

中国镧元素的动态物质流及供需分析

赵燊¹, 王昕², 王鹤鸣², 汪鹏^{3,4}, 王路^{1*}, 岳强², 杜涛², 陈伟强^{3,4*}

1. 中国科学院赣江创新研究院, 赣州 341000

2. 东北大学国家环境保护生态工业重点实验室, 沈阳 110819

3. 中国科学院城市环境研究所, 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

4. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 构建了镧元素的动态物质流分析框架, 模拟了镧的全生命周期流动情况, 分析了1990—2018年中国镧物质流量、存量和供需关系。结果显示: (1) 中国稀土镧96%的供应来自国内开采, 其中77%来自于白云鄂博矿和氟碳铈矿; (2) 镧的功能材料种类丰富, 消耗镧最多的石油裂化催化剂28年累积用镧量占到了镧应用总量的47%; (3) 中国在1990—2018年间共向其他国家出口了29.2万t镧, 且以冶炼分离产品为主; (4) 1990—2018年间, 中国镧元素总体过剩, 但2013—2017年出现少量供应不足, 原因是氧化镧的大量出口和下游应用量的增长, 有利于减少库存, 促进供需平衡。建议在巩固现有下游消费的基础上, 大力开发新材料, 拓展镧的新应用技术, 提升镧产业链的附加值; 尽快建立废石油裂化催化剂的回收机制, 并制定相关法律法规以促进镧循环利用、防止环境污染。

关键词 镧; 稀土; 物质流分析; 供需关系

稀土是一组金属的统称, 具有独特的物理和化学性质, 在众多关键技术和领域中发挥重要作用, 被誉为“工业味精”^[1]、“新材料之母”。镧元素(La)作为镧系稀土元素之首, 其地位的特殊性和重要性

不言而喻^[2]。镧的发现可以追溯至19世纪, 瑞典科学家莫桑德尔从已经发现的氧化铈中提取出了一种新的氧化物, 并将其命名为镧, 从此镧登上了被人类认识和利用的历史舞台^[3]。镧在地壳中的丰

收稿日期: 2022-06-03; 修回日期: 2022-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871204, 52070034); 中国科学院江西稀土研究院自主部署项目(E055B004); 中国科学院重点部署项目(ZDRW-CN-2021-3)

作者简介: 赵燊, 博士研究生, 研究方向为工业生态学, 电子信箱: szhao21@gia.cas.cn; 王路(通信作者), 副研究员, 研究方向为关键金属资源环境战略, 电子信箱: lwang@gia.cas.cn; 陈伟强(共同通信作者), 研究员, 研究方向为资源与环境管理, 电子信箱: wqchen@iue.ac.cn

引用格式: 赵燊, 王昕, 王鹤鸣, 等. 中国镧元素的动态物质流及供需分析[J]. 科技导报, 2022, 40(21): 66-76; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.21.007

度为 39 mg/kg, 相比于其他稀土元素, 其丰度较高^[4]。中国的镧储量十分丰富, 多赋存于独居石矿和氟碳铈矿中, 并与其他轻稀土元素共同开采。内蒙古包头的白云鄂博矿、四川和山东的氟碳铈矿都含有相当丰富的镧资源, 即使是以中重稀土著称的南方离子型稀土矿, 其中的镧元素配分也达到了 23%^[5]。同时, 中国是全球最大的稀土资源供应和出口国, 如 2018 年, 中国仅以冶炼产品形式出口镧资源 1.7 万 t, 高于当年美国、澳大利亚等稀土生产国镧资源产量之和。

储量丰富的镧元素, 极具开发利用价值, 已经被广泛应用于石油、储氢、冶金、玻璃、陶瓷等工业领域^[6]。随着高新技术和新兴产业的发展, 镧的应用潜力在很大程度上被激活。但是稀土开采引发的环境问题逐渐凸显, 并且低丰度稀土的大量开发利用导致共同开采出来的镧元素大量积压, 因此, 探究镧的上游供给和下游需求情况, 全面量化其生产、消费、贸易及可持续发展状况至关重要。

物质流分析(material flow analysis, MFA)是一种广泛用于描述物质循环(包括存量与流量)的方法, 可以描述国家、地区和全球边界内的物质存量与流量^[7], 并为可持续的物质管理战略(特别是物质回收)提供信息^[8-11]。该方法已经逐渐成为分析金属物质流最基础和重要的方法, 如钢铁^[12-14]、铝^[15-17]、铜^[18]、锌^[19-20]、银^[21]、铬^[22]、镍^[23]、铅^[24-25]、钨^[26]等研究案例, 并被广泛应用于金属的全生命周期效率、再生潜力、未来需求及关键调控政策的评估和模拟^[27]。近年来, 物质流分析领域开始关注稀土元素, 并且从全球和国家尺度对稀土元素整体或者某些稀土元素进行了分析^[28-32], 但是专门针对镧元素物质流的文献相对较少^[33], 且目前的研究大多仅涉及单一年份, 考虑连续年份的研究很少。鉴于此, 本研究将镧作为研究对象, 选取 1990—2018 年为时间边界, 分析镧的全生命周期动态流动情况。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究方法

基于全生命周期的中国镧的物质流分析框架

主要由采选、冶炼分离、加工、制造、使用和废弃物管理 6 个阶段, 以及贯穿于各阶段的贸易和损失所构成(图 1)。其中所有库存和流量都以镧金属当量来计量。具体来看, 采选阶段的稀土矿来源有白云鄂博矿、四川氟碳铈矿、南方离子矿和其他, 白云鄂博矿是由氟碳铈矿和独居石组成的混合稀土矿, 而四川氟碳铈矿是一种单一的氟碳铈矿, 这 2 种矿都是以轻稀土为主的矿物型稀土矿, 南方离子矿则属于风化型稀土矿当中的风化壳淋积型稀土矿, 以中重稀土为主^[34], 其他包括了除上述 3 种稀土矿以外的所有稀土来源; 冶炼分离阶段是从稀土矿中提取并加工成氧化镧、金属镧等精炼产品; 加工阶段负责将氧化镧或金属镧加工成为稀土功能材料, 包括石油裂化催化剂(FCC)、储氢合金、冶金合金、抛光粉等 8 种稀土材料; 制造和使用阶段主要囊括 10 类终端产品: FCC、抛光粉、镍氢电池、合金、电子产品、汽车、家电、电声器件、发光设备和日用陶瓷; 在废物管理阶段, 含镧产品达到使用寿命后进入报废阶段, 并全部以废弃物的形式通过填埋等方式回归自然环境中。研究的空间边界为中国大陆范围, 时间边界为 1990—2018 年, 该时期涵盖了中国与其他国家的稀土贸易。

1.2 数据来源

研究需要的数据大致分为 4 类: (1) 产量数据: 稀土矿的开采量以及各种产品的产量; (2) 贸易数据; (3) 各类系数: 稀土矿的配分、损失率、产品含镧量等; (4) 寿命数据。这些数据来自于出版的书籍、学术论文、专利报告、官方网站、新闻报道以及国际贸易数据库, 具体如表 1 所示。

1.3 计算方法

核算镧元素物质流的基础是镧在每个阶段的流动都遵循质量守恒原则, 计算公式为

$$F_{c,t}^{\text{in}} + F_{c,t}^{\text{im}} = F_{c,t}^{\text{out}} + F_{c,t}^{\text{ex}} + F_{c,t}^{\text{l}} \quad (1)$$

式中, c 为物质生命周期阶段; $F_{c,t}^{\text{in}}$ 为物质在第 t 年第 c 阶段的流入量; $F_{c,t}^{\text{im}}$ 为物质的进口量; $F_{c,t}^{\text{ex}}$ 为物质的出口量; $F_{c,t}^{\text{l}}$ 为第 t 年第 c 阶段的损失量; $F_{c,t}^{\text{out}}$ 为第 t 年第 c 阶段的流出量。

在采选和冶炼分离阶段, 镧的精矿、化合物和金属的产量都是根据统计数据计算的; 加工、制造

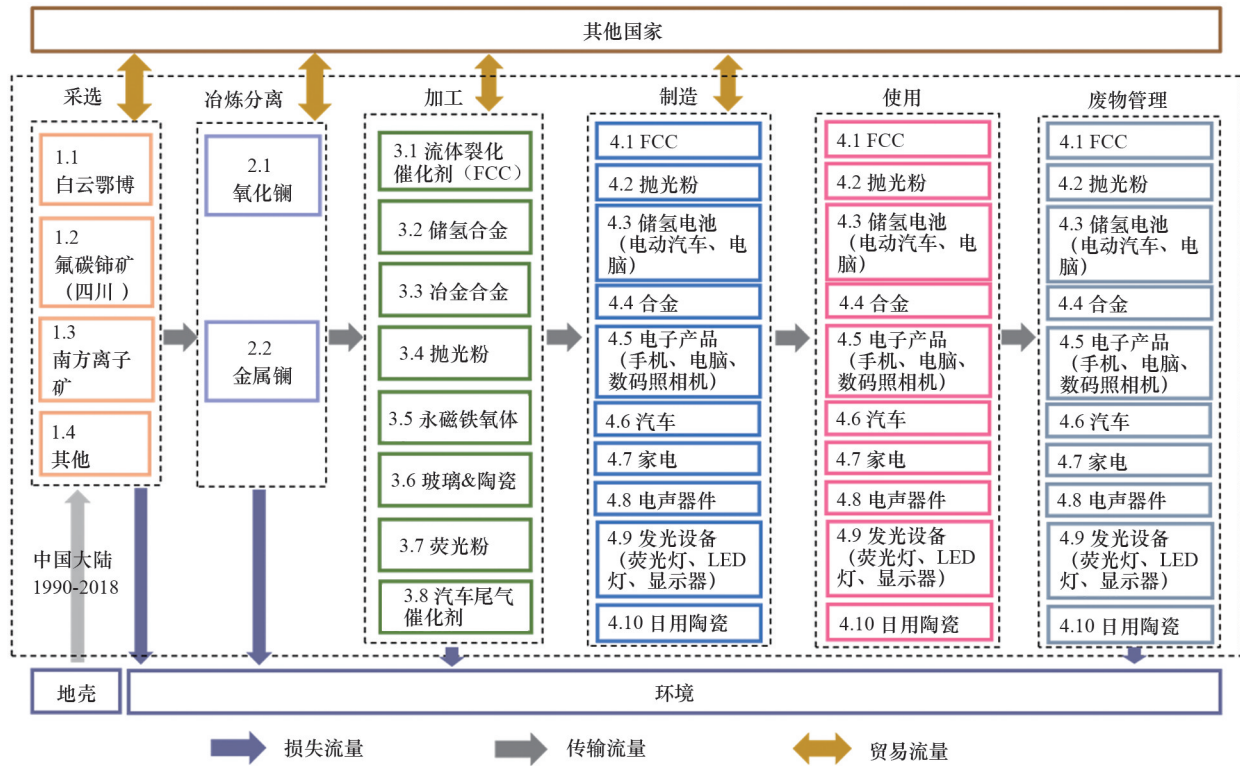


图1 稀土镧的物质流分析框架

表1 数据来源

生命周期阶段	数据类型	数据来源
稀土金属矿及冶炼产品	产量	美国地质调查局 ^[35] 、中国稀土学会年鉴
	贸易量	联合国贸易商品统计数据库 ^[36] 、中国海关统计年鉴
	元素配分	文献 ^[34]
	损失率	中华人民共和国工业和信息化部稀土产业发展计划 ^[37]
功能材料及终端产品	产量	《中国统计年鉴》、行业统计报告 ^[6,38]
	贸易量	联合国贸易商品统计数据库 ^[36] 、中国海关统计年鉴
	含镧量及市场渗透率	行业统计报告 ^[6,38] 、文献 ^[39]
	损失率	物质平衡估算
	寿命	文献 ^[41-42] 、行业报告 ^[6,38] 、新闻报道

阶段的产品消耗的镧当量通过产品的产量乘以镧元素含量计算得到；镧的在用存量通过将存量从最初的一年(定义为1990年)到某一年的年度变化相加来量化,存量和废弃物流出量的计算公式为

$$S_{i,t_1} = S_{i,t_0} + \sum_{t=t_0}^{t_1} (F_{i,t}^{in} - F_{i,t}^{out}) \quad (2)$$

$$F_{i,t}^{out} = \sum_{m=1}^{lifetime} F_{i,t-m}^{in} \times P_{i,m} \quad (3)$$

式中, S_{i,t_0} 、 S_{i,t_1} 分别为在初始年份 t_0 和给定年份 t_1 时产品 i 中含有的镧存量; $F_{i,t}^{in}$ 、 $F_{i,t}^{out}$ 分别为使用阶段的流入和流出; $P_{i,m}$ 为产品 i 服务 m 年的概率,用正态分布或威布尔分布估计(分布选择取决于产品)。

2 结果与分析

对1990—2018年中国镧元素的全生命周期流

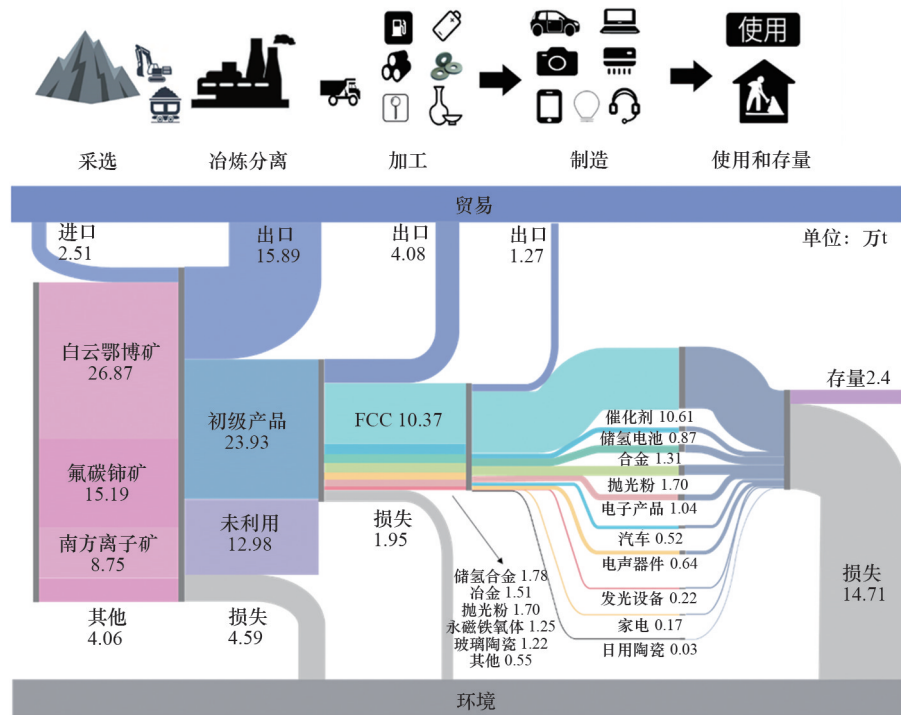


图2 1990—2018年中国累积的镧循环桑基图

2.1 开采与冶炼阶段

1990—2018年,中国稀土镧的供应以国内开采为主,占总供应的96%,其中白云鄂博矿和氟碳铈矿作为主要来源在此期间累计供应量占国内供应的77%(图2)。稀土镧的产量总体呈上升趋势,由1990年的0.4万t增至2018年的3.1万t,约增长了7.7倍(图3)。分阶段来看,1990—2006年,稀土镧的产量增长较快,这是因为串级萃取理论的提出和普及推动了中国稀土开采与冶炼技术的发展,随着美国在20世纪90年代封存了国内最大的芒廷帕斯稀土矿,中国稀土企业迅速抢占全球稀土供应市场,使中国成为了全球最大的稀土供应国^[43-44]。2006年之后,中国稀土镧的产量趋于稳定,甚至出现了短暂下降的情况,这与国家出台管理政策密切相关。由于中国稀土企业早期的“恶性竞争”带来的稀土贱卖问题以及稀土过量开采带来的严重环境问题,中国政府逐步出台政策对国内稀土企业进

行规范,并在2006年出台了稀土生产配额制度,对稀土开采(特别是南方离子矿)进行严格限制^[45],这使得中国镧产量增速明显放缓,南方离子矿的镧产量逐渐下降。近年来,随着2013—2014年和2017年后中国对轻稀土生产配额的逐步放开,中国稀土镧产量增速逐步回升,2014—2018年产量年均增长率达到7%,其中白云鄂博矿和氟碳铈矿贡献了期间超过98%的产量增量。

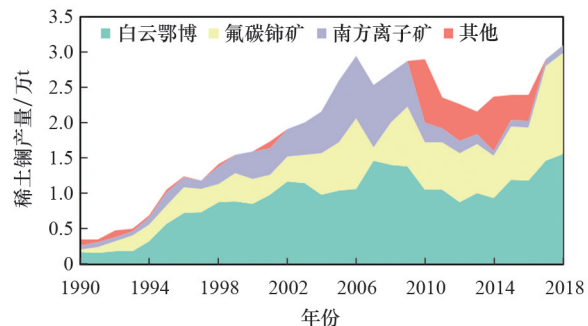


图3 稀土镧的开采结构

行规范,并在2006年出台了稀土生产配额制度,对稀土开采(特别是南方离子矿)进行严格限制^[45],这使得中国镧产量增速明显放缓,南方离子矿的镧产量逐渐下降。近年来,随着2013—2014年和2017年后中国对轻稀土生产配额的逐步放开,中国稀土镧产量增速逐步回升,2014—2018年产量年均增长率达到7%,其中白云鄂博矿和氟碳铈矿贡献了期间超过98%的产量增量。

1990—2018年,中国累计生产镧的冶炼产品57.4万t。其中,23.93万t用于国内消费,15.89万t出口,损失了4.59万t,还有12.98万t未利用(图2)。由此可知,在稀土的冶炼分离环节,虽然国内消耗了大部分冶炼产品,但仍有28%的冶炼产品用于出口,并且此阶段出现了过剩,第2.4节将进一步分析镧的历史供需趋势,并探讨镧在中国出现过剩的原因。

2.2 加工和制造阶段

镧的功能材料种类丰富,包括催化材料、储氢材料、抛光材料、永磁材料、发光材料、光学材料以及各种合金材料。其中,催化材料的镧用量最大,主要产品是FCC。1990—2018年FCC累积用镧量占到了镧应用总量的43%(图2)。此外,28年间所有功能材料的镧使用量整体呈上升趋势,其中2004—2007年出现了较大的增长幅度(图4(a)),期间储氢合金(年均增长29%)和汽车尾气催化剂(年均增长38%)中的用镧量增长最明显。储氢合金用镧量的增长主要是受到下游纯电动车和混合

动力汽车产业扩张带来的储氢电池消费量增长的驱动,其中混合动力汽车的产量在2004—2007年扩张了近4倍,而汽车尾气催化剂用镧量的增长主要是受到世界汽车产业向中国转移及尾气催化剂国产化的影响^[46]。

总体来看,终端产品的镧消费量呈先增长后减少的趋势,峰值出现在2009年,达到了1.0万t,此后逐渐下降并趋于稳定,2018年镧消费量为0.7万t,是1990年的2.5倍(图4(b))。总趋势的变化主要与催化剂和镍氢电池的镧消费量变化有关,由于添加稀土镧能有效提高催化剂性能^[47],于是石油化工业用镧量逐步增加,但是2010—2011年稀土价格大幅上涨,导致石化企业减少了石油裂化催化剂中的镧用量,并寻求了替代产品和替代技术;而镍氢电池自20世纪90年代发展起来以后,凭借其高能量、长寿命、无污染的优良特性逐步占领市场^[48],但是近些年受到了锂离子电池^[49]和新型燃料电池的冲击^[50],其产量开始下降,用镧量也随之减少。

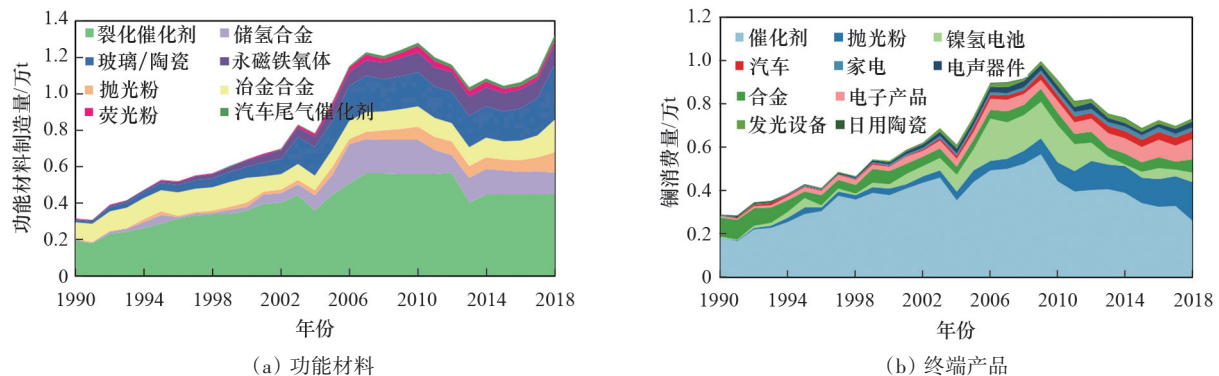


图4 功能材料与终端产品的历史演变

此外,镧的应用领域广泛,消费结构多元,既包括传统的催化剂、合金和抛光粉等产品,也包括新兴的电动汽车、家电和各种电子设备,例如手机、笔记本电脑和数码照相机,镧在手机中的应用主要是显示器和摄像头,在笔记本电脑中的应用主要是储氢电池,在数码照相机中的应用主要是镜头。

2.3 存量与废物管理

1990年以来,镧的在用存量快速增加,2018年达到2.4万t(图2)。其中,合金中嵌入的镧存量最大,达到了总存量的30%,其次是汽车,占总存量的23%;电声器件和电子产品中的累积镧存量基本相

等,约为0.3万t;镍氢电池、家电和发光设备中的镧存量较少,三者之和占总存量的18%;日用陶瓷中的镧存量最少,远低于总存量的1%。相比于镧在自然环境中的资源储量(985万t),镧在社会经济系统中的资源储量就相当少了。

1990—2018年镧最终产品报废量为14.71万t(图2),大约是存量的6倍,而含镧的废弃物中绝大部分是FCC,平均占比为76%(图5(b))。FCC作为石油精炼加工过程中的裂化催化剂,属于消耗品,不会赋存于产品中,在使用过程中催化活性会下降,所以要定期排出一部分FCC的废弃物。此外,

抛光粉的报废量不断增大,由1990年的22.2 t增加到了2018年的1779.2 t,增长了80倍。废弃物流出量总体趋势是增长的,并在2009年达到小高峰,之

后虽有波动,但基本保持在0.6万 t以上。面对如此巨大的耗散损失,废弃物管理尤为重要。

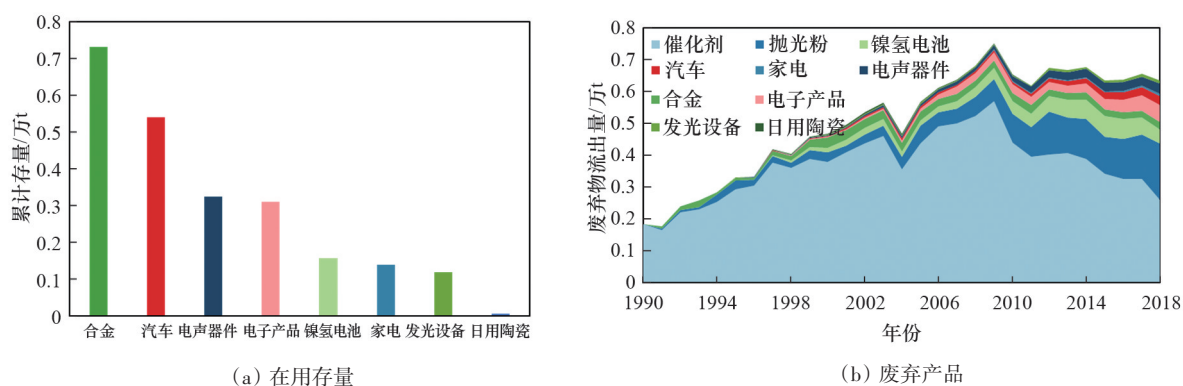


图5 镧的在用存量(1990—2018年累积量)与废弃产品的流出量

2.4 供需关系

1990—2018年,中国镧的冶炼产品供应基本处于过剩状态。其中过剩量最大的时期是1995—2006年,国家缺乏对资源开发的合理规划与管理,国内企业为了增加收益争相扩大产能、过度开采稀土矿,导致了包括稀土镧在内的稀土矿出现了供应严重过剩的问题。2006年起国家陆续出台多项稀土产业政策,例如2006年政府开始实施开采总量控制政策,2012年规范了指令性生产计划指标的分配方案^[51]。这些举措维护了稀土行业的发展秩

序,有效保护了中国的稀土资源,并使镧的过剩量开始逐渐减少,甚至在2013—2017年出现了供应不足的现象(图6(a)),消耗了库存,促使供需关系向平衡方向发展。究其原因,虽然中国对镧的下游终端应用增长进行了控制,导致国内终端产品用镧量下降,但仍有大量氧化镧和下游功能材料(如裂化催化剂、玻璃、陶瓷)在国内加工并出口。2013年开始,中国镧的初级产品出口量大幅增长,由2012年的0.5万 t增长至2013年的1.1万 t,此后出口量一直保持着每年超过1万 t的水平(图6(b))。

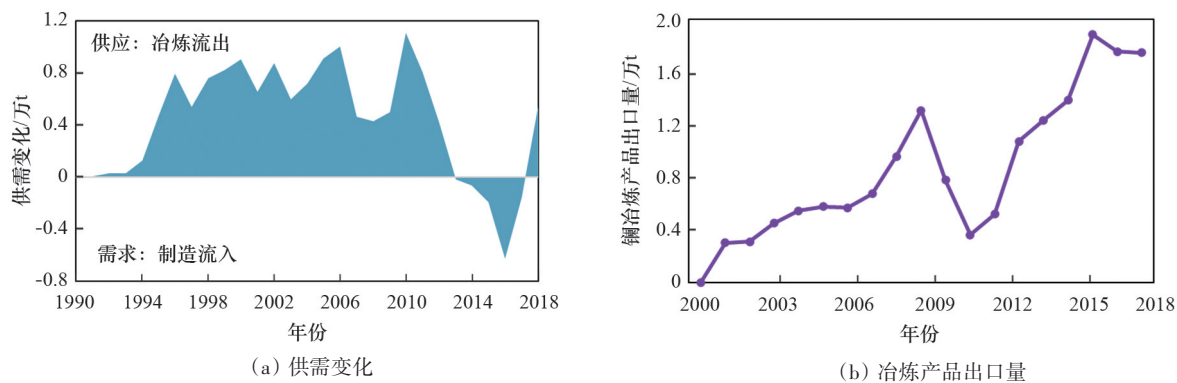


图6 镧的供需变化和冶炼产品出口量变化

2.5 贸易分析

镧的贸易流向主要是从中国出口到国外,1990—2018年净出口总量达到了18.7万 t(图2),且总贸易量不断增加,从1990年不足100 t增长到2018年的4.3万 t,增长了40多倍。从贸易结构来看,进口的镧以中间产品为主(图7(a)),只有少数几年

以稀土金属矿为主(1996、2010、2018年),出口的镧以冶炼分离产品为主(图7(b)),中间产品次之。这说明中国稀土产业在产品深加工和后续处理工艺方面仍有待提高,也可以看出全球对中国稀土产品的需求与日俱增。

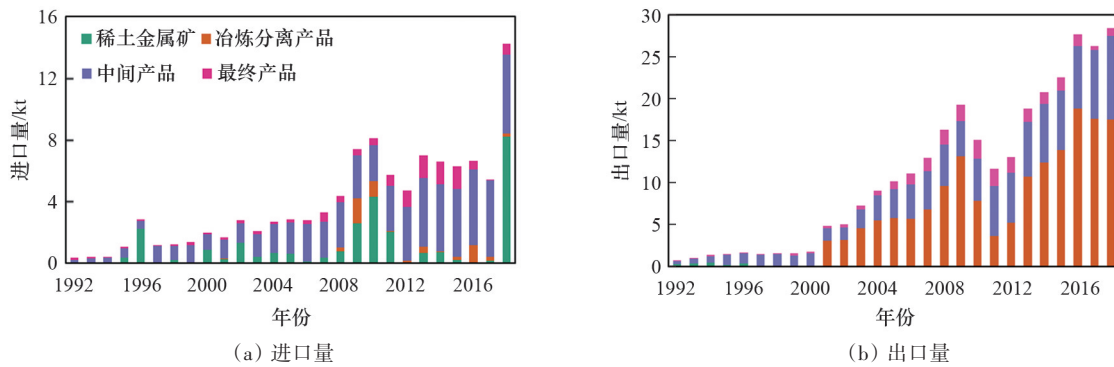


图7 1992—2018年中国镧的贸易结构

从贸易量的具体变化来看,进口量有明显的波动,总体上呈现先增长后减少的趋势。1992—2008年,总进口量随着中间产品的增加而增加;2008—2011年,由于中国从泰国大量进口稀土金属矿,导致总进口量激增,并于2010年达到0.8万t,成为除2018年外进口量最大的一年;2010年之后由于稀土金属矿的进口不断减少,总进口量也随之降低,直到2018年,中国再次从美国进口了大量的稀土金属矿,总进口量(1.4万t)比2017年增长0.9万t。出口量总体上呈增长趋势,且1992—2018年共出口了29.2万t。1992—2000年,出口主要是中间产品;2001—2009年,随着中国冶炼分离技术的提高,出口的冶炼分离产品不断增长,总出口量也随之增加;2010—2011年,由于中国减少了稀土出口配额,导致冶炼产品的出口量出现短暂下降,但随着出口限制政策的废除,冶炼产品的出口量又开始上升,同时中间产品的出口量也缓慢增长,并于2018年达到最大值(0.5万t)。

3 结论

基于物质流分析方法,建立了镧的物质流核算框架,测算了镧从生产、加工、应用到废弃处理的全生命周期流动,了解和掌握了社会经济系统中镧的存量和流量,结果如下。

1) 中国稀土镧的供应以国内开采为主,占总供应的96%,而仅有4%的稀土矿来自国外,并且稀土镧主要来自于白云鄂博矿和氟碳铈矿,2种矿在1990—2018年间累积供应了中国77%的镧。

2) 镧的功能材料种类丰富,催化材料的镧用

量最大,主要产品是FCC;而终端产品的镧消费量呈先增长后减少的趋势,峰值出现在2009年,此后逐渐下降并趋于稳定,总趋势的变化主要与催化剂和镍氢电池的镧消费量变化有关。

3) 镧的贸易流向主要是从中国出口到国外,1990—2018年净出口总量达到了18.7万t,且总贸易量不断增加,进口的镧以中间产品为主,出口的镧以冶炼分离产品为主。

4) 镧在1990—2018年基本国内供大于需,但在2013—2017年出现少量供应不足的现象,原因是氧化镧的大量出口和下游应用量的增长,库存开始减少,供需关系向平衡方向发展。

5) 镧作为稀土的一员,不仅具有优良特性,在高科技领域发挥着重要作用,而且供应充足,价格相对便宜,这赋予了镧巨大的开发潜力,尤其是在催化剂和铁氧体领域,镧是不可替代的关键原料。

针对镧的上下游供需关系以及下游最大应用(FCC),对中国镧产业发展提出以下建议。

1) 巩固下游消费,加大聚氯乙烯、光学材料和医药领域研发投入。

通过分析中国镧元素的动态物质流动情况,发现镧元素的上下游供需关系有向平衡方向发展的态势,尤其是2013—2017年,每年功能材料都需要消耗库存才能满足需求,原因主要有2方面:一方面是镧初级产品的出口量大幅增加,导致国内消费量不足;另一方面是下游应用量增大,不仅传统产业需求量有所增加,新兴产业的发展也需要更多镧的辅助^[52-54]。尽管如此,过去累积的镧库存仍然可以支撑现在过量的需求,目前总体上依然存在较多库存积压,而且镧在稀土矿中的配分占比较高,未

来供应还有包钢集团的尾矿库保障,所以镧未来发展方向应是鼓励利用其优良特性,开发新型材料,加大科研力度扩展应用,例如在聚氯乙烯、光学材料、医药领域的新研发,以提高镧资源的附加价值。另外,镧在永磁领域也具有较好的发展前景,将镧元素添入永磁铁氧体中可以提高铁氧体性能,易于获得且价格低廉^[55],是永磁领域的一大突破。

2) 创新催化技术,扩大催化剂在环境保护和治理等方面的应用。

催化材料是目前消耗镧最多的领域,而FCC和汽车尾气催化剂是该领域最大的2个应用市场。在“双碳”目标背景下,稀土催化材料在环境治理当中扮演着重要角色^[56],并且中国拥有着发展稀土催化材料的资源优势,未来绿色环保、高性价比的稀土催化材料将是发展重点^[39]。由于稀土催化材料具有良好的催化性能并且所需的镧、铈等稀土原料价格低廉、储量丰富,因此国家除了继续巩固和扩大稀土镧在FCC中的应用,促进产品升级换代之外,也要大力开发稀土镧的其他催化材料在新兴领域中的应用,如固体氧化物燃料电池、天然气催化燃烧、有毒有害废气的催化净化等,不断提高催化剂性能。

3) 促进循环利用,建立废催化剂回收机制及配套法律法规。

1990—2018年FCC消耗了10万t的镧,并产生了大量的废弃物。FCC是当今炼油工业中用量最大的催化剂品种,填埋是目前废弃FCC处理的主要方式,这种处理方式不仅占用了大量土地资源,也造成了可回收稀土资源的浪费^[57],但更严重的是,掩埋后的废催化剂中的有害重金属经雨水冲刷会浸出并污染地下水、土壤和河流^[58]。此外,废FCC的粒径很小,只有几到几十微米,易于悬浮、吸附性强,容易携带和吸附空气中的有害有毒物质,形成雾霾^[59]。因此,将FCC报废资源循环利用,是目前和未来一段时间亟待解决的问题。目前已有针对从废FCC中回收稀土的研究^[60-63],但是回收过程中使用大量的酸碱溶液,存在二次污染的问题,因此,目前还未见回收废FCC中稀土元素的工业化装置投入运营。对废FCC进行综合回收利用既可以提

高资源利用率,也能避免废催化剂带来的环境污染问题,提取出的稀土元素更是具有较高的价值,因此应鼓励这方面的技术创新,督促石油化工企业建立完备的稀土回收体系。另外国内对于废催化剂管理的相关法律法规也较少,还需进一步补充完善。

参考文献 (References)

- [1] 张亮亮, 王岩. “工业味精”生产亟待政府呵护[J]. 中国国情国力, 2007(2): 51-53.
- [2] 窦学宏. 稀土元素镧及其应用[J]. 稀土信息, 2005(2): 33-34.
- [3] 亨德森. 稀土元素地球化学[M]. 田丰, 施焯, 译. 北京: 地质出版社, 1989.
- [4] 陈润艳. 稀土污染与环境保护[J]. 金属功能材料, 2019, 26(5): 60-68.
- [5] 张苏江, 张立伟, 张彦文, 等. 国内外稀土矿产资源及其分布概述[J]. 无机盐工业, 2020, 52(1): 9-16.
- [6] 李振民, 刘一力, 孙菊英, 等. 世界稀土需求趋势分析[J]. 稀土, 2017, 38(3): 149-158.
- [7] Liu Q, Liu L, Liu X, et al. Building stock dynamics and the impact of construction bubble and bust on employment in China[J]. Journal of Industrial Ecology, 2021, 25(6): 1631-1643.
- [8] Ciacci L, Vassura I, Cao Z, et al. Recovering the "new twin": Analysis of secondary neodymium sources and recycling potentials in Europe[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 142: 143-152.
- [9] Gloser S, Soulier M, Tercero Espinoza L A. Dynamic analysis of global copper flows. Global stocks, postconsumer material flows, recycling indicators, and uncertainty evaluation[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(12): 6564-6572.
- [10] Wang C, Zhao L, Lim M K, et al. Structure of the global plastic waste trade network and the impact of China's import Ban[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 153: 104591.
- [11] Zhang C, Liu B, Li N, et al. Resource nexus for sustainable development: Status quo and prospect[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 66(26): 3426-3440.
- [12] Wang P, Jiang Z Y, Geng X Y, et al. Dynamic material

- flow analysis of steel resources in China based on circular economy theory[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 813: 64–71.
- [13] 张超, 王韬, 陈伟强, 等. 中国钢铁长期需求模拟及产能过剩态势评估[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(10): 169–176.
- [14] 李新, 任强, 罗胤达, 等. 基于物质流分析的中国机械行业铁资源代谢过程研究[J]. *资源科学*, 2018, 40(12): 2329–2340.
- [15] Chen W Q, Shi L. Analysis of aluminum stocks and flows in mainland China from 1950 to 2009: Exploring the dynamics driving the rapid increase in China's aluminum production[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2012, 65: 18–28.
- [16] Yue Q, Lu Z W. Aluminum flow analysis for the life cycle of aluminum products[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 113–116: 2287–2291.
- [17] Liu G, Müller D B. Mapping the global journey of anthropogenic aluminum: A trade-linked multilevel material flow analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(20): 11873–11881.
- [18] Rauch J N, Graedel T E. Earth's anthropogenic copper cycle[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(2): 1–13.
- [19] Graedel T E, van Beers D, Bertram M, et al. The multilevel cycle of anthropogenic zinc[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9(3): 67–90.
- [20] Graedel T E, Bertram M, Reck B. Exploratory data analysis of the multilevel anthropogenic zinc cycle[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9(3): 91–108.
- [21] Johnson J, Jirikowic J, Bertram M, et al. Contemporary anthropogenic silver cycle: A multilevel analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(12): 4655–4665.
- [22] Johnson J, Schewel L, Graedel T E. The contemporary anthropogenic chromium cycle[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(22): 7060–7069.
- [23] Reck B K, Müeller D B, Rostkowski K, et al. Anthropogenic nickel cycle: Insights into use, trade, and recycling[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(9): 3394–3400.
- [24] Mao J S, Dong J, Graedel T E. The multilevel cycle of anthropogenic lead I. Methodology[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2008, 52(8–9): 1058–1064.
- [25] Yang J, Li X, Xiong Z, et al. Environmental pollution effect analysis of lead compounds in China based on life cycle[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(7): 2184.
- [26] Tang L, Wang P, Graedel T E, et al. Refining the understanding of China's tungsten dominance with dynamic material cycle analysis[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 158: 104829.
- [27] Schneider D W. Book review: *Metabolism of the anthroposphere: Analysis, evaluation, design*[J]. *Journal of Planning Education and Research*, 2013, 33(4): 497–499.
- [28] Du X, Graedel T E. Global in-use stocks of the rare Earth elements: A first estimate[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(9): 4096–4101.
- [29] Du X, Graedel T E. Uncovering the end uses of the rare earth elements[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 461–462: 781–784.
- [30] Fishman T, Myers R, Rios O, et al. Implications of emerging vehicle technologies on rare earth supply and demand in the United States[J]. *Resources*, 2018, 7(1): 9.
- [31] Wang Q C, Wang P, Qiu Y, et al. Byproduct surplus: Lighting the depreciative europium in China's rare earth boom[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(22): 14686–14693.
- [32] Guyonnet D, Planchon M, Rollat A, et al. Material flow analysis applied to rare earth elements in Europe[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 107: 215–228.
- [33] Chen W J, Wang Z H, Gong X Z, et al. Substance flow analysis of rare earth lanthanum in China[J]. *Materials Science Forum*, 2017, 898: 2455–2463.
- [34] 张臻悦, 何正艳, 徐志高, 等. 中国稀土矿稀土配分特征[J]. *稀土*, 2016, 37(1): 121–127.
- [35] Survey U S G. Mineral commodity summaries 2019[EB/OL]. [2022–05–20]. <https://www.usgs.gov/search?keywords=Mineral+commodity+summaries+2019>.
- [36] Comtrade U N. International trade statistics database[EB/OL]. [2022–05–20]. <https://comtrade.un.org>.
- [37] 中华人民共和国工业和信息化部. 稀土产业发展计划(2016—2020年)[EB/OL]. [2022–05–20]. http://www.gov.cn/xinwen/2016–10/18/content_5120998.htm.
- [38] 张晓微, 黄颖莎. 光学行业研究报告[EB/OL]. [2022–

- 05-20]. <https://www.tfzq.com/ueditor/php/upload/file/201-80417/1523929030331344.pdf>.
- [39] 张文毓. 稀土催化材料的研究进展与应用[J]. 精细石油化工进展, 2020, 21(3): 35-39, 53.
- [40] 赖新暖, 宰云肖, 韩建崑, 等. 混合电动汽车用镍氢动力电池的寿命试验[J]. 广东化工, 2013, 40(12): 58-59.
- [41] 周亚辉, 周松涛, 周敏. 钢铁企业滚动轴承使用寿命探讨[J]. 机械管理开发, 2018, 33(8): 78-79, 112.
- [42] 孔令文. 数码相机电池如何延寿[J]. 山东农机化, 2010(2): 32.
- [43] 苏利平, 高爽. 改革开放四十年以来稀土产业政策演进历程与启示展望[J]. 中国矿业, 2021, 30(5): 20-26, 35.
- [44] 贾涛, 刘小芳. “新中国70年”中国稀土产业回顾与展望[J]. 稀土信息, 2019(9): 12-19.
- [45] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的稀土状况与政策(白皮书) [EB/OL]. [2022-10-20]. <http://www.scio.gov.cn/ztk/dtzt/7773/Document/1175752/1175752.htm>.
- [46] 苏晓云, 郭莉芳. 我国汽车尾气净化稀土催化剂研究应用现状及发展趋势[J]. 稀土, 2006, 27(5): 3.
- [47] 张莉, 孙兆林, 王久江, 等. 稀土在催化裂化领域中的研究进展[J]. 稀土, 2020, 41(3): 117-128.
- [48] 曹生彪, 皇甫益. 混合动力汽车用镍氢电池的现状及发展分析[J]. 电池, 2016, 46(5): 289-291.
- [49] Hu X, Wang C, Zhu X, et al. Trade structure and risk transmission in the international automotive Li-ion batteries trade[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 170: 105591.
- [50] 墨柯. 锂电市场发展回顾及趋势预测[J]. 新材料产业, 2015(9): 2-7.
- [51] 易璐, 郑明贵. 中国稀土开采总量控制政策效应评估[J]. 有色金属科学与工程, 2021, 12(2): 120-126.
- [52] 王慧娟, 缪羽. 稀土元素镧在医学领域的应用与研究[J]. 内蒙古医学杂志, 2020, 52(3): 278-280.
- [53] 崔小明. 稀土化合物在橡胶领域中的应用研究进展[J]. 橡胶科技, 2015, 13(9): 11-16.
- [54] 唐定骧, 涂铭旌, 陈云贵, 等. 铜镧铈新型混合稀土金属应用研究进展[C]//中国稀土学会第四届学术年会. 北京: 中国稀土学会, 2000: 709-715.
- [55] Bhandari C, Flatté M E, Paudyal D. Enhanced magnetic anisotropy in lanthanum M-type hexaferrites by quantum-confined charge transfer[J]. Physical Review Materials, 2021, 5(9): 094415.
- [56] Wang P, Wang H, Chen W Q, et al. Carbon neutrality needs a circular metal-energy nexus[J]. Fundamental Research, 2022(3): 392-395.
- [57] 刘贵清, 曲志平, 张磊. 从废催化剂中回收稀土的现状与展望[J]. 中国资源综合利用, 2014, 32(6): 27-29.
- [58] 刘腾, 邱兆富, 杨骥, 等. 废FCC催化剂的形态、成分分析及环境风险评估[J]. 无机盐工业, 2016, 48(11): 71-74.
- [59] 张宏哲. 催化裂化废催化剂综合利用技术[J]. 化工进展, 2016, 35(增刊2): 358-362.
- [60] 赵哲萱, 邱兆富, 杨骥, 等. 从废FCC催化剂和废汽车尾气净化催化剂中回收稀土的研究进展[J]. 化工环保, 2015, 35(6): 603-608.
- [61] 苑志伟, 孟佳, 赵世伟. 从废FCC催化剂中回收稀土的研究[J]. 石油炼制与化工, 2010, 41(10): 33-39.
- [62] Zhou Y, Schulz S, Lindoy L F, et al. Separation and recovery of rare earths by in situ selective electrochemical oxidation and extraction from spent fluid catalytic cracking (FCC) catalysts[J]. Hydrometallurgy, 2020, 194: 105300.
- [63] Wang J Y, Huang X W, Wang L S, et al. Kinetics study on the leaching of rare earth and aluminum from FCC catalyst waste slag using hydrochloric acid[J]. Hydrometallurgy, 2017, 171: 312-319.

Dynamic material flow analysis and supply and demand management of lanthanum in China

ZHAO Shen¹, WANG Xin², WANG Heming², WANG Peng^{3,4}, WANG Lu^{1*}, YUE Qiang², DU Tao², CHEN Weiqiang^{3,4*}

1. Ganjiang Institute of Innovation, Chinese Academy of Sciences, Ganzhou 341000, China
2. State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-Industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China
3. Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to reveal the changing trend of lanthanum material flow in China and describe its trade pattern, this paper constructs a dynamic material flow analysis framework for lanthanum that simulates the flow of lanthanum in the whole life cycle and analyzes the flow of lanthanum in China in terms of inventory, and supply and demand from 1990 to 2018. The results show that: 1) 96% of China's lanthanum supply came from domestic mining, of which 77% came from Bayan Obo ores and bastnaesite ores; 2) lanthanum has a wide variety of functional materials, and the most of the 28-year cumulative amount of lanthanum were used in petroleum cracking catalysts that consumed 47% of the total application of lanthanum; 3) from 1990 to 2018, China exported 292,000 tons of lanthanum, mainly smelting and separating products, to other countries; and 4) between 1990 and 2018, China's lanthanum was generally in excess but a small amount of insufficient supply occurred in 2013–2017 due to the significant export of lanthanum oxide and the growth of downstream applications, which was conducive to reducing inventory and promoting supply and demand balance. Based on these results this study suggests vigorously developing new materials and expanding new applications based on consolidating existing downstream consumption. In addition, to prevent environmental pollution, it is necessary to establish a recovery mechanism for waste petroleum cracking catalysts as soon as possible and formulate relevant laws and regulations.

Keywords lanthanum; rare earth; material flow analysis; supply and demand relationship ●



(责任编辑 刘志远)