其实的工业味精和新材料之母。

我国拥有世界上最大的稀土资源储量，也是世界上最大的稀土生产国、出口国和消费国。从20世纪末开始，我国稀土开始占据国际市场主导地位，最多时占有90%以上的世界市场份额。但由于种种原因，我们宝贵的稀土资源并没有得到足够的重视，在国际市场上被大量贱卖。有鉴于此，许多有识之士多方奔走，呼吁加强稀土的管控，甚至喊出了打响“稀土保卫战”的口号。近年来我国为了保护稀土资源实施出口配额限制，又引发了国际贸易争端。稀土是近几年来让人非常纠结的一个话题。

本书作为一本科普作品，是在参阅大量文献资料的基础上，力图将稀土有关的发现、新材料研发、应用及未来前景展现给读者。全书共分为26个专题进行叙述，采用我国古典小说常用的章回体结构，题目大致说明了该专题的主要内容，且每个专题相对独立。在每个专题开始之前，通过讲述一些简单的知识或故事作为铺垫，在文中尽量做到深入浅出，避免生僻的概念和高深的理论描述。以方便读者阅读。

稀土应用涵盖的知识面颇为广泛，涉及的领域又很多，文献资料非常丰富，由于作者水平有限，在编写过程中难免有不妥和疏漏之处，恳请读者不吝批评指正。

邓玉良

2015年夏于廊坊

目 录

引子 启争端甚嚣尘上 谋入世委曲求全	(1)
第一章 孪生兄弟着假面 多管齐下现真容	(8)
第二章 初出茅庐铍先行 汽灯火石送光明	(14)
第三章 崭露头角镧出列 玻璃制造离不得	(20)
第四章 新型陶瓷烧结难 稀土色料发光艳	(27)
第五章 遨游天际享殊荣 镁基轻材变金刚	(33)
第六章 稀土铝材强度高 线缆代铜优势明	(40)
第七章 钢铁味精名非虚 稀土点睛实相符	(46)
第八章 锋芒再露激光器 立万扬名美容机	(51)
第九章 红极一时钐钴系 青眼有加钕铁硼	(57)
第十章 稀土不稀分布散 中国资源储量高	(67)
第十一章 稀土兄弟分离难 串级萃取奇功全	(72)
第十二章 荧光粉闪亮登场 白炽灯穷途末路	(80)
第十三章 稀土催化效率高 石油裂化应用广	(87)
第十四章 光纤通信距离长 信号无损保真高	(94)
第十五章 能屈能伸品位高 磁热效应用处长	(103)
第十六章 收放自如随我心 储氢材料已上场	(114)
第十七章 一路畅通无电阻 高温超导有稀土	(120)
第十八章 四代发电技术好 燃料电池耗钕多	(129)
第十九章 稀土激活储能多 夜光蓄能余辉长	(135)
第二十章 庞磁电阻容量大 磁光存储寿命长	(140)
第二十一章 三基色久缺蓝调 二极管终发白光	(145)
第二十二章 国防事业常点卯 高端武器作尖兵	(150)
第二十三章 铁矿堪比黄金贵 稀土何似白菜贱	(160)
第二十四章 资源面前争夺急 专利背后博弈忙	(168)
尾声 新品辈出不落幕 唯愿时时露峥嵘	(174)
参考文献	(178)

引子 启争端甚嚣尘上 谋人世委曲求全

2012年3月13日，美国总统奥巴马宣布，美国已联合欧盟、日本向世界贸易组织（WTO）提起一项针对中国限制稀土出口的贸易诉讼，声称中国对稀土、钨、钼的出口限制措施违反了WTO规则。起诉方要求中国解除出口限制，否则将进行贸易制裁。美方声明，中国是世界上此类关键原材料的主要出口国，中国的出口限制政策提高了中国以外地区的原材料价格，降低了中国国内价格，导致下游生产商面临巨大压力，被迫将业务、工作岗位和技术转移到中国。

大家都知道，钨是一种稀有金属，白炽灯泡中就有钨丝。钨的熔点高达 3400°C ，居所有金属之首，更为重要的是钢中加入钨后硬度会得到极大提高，有“工业牙齿”的美誉。世界上生产的钨，有一半用于优质钢的冶炼，三分之一用来生产硬质钢，十分之一用来制钨丝，剩下约百分之五作他用。

钨是当代高科技新材料的重要组成部分，在电子光学材料、特殊合金、新型功能材料及有机金属化合物方面均有应用。钨用来制造枪械、火箭推进器的喷嘴、切削金属的刀片、钻头、超硬模具、拉丝模等，用途涉及工业的各个领域。2013年全球钨产量仅7.1万吨，其用量虽说不大，但至关重要，不可或缺，被各国列为一种战略金属。

由于钨在地壳中的含量极低，只有 160.6×10^{-6} ，在花岗岩中含量平均为 1.5×10^{-6} ，这种特点导致其提取难度非常大。据美国地质调查局数据，2003年全世界钨的自然储量620万吨，可开采储量290万吨。我国是钨资源最丰富的国家，资源储量420万吨，占世界钨资源的68%，可开采储量为180万吨。2013年我国钨产量达6万吨，占全球总产量84.5%，产量及出口量均居世界第一。

钨矿资源是我国的国宝，早在20世纪40年代，我国抗日战争初期，德国为获得我国的钨矿，不愿支持与其结盟的日本侵华，而是竭力在中日之间进行调停。后来由于德国从土耳其进口钼矿的渠道被切断，从中国进口钨矿的渠道也被切断，使其军事工业受到严重影响，以至于无力支撑大规模的装甲作战。据说战争狂魔希特勒为此曾哀叹：“要是再给我一万吨钨砂，就可以征服俄罗斯。”因为武器装备中枪、炮的发射管及穿甲弹的弹丸中都要用到钨的合金，军事上没有钨就没有办法进行战争，工业上没有钨则会导致金属加工能力的瘫痪。

一般人对钼比较陌生，其实钼也是一种战略金属，其应用始于20世纪初。人们发现含钼的炮钢具有耐高温烧蚀的特殊性能，将其用来制造武器装备。钼和钨的性质十分相似，具有高温强度好、硬度高、密度大、抗腐蚀能力强、热膨胀系数小、良好的导电和导热等重要特性，广泛用于钢铁、石油化工、航空和宇航、运输、电子和农业等各个部门。

钼是各种耐热和防腐结构钢的重要成分，也是镍和铬合金的重要添加剂，在钢铁工业领域的消费约占总其消费量的一半，主要用作添加剂，以提高钢铁的强度、弹性、韧性、

耐磨性和抗腐蚀性能。钼和钨、铬、钒的合金用于制造现代高精尖装备，作为军舰、火箭、卫星的合金构件和零部件，如火炮内膛、火箭喷口等。纯钼丝用于高温电炉和电火花加工及线切割加工，钼片可用来制造无线电器材和 X 射线器材，氧化钼和钼酸盐是化学和石油工业中的优良催化剂，二硫化钼用于航天和机械工业部门，是一种重要的润滑剂。此外，钼还是植物生长和发育中所需七种微量营养元素中的一种，没有它，植物无法生存。

20 世纪末，科学家发现单层的辉钼（即 MoS_2 ）材料具有良好的半导体特性，有些性能甚至超过现在广泛使用的硅和热门研究的石墨烯，很有希望成为下一代半导体材料，在制造超小型晶体管、发光二极管和太阳能电池方面前景广阔。同硅和石墨烯相比，辉钼的优势之一是体积更小，可以被加工到只有 3 个原子厚。辉钼单分子层是二维的，而硅是一种三维材料。在一张 0.65nm 厚的辉钼薄膜上，电子运动和在 2nm 厚的硅薄膜上一样容易。科学家已用辉钼制造出辉钼基柔性微处理芯片，这个微芯片的大小只有同等硅基芯片的 20%。用辉钼制成的晶体管在待机情况下功耗仅为硅晶体管的十万分之一，且比同等尺寸的石墨烯电路更廉价，所以辉钼是未来取代硅基芯片的有力竞争者。

钼也是一种稀有金属，钼的地壳丰度为 1.5×10^{-6} ，在岩浆岩中以花岗岩类含钼最高，为 2×10^{-6} ，具有工业价值的主要钼矿物为辉钼矿（ MoS_2 ），其开采量占钼开采总量的 90% 以上。根据美国地质调查局 2014 年发布的数据，全球钼资源储量约 1100 万吨，我国 430 万吨，美国 270 万吨，智利 230 万吨，三国钼资源储量约占全球总储量的 85%。2013 年全球钼产量为 27 万吨，我国 11 万吨，约占全球总产量的 41%，美国 6.1 万吨，居次席，智利 3.65 万吨和秘鲁 1.69 万吨，分列三、四位。

从上面所谈到的情况来看，美、欧、日对我国限制钨、钼的出口提起诉讼也就在情理之中。因为我国的钨、钼矿产资源储量最多、产量最大，我国限制出口对整个国际市场的影响肯定非常大。

莫非稀土也是这种情况？稀土是一种什么样的资源呢？有重大应用价值吗？

的确如此，稀土不仅是一种稀有资源，而且还是各国政府确定的战略金属。我国不仅拥有全球最大的稀土资源储量，还是近十多年来世界上最大的稀土生产国和出口国。我国的稀土产量占全球总产量的 90% 以上，产量居于垄断地位，但价格却是由西方发达国家商定，因为我们没有稀土的定价主导权。在 2010 年以前的十多年里，国际市场稀土供大于求，稀土价格一路走低，出现了“金子卖成白菜价”的局面，造成我国稀土资源储量急剧减少。稀土的开采、加工是典型的高污染、高能耗产业，已经对我国的环境造成了的严重污染。稀土属于不可再生资源，我国又是稀土消费大国，按现有生产速度，我国的中、重类稀土储备只够维持 15 ~ 20 年，将来要用也得进口。面对这样的形势，在有识之士的多次呼吁下，我国政府从 2005 年开始制定限制稀土出口的政策，实行稀土出口配额许可制度，希望借此来保护我国日渐减少的珍贵资源，减少环境污染，保护我们赖以生存的家园。

西方发达国家与我国在稀土方面的矛盾由来已久，他们当然不满意我们减少稀土出口。自从我国开始限制稀土出口后，美国、欧盟和日本的抗议就没消停过，只是矛盾并未激化。但这一矛盾却从 2010 年下半年起骤然升温。

要知道，日本是世界上最大的稀土进口国，其进口几乎全部来自中国。2010 年 9 月

上旬恰逢中日“钓鱼岛撞船事件”，就曾闹出“中国停止向日本出口稀土”风波，许多西方媒体借此纷纷炒作“中国试图以控制稀土出口来实现政治目的”。

近年来我国加大了稀土的出口限制力度，他们的叫嚣和施压行为愈演愈烈，“中国对西方发动稀土战”的论调甚嚣尘上。稀土，并非我国独有，而是一种分布在多个国家的资源，却被他们描绘成中国要挟他国的“独门武器”，或悬于他国头上的“达摩克利斯之剑”。事实上，出于保护环境和可持续发展的目的，我国加强对稀土开采和出口管理，符合世贸组织规则中关于保护可用尽自然资源的例外条款。以美国为首的西方国家却扬言要对此采取报复性措施，将此事告上世贸组织，企图压迫中国就范，使稀土问题的争端骤然升级，一场“稀土大战”似乎迫在眉睫。

一般来说，西方对我国提起贸易诉讼通常都是“限制中国出口”，近年来美国对中国输美钢制车轮、晶体硅光伏电池及组件、二苯乙烯类增白剂、镀锌钢丝等多次进行反倾销调查和裁决，不断加剧贸易摩擦。但稀土争端不同，目的是“要求中国出口”。多年来大量廉价出口的稀土，如今成了美、欧、日联合向中国“发难”的对象。

除石油外，世界上还从来没有一种资源像稀土这样引人关注。“中东有石油，中国有稀土”的名言曾让拥有丰富稀土资源的国人颇为自豪。20世纪80年代以来，在以产油量较大的国家组成的石油输出国组织即欧佩克的主导下，石油价格节节攀升，拥有大量石油资源的中东产油大国个个赚得盆满钵满。而稀土供应占全球90%以上的中国，却一直以“猪肉”甚至“白菜”价格，向美、日、欧等大量廉价出口稀土资源，我国亏了资源，污了环境，却未得好报。他们还希望这种情况继续下去。据美国的《稀土元素——全球供应链》报告显示：2009年，中国稀土储量3600万吨，占全球储量的36%，产量近12万吨，占世界产量的97%；美国稀土储量1300万吨，占世界储量的13%，产量很低，所需稀土主要从中国进口。日本没有稀土资源，却是最大的稀土消费国，占世界稀土应用总量近30%，其中83%来自中国。

尽管稀土在全球的用量不大，远不像铁、铜、铝、石油这些动辄上亿吨的大宗资源。但稀土元素具有优异的光、电、磁、超导、催化等特性，能与其他材料组成性能各异、品种繁多的新型材料，有“工业味精”“新材料之母”之美誉。虽然用量很少，但在许多高科技产品和尖端武器制造中不可或缺，是一种稍用一点就能发挥巨大作用的战略元素，具有极高的经济附加值和战略利益。据说每1亿元的稀土原料用于高科技产品，可创造出200亿元的效益。

稀土元素被用来制备各种功能材料，广泛用于冶金、机械、石油、化工、轻工、农业、电子、信息、能源、环保、国防、军工和高新材料等13个领域的40多个行业，是当今世界各国改造传统产业、发展高新技术和国防尖端技术不可缺少的战略物资。

稀土金属从70年代初开始作为一种新型功能材料受到广泛关注，80年代起进入工业化应用开发，其研发速度之快在金属材料中首屈一指。随着世界各国加大对稀土研究的投入，稀土为人类奉献的新材料会更多。有人甚至预言“稀土是21世纪的材料”。

原来如此!!!

让我们来看看稀土争端的经过和结局。

2012年3月13日，美国联合欧盟和日本针对中国限制稀土、钨、钼出口向世界贸易

组织（WTO）提出贸易诉讼，认为中国对稀土、钨、钨三种原材料实施的加收出口税、限制出口数量、设定最低出口价格不合世贸规定。三方将就解除限制与中国展开磋商，如果问题得不到解决，将要求 WTO 成立专家组加以解决。

2012 年 3 月 13 日，作为回应，我国商务部条约法律司负责人表示，中方的政策是为了保护资源和环境，实现可持续发展，无意通过扭曲贸易的方式保护国内产业，表明了中国在这个问题上的正当立场。

2012 年 4 月 25 日和 26 日，美、欧、日与中国进行协商，无果。

2012 年 5 月，日本联合美国和欧盟，向 WTO 争端解决委员会提出专家组仲裁申请。

2012 年 6 月，WTO 设立争端解决专家小组。

2012 年 6 月 27 日，基于商议结果，美、欧、日希望 WTO 争端解决委员会仲裁“中国违规限制出口”。

2014 年 3 月 26 日，世界贸易组织公布专家组报告，裁定中方涉案产品的出口管理措施违规，要求中国取消对稀土的出口限制。这被认为是发达经济体对中国取得的一项重大胜利。中国败诉的消息传出后，日、美、欧随即指出，中国的做法显然违反世贸组织规则。

但专家组同时确认了资源主权原则，认可中国以可持续发展方式行使自然资源主权的权利，赞同中国实施了资源综合保护政策，并对中国在资源保护方面所做的努力予以肯定。WTO 网站显示，虽然专家组支持中国保护国内可用竭资源的权利，但中国对稀土出口施行的出口税、管制措施违反了 WTO 规定，并且不能被证明是保护资源的必要手段，即保护资源的手段不合规则。

中国方面辩护说，中国削减出口配额是为了保护环境，因为稀土矿开采和提炼对环境损害很大，中国的做法并不违反世贸组织规则。中方认为，世贸组织既强调贸易自由，也尊重自然资源主权，并允许成员采取必要手段实现资源保护目标。中方将认真评估世贸组织裁决，以符合世贸组织规则的方式加强对资源类产品的管理，促进资源保护，维护公平竞争，实现可持续发展。

按照 WTO 程序，中国可以在 60 日之内考虑是否提起上诉。若中国上诉，WTO 上诉机构将在三四个月之后作出终裁。

2014 年 4 月 17 日，中国方面就世界贸易组织认定中方稀土出口管理措施违规的裁决向该组织提出上诉，并表示中国保护资源、环境的政策目标不会改变。

2014 年 8 月 7 日，世界贸易组织公布了稀土案上诉机构报告。上诉机构维持了此前 WTO 专家关于中方涉案产品的出口关税、出口配额措施不符合有关 WTO 规则和中方加入世贸组织承诺的裁决。按照惯例，世贸组织上诉机构报告与专家组报告将在世贸组织争端解决机构通过后，成为生效裁决。

这项关于稀土的裁决所产生的影响及造成的后果来看，这次败诉可以说是我国加入世贸组织 10 多年来所遭受的最大挫败。

但这是一次预料之中的败诉，也是发达经济体对中国这个新兴经济体的又一次蓄意贸易压迫行为。早在 2009 年夏，当时欧盟、美国与墨西哥先后将中国的原材料出口限制政策告上世界贸易组织，三方所列举的原材料涉及铝土、焦炭、萤石、镁、锰、硅铁、硅碳、黄磷和锌 9 种。2012 年初，WTO 争端解决机构判定，中国限制原材料出口不符合中

方加入 WTO 时的承诺和 WTO 有关规则。业内人士普遍认为，针对上述 9 种产品的诉讼不过是投石问路，发达经济体的真正目标其实意在中国稀土。

为什么我们会输呢？

2012 年 3 月 20 日《法制晚报》刊登了社科院财经战略研究院汤婧的分析文章。文章认为，本次申诉焦点主要集中在两方面：第一，中国稀土材料出口限制的法律是否符合 WTO 规定 GATT（即关贸总协定）第 20 条（g）项，即 GATT 不得妨碍成员方实施“与保护可用竭的自然资源有关的措施，且与限制国内生产或消费措施同时实施”；第二，中国出口关税是否符合例外情形。分析认为，由于中国在国内稀土开采和消费方面，尚未采取相应的限制措施，这可能成为中国在该场诉讼中的软肋。在之后的抗辩中，应向 WTO 提交“证明采取了相应的国内限制生产或消费措施”的证据。在出口税方面，如果需要 WTO 认可“特殊例外”，中国必须满足程序性要件，如“与受影响的成员事先磋商”。显然中国并未履行这些程序。文章总结道：“在缺乏合作、沟通的前提下，独自提高关税的办法无疑在现行 WTO 框架下是不具有正当性的。”

这场败诉也不突然。有关这场稀土争端的结局早有预言，还多次被重复，甚至内容基本一样的官司，在 2009 年我们就已经输过一回。那次裁决的结果，我们被迫开放铝土、焦炭等 9 种工业原料的出口。而这次，不知道我们利用上诉期争取的时间组建的五大稀土集团，是否可以亡羊补牢。

事实上，我国采取的出口限制措施并未影响到国际市场使用稀土的需求。有统计显示，2011 年我国稀土出口配额只用了 52.01%，2012 年仅为 48.75%，而 2013 年稀土出口配额总量 2.4 万吨，全年实际出口稀土配额产品实物量仅为 2.29 万吨，并未完成配额。有专家指出，西方国家起诉中国不是因为买不到稀土，而是嫌贵了，他们希望低价获取资源。我国出口的稀土曾经便宜到每千克仅 18 元人民币，而国际市场价格竟高达每千克 1000 美元。在我国实行配额制后，我国稀土的出口量减少了，稀土价格上升了，这些当然不合原来买家的胃口。一些西方国家只考虑自己方便地使用稀土，不仅要求数量充裕，还要价格便宜，于是利用他们有更多话语权的平台，无视中国资源枯竭、环境被破坏的现状，要求中国不断地满足他们的需要。

美国是稀土应用大国，用于高新技术领域的稀土占其总用量的 77%。出于保护环境及对本国战略资源的考虑，对稀土只探不采，所需稀土资源 91% 来自我国。美国国防部宣布的未来最重要的与国防材料相关联的元素有 35 种，其中有 15 种是稀土元素。

法国通过海外建厂，特别是通过在我国办合资企业获取他们需要的稀土原料，能够生产所有稀土产品，其产量占我国总产量约 20%。

日本超过 90% 的稀土用于高新技术领域，是实现稀土附加值最高的国家。20 世纪 80 年代，日本出台了稀有矿产战略储备制度，储备对象为镍、铬、钨、钴、钼、钒、锰等 7 种稀有金属，后又把铂、钨及稀土类三种资源纳入储备对象，这些都是日本最顶尖的汽车、电子、信息等产业急需的物资。由于境内外资企业在我国购买稀土原料、初级产品不受出口配额限制，日本等国近年来在我国稀土资源区大规模投资设厂，实质是变相获取我国稀土资源。在过去的 20 多年里，日本只将从我国进口稀土总量的 1/3 用于生产，其余的 2/3 用钢板焊封沉入海底作为战略储备，所囤积的稀土足够其国内使用三十年。不仅如

此，他们还掌握了稀土的国际定价权。

WTO 对某些出口管制极为严密的国家视而不见，比如以美国为首的西方发达国家在对华高科技产品、高新技术方面采取了异常严格的限售禁售措施，澳大利亚等国的矿石垄断借中国需求大肆涨价，却为何对中国保护环境、不针对任何国家而出台的管制措施判了违规。此项裁决相当于强迫中国放弃出口限制手段，转而选择成本较高、效率较低的其他方式保护本国的资源和环境。

与其他国家惜采惜售不同，中国一直廉价向世界供应着大量稀土。20 世纪 70 年代之前，我国稀土占全球总储量的比例接近 90%，到了 1996 年，这一比例下降到 43%，2009 年进一步下降到 36%。加上长期的无序开采和滥采乱挖，使得开采地山林变沙地，农田荒芜，水体污染，矿渣堆积成山，生态环境遭到严重破坏。近年来，我国政府开始加强管理，才出台了出口配额这个不得已的政策。

对矿物资源控制权的争夺，在历史上就一直没有停止过。历史上爆发过的两次世界大战和大大小小的局部战争，又有多少与资源争夺没有关系。只是第二次世界大战产生的后果太过沉重，通过野蛮战争来争夺资源往往得不偿失，争夺资源的方式才转化为采用高科技和专利垄断的“文明”形式。

但是，在这个由发达国家主导的市场经济体系中，在进行商品交换时，由于他们对生产技术的垄断，在欠发达国家和发展中国家与发达国家之间存在严重的不平等。缺少技术或没有专利的国家要生产一种必需商品时，必然会被拥有技术和专利的对手攫取超额利润。发达国家由于长期的发展和科技的积淀，几乎掌握着全部先进的技术和专利，掌握着商品与矿物资源的定价权。他们还通过国家政策支持，建立了完善的服务系统，实现了矿业企业的跨国经营，以跨国公司作为载体实施全球资源战略，控制了世界上大部分的优质资源，获得了稳定、安全和廉价的矿产资源供应。在这样的基础上，他们在基础研究、新技术、新材料和新专利方面自然就能始终保持领先，欠发达国家和发展中国家只能永远跟在他们后面，不断为他们提供矿产资源和初级产品。为预防不测，发达国家还都建立了战略资源储备制度，禁止、限制开采本国资源，确保万一需要时仍有储备供应或重启自有资源。

多么精明啊！所谓棋高一着，步步领先。

那为什么专家组和上诉机构没有认可我们提出的 WTO 规则中关于保护可用尽自然资源的例外条款呢？

我们知道，从 1986 年我国提出恢复关贸总协定缔约国地位，到后来申请加入世界贸易组织，经过了 15 年漫长、曲折、艰苦的谈判和其他方面更多的努力，才在 2001 年正式加入世贸组织。我国入世的首席谈判代表龙永图曾概括这 15 年的谈判无非是为了 8 个字，一是“市场经济”，二是“开放市场”。为了入世，时任总理的朱镕基曾说过，中国准备为加入 WTO 作出最大的让步。因为对中国的改革开放及经济社会发展来说，入世产生的效果是利远远大于弊，当然只有委曲求全，不得不接受一些不平等的条款。

加入 WTO，自然要接受 WTO 各种规则的约束。按照入世承诺，我国可以对 84 个税号的产品征收出口关税，而稀土、钨相关产品并不在这 84 个税号之中，钨产品只有一个税号包含在内。估计当时为保留这 84 个税号征税权，我国政府一定经过反复的权衡和争

取。所以按理说不能征收稀土出口税。GATT 第 20 条中有涉及可用尽自然资源例外条款，即如果某国的资源面临枯竭则可用设置出口配额方式予以保护，因而控制开采量，延长可使用年限，但同时要减少国内消费量。也就是说要限制稀土出口，也必须同时要限制国内生产，但我们却没有对国内的稀土生产商使用稀土实施什么限制。这也是在稀土争端中，我国一直试图援引这一条款进行申诉，但未获得专家组和上诉机构认可和支持的根本原因。

因为例外条款的使用门槛极为严格。因为自由贸易是 WTO 的宗旨，当然会把这些例外限制的非常严格。否则的话，例外就会被扩大，变成对自由贸易的阻碍。

有专家指出，由于稀土出口配额的限制和减少，推动了国际市场稀土价格飞涨，部分稀土价格两年内的涨幅高达 500%，引发欧美国家不满。但国内稀土产能并未下降，造成内外差价悬殊，这样的结果造成出口配额价格大涨。按照国家有关规定，出口许可证的转让和买卖属于非法，是禁止的。可事实上，这个市场不但一直存在，最近几年还变得更加抢手。有报道称，2011 年一吨稀土的出口许可证的市面价，已从前几年的几千元涨到了 40~50 万元，出口许可证的身价超过稀土矿产本身！这又岂非咄咄怪事！

由此还产生了另外一个后果，就是极大地刺激了稀土走私。有权威人士估计，2010 年全国走私出境的稀土可能已超过 3 万吨！

这也就是为啥我们实行了配额许可，减少稀土的出口量之后，国际市场的稀土供应并没有出现紧张局面，甚至我国所定的出口配额每年连一半都用不完的根本原因所在了。

那稀土到底是什么？真的那么重要吗？

下面我们就一一道来。

第一章 孪生兄弟着假面 多管齐下现真容

话说欧罗巴北部有个半岛，名叫斯堪的纳维亚，岛上就两个国家，瑞典和挪威，半岛面积不大，人口不多，却也是物华天宝，人杰地灵。

在瑞典的首都斯德哥尔摩附近有一个小镇，名叫乙忒耳比（Ytterby）。在距今两百多年前的1788年，平时就喜欢收集矿石标本的瑞典军官阿伦尼乌斯，从这儿的矿工手里得到了一块形似沥青的黑色矿石。阿伦尼乌斯凭直觉认为这块质地特殊的矿石很可能是一块稀有矿石，为此他花费了几年来对它进行研究，可惜条件有限，没能得到满意的结果。1794年，他的一位朋友，就是后来鼎鼎有名的芬兰矿物学家和化学家——加多林到瑞典旅行时，阿伦尼乌斯特意带上这个矿石前去请教。加多林通过认真仔细的分析和研究后，发现其中含有38%的未知金属氧化物，其性质与氧化钙或氧化铝有点类似，但又有明显区别，在高温下难以熔化，也难溶解于水，于是将其命名为钇（yttrium）土。土者，固体不溶于水之谓也。当时人们常把不溶于水的固体氧化物称为土，如氧化铝叫矾土，氧化镁叫苦土。1797年，瑞典的化学家埃克伯格证实了加多林的发现。

钇土是最早被发现的稀土，以此作为开端，稀土元素才一个接一个地被发现。加多林作为稀土元素的最先发现者，为纪念他的功绩，后来的矿物学家把他研究的这种黑色矿石称为加多林矿石，也叫硅铍钇矿，除含有钇外，里面还有铁铍硅氧等多种元素。

稀土是历史遗留下来的名称，其实稀土并不稀少，在地壳中有些稀土元素的储量比常见金属元素铅、锡、锌还要丰富，只是它们的分布较为分散，给人一种“稀少”的印象。稀土元素一般以氧化物状态被分离出来，所以得名“稀土”。加多林被后人称为世界稀土之父。

1803年，德国矿物学家和化学家克拉普罗特，在分析产自瑞典小城瓦斯特拉斯的红色重石时，确定有一种新元素的氧化物存在，因其在灼烧时显赭色（ochra），将该元素称作 ochroium。几乎在同一时间，年仅24岁的瑞典青年化学家贝采里乌斯和他的老师希辛格在研究该矿石时，也发现了同一元素的氧化物，称为铈土，元素命名为铈（cerium），以纪念当时发现的小行星谷神星（Ceres）。贝采里乌斯后来是19世纪上半叶最有威望的化学家，又是近代化学元素符号的制定者，那时的通讯不发达，所以尽管差不多同时发现，ochroium 和 cerium 的命运却截然不同，后者作为元素名称被保留了下来，前者被废弃了。

其实当时发现的钇土和铈土并非单一的氧化物。1814年，贝采里乌斯就在含铈的钼硅石中发现了钇土，说明当初发现的铈土其实是铈土和钇土的混合物。后来捷克化学家布劳纳在铈土中又得到一种新土，与贝采里乌斯白色铈土不同，新土呈玫瑰棕色，称作 metaceria。但这一发现没有被证实，因为布劳纳的所谓新土其实是铈的高价氧化物，贝采里乌斯发现的则是铈的低价氧化物。

钇和铈的氧化物很难被还原，贝采里乌斯的高足莫桑德尔将金属钾与铈的氯化物反应，才得到不纯的棕色铈粉。直到1875年希尔布朗德电解熔融的氯化铈才制得纯的金属

铈，这也是当今生产稀土金属的普遍方法。

1839年，瑞典化学家莫桑德尔加热分解硝酸铈，发现仅部分溶于硝酸，他将能溶的部分命名为镧（lanthanum，意为“隐藏”）土，不溶的部分仍称为铈土。两年后，他从铈土中又分离出另一种新元素的氧化物，称为 didymium（意为“双胞胎”）土，莫桑德尔认为 didymium 和镧是一对孪生兄弟。1869年门捷列夫的第一张元素周期表曾列入该元素，但它并未得到公认，因为它里面竟然包含了四种元素。

1842年，莫桑德尔通过分析发现铈土也非单一氧化物，而是三种，他将其中之一仍称为铈土，其他两种命名为铒（erbium）土和铥（terbium）土。从铈矿中分离出新元素并给予命名的有不少人，但未被承认，只有镧、铥、铒保留了下来。其实这三个和前两个一样，也不是纯净的，里面还隐藏着好几个元素，但当时无法用单纯的化学分析方法进行分辨。

1860年，德国的本生和克希荷夫创建光谱分析法，这种方法比化学分析灵敏度大得多，能检测到地壳中含量较少和不易分离成单质的元素。通过光谱分析，人们确定 didymium 土、铒土、铥土不是纯净的氧化物，促使化学家对它们继续分离。

1878年，致力于元素原子量的精密测定的瑞士化学家马里尼亚克从铒土中分离出镱（ytterbium）土。镱（ytterbium）、钇（yttrium）、铒（erbium）、铥（terbium）四个元素的名称都来自小镇乙忒耳比（Ytterby），这恐怕是小镇中绝无仅有的殊荣了。因为正是在这里首先发现了钇的矿石，从而拉开了稀土元素发现的帷幕。

同年，法国光谱学家、化学家德拉丰坦从褐钇铈矿中提取的 didymium 土光谱中找到两条新谱线，可以说发现了一种新元素的踪迹，他称之为 decipium（意为“蒙骗”），但遗憾的是他未能成功地将两种元素的氧化物分离开来，与真正的发现失之交臂。翌年，法国另一位化学家布瓦邦德朗技高一筹，利用光谱分析确定 decipium 是一些未知和已知稀土元素的混合物，并从中分离出当时未知的新元素钐（samarium，源自褐钇铈矿的另一名称萨马尔斯克矿）。

1879年，瑞典化学家尼尔松对镱土进行了详细研究，期望能测定出镱元素的物理和化学常数，借以验证门捷列夫1869年前提出的元素周期律，谁知这项工作没有获得预期的成果，却无心插柳地从镱土中分离出了钪（scandium，源于“斯堪的纳维亚半岛”）土。钪的性质与门捷列夫预言的类硼十分吻合，与镓（类铝）、锗（类硅）一起成为说明元素周期律正确性的重要证据。正是通过这三个元素发现者的大力宣传，元素周期律才获得普遍承认，成为人们探索未知世界的重要理论，也成就了化学史上的一段佳话。

同年，瑞典化学家克利夫从铒土分离出镱土、钪土后，发现剩下的铒的原子量并不恒定，经过进一步研究，他终于从中分离得到两个新元素的氧化物，命名为铈（holmium）土和铥（thulium）土，两个名称分别源自斯德哥尔摩和斯堪的纳维亚半岛的古名。

1880年，马里尼亚克对布瓦邦德朗得到的钐土进行了多次重结晶，分离出两个新元素，称为 γ_{α} 和 γ_{β} ，后经光谱分析鉴定， γ_{β} 与钐是同一元素。但对 γ_{α} 是不是一个新元素，马里尼亚克一直拿不定主意。六年后布瓦邦德朗终于制得纯净的 γ_{α} 并确认其为新元素，命名为钆（gadolinium，以纪念加多林）。据说布瓦邦德朗为命名一事还曾请求马里尼亚克赞同他的意见。而马里尼亚克既不声称自己对钆拥有共同的发现权，更未提出任何优先权，非常爽快地同意了布瓦邦德朗的意见。这种博大的胸襟在科学史上并不多见。

1885年，奥地利化学家威斯巴赫将 didymium 土分离出钐土后，继续分离得到镨（pra-

seodymium, 意为绿色的 didymium) 土和钕 (neodymium, 即新的 didymium) 土。至此, didymium 被分解成钐、钆、镨、钕四个元素, didymium 从此成为了稀土历史长河中的回忆。

1886 年, 法国布瓦邦德朗采用分级沉淀法, 将钍土一分为二, 他保留了钍, 另一个称为镱 (dysprosium, 意为“难以取得”)。

1892 年, 布瓦邦德朗利用光谱分析, 认定钐中存在两种新元素, 称作 Z_e 和 Z_t 。1893 年, 他证明后者与克鲁克斯 1887 年从钍中鉴定的 S_6 非常相似。1906 年, 致力于光谱研究的法国化学家德马赛将硝酸钐用分级沉淀法做了一次极精密的分析, 加上他对各种复杂光谱了如指掌, 他最终确定这三者为同一元素, 并命名为铕 (europium, 源自“欧洲”), 得到公认。铕的发现者既不是布瓦邦德朗, 也不是克鲁克斯, 而是德马赛。铕被发现的时间不在 1892 年, 也不在 1887 年, 而是 1906 年, 所以铕是 20 世纪初被发现的一个稀土元素。

1907 年, 法国化学家乌尔班将镱一分为二, 一个称为 neoytterbium (新镱), 另一个称为镱 (lutetium, 源于巴黎古名, 乌尔班的出生地)。新镱后来被证明就是镱。同年, 威斯巴赫也从镱土中分离出两种新元素的氧化物, 并将这两种新元素称为 aldebaranium 和 cassiopeium, 它们曾被化学家分别以 Ad 和 Cp 为元素符号按原子量大小排在镱和镱之前。但后来证实前者与镱是同一元素, 后者与镱为同一元素。其实乌尔班发现的镱并不纯净, 威斯巴赫获得的是纯净的 cassiopeium, 尽管化学家们认为威斯巴赫的结果更可信, 但因乌尔班发表报告比威斯巴赫早了几个月, 镱的发现者最终被认定是乌尔班, cassiopeium 成为了元素发现史中的一个注脚。

至此, 从最初的钍土中分离出钐、铽、铈、镱、钐、铈、铈、镱、镱、镱, 共九种元素。最初的钍土包含了钐、镧、钐、镨、钕、钆、铕, 共七种元素。

这段时间, 关于新稀土元素的发现非常热闹, 所发现的稀土元素多达数十个, 如美国史密斯的 mosandrium (1878)、columbium (1884), 奥地利林内曼的 austrium (1886), 俄罗斯切劳斯特乔夫的 glaucodidymium (1885)、russium (1887), 德国劳埃和安兹的 damarium (1894), 法国巴里埃的 lucium (1896), 德国威斯巴赫的 aldebaranium 和 cassiopeium (1907), 乌尔班的 neoytterbium (1907), 以及 junonium, vestium, sirium 和很多用各种字母符号表示的所谓新元素, 通通消失在历史的长河中。

造成这么混乱的原因, 是当时人们并不知道自然界中究竟有多少种稀土元素。那时的元素周期表中, 化学元素是按照原子量大小进行排列的, 原子量不同就是不同元素。门捷列夫曾意识到稀土元素对其周期表影响极大, 却无法合理安排它们的位置, 以至于在去世前痛苦地写道: “(稀土元素的排位) 是周期表中最难的问题之一。” 据统计, 在 1878 年至 1913 年的 35 年间, 各种科学杂志报道至少有 100 种稀土元素被发现, 当然绝大部分被否定了。有人甚至在 4 月 1 日愚人节那天, 声称发现了两种新的稀土元素, 用稀土跟大家开玩笑, 也算给长期郁闷的稀土发现史添加了一个滑稽的小插曲。直到 1913 年英国剑桥大学年轻的物理学家莫斯莱 (时年 26 岁) 在原子结构行星模型的提出者、物理学家卢瑟福的指导下研究原子结构时, 发现不同元素产生的特征 X 射线的波长不同。他通过大量测定各金属元素特征 X 射线的波长, 然后把他们按波长由长到短进行排列, 发现排列的次序与它们在元素周期表中排列的次序一致, 由此建立了元素的原子序数, 并改正了元素周期表中化学元素按原子量进行排列的问题。从此稀土元素才真正拥有了各自的编号。

同年, 英国化学家索第在与物理学家卢瑟福合作研究钍的放射性产物时, 发现了原子

的蜕变现象。索第随后提出了同位素假说，认为存在着原子量不同，放射性也不同，但其他物理化学性质完全一样的化学元素的变种。这种化学性质完全相同的化学元素的变种，应该处在元素周期表的同一个位置上，称为同位素。为此索第荣获 1921 年诺贝尔化学奖。

与此同时，丹麦物理学家玻尔为了解决他的老师卢瑟福提出的原子结构行星模型所遇到的困难，将德国物理学家普朗克的量子化概念引入到原子结构研究领域，并提出原子结构的量子化定态轨道理论，在 1921 ~ 1922 年间又提出原子核外电子排布的理论。该理论认为原子核外的电子是分层排布的，且每一个电子层中还有不同的亚层。玻尔认为，根据他的理论，71 号元素镧的 4f 亚层电子已达到全充满，不可能再增加。这时人们才认识到稀土元素到此为止，连同 21 号元素钪、39 号元素镱和 57 ~ 71 号镧系元素总共只有 17 种。

有趣的是，稀土研究专家乌尔班在 1911 年还曾宣布发现了新的稀土元素 *celtium*，并将其放在元素周期表中镧的后面，认为它应该是 72 号元素。直到 1922 年，乌尔班仍坚称 *celtium* 确实存在，宣称这是“最新的成就”。对此，玻尔根据他自己新提出的原子核外电子排布理论，指出 72 号元素新增的电子应排在 5d 亚层上，且化合价表现为 4，而不是稀土元素特征的 3 价。玻尔进一步指出，72 号元素不可能从稀土元素矿物中得到，而应当从含有与它同族的锆和铪的矿石中去寻找。按照玻尔指引的方向，1922 年，与玻尔一起工作的匈牙利化学家海弗西和荷兰物理学家科斯特，利用 X 射线光谱分析在多种含锆矿石中果真找到了 72 号元素铪 (*hafnium*，源于丹麦首都哥本哈根的古名)，才算基本结束了这一场纷争。有趣的是，一直到 1962 年，法国出版的大百科全书，在铪的条目中仍写着：“铪是一种化学元素，它的原子序数为 72，原子量为 178.6，它是被乌尔班发现的，海弗西分离出它。”可见乌尔班在法国的影响力着实不小，也说明优先权之争的惨烈。

1902 年，门捷列夫的朋友布劳纳教授推测在钆和钷之间应有一种元素存在。莫斯莱发现原子序数后，还对稀土元素的 X 射线光谱进行了仔细研究，在 1914 年确认有 61 号元素存在。但 61 号元素却没能从稀土矿中找到。关于这个元素发现的最早报道是 1926 年，来自美国伊利诺斯州大学的霍普金斯和他的几位同事，他们长期从事稀土元素分离的研究工作，声称从稀土矿独居石中发现了这个元素，并命名为 *illinium*，以纪念他们工作的所在地伊利诺斯州。此消息一经传出，意大利佛罗伦萨皇家大学教授路拉和费尔南德斯急忙宣称，这个元素他们早在 1924 年就已发现，也是从独居石矿中分离出来的，只是当时没有公布。他们把该元素命名为 *florentium*，也是为了纪念他们工作的所在地佛罗伦萨。但是，不论是美国的化学教授，还是意大利的化学教授，都没能把这个元素分离出来，也没有报道关于这个元素的任何性质。元素周期表上的 61 号位置依然空着。

这时德国科学家诺达克和塔克夫妇在发现镥后不久，开始着手寻找和提取 61 号元素。他们用各种方法研究了多种试剂，提炼了上百千克的含稀土元素的矿物，结果仍然一无所获。

1924 年，前苏联学者苏卡列夫提出“同位素统计规则”，认为不能有核电荷数仅仅相差一个单位的两种稳定同量素存在。同量素是指质量数相同但原子序数不同的原子，如 $^{40}_{18}\text{Ar}$ 、 $^{40}_{19}\text{K}$ 、 $^{40}_{20}\text{Ca}$ 。这个规则尽管也存在少数几个例外 (^{113}Cd - ^{113}In 、 ^{115}In - ^{115}Sn 、 ^{123}Sb - ^{123}Te)，但整体来说，还是描述了天然同位素分布的一般规律。利用这个统计规则，可以解释周期表上 43 号和 61 号的空位。分析 42 号钼和 44 号钨的稳定同位素，容易发现对于 43 号元素适当的原子量区间，已经被另外两种元素的稳定同位素占据了，它们是 ^{94}Mo 、 ^{95}Mo 、 ^{96}Mo 、 ^{96}Ru 、 ^{97}Mo 、 ^{98}Mo 、 ^{98}Ru 、 ^{99}Ru 、 ^{100}Mo 、 ^{100}Ru 、 ^{101}Ru 和 ^{102}Ru 。同样 60 号的钆和 62 号的钷也

占据着 61 号元素所有可能质量数，分别是¹⁴²Nd、¹⁴³Nd、¹⁴⁴Nd、¹⁴⁴Sm、¹⁴⁵Nd、¹⁴⁶Nd、¹⁴⁷Sm、¹⁴⁸Nd、¹⁴⁸Sm、¹⁴⁹Sm、¹⁵⁰Nd 和 ¹⁵⁰Sm。所以不是这两个元素有意藏起来折磨化学家，而实在是它们的天然同位素已无立锥之地。这个规则在 1934 年被德国物理学家马陶赫确定。

根据这个规则，自然界应该不存在 61 号元素的稳定同位素，在地壳中寻找它注定不会成功。在此之后科学家们才掉转头来，不再从天然矿石中寻找，而是转向核反应的产物中。

1941 年，美国俄亥俄州大学教授奎尔和他的同事宣布，在回旋加速器中轰击钷和钷的产物中，他们发现了一种具有放射性的新元素，认为这就是 61 号元素，并将其命名为 cyclonium（源于回旋加速器）。有趣的是，奎尔曾是霍普金斯在伊利诺斯州大学的同事，也是参与 1926 年声称发现元素 illinium 的当事人，不过这次他从配角变成了主角，但仍然没能鉴定新元素确实存在。

直到 1947 年美国马林斯基、格伦登宁和科里尔才在“曼哈顿计划”的铀裂变产物中发现 61 号元素，并将其命名为钷（promethium，源自火神普罗米修斯）。1965 年，人们才从 6000 吨铀矿中取得了 350 毫克的钷，是铀自动分裂的产物，这个“失落的元素”终于在地壳中被找到了。

发现稀土元素的大幕终于被徐徐拉上了。

但到此时，稀土元素应用的大幕却才只是露出了一条小缝，精彩的节目还没有开始，高潮部分远远没有到来。

我们不妨先从这条小缝中来看看表演，来个管中窥豹，也是蛮有意思的。

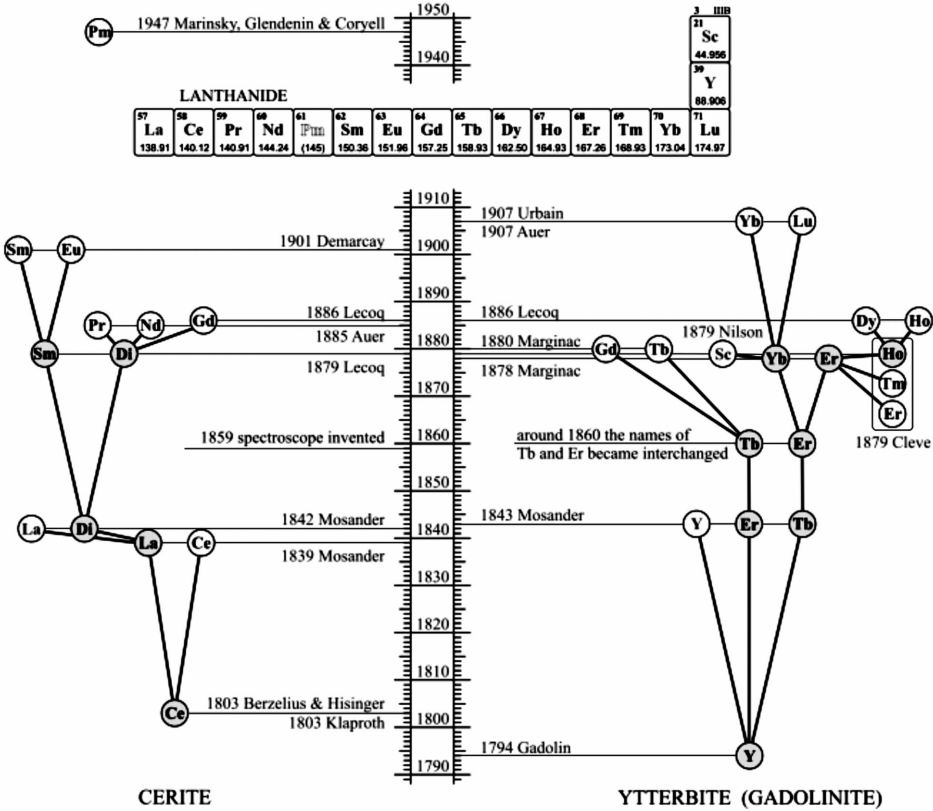


图 1-1 稀土元素的发现简史（图片来源 periodni. com/rare_earth_elements）