

# 中国稀土镨元素的供需失衡问题 ——基于镨的物质流分析

李新宇<sup>1</sup>, 汪鹏<sup>2,3\*</sup>, 王路<sup>4</sup>, 王鹤鸣<sup>1\*</sup>, 岳强<sup>1</sup>, 杜涛<sup>1</sup>, 陈伟强<sup>2,3</sup>

1. 东北大学国家环境保护生态工业重点实验室, 沈阳 110819
2. 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
3. 中国科学院大学, 北京 100049
4. 中国科学院赣江创新研究院, 赣州 341000

**摘要** 基于动态物质流分析方法,以1990—2018年为时间边界,以中国大陆为空间边界,对镨的全生命周期流动情况和供需失衡问题进行了分析。结果表明:(1) 1990—2018年中国累计开采超10万t的镨供下游产业应用,其中钕铁硼领域用镨量(6.9万t)占镨总用量的70%;(2) 2009年以前,中国的镨供应充足(未登记消费3.1万t),2009年之后镨供应缺口逐年增大(未登记生产2.4万t);(3) 镨的进口量和出口量均在增长,其中进口以稀土矿和镨的中间产品为主,出口以镨的中间产品和最终产品为主;(4) 截至2018年镨的在用存量超过了3.7万t,其中有23%在空调、电声耳机和磁选机中,但回收不足。研究建议:(1) 提升镨的回收能力,重点关注即将迎来报废高峰期的空调、电声耳机、磁选机、电机和消费电子;(2) 优化镨贸易结构,提升镨贸易价值,加大镨原矿及初级产品进口,并适当控制其出口,以缓解镨供应压力来解决供需失衡问题;(3) 合理布局低碳产业发展并通过探索钕铁硼永磁体替代产品推动去镨钕技术发展。

**关键词** 镨;物质流分析;钕铁硼;稀土;产业生态学

镨,是一种轻稀土元素,为银白色,质较软,有延展性。镨在地壳中的含量约为 $9.5 \times 10^{-6}$ ,主要存

在于独居石和氟碳铈矿中,通常被用于钕铁硼永磁体制造。镨的添加,可以提高钕铁硼永磁体的矫顽

收稿日期:2022-06-03;修回日期:2022-09-19

基金项目:国家自然科学基金项目(41871204,52070034)

作者简介:李新宇,硕士研究生,研究方向为工业生态学,电子信箱:lixinyu\_2019@hotmail.com;汪鹏(通信作者),副研究员,研究方向为金属-能源关联系统建模与分析,电子信箱:pwang@iue.ac.cn;王鹤鸣(共同通信作者),教授,研究方向为工业生态学,电子信箱:wangheming2006@gmail.com

引用格式:李新宇,汪鹏,王路,等. 中国稀土镨元素的供需失衡问题——基于镨的物质流分析[J]. 科技导报, 2022, 40(21): 55-65; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.21.006

力、抗氧化性能和机械性能。镨最重要的应用在于稀土永磁领域。此外,镨在冶金、抛光粉、玻璃陶瓷、汽车催化剂、储氢材料等领域均有应用。中国的稀土储量丰富,这为今后持续发展镨产业提供了坚实的资源基础<sup>[1]</sup>。中国不仅是稀土镨储量大国,也是稀土镨开采量大国<sup>[2]</sup>。中国在2019年的稀土镨矿产量为13万t,占当年全球总开采量的62%。如今,由于国家“十四五”规划中相关战略需要,镨变得愈发重要。制造业升级、推动稀土高端功能材料发展和碳减排是中国“十四五”规划的目标。钕铁硼永磁体由于其良好的磁积能被广泛应用于风电、工业机器人、节能家电、新能源汽车、消费电子等低碳产业部门。这些低碳产业不仅是中国制造业升级的要求,同时也是中国实现碳中和目标重要的基础。镨的重要地位逐渐显现的同时,中国镨相关产业发展也面临着诸多问题,如定价权缺失<sup>[3-5]</sup>、产业发展不平衡<sup>[6]</sup>、环境问题凸显<sup>[7]</sup>等。因此,开展稀土镨的物质流分析研究极其重要。

针对稀土镨元素的物质流分析主要包括稀土镨的流量和存量核算、未来需求预测和回收潜力分析。目前已有研究核算了全球和欧盟的稀土镨元素的流量和存量<sup>[8-10]</sup>。随着镨的战略地位不断提高,针对稀土镨的研究不仅着眼于流量、存量的核算<sup>[11]</sup>,而且会预测稀土镨的未来用量<sup>[12-13]</sup>。预测稀土镨未来用量的研究不仅涉及全行业<sup>[14-15]</sup>,还会涉及新能源汽车、风电等具体行业<sup>[16-18]</sup>。此外,稀土镨的回收和供应安全也是研究重点<sup>[15]</sup>。这些研究不仅分析了所有用镨行业的镨回收潜力<sup>[19-22]</sup>,还分析了钕铁硼<sup>[23]</sup>、电子设备<sup>[24]</sup>等重点行业的镨回收潜力。然而,从中国的镨产业链看,对镨整个生命周期的流量和镨在用存量核算的相关研究仍存在不足。

物质流分析是研究一定区域内某种特定物质工业代谢的重要工具<sup>[25-27]</sup>。它不仅可以定量分析特定物质流动<sup>[28]</sup>,如铁<sup>[29]</sup>、铜<sup>[30-32]</sup>、铝<sup>[33-34]</sup>等,而且与资源效率<sup>[35]</sup>、循环经济<sup>[36]</sup>、供应链优化<sup>[37-39]</sup>、国际贸易<sup>[40-42]</sup>等紧密相关。本研究基于动态物质流方法,以1990—2018年为时间边界,以中国大陆为空间

边界,对镨的生产、冶炼、制造、消费、使用、废弃回收全生命周期流动情况进行核算,并分析镨的供需失衡情况、在用存量和对外贸易情况。

## 1 研究方法和数据来源

### 1.1 研究方法概述

以中国大陆为空间边界,核算镨的整个生命周期的存量和流量,所有的存量和流量均以镨金属当量来计算。镨的生命周期分为采矿选矿、冶炼分离、中间产品加工、产品制造、产品使用、产品回收6个阶段。镨从地壳中以混合物的形式被开采出来,经过选矿、分离、精炼等步骤被处理成镨金属、镨氧化物、镨的其他化合物进而制造中间产品和最终产品。这些产品主要集中于钕铁硼永磁体、冶金、抛光粉、汽车催化剂、玻璃陶瓷、储氢材料等领域。由于镨在钕铁硼永磁体领域的应用最多,本研究重点对其进行展示。

### 1.2 数据来源

涉及的数据可分为生产数据、损失率数据、贸易数据、镨含量数据、寿命数据。这些数据主要来自于:个人或机构的研究成果,如文献资料、商业数据库、券商报告、咨询公司报告等;具体数据和来源见表1。出现数据缺失时,根据已有数据进行线性拟合。此外,表1中的中国稀土年鉴信息主要是“国家计委稀土办公室”发布的1991—2019年的《中国稀土年鉴》,镨产品生产数据的统计数据来源于中部分数据来自于中国统计局发布的1991—2019年的《中国统计年鉴》。分析框架如图1所示。

表1 数据来源

数据类型	数据来源
镨产品生产数据	中国稀土信息年鉴,行业报告 <sup>[43-46]</sup> ,文献[18,47-64]
损失率数据	文献[18]
镨相关产品贸易数据	市场报告 <sup>[43]</sup> , UN Comtrade Database, 文献[65-66]
镨含量数据	文献[47,67-70]
寿命数据	文献[43,47,67,69-70]

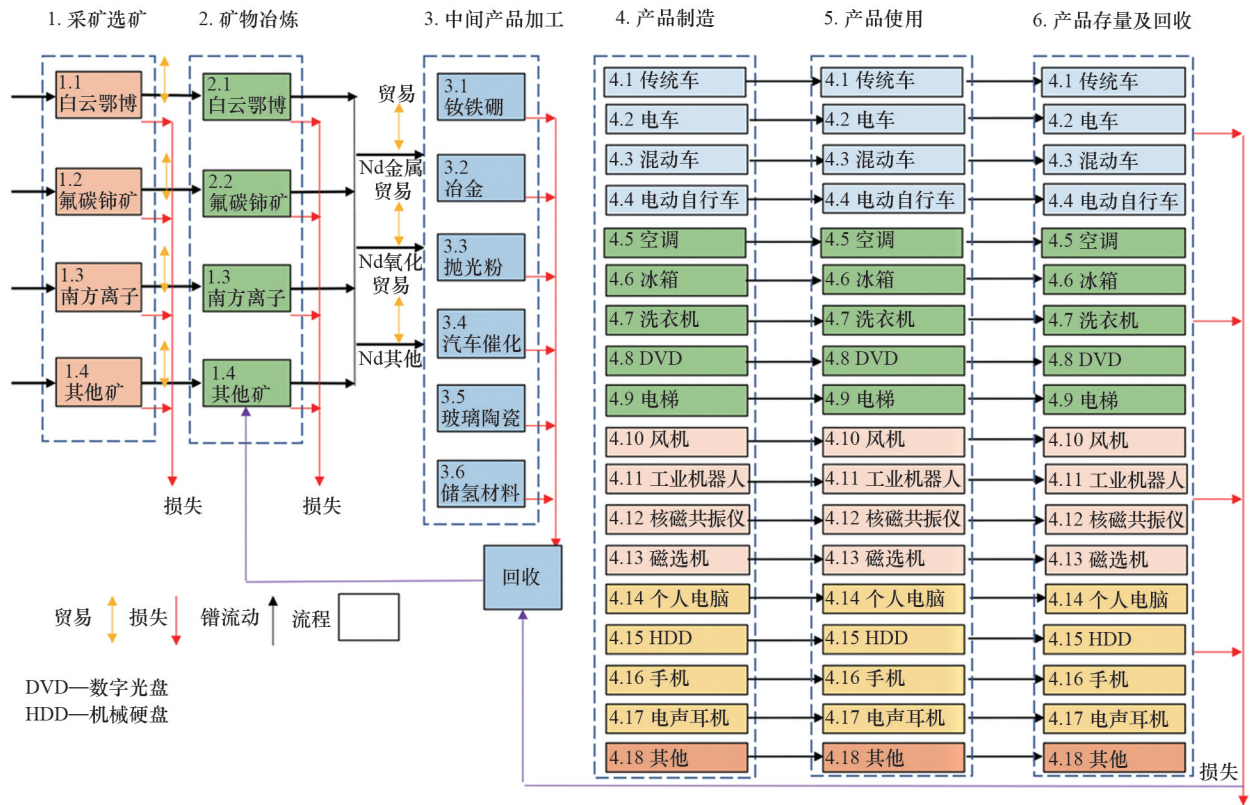


图1 1990—2018年镨物质流分析框架

### 1.3 计算方法

稀土物质流分析遵循质量守恒原则。镨的各生命周期的流量平衡公式为

$$\text{inflow}_t^{n+1} = \text{outflow}_t^n = \text{inflow}_t^n + \text{import}_t^n - \text{output}_t^n - \text{loss}_t^n \quad (1)$$

式中,  $n$  为物质生命周期阶段;  $t$  为年份;  $\text{inflow}$  为某阶段物质流入量;  $\text{outflow}$  为某阶段物质流出量;  $\text{import}$  为某阶段物质进口量;  $\text{export}$  为某阶段物质出口量;  $\text{loss}$  为某阶段物质损失量。

研究中所有的流量和存量分为5组。

1) 贸易流: 各生命周期阶段的贸易流(进口和出口)由某产品贸易量和该产品的镨含量系数相乘得到。

2) 损失流: 各生命周期阶段的损失流由各阶段产品流入量和损失系数得到。

3) 镨流动: 镨的流动遵循式(1)。

4) 供需失衡: 采矿选矿、冶炼分离2个阶段的流量以镨矿石开采量为基础根据自上而下的物质流分析方法核算。中间产品加工、产品制造、产品

使用、产品回收4个阶段的流量以中间产品产量为基础自上而下核算。因此, 冶炼分离阶段的镨流出量和中间产品加工阶段的镨流入量会存在差异, 这一定程度上体现了实际的供需失衡。

5) 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的, 存量和废弃物流出量的计算公式为

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

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

$$S_{t_1} = \sum_{i=1}^q S_{i,t_1} \quad (4)$$

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  $i$  中含有的镨存量, 假设  $S_{i,t_0} = 0$ ;  $F_{i,t}^{\text{in}}$ 、 $F_{i,t}^{\text{out}}$  分别为使用阶段镨的流入量和流出量;  $P_{i,m}$  为产品  $i$  服务  $m$  年的概率, 可用正态分布或威布尔分布估计(分布选择取决于产品);  $S_{t_1}$  为给定年份  $t_1$  的总使用镨库存, 是所有最终产品 ( $q$  种产品) 的库存之和。

## 2 结果与分析

中国稀土镨的总物质流分析结果展示了1990—2018年中国镨的供应、消费、贸易、损失的总体情况(图2)。从供应端来看,1990—2018年中国累

计开采了9.9万t镨用于冶炼分离,加上0.3万t的净进口量,已有超过10.2万t的镨从源头上进入镨产业链。经过冶炼分离后,共计9.8万t的镨被用于中间材料加工或直接用于产品制造。

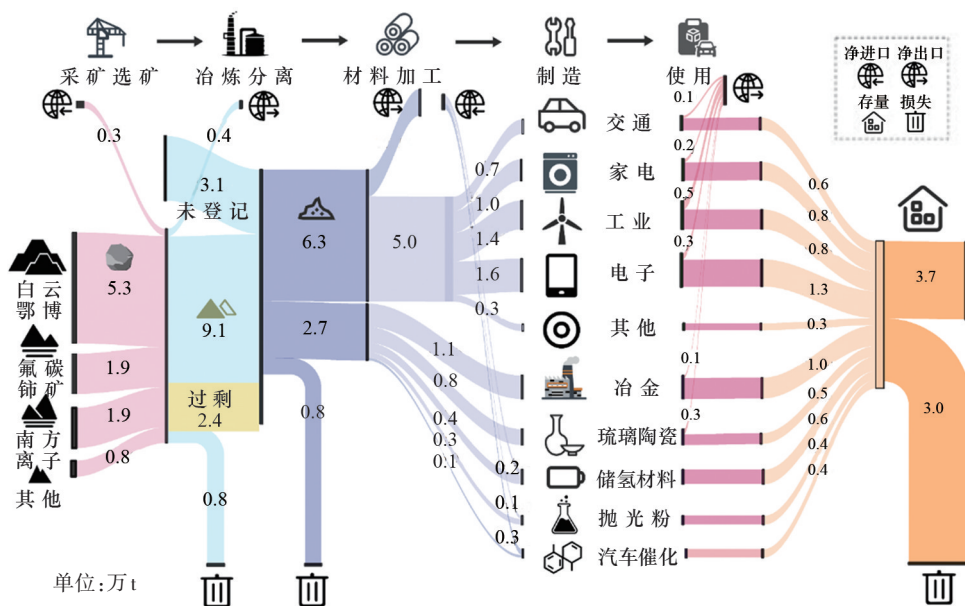


图2 1990—2018年镨物质流分析

从消费端来看,研究时间段内累计有6.3万t的镨被用于钕铁硼制造,占镨总供应量的70%。冶金领域由于稀土钢、热阻合金、发火合金的制造需求占据了镨消费总量的12%。此外,玻璃陶瓷、储氢材料、抛光粉、汽车催化剂领域的镨累计用量占比分别为8%、5%、3%、2%。共有5.0万t的镨随永磁体进入其下游产品制造阶段。永磁体下游产品集中在消费电子、工业、家电、交通4个领域,且它们的镨用量占比分别为32%、27%、21%、14%。镨的所有下游产品经过使用和废弃,总在用存量为3.7万t,废弃量为3.0万t。

### 2.1 镨的生产及供应

镨的生产应重点关注总产量的变化和供应结构变化。中国的镨供应量总体上呈现先增长、后下跌,最后回暖的趋势(图3(a))。从1990年(691 t)开始,镨的产量逐年增加,到2006年(0.5万t)达到顶峰。中国的镨产量从2010年开始下跌,直到2015年才开始再次明显增长。中国镨的生产仍然

以国内自给为主,净进口仅为0.3万t。“北轻南重”的中国稀土供应格局,使得白云鄂博矿一直是最大的镨供应矿,总体供应占比为54%。多年来,氟碳铈矿和南方离子矿的镨供应量占比均为19%,其中氟碳铈矿的镨供应量相对稳定,但南方离子矿的镨供应量从2011年开始萎缩。其他矿的镨供应集中于2009—2017年,总体占比为8%。因此,按目前的供应格局,今后中国的镨供应将主要依赖白云鄂博矿和氟碳铈矿。

镨冶炼产量变化与其生产变化趋势基本一致(图3(b))。镨的冶炼产品主要被用于中间产品的加工。图3(c)展示了中间产品加工用镨量变化和其加工结构。用于中间产品加工的镨用量以10年为阶梯呈现出3次增长变化:(1) 1990年(281 t)开始,到2000年超过了0.1万t;(2) 2010年超过了0.5万t;(3) 2018年突破了1.0万t。1990—2018年,中间产品的累计用镨量为9.8万t,其中70%(6.9万t)被用于钕铁硼永磁体领域。多年来,永磁体领域的

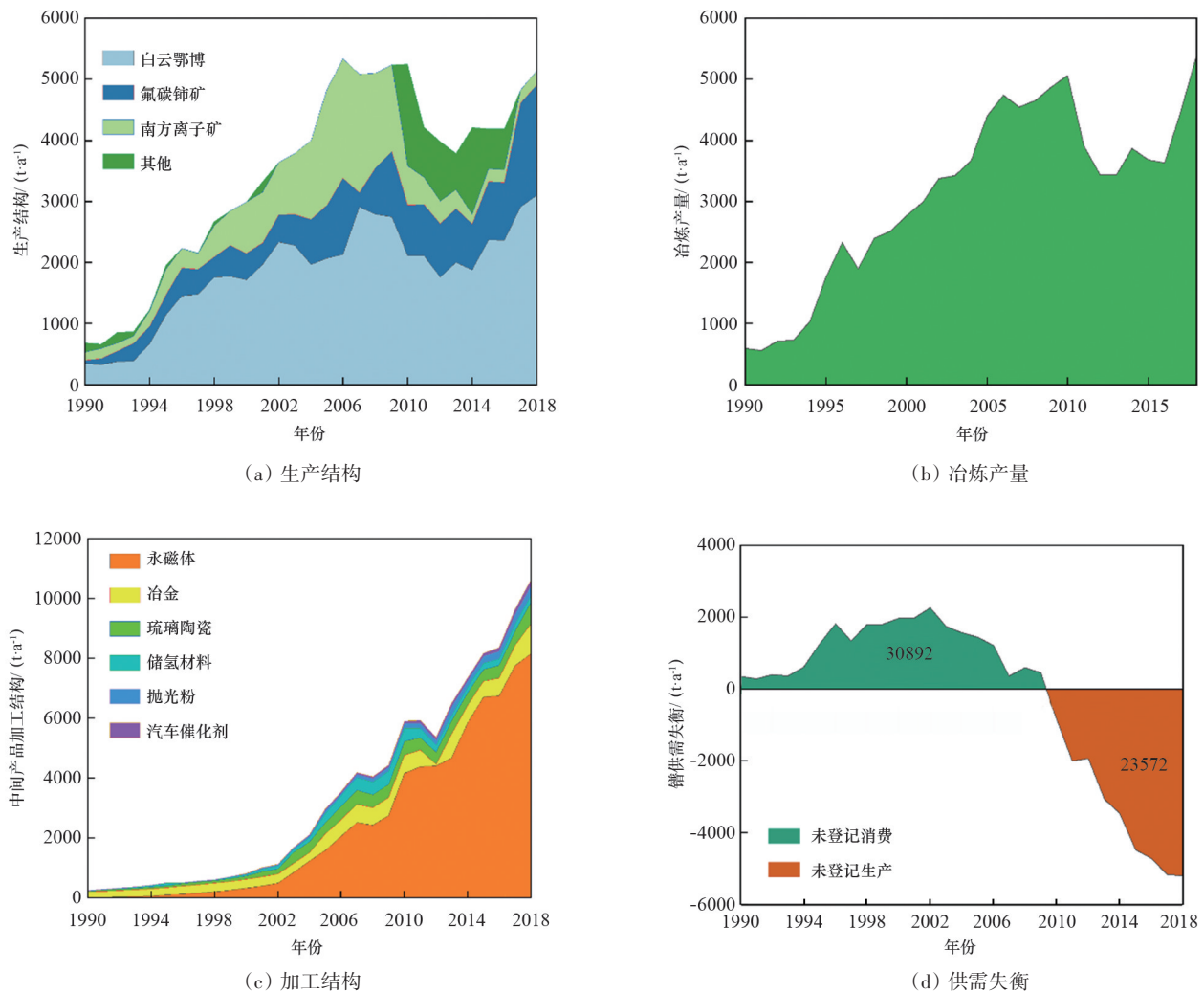


图3 1990—2018年中国稀土镧的供应及失衡

镧用量逐年递增,而其他领域的镧用量却保持稳定。因此,永磁领域已成为拉动镧产业发展的主要动力,这也给镧的供应带来了挑战。

## 2.2 镧的消费-最终产品制造

镧在钕铁硼领域的用量占镧总用量的比例将不断提升。与图3(c)展示的中间产品的镧含量不同,图4(a)展示了1990—2018年镧的中间产品用于产品制造的镧的变化趋势。1990—2018年,累计7.76万t的镧被用于产品制造,其中65%被用于钕铁硼下游产品制造。冶金领域的用量占镧总用量的13%,总体镧用量稳定,仅在2010年出现了下跌(图4(a))。玻璃陶瓷、储氢材料、抛光粉、汽车催化剂的镧用量占比分别为10%、6%、4%、2%。

钕铁硼下游产业集中于消费电子、工业、家电、交通4个领域。消费电子和工业领域的镧消耗量分别为1.6万、1.4万t(图4(b))。在消费电子领域,手机、HDD(hard disk drive)、个人计算机(PC)、电声耳机镧用量占比分别为14%、20%、17%、49%。随着技术的进步,镧在消费电子领域的应用逐渐高端化,在电声耳机的应用比重将逐渐加大。在工业领域,镧主要应用于风电、工业机器人、MRI(magnetic resonance imaging)、磁选机4种产品。这些产品涉及清洁能源、医疗、高端制造业等领域,足见镧的重要性。MRI和磁选机对钕铁硼的应用起步较早<sup>[47,57]</sup>,占比分别为29%、40%。风电和工业机器人的镧消费量占比分别为15%、16%。尽管对钕铁硼

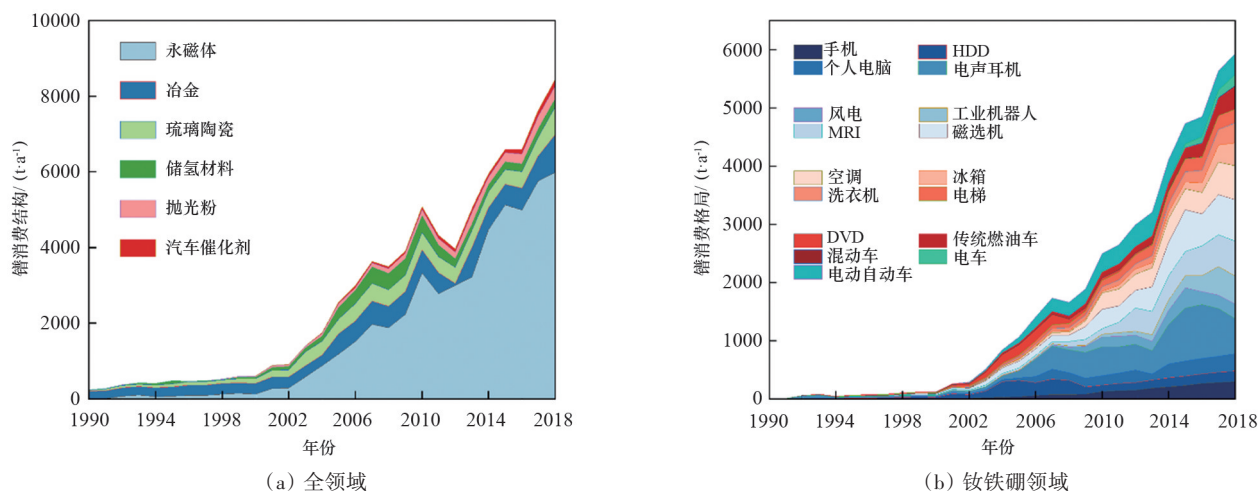


图4 1990—2018年锆的消费结构

的使用从2000年左右才开始起步<sup>[68]</sup>,但它们的快速发展将会对锆的供应提出挑战。

家电和交通领域的锆消费量分别为1.0万、0.7万t(图4(b))。在家电领域,空调、冰箱、洗衣机、电梯、DVD(digital video disk)这5种产品的锆消费量占比分别为36%、14%、17%、21%、11%。相比于电梯,空调、冰箱和洗衣机对钕铁硼的大量应用起步较晚,是从2000年以后开始的<sup>[56,69]</sup>。锆是家电走向高端化、节能化必不可少的金属。DVD在中国兴起于20世纪末,在2010年以后逐渐衰落。如今,由于国内DVD的产量很少,其锆用量也少。锆在交通领域主要应用于传统燃油车、新能源车、电动自行车3种产品,它们的锆消费量占比分别为30%、18%、62%。传统车和电动自行车经过多年发展,已经过了产品爆发增长时期,逐渐趋于稳定。“碳中和”背景下的新能源汽车正迎来发展的契机<sup>[70]</sup>,表明在高端产品领域锆将逐渐发挥优势。

### 2.3 锆的供需失衡分析

总体上看,锆的供需失衡应考虑国内供应(包括原生供应和次生供应)和海外供应,但考虑到数据可获得性,即基于本研究分析的在用存量无法准确直接地得出锆的次生供应(回收利用)量,因此本研究的锆供需失衡分析只考虑了国内原生供应和海外供应情况。

通过对比锆的冶炼产量(图3(b))和中间产品加工用锆量(图3(c))发现锆存在供需失衡情况(图3(d))。2009年以前锆的冶炼产量高于其中间

产品加工消费量,存在3.1万t未统计的锆消费。相反,从2009年开始,存在2.4万t未登记的锆生产。供需失衡的出现表明了中国应加强锆的开采和使用的统筹管理。此外,供需失衡情况的出现主要基于2个方面的原因:一方面,南方离子矿的供应萎缩和白云鄂博矿的供应下降导致了2009年以后锆的供应缺失。另一方面,由于钕铁硼下游产品大多是绿色的高端产品,随着技术发展与战略需要,这些产品的用锆潜力得到了释放。因此,未来的锆供应压力会逐步增大。

### 2.4 锆贸易结构及其演变分析

总体上看,1990—2018年,中国的锆进口量和出口量都呈现上升趋势(图5)。1990年中国的锆进口量仅为8t,到2018年中国的锆进口量超过了2200t。锆的进口量仅在1997年、2011年、2012年、2015年出现了下降(图5(a))。从进口结构来看,中国的锆进口主要集中于稀土金属矿和中间产品。虽然中国的锆进口量增长较大,但仍然难以保障中国的锆供应安全。因此,需要继续加大锆的进口,特别是稀土金属矿的进口。

锆的出口量在2000年以后超过了进口量。总体上中国的锆出口总量是进口总量的1.9倍。中国的锆出口量呈现出了3个明显的发展阶段:(1)1990—2000年处于稳中有升的阶段;(2)2002—2010年处于快速增长阶段;(3)2010年以后锆出口量处于较高水平且稳中有升(图5(b))。从结构上看,锆的中间产品和最终产品是锆的主要出口产

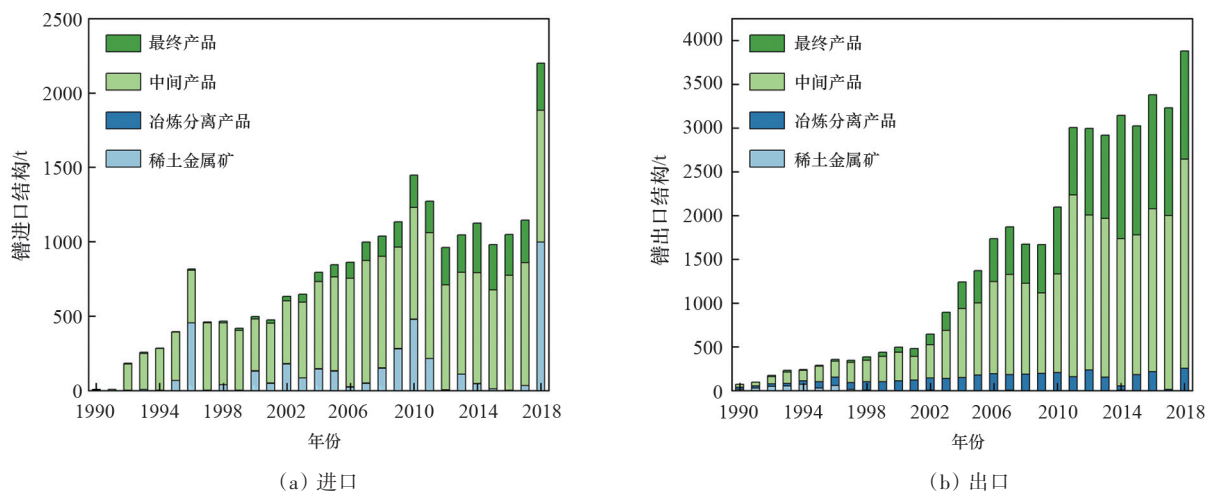


图5 中国1990—2018年镨资源进出口情况

品形式。因此,中国应适当减少镨的出口,特别是减少镨的冶炼产品和中间产品的出口,如钕铁硼永磁体等。

## 2.5 镨的在用存量及回收

目前中国的镨在用存量较多,具备很大的回收潜力和回收价值。2004年以后,镨的在用存量开始快速增长。截至2018年,中国的镨在用存量已经超过了3.7万t(图6(a))。鉴于目前镨的高昂价格,其在用存量的价值非常高。镨的存量有68%集中于钕铁硼的下游产品中。即将迎来报废高峰

期的空调、电声耳机和磁选机是镨在用存量最多的3种产品,分别占镨总在用存量的8%、8%、7%(图6(b))。此外,电动自行车、风机、工业机器人、其他消费电子(HDD、PC、手机)也将迎来报废高峰期。因此,针对以上产品中的镨回收应该是未来的回收重点,也是需要优先规划的镨回收产品。考虑到目前这些废弃产品中的镨回收比例很小,主要是受限于相关的回收技术<sup>[8]</sup>,针对废弃电子产品和电机中的镨回收技术需要提高<sup>[71]</sup>。镨的回收将会是保障中国镨供应安全的有力措施。

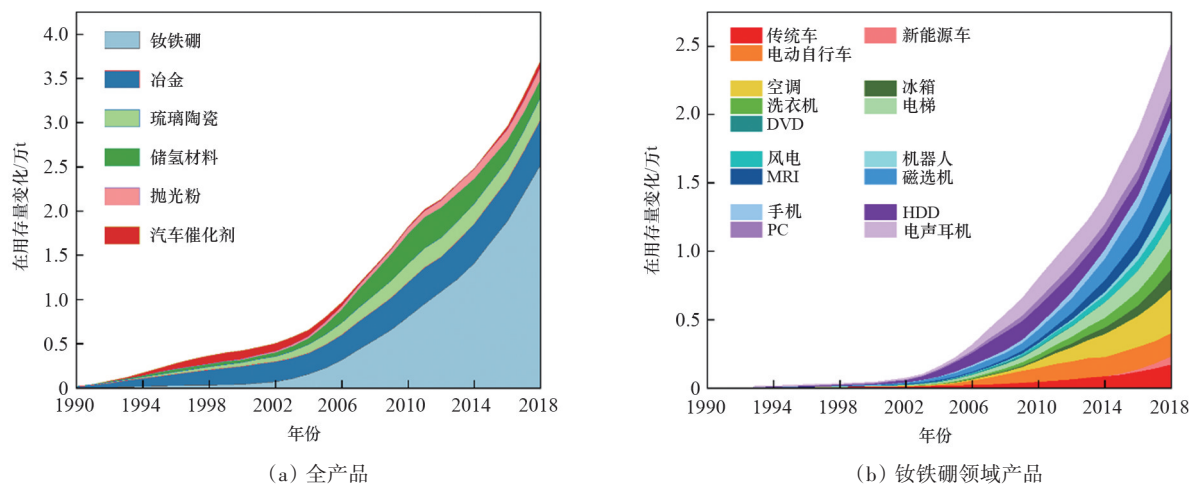


图6 1990—2018年镨存量变化

## 3 讨论

在分析了1990—2018年中国镨的全产业链情况后,发现中国稀土镨元素存在供需失衡问题。在

2009年以前,中国的稀土镨元素供大于求,存在3.1万t未登记的镨消费。且在这一时期,过剩量总体上先增后减。而在2009年以后,中国的稀土镨元素供不应求,且供应缺口逐年增大。

中国的稀土镨元素的供需失衡主要是由于镨下游产品对镨的需求逐年增加,然而白云鄂博矿和氟碳铈矿的镨产量没有明显提升。从产量上来看,2006年,中国的镨生产量达到了0.5万t。2006年以后,镨的生产量非但没有上升,反而在2011年(0.4万t)出现了大幅下跌。镨供应骤降是由于南方离子矿和白云鄂博矿的镨供应下降。2018年,中国的镨生产量为0.5万t,其中96%来自于氟碳铈矿(35%)和白云鄂博矿(61%)。考虑到白云鄂博矿和氟碳铈矿的镨产量趋于稳定,将难以应对国内旺盛的镨需求。

今后镨的供需失衡问题主要体现在镨的供应不足。因此,中国需要从镨的国内供应、贸易、存量回收3方面缓解镨的供应不足。

首先,考虑到今后镨的国内供应将主要依赖白云鄂博矿和氟碳铈矿,建议:(1)加大镨的开采管理和使用管理以实现镨供应矿的高效利用;(2)提升镨在开采及生产过程中的废料回收技术,制定相应的回收政策规范。

其次,镨贸易结构的优化将是缓解中国镨供应压力的重要措施。1990—2018年,中国的镨进口量和出口量总体上均处于上升趋势。为了保障中国的镨供应安全,应该加大镨的进口,减少镨的出口。本研究结果显示中国的镨出口总量是镨进口总量的1.9倍。因此,需要优化中国的镨贸易结构。建议:(1)适当加大稀土金属矿进口力度,特别加大镨的冶炼产品的进口力度;(2)减少镨冶炼产品和中间产品的出口,提升镨贸易价值。

最后,镨的回收也将是中国缓解镨供应压力的有力措施。截至2018年,中国的镨在用存量规模已经达到了3.7万t,相当于当前中国7年的镨生产总量。鉴于目前镨的价格已经超过了100万元/t,废弃产品中的镨将拥有极高的回收价值。钕铁硼下游产品的镨在用存量占在用总存量的68%,也是镨回收的重点。目前,电动自行车、节能家电、风机、磁选机、工业机器人、消费电子都将迎来产品报废高峰期,因此,需要优先将这些产品纳入镨回收计划。然而,目前镨的回收受到了技术的限制。建议:(1)加大镨下游产品制造时的镨废料回收;

(2)优先将电动自行车、节能家电、风机、磁选机、工业机器人、消费电子纳入镨回收计划产品;(3)提升废弃消费电子产品和电机中的镨回收技术。

镨的供应压力的缓解,不仅要从供应端去解决,而且要从消费端去考虑。从消费端缓解镨的供应压力,就要优化镨消费结构并发展去镨钕技术。多年来,镨在冶金、抛光粉、玻璃陶瓷、汽车催化剂、储氢材料这些领域的用量基本保持稳定,未来带动镨相关产业发展的将是钕铁硼永磁体领域和其他潜在应用领域,如光纤领域等。未来,新能源汽车、风电、节能家电、工业机器人、消费电子类产品的相关产业的规模将逐步扩大,这将对镨的供应提出挑战。建议:推动永磁相关低碳产业协调发展并探索钕铁硼替代产品来推动去镨钕技术的发展,加大相应科研投入力度,促进镨钕减量永磁材料技术的进步及其商业化、规模化应用。

## 4 结论

以动态物质流方法核算了1990—2018年中国稀土镨元素基于全生命周期的流量。中国累计提供了超过10万t的镨用于下游使用,其中54%来源于白云鄂博矿。经过冶炼之后,有9.8万t的镨被用于中间产品加工,其中70%被用于钕铁硼永磁体的制造。经过贸易后,供最终产品使用的镨总量为7.8万t,其中65%被用于钕铁硼下游四大类产品(车辆、家电、工业、消费电子)的制造。最终产品经过贸易,报废后流出系统外。此外本研究也分析了中国镨的在用存量和贸易情况。目前,中国镨的在用存量已经超过了3.7万t,具有很高的回收价值。1990—2018年,中国镨的进口量和出口量均呈上升趋势,且累计出口总量为累计进口总量的1.9倍。

研究发现国内镨供需失衡问题主要是由中国日益不足的镨供应和日益旺盛的镨需求造成的。因此,结合得到的结论从供应端和消费端对供需失衡问题的解决提供支持。从供应端来看,保障镨国内生产、优化镨贸易结构、做大做强镨的回收都是保障中国镨供应安全的有效措施。多年来,国内的镨供应处于供应源减少和供应潜力不足的困境。目前国

内的镨供应主要依赖白云鄂博矿和氟碳铈矿,且它们的供应能力无明显的提升。因此需要加强镨的开采和使用管理,并且加大镨的进口力度。加大稀土金属矿和镨的冶炼产品的进口力度并且减少镨的中间产品和冶炼产品的出口,不仅能缓解镨供应压力,还能提升贸易价值。考虑到目前镨的存量规模可观,镨的回收也是缓解中国镨供应压力的有力措施。本研究建议重点关注即将迎来报废高峰期的空调、磁选机、消费电子产品和电机等产品中镨的回收。从消费端,建议优化镨消费结构,合理规划新能源汽车、风机等低碳产业的发展规模来缓解镨供应压力。同时,建议探索钕铁硼替代产品推动去镨钕技术的发展,以减少对稀土镨的依赖。

#### 参考文献(References)

- [1] 林河成. 金属镨的生产及其应用发展[J]. 金属世界, 2007(2): 52-55.
- [2] 中国的稀土状况与政策[EB/OL]. (2020-01-20)[2022-05-16]. <https://www.docin.com/p-2299035750.html>.
- [3] 周代数, 李小芬, 王胜光. 国际定价权视角下的中国稀土产业发展研究[J]. 工业技术经济, 2011, 30(2): 73-77.
- [4] 宋文飞, 李国平, 韩先锋. 稀土定价权缺失、理论机理及制度解释[J]. 中国工业经济, 2011(10): 46-55.
- [5] 刘刚. 中国大宗商品定价权缺失问题探析: 以国际市场铁矿石与稀土定价为例[J]. 价格理论与实践, 2009(11): 25-26.
- [6] 郭咏梅, 杨丽, 张文灿. 稀土不稀 重在创新应用[J]. 稀土信息, 2020(7): 10-18.
- [7] 白丽娜, 隋文力, 林忠. 白云鄂博矿在稀土和钢铁生产中放射性对周围环境的影响[J]. 稀土, 2004, 25(4): 75-77.
- [8] Du X, Graedel T E. Uncovering the global life cycles of the rare earth elements[J]. Scientific Reports, 2011, 1: 145.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Alonso E, Sherman A M, Wallington T J, et al. Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(6): 3406-3414.
- [13] Li J, Peng K, Wang P, et al. Critical rare-earth elements mismatch global wind-power ambitions[J]. One Earth, 2020, 3(1): 116-125.
- [14] Elshkaki A, Shen L. Energy-material nexus: The impacts of national and international energy scenarios on critical metals use in China up to 2050 and their global implications[J]. Energy, 2019, 180: 903-917.
- [15] Wang P, Li W, Kara S. Dynamic life cycle quantification of metallic elements and their circularity, efficiency, and leakages[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 174: 1492-1502.
- [16] Elshkaki A. Long-term analysis of critical materials in future vehicles electrification in China and their national and global implications[J]. Energy, 2020, 202: 117697.
- [17] Li X Y, Ge J P, Chen W Q, et al. Scenarios of rare earth elements demand driven by automotive electrification in China: 2018—2030[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 145: 322-331.
- [18] Nassar N T, Wilburn D R, Goonan T G. Byproduct metal requirements for US wind and solar photovoltaic electricity generation up to the year 2040 under various Clean Power Plan scenarios[J]. Applied Energy, 2016, 183: 1209-1226.
- [19] Peiró L T, Méndez G V, Ayres R U. Material flow analysis of scarce metals: Sources, functions, end-uses and aspects for future supply[J]. 2013, 47(6): 2939-2947.
- [20] Pavel C C, Lacal-Arúntegui R, Marmier A, et al. Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines[J]. Resources Policy, 2017, 52: 349-357.
- [21] Yano J, Muroi T, Sakai S I. Rare earth element recovery potentials from end-of-life hybrid electric vehicle components in 2010—2030[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2016, 18(4): 655-664.
- [22] Morf L S, Gloor R, Haag O, et al. Precious metals and rare earth elements in municipal solid waste—sources and fate in a Swiss incineration plant[J]. Waste Management, 2013, 33(3): 634-644.
- [23] Schulze R, Buchert M. Estimates of global REE recycling potentials from NdFeB magnet material[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2016, 113: 12-27.
- [24] Sommer P, Rotter V S, Ueberschaar M. Battery related cobalt and REE flows in WEEE treatment[J]. Waste Management, 2015, 45: 298-305.
- [25] Bi M, Liu W, Luan X, et al. Production, use, and fate of phthalic acid esters for polyvinyl chloride products in China[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55

- (20): 13980–13989.
- [26] Graedel T E. Material flow analysis from origin to evolution[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(21): 12188–12196.
- [27] Liang C, Gracida-Alvarez U R, Gallant E T, et al. Material flows of polyurethane in the United States[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(20): 14215–14224.
- [28] Zhang C, Liu B, Li N, et al. Resource nexus for sustainable development: Status quo and prospect[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(26): 3426–3440.
- [29] Wang P, Ryberg M, Yang Y, et al. Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply-and demand-side mitigation efforts[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 2066.
- [30] Yue Q, Wang H M, Lu Z W. Quantitative estimation of social stock for metals Al and Cu in China[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(7): 1744–1752.
- [31] Wang P, Wang H M, Chen W Q, et al. Carbon neutrality needs a circular metal-energy nexus[J]. *Fundamental Research*, 2022, 2(3): 392–395.
- [32] 王俊博, 范蕾, 李新, 等. 基于物质流方法的中国铜资源社会存量研究[J]. *资源科学*, 2016, 38(5): 939–947.
- [33] Chen W Q, Graedel T E. Dynamic analysis of aluminum stocks and flows in the United States: 1900–2009[J]. *Ecological Economics*, 2012, 81: 92–102.
- [34] 岳强, 王鹤鸣, 陆钟武. 中国 2003 年至 2007 年铝循环分析[J]. *资源科学*, 2010, 32(3): 472–477.
- [35] 刘立涛, 沈镛. 中国区域能源效率时空演进格局及其影响因素分析[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(12): 2142–2153.
- [36] Wang H M, Schandl H, Wang X Z, et al. Measuring progress of China's circular economy[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 163: 105070.
- [37] 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.
- [38] Habib K, Schibye P K, Vestbø A P, et al. Material flow analysis of NdFeB magnets for Denmark: A comprehensive waste flow sampling and analysis approach[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(20): 12229–12237.
- [39] Glöser S, Soulier M, Tercero Espinoza L A. Dynamic analysis of global copper flows. global stocks, post-consumer material flows, recycling indicators, and uncertainty evaluation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(12): 6564–6572.
- [40] Wang C, Zhao L F, 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.
- [41] Wang C, Huang X, Lim M K, et al. Mapping the structural evolution in the global scrap copper trade network[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020: 275122934.
- [42] Hu X Q, Wang C, Lim M K, et al. Characteristics and community evolution patterns of the international scrap metal trade[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 243: 118576.
- [43] 信达证券. 稀土永磁: 碳中和驱动需求加速增长[R]. 北京: 信达证券股份有限公司, 2021.
- [44] 宋洪芳, 高玮. 稀土抛光粉最新动向[J]. *稀土信息*, 2006(11): 26–29.
- [45] 中国 DVD 行业市场发展历程[EB/OL]. (2012-02-20) [2022-05-16]. <https://www.docin.com/p-345599545.html>.
- [46] 中金公司. 钕铁硼行业深度报告-“节能环保、轻薄短小”开拓成长之路[R]. 北京: 中国国际金融股份有限公司, 2011.
- [47] 陈占恒, 叶少硕, 徐鹏. 2010 年以来稀土市场分析与展望[J]. *稀土信息*, 2016(6): 10–15.
- [48] 黄小卫, 李红卫, 王国珍, 等. 我国稀土工业发展现状及进展[J]. *稀土信息*, 2007, 31(3): 279–288.
- [49] 刘跃, 谢丽英. 全球稀土消费现状及前景[J]. *稀土*, 2008, 29(4): 98–101.
- [50] 周喜, 韩晓英. 我国稀土产业现状及发展趋势(上)[J]. *稀土*, 2010, 31(5): 96–101.
- [51] 林河成. 稀土抛光粉的生产及应用现状[J]. *湿法冶金*, 2002, 21(3): 117–119.
- [52] 林河成. 我国稀土抛光粉的发展现状及前景[J]. *中国有色冶金*, 2004, 33(1): 32–35.
- [53] 窦宁. 我国稀土抛光粉产业现状浅析(下)[J]. *稀土信息*, 2011, 12(12): 18–20.
- [54] 刘余九. 中国稀土产业现状及发展的主要任务[J]. *中国稀土学报*, 2007, 25(3): 257–263.
- [55] 李振宏, 伍虹. 我国稀土应用的现状与前景[J]. *稀土*, 1996, 17(6): 48–53.
- [56] 慧聪. 发展节能电梯势在必行[J]. *中华建筑报*, 2006, 4(3): 1.
- [57] 郑学家. 第三代永磁体: 钕铁硼[J]. *辽宁化工*, 2002, 31(2): 60–61.
- [58] 谢丽英. 包头稀土抛光粉产业差距分析[J]. *稀土信息*, 2010(6): 18–20.
- [59] 马荣璋. 中国稀土行业现状及展望[J]. *稀土信息*, 2012(8): 4–8.
- [60] 陈占恒. 后 WTO 时代中国稀土供应与需求分析[J]. *新材料产业*, 2014(1): 53–56.
- [61] 陈占恒. 2018 年稀土产业与市场简析[J]. *稀土信息*, 2019(5): 26–30.

- [62] 林河成. 我国稀土贮氢合金的生产、应用与市场[J]. 矿冶, 2003, 12(2): 80-84.
- [63] 张丽华, 张临婕. 近两年稀土贮氢合金及镍氢电池产业状况[J]. 稀土信息, 2012(1): 16-19.
- [64] 宋洪芳. 我国稀土产业现状及发展趋势浅析[J]. 稀土信息, 2008, 4(12): 4-8.
- [65] 林河成. 我国钕铁硼永磁体的生产及应用[J]. 有色冶炼, 2000, 29(2): 7-10.
- [66] 林河成. 我国烧结钕铁硼永磁体的高速发展[J]. 上海有色金属, 2006, 27(4): 33-37.
- [67] 中信证券. 中科三环(000970)投资价值分析报告-汽车领域爆发性增长, 钕铁硼领军者重装出发[R]. 北京: 中信证券股份有限公司, 2015.
- [68] 浙商证券. 新材料&金属材料(有色)行业点评报告: 行业趋势拐点已现, 全新稀土产业时代来临[R]. 杭州: 浙商证券股份有限公司, 2021.
- [69] 2017年中国钕铁硼行业需求状况及未来发展趋势分析[EB/OL]. (2017-12-23)[2022-05-16]. <https://www.chyxx.com/industry/201712/597079.html>.
- [70] 平安证券. 新材料系列深度报告之二: 关键战略材料篇, 高性能稀土永磁材料, 全球竞争力, 风起正当时[R]. 深圳: 平安证券股份有限公司, 2020.
- [71] 王敏晰, 游孝岭, 李新. 电子废弃物中金属资源循环利用效率研究[J]. 国土资源科技管理, 2018, 35(2): 26-39.

## On the imbalance between supply and demand of rare earth praseodymium in China: A praseodymium-based material flow analysis

LI Xinyu<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>2,3\*</sup>, WANG Lu<sup>4</sup>, WANG Heming<sup>1\*</sup>, YUE Qiang<sup>1</sup>, DU Tao<sup>1</sup>, CHEN Weiqiang<sup>2,3</sup>

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

**Abstract** Based on the dynamic material flow analysis method, this study takes 1990–2018 as the time boundary and mainland China as the spatial boundary to analyze the whole life cycle flow of praseodymium. It is found that 1) from 1990 to 2018, China mined more than 100000 t of praseodymium for downstream industrial applications, about 70% of which (68500 t of praseodymium) were used in NdFeB; 2) before 2009, China's praseodymium supply was sufficient (31000 t of unregistered consumption), and after 2009 the supply gap of praseodymium increased year by year (24000 t of unregistered production); 3) both import and export volumes of praseodymium increased, with import being mainly intermediate product of rare earth ores and praseodymium while export mainly intermediate product and final product of praseodymium; and 4) in 2018 the in-use stock of praseodymium exceeded 37000 t, of which 23% were in air conditioners, electroacoustic headphones and magnetic separators, with insufficient recycling. To resolve the problem between supply and demand this study put forward some suggestions, such as improving recycling capacity and technology of praseodymium, optimizing the structure of praseodymium trade, increasing the import of ore and primary products, properly controlling export, and exploring NdFeB permanent magnet substitute products.

**Keywords** praseodymium; material flow analysis; neodymium iron boron; rare earth; industrial ecology ●



(责任编辑 刘志远)