

引用格式: 刘若华, 曾现来. 中国稀土镱回收潜力评估[J]. 资源科学, 2025, 47(7): 1476–1484. [Liu R H, Zeng X L. Measuring the recycling potential of rare earth dysprosium in China[J]. Resources Science, 2025, 47(7): 1476–1484.] DOI: 10.18402/resci.2025.07.07

中国稀土镱回收潜力评估

刘若华¹, 曾现来^{1,2}

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 清华大学钢铁工业环境保护全国重点实验室, 北京 100084)

摘要:【目的】“城市矿产”二次资源在资源可持续供给方面发挥着越来越重要的作用, 镱是一种重要的稀土资源, 被广泛应用于家用电器、汽车、风力涡轮机等产品中, 如何精确评估镱回收潜力是迫切需要解决的科学问题。【方法】本文通过物质流分析的自下而上方法, 核算了2001—2023年中国金属镱的消费量, 并预测2024—2050年镱的消费和报废状况, 评估从“城市矿产”中回收镱的潜力。【结果】①镱的消费量在2001—2023年间迅速扩大, 主要应用于风力涡轮机、电动汽车和空调中。②2024—2050年, 家用电器、汽车和电动自行车对镱的消费量将呈现先升后降的趋势, 风力涡轮机对镱的消费量持续上升; ③镱消费量将在2036年增长至峰值, 约为7200 t, 随后下降至2042年的约6600 t, 并趋于平稳, 消费主要集中在电动汽车和风力涡轮机中。④随着产品报废量的增加, 镱的回收潜力持续上升, 在2050年达到约6500 t, 预计回收潜力可以满足相关产业发展需求。【结论】尽管中国镱的储量位于世界前列, 但目前的开采量难以满足未来产品对镱的需求。因此, 需要发展循环经济, 从“城市矿产”中回收镱以弥补需求缺口, 降低原生矿产开采压力, 保障镱资源供给安全。

关键词: 镱; 回收潜力; 城市矿产; 循环经济; 稀土; 中国

DOI: 10.18402/resci.2025.07.07

1 引言

稀土作为制造众多高科技产品、支撑低碳新兴产业的关键基础材料, 已被多个国家列为战略性矿产资源。随着稀土的不断开采利用, 越来越多的稀土资源由自然矿产开采、利用、报废而变为“城市矿产”。镱因其优异的理化特性, 通常被添加于钕铁硼永磁体中, 用于提高磁体的矫顽力和高温性能, 延长使用寿命。钕铁硼永磁体由于尺寸小、磁力强等优点, 被广泛用于家用电器、工业机器人、风力涡轮机和电动汽车等产品的关键部件中^[1-3]。随着智能制造和清洁能源技术的发展, 镱的需求量也随之大幅上升。然而, 全球探明镱储量有限且分布不均, 引发国内外学者对镱资源可持续供应的关注^[4]。

全球镱(以氧化物计)的储量为162万t, 相当于141万t镱金属当量。中国是镱储量最大的国家, 其储量约为123万t镱金属当量, 占全球储量的87%, 同时也是消费和贸易大国^[5]。1990—2019年, 国内

镱金属累计开采量达到近3万t, 终端产品对镱的消费量也持续增长, 2019年的消费量是1990年的近100倍, 约80%的镱用于家用电器、交通和能源领域。中国也是镱的净出口国, 1990—2019年各类出口产品中镱金属总量累计超过1万t, 包括初级产品、中间产品及含有镱的最终产品, 分别约占42%、43%和15%^[6]。然而, 非法开采在镱的供应中占据了一定比例, 释放的污染物在环境中积累、迁移、转化, 对矿区周围生态环境和人体健康造成不良影响^[7,8]。中国2024年颁布的《稀土管理条例》鼓励和支持企业对稀土进行二次资源综合利用, 随着稀土资源在报废产品中的聚集, 以及稀土循环经济行业的日益发展, 回收“城市矿产”中的镱可以有效降低原生资源的开采量, 减少对生态环境的影响。

目前, 有关镱资源可持续性的研究主要集中在物质流分析、未来需求形势预测、供应安全等方面。基于动态物质流分析, Dai等^[9]以中国为空间边界,

收稿日期: 2024-08-24; 修订日期: 2025-02-20

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划集成项目(92462301); 气候变化与碳中和国际合作联合行动科学研究类项目(20243080044)

作者简介: 刘若华, 女, 北京人, 硕士研究生, 研究方向为城市矿产与循环经济。E-mail: liurh23@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 曾现来, 男, 山东东平人, 博士生导师, 副研究员, 研究方向为资源环境管理。E-mail: xlzeng@tsinghua.edu.cn

2025年7月

追踪了2001—2020年镨在开采、冶炼、加工、使用到废弃的各环节的流量和存量,指出镨在家用电器、交通和风力涡轮机领域的消费占比较大。有关未来稀土镨的需求形势预测与供应安全的研究主要聚焦于电动汽车、新能源等行业,如王晨阳等^[10]构建了不同情景下汽车保有量及电动汽车占比,预测了镨、钕、镨3种稀土的需求量,发现镨在现有产能下难以满足2040年以后的应用需求,其供给面临较大挑战。Li等^[11]研究了全球风力发电扩张对稀土的需求,发现2050年风力涡轮机制造所需的稀土镨、钕、镨将是其目前总产能的2~4倍,其中镨的缺口尤为突出。

随着稀土的需求量日益扩大,一些研究致力于评估稀土的回收潜力,以应对稀土的供应风险。蒋冬梅等^[12]、Wang等^[13]分别对中国的废弃家用电器与风力涡轮机中稀土的资源化潜力展开评估,Maani等^[14]、Schulze等^[15]引入拆解效率与回收效率等参数,分别测算从电动汽车与钕铁硼磁体中回收的稀土量。Wang等^[16]量化了循环经济战略对稀土供应链的影响,指出稀土“城市矿产”开发利用可以使得部分区域由稀土“自然矿产稀缺”转为“城市矿产丰富”的地区,减少对稀土原生资源的依赖。

现有文献对于镨的历史流动核算、未来需求预测等研究的成果较为丰富,但是对于镨的回收潜力研究有待进一步深入。目前相关研究主要只针对一种或一类产品展开分析,在进行镨的消费量及报废量预测时,仅设定固定的变化率或根据既往数据拟合,缺乏对政策和市场变化的考量,难以系统、全面地评估镨的回收潜力。本文收集了2001—2023年中国含镨产品消费量及产品中镨的含量,核算国内对镨的消费状况,结合历史数据,通过非线性拟合与情景设置的方法,预测2024—2050年镨的消费量。同时,结合产品的报废周期,核算各年份含镨产品的报废量,将报废量及消费量进行对比,评估从“城市矿产”中回收镨的潜力。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 消费量核算方法

含镨的产品主要分为家用电器、交通工具、能源设备3大类,经文献调研,本文在镨的消费量核算中覆盖空调、冰箱、洗衣机、电动自行车、燃油车、电

动汽车及风力涡轮机7种产品^[5,6,9,10,17-19],采用自下而上的方法,评估各类产品中镨的消费量,计算公式为:

$$D_{j,t} = P_{j,t} + I_{j,t} - E_{j,t} \quad (1)$$

$$M_{j,t} = D_{j,t} \times C_{j,t} \quad (2)$$

式中: $D_{j,t}$ 为产品 j 在 t 年的国内销售量; $P_{j,t}$ 为产品的产量; $I_{j,t}$ 为产品的国内进口量; $E_{j,t}$ 为产品的出口量; $C_{j,t}$ 为产品中镨的平均含量; $M_{j,t}$ 为产品中镨的消费量。

2.1.2 回收潜力核算方法

产品的报废及其镨的回收潜力与产品的寿命分布有关,表征方式主要包括指数分布、正态分布、对数分布以及韦伯(Weibull)分布4类。对于洗衣机、空调、冰箱、燃油车、电动汽车及电动自行车,其寿命分布取决于关键组件的疲劳程度,Weibull分布可以有效描述机电类产品组件磨损与产品使用寿命之间的关系,因此本文采用该分布表征这些产品的寿命分布,概率密度函数如式(3)所示:

$$f(t, t') = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t - t'}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t - t'}{\alpha} \right)^{\beta}} \quad (3)$$

式中: $f(t, t')$ 为 t' 年份进入市场的产品在 t 年份报废的概率; α 为形状参数; β 为比例参数。家用电器、汽车及电动自行车的寿命分布函数中的比例参数及形状参数取值见表1。

目前国内关于风力涡轮机使用寿命的评估较少,风力涡轮机的设计寿命一般为20~25年,本文采用正态分布作为寿命分布函数,概率密度函数如式(4)所示:

$$f(t, t') = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t - t' - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

式中: μ 为均值(本文取22.5); σ 为标准差(本文取2.3)。

表1 各类产品的韦伯寿命分布函数的参数

Table 1 Parameters of Weibull lifetime distribution functions of different products

产品类型	比例参数	形状参数
洗衣机	13.3	2.8
空调	14.3	2.2
冰箱	11.3	2.8
燃油车	13.2	3.6
电动汽车	13.2	3.6
电动自行车	6.0	1.3

由此可以核算产品在各年份的报废量:

$$O_{x,t} = \int_{t_0}^t D_{x,t'} f(t, t') dt' \quad (5)$$

式中: t_0 为初始年份; $O_{x,t}$ 为产品 x 在 t 年份的报废量; $D_{x,t'}$ 为产品 x 在 t' 年份的消费量。

2.1.3 未来镉消费量预测方法

电子电器等消费品进入市场后,通常呈现S形增长趋势,在引入阶段,消费者对产品认知程度低,消费量增长缓慢,拥有量较小;随着产品知名度与消费者接受程度的提高,消费量和拥有量得以快速提升,进入成长阶段;当产品的拥有量持续增加,市场逐渐趋于饱和,产品增长放缓,进入成熟阶段^[9]。考虑到研究对象中产品的性质以及未来人口变化,本文采用Logistics模型,分别对冰箱、空调、洗衣机、电动自行车和汽车(包括燃油车与电动汽车)的人均存量随时间变化进行拟合,实现2024—2050年存量情况的模拟预测,结合存量的变化及产品的寿命分布函数,核算每年的消费量。

风力涡轮机和电动汽车在推进“双碳”目标实现过程中发挥重要作用,其发展深受国家政策导向和规划布局的影响,不再适合仅基于历史数据进行拟合,需要结合发展规划、气候目标、政策实施等因素进行情景设置。因此,本文通过收集各类政策文件、研究报告及文献,综合构建具体的发展情景并进行预设。对于电动汽车,基于《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》^[20]、《节能与新能源汽车

技术路线图2.0》^[21]、《电动汽车展望》^[22]等政策文件及研究报告,设置汽车保有量和销售量中电动汽车的占比,结合对于汽车整体的消费量预测,推算电动汽车直至2050年的消费量。对于风力涡轮机,采用国际能源署发布的《世界能源展望》^[23]中的既定政策情景,预测直至2050年中国风力涡轮机的装机量。

2.2 数据来源

本文收集了冰箱、空调、洗衣机、电动自行车、燃油车、电动汽车和风力涡轮机7类产品的产量、进出口量、镉的含量、产品的使用寿命以及人口等数据。冰箱、空调、洗衣机、汽车的产量数据及风力涡轮机的装机量数据来源于2001—2023年《中国统计年鉴》;对于《中国统计年鉴》中没有纳入的产品,通过相关行业报告获得,电动自行车产量来源于中国自行车协会统计数据,电动汽车产量来源于中国汽车工业协会统计数据,以上各产品的进出口量来源于联合国商品贸易数据库,产品中镉的含量以及产品的使用寿命参考了相关文献,从中获取有关数据^[24-26]。既往年份的人口数据来源于2001—2023年《中国统计年鉴》,未来年份的人口数据参考联合国《2022年世界人口展望》。

3 结果与分析

3.1 镉的消费状况及预测

镉在工业产品中的消费量增长迅速,从2001年的12 t增加到2023年的2157 t(图1a),冰箱、空调、

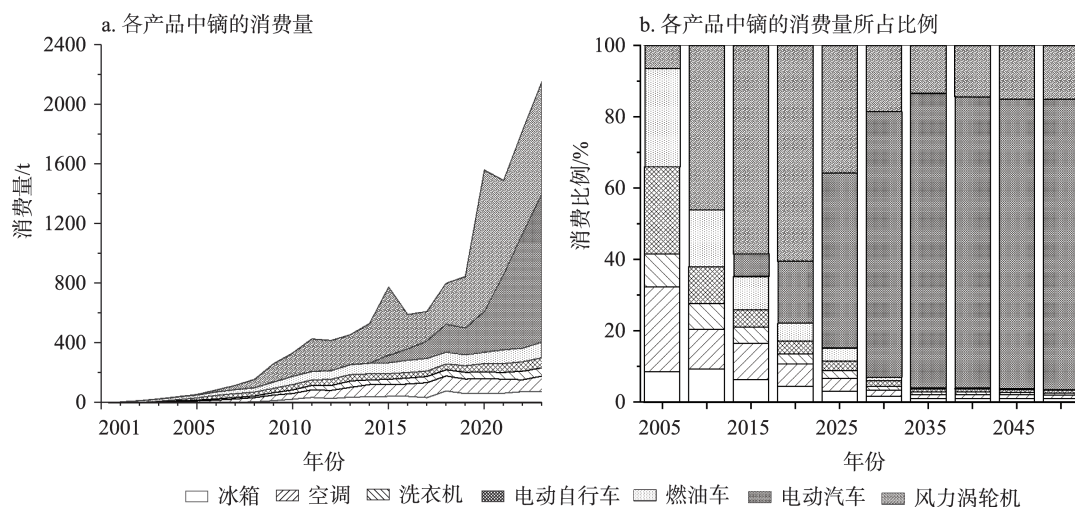


图1 中国产品中镉的消费:2001—2023年消费量(a);2005—2050年消费比例(b)

Figure 1 Dy consumption in China: a. weight in 2001-2023 (a); b. ratio in 2005-2050 (b)

2025年7月

洗衣机等家用电器产品中镨的消费量呈现总体上升的趋势,其原因是城市化的加速以及“家用电器下乡”等政策的实施。自2022年开始,家用电器的日均用量逐渐趋于饱和,且人口数量有下降趋势,家用电器销售遇到阻力,使得消费量的增长放缓。中国自2024年起持续大力推动家用电器“以旧换新”工作,对消费者予以补贴,着力释放国内家电市场的消费潜力,促进消费者及时淘汰老旧的家用电器,购置优质的新产品,激发家电市场的活力。在这一背景下,冰箱、空调和洗衣机对镨的消费量还会有所上升,预计均在2024—2030年达到最大值,分别为80、94和57 t,之后总体缓慢下降,使得未来家用电器对镨的消费量占比也随之下降,显著低于现有的占比(图1b)。

在交通领域,中国汽车的销售量和保有量不断上升,使得汽车中对镨的消费量随之上升,车辆电动化的趋势将加快这一速度。中国2001年汽车销售量仅有263万辆,2023年增长至3010万辆,其中新能源汽车达到950万辆。2015—2023年,中国出台了针对电动汽车的政府补贴、免征车辆购置税、指标与路权分配优惠等政策,使得电动汽车的市场渗透率扩大。2019年,补贴标准退坡,导致消费量在当年有所下降。由于电动汽车的迅速推广,以及电机中较高的稀土含量,电动汽车对镨的利用由2015年时的仅49 t,跃升至2023年的992 t(图1a),并将持续增加,预计在2036年达到最大值,约为5900 t,随后下降至2042年的约5300 t,趋于平稳。而燃油车对镨的消费量在2001—2023年呈上升趋势,预计在2023—2026年达到峰值106 t后快速下降至较低的水平,电动汽车将会成为对镨的消费量最大的产品。此外,电动自行车行业自20世纪90年代起逐渐发展至成熟,消费量不断提升,外卖、配送等行业的发展也为其消费带来了新的增长点,预计在2030年左右达到消费量的最高值,约为69 t,之后电动自行车的消费量下降,对镨的消费量也随之下降。

在能源方面,风力涡轮机中镨的消费量整体呈上升趋势,从2001年的1 t上升至2023年的750 t(图1a)。由于2020年中国对风力发电项目的补贴进行了调整,使得当年的装机量显著高于其他年份,因

而镨的消费量较高。到2030年清洁能源(风力涡轮机和光伏)的装机量将翻一倍,清洁能源发电量也会占比越来越大。在这一背景下,风力涡轮机的装机量将会持续上升。本文估算在2025—2030年间,风力涡轮机的年装机量在60~70 GW,2030年以后年装机量在70 GW以上。风力涡轮机对镨的消费量将一直处于较高水平,2025年后每年风力涡轮机对镨的消费量将达到800~1000 t。在2025—2030年间,镨的消费量增长速度较快,之后每年的装机量将趋于平稳,使得镨的消费量增长放缓,占比也趋于稳定(图1b)。

3.2 镨的回收潜力分析

随着含镨产品消费量的变化,报废产品中镨的资源回收潜力也呈动态变化。冰箱、空调和洗衣机中镨的回收潜力呈相似的趋势,均为先上升后下降,因消费量和产品寿命的不同而在峰值和到达峰值的时间上有所不同。冰箱中镨的回收潜力在2038年达到峰值77 t,回收潜力的峰值比需求量的峰值大约晚15年,从2036年起,冰箱中镨的回收潜力将超过需求量(图2a)。空调中镨的回收潜力在2035年达到峰值81 t,比需求量的峰值滞后了约12年,从2034年起,该值将超过需求量(图2b)。洗衣机中镨的回收潜力在2040年达到峰值48 t,比需求量的峰值滞后了约12年,从2039年起,该值将超过需求量(图2c)。

电动自行车中镨的回收潜力在2033年前持续增长,由2001年的0.07 t增长到65 t,达到峰值。由于电动自行车的使用寿命较短,回收潜力的峰值与需求量的峰值仅相差大约4年。2040年起,电动自行车中镨的回收潜力将超过需求量(图2d)。随着既往购买的燃油车逐渐达到寿命周期,燃油车中镨的回收潜力还会在一段时间内增加,在2030—2035年触顶,比需求量的峰值晚约10年,但由于需求量的下降,2030年前燃油车中镨的回收潜力就超过了需求量(图2e)。电动汽车中镨的回收潜力呈S形持续上升,在2035—2045年间增速较快,对应着2025—2035年间购买的电动汽车进入大量报废阶段,之后镨的回收潜力增长速度放缓。电动汽车中镨的回收潜力在接近2050年时将超过需求量(图2f)。

风力涡轮机的寿命较长,在2025年前,风力涡轮

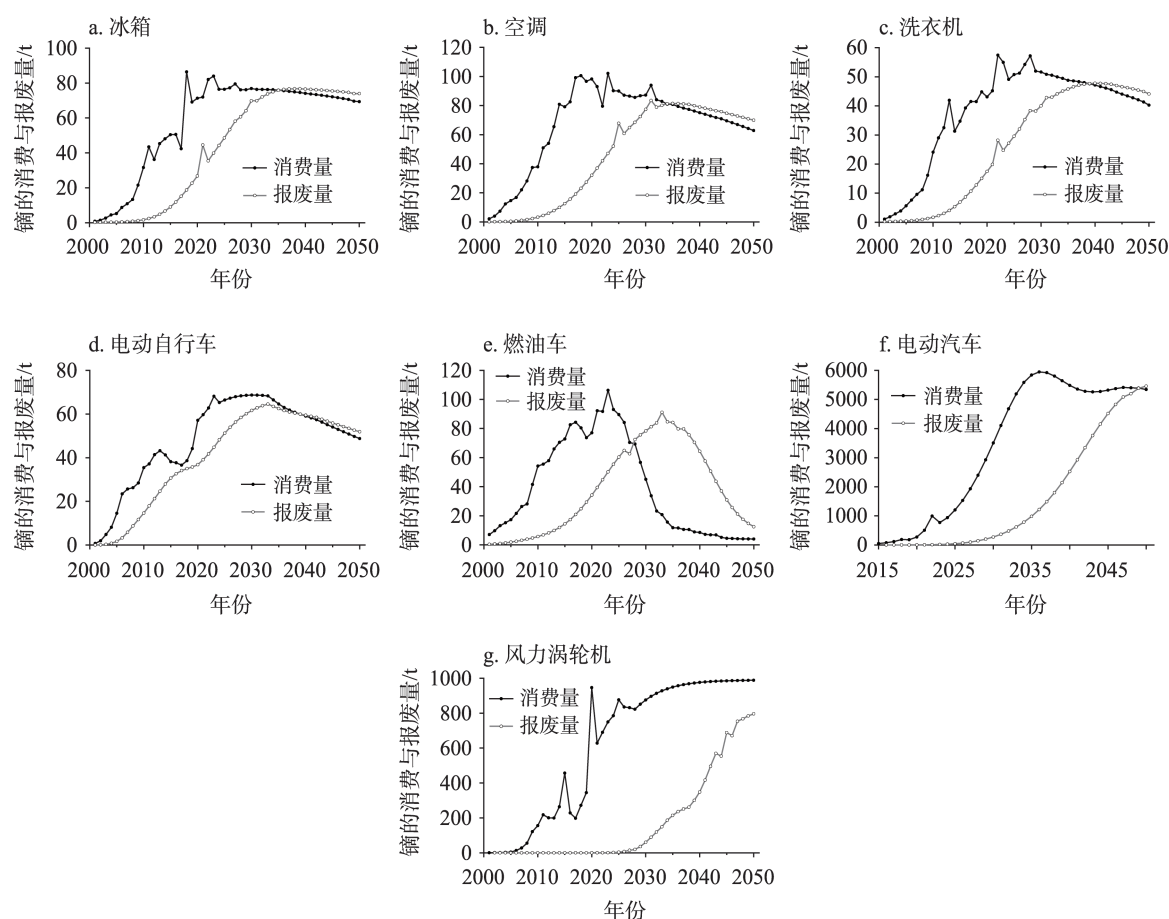


图2 2001—2050年中国各产品中镨的消费量与报废量

Figure 2 Dysprosium consumption and scrap in different Chinese products, 2001-2050

轮机中镨的回收潜力较小。在2025—2050年间,风力涡轮机中镨的回收潜力增长迅速,2038—2043年尤为突出,对应着中国装机量快速增长的阶段。由于风力涡轮机的消费量一直处于高位,因此2050年前镨的消费量仍然大于回收潜力。未来风力涡轮机中报废的镨预计会超过或者与需求量持平(图2g)。

镨的回收潜力整体呈“S”型趋势,在2001—2025年间增长较为缓慢,但是增长速度在逐渐变快;随着电动汽车和风力涡轮机这两种镨含量较高的产品进入大量报废阶段,镨的回收潜力在2030—2045年间快速上升;2045年后增长放缓,到2050年时达到约6500t,超过消费量(图3a)。未来镨的回收潜力还会增长一段时间,而消费量呈下降趋势,因此回收潜力在未来的一段时间内仍将大于消费量。在2025年之前,镨的回收潜力主要来自燃油车、电动自行车和空调。空调的消费量很大,因而

在镨的回收潜力中发挥较大作用。电动自行车寿命较短,能在短时间内产生报废产品,且由于价格适中、通勤方便,消费量一直较高。尽管燃油车消费量不如电动自行车和家用电器产品,但镨的含量相对较高,因而也占据了较大比例。2025年前,电动汽车规模进入市场的时间尚短,风力涡轮机由于较长的使用寿命也未产生大量报废产品。2025—2050年,由于电动汽车中镨的含量显著高于其余产品,在电动汽车达到报废年限时,其镨的回收潜力迅速上升,在2030年超过其他产品,在2050年占比约80%。风力涡轮机中镨的回收潜力占比在2025—2035年也有所上升,在2035—2050年趋于平稳(图3b)。

3.3 不确定性分析

采用蒙特卡罗模拟研究预测结果的不确定性,本文中的不确定性来源于产品中镨的含量、产品寿命、未来消费情景等,针对不同来源、不同类型的变

2025年7月

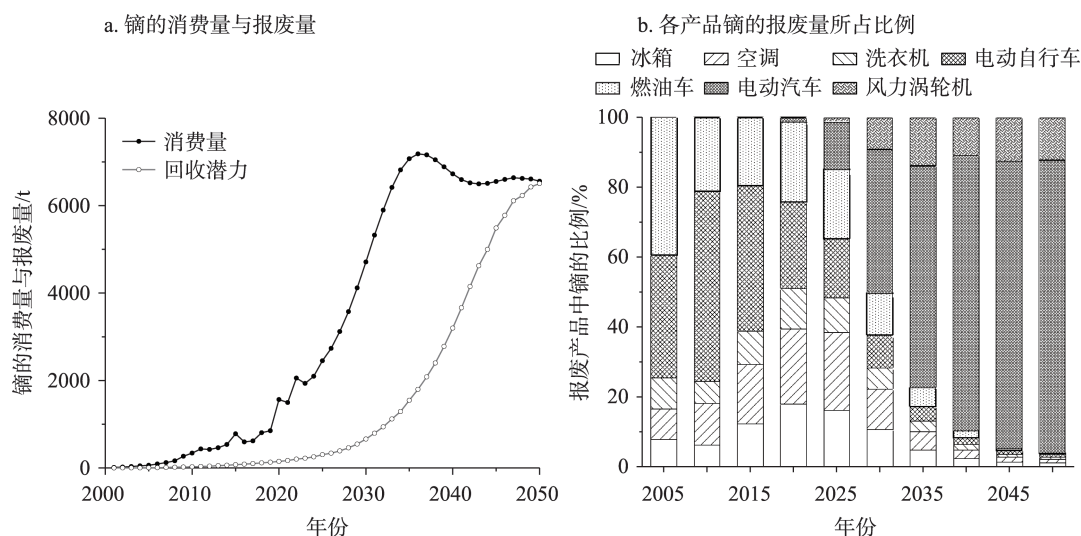


图3 2001—2050年中国镨的需求量与回收潜力、报废产品中镨的比例

Figure 3 Dysprosium demand and scrap generation, and proportion of dysprosium in scrap products in China, 2001-2050

量,设置不同的浮动范围。来源于统计年鉴等官方文件的数据浮动范围设为2%,来源于文献的数据浮动范围设为5%。2030、2040、2050年镨的需求量分别在4400~5500 t、5500~8000 t、5000~8000 t之间,随着时间的推移,不确定性的范围逐渐变大,但是消费量的总体趋势是一致的(图4a)。回收潜力的不确定性区间变化和需求量相似。2030、2040、2050年镨的回收潜力分别在560~750 t、2600~4800 t、4600~8200 t(图4b)。随着“城市矿产”二次资源在满足资源消费中的贡献越来越大,镨二次资源供给的满足率(回收潜力/消费量)也不断上升,到2050年满足率为60%~150%,有效缓解原生矿产的供给压力。

4 讨论

面向未来的稀土市场,随着技术的革新与进步,稀土的需求格局也将发生很大变化。在能源和技术转型中涉及的稀土(如钕、镨、镱)的需求量将

迎来大幅增长^[27]。照明、荧光粉、催化剂、玻璃制造等工艺中涉及的稀土(如钕),由于工艺技术的提高或材料的替代,需求量会下降^[28]。然而,由于大多数稀土元素伴生存在,作为整体被开采,导致在开采过后钕、镨等稀土资源供应短缺,而铈、钇等稀土资源供应过剩。对于镨,未来的需求和报废产品均主要为电动汽车与风力涡轮机,这些产品中含镨的磁体设计相对标准化、易拆卸,稀土元素含量高,汽车回收行业规模的扩大与风电产业的集群化发展也为回收提供了有利条件。若由开发原生材料为主转为协同开发原生和再生材料为核心,可以使得供应和需求更为匹配,减少供需关系在元素层面的不均衡性,保障镨的供应链安全。

在“城市矿产”二次资源供给满足资源需求方面,Zeng等^[29]预测了中国电子电器产品、汽车及电线电缆等3大类产品中关键金属回收潜力,并评估

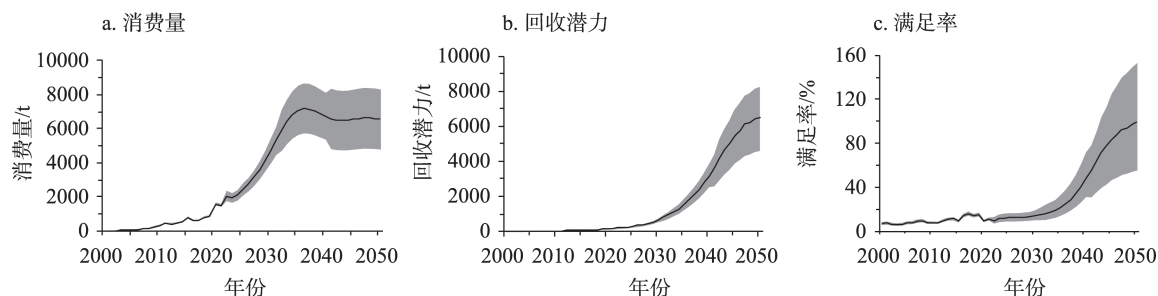


图4 2001—2050年镨的消费量、回收潜力及其满足率的不确定性分析

Figure 4 Uncertainty analysis of consumption, recycling potential, and fulfillment rate, 2001-2050

了其中典型金属的供给满足率,对比本文研究结果发现,稀土镝的回收利用供给满足率与钴、钕等元素相近,在2001—2050年呈现持续上升的趋势,在2050年达到近100%。相较而言,铜、铝的回收供给满足率较低,仅为20%~40%,镝的应用类别更为集中,主要为产品中嵌入的钕铁硼磁体,其消费与报废会随着产品的更替平衡而趋于稳定。因此,从报废产品中回收镝资源,是满足未来资源需求的有效途径。相较于从原生矿产中获取稀土,采用回收再生的方法仅需收集和清洗废弃产品,省去了开采、选矿、富集等步骤,加工过程也相对更简单,大大减少了环境污染^[30]。Jin等^[31]对原始生产磁体与回收再生磁体展开生命周期评价,对比了全球变暖、酸化、致癌健康风险、非致癌健康风险、呼吸系统影响、富营养化、臭氧消耗量、生态毒性及烟雾排放等9类环境影响,结果表明原始生产磁体比回收再生磁体有更大的负面影响。Luca等^[32]对欧洲回收永磁体中的稀土作为二次供给的环境影响进行评估,指出通过回收当前废弃物中的稀土,可以减少约1万~2万t的CO₂当量排放。新技术的研发与应用有望进一步降低回收过程的环境影响。

5 结论与政策建议

5.1 结论

本文基于自下而上的方法,核算了2001—2023年稀土镝的消费量,并预测了2024—2050年镝的需求情况,以及“城市矿产”中镝的回收潜力。主要结论如下:

(1)2001—2050年,家用电器及交通工具对镝的消费量呈现先升后降的趋势,电动汽车中镝的消费量在2036年达到峰值,其他产品则在2023—2030年达到峰值。风力涡轮机对镝的消费量持续上升。

(2)镝的消费量在2036年前呈上升趋势,达到约7200 t的峰值,随后下降至2042年的约6600 t,并在2042—2050年间保持平稳。在“双碳”目标和能源转型的背景下,电动汽车和风力涡轮机在镝的消费占比中显著提升。

(2)镝的回收潜力呈上升趋势,随着电动汽车与风力涡轮机进入大量报废的阶段,2030—2045年快速上升,2050年将超过消费量,达到6500 t。除风力涡轮机外,其他产品中镝的回收潜力均在2050年前超过消费量。镝的回收潜力对消费量的满足率持续

上升,在2050年达到近100%,报废产品中含有的镝可以有效满足消费产品对镝的需求。

5.2 政策建议

稀土镝作为战略性矿产资源,在低碳技术与高科技产品中发挥着关键作用,确保其可持续供给尤为重要。目前中国稀土镝的产量距离未来的需求量仍有较大差距,随着更多含镝产品的退役,尤其是含量较高的电动汽车与风力涡轮机,从报废产品中回收镝可以很好地进行补充。为推动镝的供给稳健,提出以下政策建议:

(1)给予政策与资金支持,鼓励企业研发先进适用的镝回收技术。尽管中国的稀土回收技术已有较大发展,但是仍有很大的空间,以促进资源利用效率,降低工艺成本,减少环境污染与能源消耗,推动回收技术向着高效、绿色的方向发展。

(2)规范镝的回收行为,加强政府对稀土回收利用产业的监管和引导。目前,镝主要被应用于钕铁硼永磁体中,该磁体已进入了产业化回收利用阶段。然而,仍有部分稀土回收企业采用高污染的工艺,严重影响了生态环境;还有部分企业虽表面为综合利用企业,实则以稀土矿产品作为原料,对稀土回收市场产生了冲击。因此,需加强循环经济技术规范和标准建设,严厉打击“作坊式”回收拆解,促进市场健康发展。

(3)优化循环利用体系,推动产业链上下游的协同。目前,中国稀土镝的回收企业渠道较为分散,循环和制造企业的衔接有待提高。因此,应明晰“城市矿产”中镝的资源量及区域分布状况,以及未来镝的需求行业及其分布,建立产品从生产、使用、报废到回收、再利用的平台,加快健全标准化规范化回收利用网络,以更有效地进行资源匹配,畅通资源循环利用链条,促进稀土产业的高质量发展。

参考文献(References):

- [1] Kumari A, Sahu S K. A comprehensive review on recycling of critical raw materials from spent neodymium iron boron (NdFeB) magnet [J]. Separation and Purification Technology, 2023, DOI: 10.1016/j.seppur.2023.123527.
- [2] Chen C, Li N, Qi J, et al. Material flow analysis of dysprosium in the United States[J]. Environmental Science & Technology, 2023, DOI: 10.1021/acs.est.3c07496.

2025年7月

- [3] 周美静, 王甫园, 邵留国. 中国境外国家(地区)稀土供应链韧性评估: 以钕铁硼永磁体为例[J]. 资源科学, 2023, 45(9): 1746–1760. [Zhou M J, Wang F Y, Shao L G. Resilience evaluation of the rare earth supply chain in countries (regions) outside China: A case study of NdFeB permanent magnet[J]. Resources Science, 2023, 45(9): 1746–1760.]
- [4] Lai C, Wang X, Li H, et al. Rare earth recycling and remanufacturing: Impacts on oligopoly markets and industry development from a closed-loop supply chain perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143773.
- [5] Xiao S J, Geng Y, Pan H Y, et al. Uncovering the key features of dysprosium flows and stocks in China[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(12): 8682–8690.
- [6] Wang Q C, Chen W Q, Wang P, et al. Illustrating the supply chain of dysprosium in China through material flow analysis[J]. Resources Conservation and Recycling, 2022, DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106417.
- [7] Sun M Q, Liu J, Lin K, et al. Distribution and migration of rare earth elements in sediment profile near a decommissioned uranium hydrometallurgical site in South China: Environmental implications[J]. Journal of Environmental Management, 2024, DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121832.
- [8] 邓丽明, 王园园, 尹小玲, 等. 广州周边地区地表水稀土元素污染特征及来源解析[J]. 地球化学, 2024, 53(1): 64–76. [Deng L M, Wang Y Y, Yin X L, et al. Characteristics and source of rare earth elements pollution in the surface waters of Guangzhou around and surrounding areas[J]. Geochimica, 2024, 53(1): 64–76.]
- [9] Dai T, Liu Y F, Wang P, et al. Unlocking dysprosium constraints for China's 1.5°C climate target[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(38): 14113–14126.
- [10] 王晨阳, 汪鹏, 汤林彬, 等. 碳中和背景下中国电动车产业稀土需求预测[J]. 科技导报, 2022, 40(8): 50–61. [Wang C Y, Wang P, Tang L B, et al. Forecast of rare earth demand driven by electric vehicle industry in China: 2010–2060[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(8): 50–61.]
- [11] Li J S, Peng K, Wang P, et al. Critical rare-earth elements mismatch global wind-power ambitions[J]. One Earth, 2020, 3(1): 116–125.
- [12] 蒋冬梅, 陈姝媛, 梁倩, 等. 废电路板元器件稀土资源回收及其碳减排潜力研究[J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(12): 106–113, 119. [Jiang D M, Chen S Y, Liang Q, et al. Research on rare earth resource recovery and carbon emission reduction potential of waste circuit board components[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2023, 41(12): 106–113, 119.]
- [13] Wang Z, Hu C L, Wang H M, et al. Material demand and recycling potential driven by wind power expansion in China[J]. Journal of Environmental Management, 2024, DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122840.
- [14] Maani T, Mathur N, Rong C B, et al. Estimating potentially recoverable Nd from end-of-life (EoL) products to meet future US demands[J]. Resources Conservation and Recycling, 2023, DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.106864.
- [15] Schulze R, Buchert M. Estimates of global REE recycling potentials from NdFeB magnet material[J]. Resources Conservation and Recycling, 2016, 113: 12–27.
- [16] Wang P, Yang Y Y, Heidrich O, et al. Regional rare-earth element supply and demand balanced with circular economy strategies[J]. Nature Geoscience, 2024, 17(1): 94–102.
- [17] Zhao S, Wang P, Wang L, et al. Quantifying provincial in-use stocks of rare earth to identify urban mining potentials in the Chinese mainland[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142251.
- [18] Eheliyagoda D, Ramanujan D, Veluri B, et al. Tracing the multi-regional evolution of the global dysprosium demand-supply chain [J]. Resources Conservation and Recycling, 2023, DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107245.
- [19] 陈立洋, 杨宇瑶, 汪鹏, 等. 碳中和驱动下的全球风电发展稀土需求[J]. 科技导报, 2022, 40(21): 31–43. [Chen L Y, Yang Y Y, Wang P, et al. Analysis of rare earth demand for global wind power development under carbon neutrality[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(21): 31–43.]
- [20] 国务院办公厅. 新能源汽车产业发展规划(2021–2035年)[EB/OL]. (2020–11–02) [2024–10–08]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-11/02/content_5556716.htm. [General Office of the State Council. Development Plan for New Energy Vehicle Industry (2021–2035)[EB/OL]. (2020–11–02) [2024–10–08]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-11/02/content_5556716.htm.]
- [21] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图2.0(第2版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021. [Chinese Society of Automotive Engineers. Technology Roadmap for Energy Saving and New Energy Vehicles 2.0 (2nd ed.)[M]. Beijing: China Machine Press, 2021.]
- [22] Agency I E. Global EV Outlook 2023[R]. Paris: IEA, 2023.
- [23] Agency I E. World Energy Outlook 2023[R]. Paris: IEA, 2023.
- [24] Jiang P, Roy B B, Tu Q. Revealing material requirements and environmental impacts of Canadian wind energy development using dynamic material flow analysis[J]. Resources Conservation and Recycling, 2025, DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.108094.
- [25] Yang Y Q, Zhang H Y, Wu L L, et al. Supply potential, carbon emission reduction, energy conservation, and sustainable pathways for aluminum recycling in China[J]. Sustainable Production and Consumption, 2024, DOI: 10.1016/j.spc.2024.07.034.
- [26] Yao T, Geng Y, Sarkis J, et al. Dynamic neodymium stocks and flows analysis in China[J]. Resources Conservation and Recycling, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105752.
- [27] Kosajan V, Wen Z, Wang X. Criticality assessment and manage-

- ment policy analysis of rare earth elements[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2025, 29(1): 344–357.
- [28] 代涛, 高天明, 文博杰. 元素视角下的中国稀土供需格局及平衡利用策略[J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(11): 1586–1594. [Dai T, Gao T M, Wen B J. China's rare earth supply and demand pattern and balanced utilization strategy from perspective of elements[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(11): 1586–1594.]
- [29] Zeng X L, Ali S H, Tian J P, et al. Mapping anthropogenic mineral generation in China and its implications for a circular economy[J]. *Nature Communications*, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15246-4>.
- [30] 李顺, 韩萧萧, 熊竹楠, 等. 中国稀土全产业链中的环境和健康风险[J]. *稀土*, 2024, 45(2): 143–158. [Li S, Han X X, Xiong Z N, et al. Environmental and health risks in China's rare earth industry chain[J]. *Chinese Rare Earths*, 2024, 45(2): 143–158.]
- [31] Jin H, Afiuny P, McIntyre T, et al. Comparative life cycle assessment of NdFeB magnets: Virgin production versus magnet-to-magnet recycling[J]. *Procedia CIRP*, 2016, DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.013.
- [32] 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.

Measuring the recycling potential of rare earth dysprosium in China

LIU Ruohua¹, ZENG Xianlai^{1,2}

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Key Laboratory of Iron and Steel Industry Environmental Protection, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: [Objective] Secondary resources from “urban minerals” play an increasingly significant role in the sustainable supply of resources. Dysprosium is an important rare earth element widely used in products such as household appliances, automobiles, and wind turbines. Accurately assessing the recycling potential of dysprosium is an urgent scientific issue that needs to be addressed. [Methods] This study used a bottom-up approach to calculate the consumption of dysprosium in China from 2001 to 2023. The consumption and scrap conditions of dysprosium from 2024 to 2050 were predicted to assess the recycling potential of dysprosium from “urban minerals”. [Results] (1) The consumption of dysprosium increased rapidly from 2001 to 2023, primarily being applied in wind turbines, electric vehicles, and air conditioners. (2) From 2024 to 2050, dysprosium consumption in household appliances, automobiles, and e-bikes would first increase and then decline, while consumption in wind turbines would continue to rise. (3) Dysprosium consumption would peak at about 7200 t by 2042, then remain relatively stable at about 6600 t between 2041 and 2050, mainly concentrated in electric vehicles and wind turbines. (4) With the increase of product scrap, the recycling potential of dysprosium would continuously rise, reaching about 6500 t by 2050, which is expected to meet the future demand. [Conclusion] Although China ranks among the world's top holders of dysprosium reserves, the current mining volume is unlikely to meet future product demand. Therefore, it is necessary to develop a circular economy and recycle dysprosium from “urban minerals” to fill the demand gap, reduce the pressure on primary mineral extraction, and ensure the security of dysprosium resource supply.

Key words: dysprosium; recycling potential; urban minerals; circular economy; rare earth; China