

稀土元素物质流分析研究进展

陈玮^{1,2,3}, 汪鹏^{1,3,4*}, 赵桑^{4,5}, 陈伟强^{1,2,3,4}

1. 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
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 福建农林大学生命科学学院, 福州 350002
4. 中国科学院赣江创新研究院, 赣州 341000
5. 江西理工大学材料冶金化学学部, 赣州 341000

摘要 通过文献计量分析, 梳理了全球、国家和地区尺度的 150 余个稀土元素物质流研究案例, 发现已有研究涉及物质流分析的多个侧面, 但存在基础数据不完备、量化模型不完善、与行业发展需求尚不适应等问题。因此建议: (1) 夯实稀土物质流分析研究数据基础, 整合稀土不同元素的资源与环境数据, 建设稀土行业的大数据平台; (2) 延伸稀土物质流分析的研究边界, 将原生与再生两种资源、国内与国外 2 个市场纳入稀土物质流分析体系, 模拟稀土全元素、分部门的中长期发展需求; (3) 拓展物质流分析方法在稀土产业可持续发展研究中的应用, 开展稀土分元素的环境流、贸易流、价值流及供应链风险研究, 为稀土产业安全高质量发展提供研究支撑。

关键词 稀土; 物质流分析; 资源管理

稀土是元素周期表中镧(La)、铈(Ce)、镨(Pr)、钕(Nd)、钷(Pm)、钐(Sm)、铕(Eu)、钆(Gd)、铽(Tb)、镝(Dy)、钬(Ho)、铒(Er)、铥(Tm)、镱(Yb)、镱(Lu)、铪(Hf)、钇(Y)共 17 种元素的总称^[1]。由于独特的物理化学性质, 稀土成为制造许多高科技产品与支撑众多新兴产业的关键基础材料, 被誉为“新材料之母”。当前, 新一轮能源革命与产业变革

正在全球兴起, 世界各主要经济体如日本、欧盟、美国纷纷发布低碳绿色经济复兴计划。例如, 日本经济产业省发布了《绿色增长战略》^[2], 欧盟委员会发布了“欧洲绿色协议”与《欧洲气候法》草案^[3], 美国宣布重返《巴黎协定》并提出了若干碳减排新政^[4]。在这些不同版本的规划或路径中, 发展风能、储氢、新能源汽车等低碳的稀土下游应用产业被普遍认

收稿日期: 2021-05-15; 修回日期: 2022-01-31

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(71961147003); 国家自然科学基金项目(71904182); 中国科学院江西稀土研究院自主部署项目(E055B004)

作者简介: 陈玮, 硕士研究生, 研究方向为稀土物质流分析, 电子信箱: wchen@iue.ac.cn; 汪鹏(通信作者), 副研究员, 研究方向为金属资源和环境战略, 电子信箱: pwang@iue.ac.cn

引用格式: 陈玮, 汪鹏, 赵桑, 等. 稀土元素物质流分析研究进展[J]. 科技导报, 2022, 40(8): 14-26; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.08.002

2 稀土物质流分析的核算框架

对研究案例进行分析发现,和大多数金属一样^[32],稀土物质流的核算框架大体也有2种表现形式:图2(a)所示为耶鲁大学 Graedel 和 Du^[33]提出的基于存量流量模型(Stock And Flow Model)的稀土物质流核算框架;另一种如图2(b)所示的框架的优势在于能够清晰地展现出稀土元素不同生命阶段所包含的各种产品。在这些研究框架中,稀土元素生命周期循环过程的主要包括6个阶段。

1) 采选阶段:稀土通常作为共生矿产赋存于氟碳铈矿、独居石矿、磷钇矿、风化壳淋积型稀土矿等矿物中,经开采、浮选(或重选、磁选)等工序除去有害杂质、提高稀土氧化物的含量,形成稀土精矿。

2) 冶炼分离阶段:稀土精矿是多种稀土元素的混合物,经溶解、分离、浓缩、灼烧等工艺过程,转

化为混合稀土氯化物,经萃取、洗涤、反萃取等过程分离为单一元素氧化物,再经过熔盐电解形成稀土金属。

3) 材料加工阶段:稀土氧化物或稀土金属加工成为稀土功能材料,包括稀土永磁体、稀土催化剂、稀土荧光粉、稀土抛光粉、稀土玻璃陶瓷等。

4) 产品制造阶段:稀土功能材料经过制造阶段成为稀土终端产品,包括家用电器、风机、电动汽车等。

5) 社会使用阶段:稀土终端产品进入社会为人类提供服务,在产品使用寿命期限内,稀土都将留存于社会经济系统中,成为物质的产品存量(in-use product stocks)。

6) 废弃处理与回收阶段:稀土产品达到使用寿命后进入报废阶段,其中部分稀土经回收重新进入稀土的流动过程。

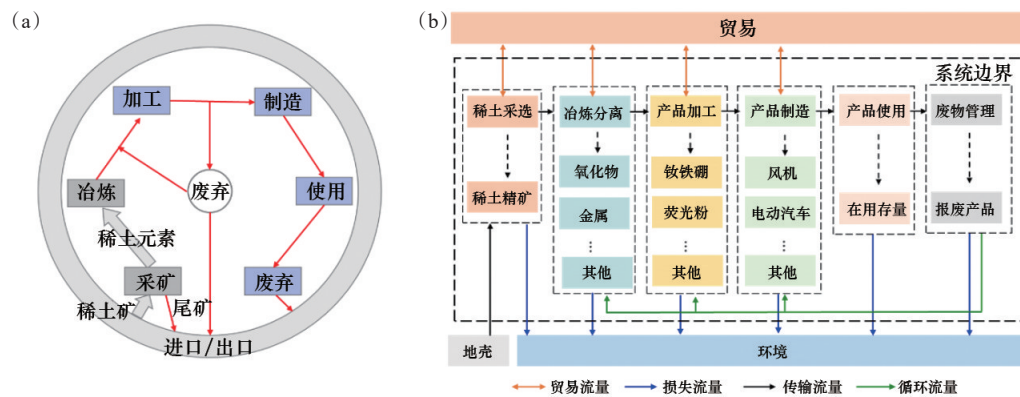


图2 稀土物质流分析研究框架的循环(a)及从左到右2种表现形式(b)

稀土物质流核算的基础是元素在每个阶段的流动都遵循质量守恒原则。具体而言,某一环节的输入流量包括从上一个环节传输过来的流量 F_{ij}^{fromPre} 和该环节产生的产品的进口流量 F_{ij}^{import} ; 输出流量包括传输给下一个环节的流量 F_{ij}^{toNext} 、从该环节产生的排放到自然环境的损失流量 F_{ij}^{loss} 及该环节产生的产品的出口流量 F_{ij}^{export} 。每个环节的流入量、流出量、损失量、贸易量遵循质量守恒定律,即

$$F_{ij}^{\text{fromPre}} + F_{ij}^{\text{import}} = F_{ij}^{\text{toNext}} + F_{ij}^{\text{export}} + F_{ij}^{\text{loss}} \quad (1)$$

$$F_{ij}^{\text{fromPre}} + S_{j-1}^{\text{inuse}} = F_{ij}^{\text{toNext}} + F_{ij}^{\text{loss}} + S_j^{\text{inuse}} \quad (2)$$

式中, i 为物质生命周期阶段; j 为年份; F_{ij}^{fromPre} 为物质在第 j 年第 i 阶段的流入量; F_{ij}^{import} 为物质的进口量; F_{ij}^{export} 为物质的出口量; F_{ij}^{loss} 为第 j 年第 i 阶段的损失量; F_{ij}^{toNext} 为第 j 年第 i 阶段的流出量; S_j^{inuse} 表示第 j 年的存量。

3 稀土元素物质流分析研究案例

梳理全球(表1)与国家/地区尺度(表2)稀土物质流分析研究的生命周期边界、元素种类以及关注

问题,追溯稀土物质流分析的起源与发展,并分区域分析中国、美国、日本、欧洲的稀土元素物质流分析研究的特征及进展。

如表1所示,全球尺度下稀土物质流分析内容较为全面,既有稀土历史流动的核算,也有未来流动的模拟,其中稀土历史流动以单一年份的核算为主,未来需求模拟大多涉及较长时间序列;既有稀

土产能的趋势分析,也有消费量及其结构的预测;既有稀土供应风险的评估,也有相应缓解策略的研究,重点评估稀土回收的潜力与经济性。如表2所示,国家/地区尺度的研究主要分布在中国、欧盟、日本与美国,主要研究元素有钕、镨、镱、铽、铈等,不同区域的重点关注问题各不相同。

表1 全球尺度稀土物质流分析研究情况

作者	生命周期阶段	时间边界	研究对象	研究问题
Nansai 等 ^[34]	完整生命周期	2005	钕	全球贸易与稀土流动
Du 等 ^[35-36]	完整生命周期	2007	钕、镧、铈、镨、钆、钇、铈、镱、镱、镱	稀土流量存量核算
Wang 等 ^[37]	完整生命周期	1950—2012	钕、镧、铈、镨、钆、钇、铈、镱、镱、镱、镱、镱、镱、镱、镱	稀土资源效率分析
Alonso 等 ^[38]	完整生命周期	2010—2035	钕、镧、铈、镨、钆、钇、铈、镱、镱、镱	稀土未来需求预测
Zimmermann ^[39]	完整生命周期	2012—2030	钕	稀土资源耗散核算
Sprecher 等 ^[40]	完整生命周期	—	钕	稀土供应链弹性分析
Peiró 等 ^[41]	回收	2010	镧、铈、镨、钆、钇、铈、钆	稀土资源供应安全
Sommer 等 ^[42]	回收	2011	稀土整体	电子设备中稀土回收潜力
Qiu 等 ^[43]	回收	1990—2050	钕、镧、铈、钆、钆	照明领域稀土回收经济性
Pavel 等 ^[44]	回收	2005—2020	镨、钆、镱、钆	稀土资源供应安全
Rademaker 等 ^[45]	回收	2011—2030	钆、镱	钆铁硼的稀土回收潜力
Schulze 等 ^[46]	回收	2020—2030	镨、钆、镱、钆	永磁体中的稀土回收潜力
Sabbaghi 等 ^[47]	损失	2005—2015	钕	全球HDD贸易与稀土损失
Du 等 ^[48]	使用	1995—2007	钕、镧、铈、镨、钆、钇、铈、镱、镱、镱	稀土流量存量核算
Li 等 ^[49]	使用	2016—2050	镨、钆、镱	风机发展与稀土需求预测

3.1 稀土元素物质流分析研究梳理

稀土物质流分析研究的发展可以划分为2个阶段:

第1个阶段以科研需求为导向,在稀土物质流量化框架搭建上取得了一系列进展。耶鲁大学的Du和Graedel^[35]最早构建了包括采矿、冶炼分离、加工、制造、使用、废弃回收等阶段在内的稀土全生命周期物质流核算框架,针对镧、铈等10种稀土元素开展物质流分析,核算了这些稀土元素全生命周期的流量与存量。Du和Graedel的贡献在于开发了稀土元素物质流核算框架。在此基础上,Du等^[48]又基于稀土的最终用途,首次量化了1995—2007年中国、日本和美国稀土元素在各个领域的消费量及其变化趋势。

第2阶段以对接现实需求为导向,在稀土分元

素和动态物质流的分析方面取得了一系列进展。以2010年稀土供应危机事件为关键时间节点,世界各国开始高度关注稀土资源的供应安全。因此,研究者纷纷围绕稀土资源供应风险及其缓解策略开展研究,国际稀土物质流分析研究进入第2阶段。相较于第1阶段,第2阶段的研究呈现3大新的特征:首先是稀土物质流分析由历史核算转向未来预测,Alonso等^[38]预测了未来全球稀土各元素的需求量,发现未来钕和镨的需求将分别增长7和26倍,Li等^[49]分析了未来稀土供应与风电可持续发展的关系,发现目前全球稀土储量高于截至2050年风电发展的稀土需求量,但产能是最大的制约因素,未来钕、镨、镱元素的产能需要扩张7~14倍;其次是稀土物质流分析由全链条核算转向单一环节的具体分析,Rademaker等^[45]、Sommer等^[42]和Schul-

表2 国家/地区尺度稀土物质流分析研究情况

国家/地区	作者	生命周期	时间边界 (年份)	研究对象	研究问题
中国	Geng等 ^[50]	完整生命周期	2016	钕	稀土物质流核算
中国	Wang等 ^[51]	完整生命周期	1990—2018	铈	物质流核算与关键性评估
中国	Mancheri等 ^[52]	完整生命周期	—	稀土整体	政策-稀土供应链评估
中国	Elshkaki ^[53]	制造及使用	2010—2050	镧、铈、镨、钕、镱、钆	汽车电气化与稀土需求预测
中国	Elshkaki等 ^[54]	制造及使用	2010—2050	钕、镱、镨、铽	稀土未来需求预测
中国	Wang等 ^[55]	制造及使用	2010—2050	钕、镱	稀土未来需求预测
中国	Li等 ^[56]	制造及使用	2018—2030	镧、铈、镨、钕、镱、钆、铽、钇、铈	汽车电气化下稀土需求预测
中国	Qiu等 ^[57]	选矿及冶炼	—	稀土整体	稀土生产环境影响
中国	Nguyen等 ^[58]	生产	2007—2015	稀土整体	政策-稀土供应链弹性分析
中国	Chen等 ^[59]	缺少最终环节	2002、2011	镧	稀土流量存量核算
中国	Chen等 ^[60]	缺少最终环节	2002、2011	钕	稀土流量存量核算
日本	Shi等 ^[61]	完整生命周期	1987—2008	镱	稀土物质流核算
日本	Sekine等 ^[62]	完整生命周期	1987—2012	钕、镱	稀土物质流核算与回收评估
日本	Seo等 ^[63]	回收	2010—2030	镱	稀土减量化与稀土回收策略
日本	Yano等 ^[64]	回收	2010—2030	钕、镨、镱、铽、镧、铈、钇、铈	HEV的稀土回收潜力分析
日本	Seo等 ^[65]	缺少最终环节	2001—2011	钇	稀土物质流核算
欧盟	Deloitte ^[66]	完整生命周期	2013	镱、铈、铈、钕、铽、钇	稀土物质流核算
欧盟	Ciacci等 ^[67]	完整生命周期	1990—2016	铈	稀土物质流核算与供应安全
欧盟	Guyonnet等 ^[68]	完整生命周期	2010—2020	镨、钕、铈、铽、镱、钇	稀土物质流核算与供应潜力
欧盟	Rollat等 ^[69]	完整生命周期	2013—2020	镨、钕、铈、铽、镱、钇	稀土未来供需预测
欧盟	Ciacci等 ^[70]	回收	1990—2016	钕	稀土回收潜力与供应安全
美国	Fishman等 ^[71]	完整生命周期	2000—2050	镧、铈、钕	汽车电气化下稀土未来需求
美国	Nassar等 ^[72]	制造及使用	2016—2040	钕、镨、镱、铽	风电驱动下稀土需求预测
韩国	Swain等 ^[73]	完整生命周期	2010	钕	稀土流量存量核算
韩国	Lee等 ^[74]	完整生命周期	2011	铽	稀土流量存量核算
瑞士	Morf等 ^[75]	回收	—	钕、钆、镨、钇	稀土回收潜力评估
丹麦	Cao等 ^[76]	制造及使用	2018—2050	钕、镱	稀土需求预测与回收潜力
丹麦	Habib等 ^[77]	回收	2012—2035	钕、镱	稀土回收潜力分析

ze等^[46]聚焦回收环节,分别量化了风机、废弃电子设备(如手机、电脑等)、永磁体中的稀土可回收量,发现与快速增长的需求相比稀土可回收量非常小,Qiu等^[43]则从成本收益的角度评估了照明领域内的稀土回收潜力,发现回收利用只有在稀土价格较2018年价格提高3倍的情景下才具有经济可行性;最后是稀土物质流分析愈发倾向于单一元素的精细化分析,例如Nansai等^[34]刻画了钕元素在全球范围内高分辨率的流动足迹。

3.2 稀土物质流分析区域特征和进展分析

由于各国稀土产业发展状况与政府需求的差异性,不同区域下稀土物质流分析研究的关注重点也存在差异,如图3所示。

中国是稀土储量大国、生产大国与消费大国,针对中国的稀土物质流分析研究集中在3个方面。首先是稀土元素全生命周期的物质流核算,Chen等^[59-60]、Geng等^[50]、Wang等^[51]量化了中国稀土镧、钕、铈的流动;其次是稀土资源未来需求预测与供

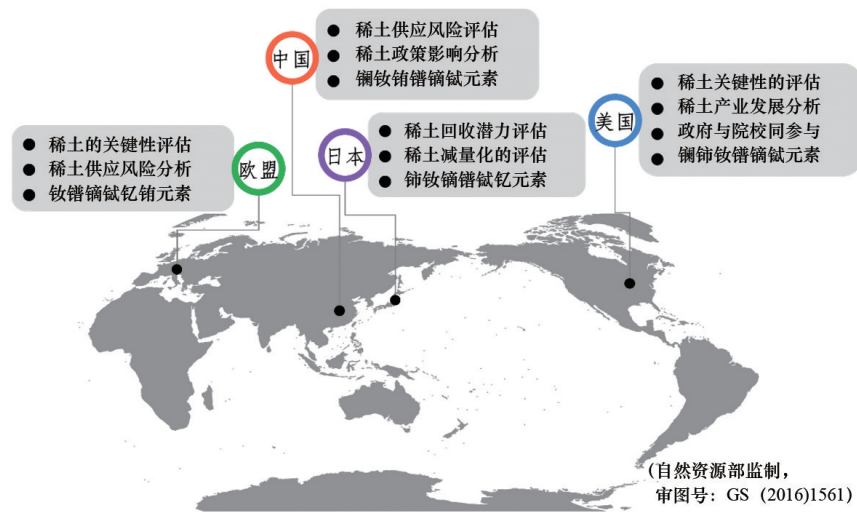


图3 不同国家/地区稀土物质流分析的特点

应风险评估, Wang等^[55]核算了中国可再生能源转型对稀土资源的需求量,发现中国的风力发电的发展可能会受到稀土产能的限制, Elshkak等^[53]认为中国电力技术与新能源汽车发展可能受钽、镧、钕元素产能的制约, Li等^[56]认为中国汽车电气化将加剧镧、镨元素的供需矛盾;最后是中国稀土政策影响分析, Nguyen等^[58]从供应和需求2个角度分析中国的稀土开采配额、冶炼分离配额、出口配额和资源税等政策对全球稀土供应格局的影响, Mancheri等^[52]利用系统动力学模型评估了中国稀土生产与贸易政策对稀土供应链弹性的影响,发现中国稀土政策是国际稀土价格的重要影响因素。

美国对稀土等战略性关键矿产的关注和研究由来已久,针对美国的稀土物质流分析研究可以分为3类:首先是美国能源部等政府部门以及耶鲁大学等高校开展的稀土元素关键性(criticality)评估研究,2010年美国能源部^[78]开展了金属元素的关键性评估研究,认为稀土镧、钕、钽、铈、镨对经济、科技、军事极为重要但存在较高的供应风险,美国科学技术委员会^[79]将关键性与物质流结合开展关键金属的动态评估,发现稀土元素的关键性级别一直处于较高水平,耶鲁大学^[80]的研究也表明稀土极其“关键”;其次是美国学术界对稀土资源未来需求的预测研究, Fishman等^[71]预测了美国未来新能源汽车产业对稀土的需求量, Nassar等^[72]预测了美国风

能发展所需的稀土量,发现到2040年镧元素的供应风险最高;最后是近年来美国白宫、国防部等发布的一系列关于稀土产业政策的法案与法规,美国2017年发布总统令^[81]要求确保国内稀土资源安全稳定的供应,2020年再度发布总统令^[82]要求推动稀土等关键矿产的产业链自主化,以消除对外依赖带来的供应风险,2021年发布行政命令^[83]要求利用物质流等方法全面审查稀土金属的供应链,意在全面分析美国稀土产业存在的问题与风险。

与美国类似,欧盟也长期关注稀土等关键金属的资源安全,针对欧盟的稀土物质流分析研究可以分为2类:第1类是欧盟定期开展金属元素的关键性研究,在欧盟关键原材料委员会连续发布的矿产资源关键性评估报告^[84-86]中,稀土一直被列为“关键金属”;第2类是欧盟学术界开展的稀土元素未来供需变化研究, Rollat等^[69]预测未来欧盟稀土金属的供需变化,发现在没有地缘政治危机的情况下,欧盟的稀土供应不会出现严重短缺,而部分元素供应将出现过剩现象, Ciacci等^[70]以稀土钕为研究对象,发现如果将回收潜力全部转化为实际产能,回收量能满足欧盟每年稀土钕需求量的50%, Guyonnet等^[68]也认为采矿与回收可以满足欧盟对稀土的需求。

日本是稀土消费大国但缺乏稀土生产与冶炼能力,因此日本高度担忧稀土供应安全并长期致力

于减缓稀土资源的供应风险。针对日本的稀土物质流分析研究集中于稀土回收潜力评估与稀土减量化技术评估等, Sekine 等^[62]核算了日本钕、镨元素的流量与存量, 发现回收混合动力电动汽车(HEV)的驱动电机和空调的压缩机中的稀土具有经济可行性, Yano 等^[64]研究了日本从 HEV 中回收稀土的潜力, 发现到 2030 年从驱动电机、镍氢电池中回收的稀土可以满足各自需求的 36%、92%, Seo 等^[63]对比日本稀土镨减量化与稀土回收 2 种策略对缓解供应风险的效果, 发现少镨磁体开发策略比回收策略更有效。

4 研究存在的不足与挑战

现有研究在稀土流动量化与稀土资源供应安全方面取得了一定的进展, 但仍存在稀土物质流分析基础数据不完备、稀土流动模拟模型不完善、研究内容与实际产业需求不匹配等不足。

4.1 供需数据不匹配和历史量化流动研究缺失

模拟元素历史全生命周期流动是解析稀土生产、消费、贸易、损失与回收格局及其演变过程的重要手段。然而如 3.1 部分所示, 现有研究在稀土分元素的历史动态流动模拟方面存在较大空白: 在全球尺度, 有 7 种元素缺乏物质流模拟研究, 分别是钷、铽、铈、镱、镱、镱、钆; 在国家/地区尺度, 欧盟仅有 6 种元素的物质流分析研究(镨、钕、镨、铈、镱、钆), 日本仅有 3 种元素(钕、镨、钆), 中国仅有 3 种元素(镧、钕、镨), 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。稀土生产、消费、贸易等统计数据是元素物质流核算的基础, 而稀土统计数据目前存在供需数据不平衡、贸易数据不对称、下游数据不完备等 3 大问题。

第一, 稀土供给需求数据不平衡。上下游质量平衡是元素物质流核算的基本原则, 然而, 如图 4 所示, 实际稀土矿产量(基于下游钕铁硼永磁体产量反推得到, 以稀土氧化物 REO 计)、高于中国统计的稀土矿产量。Geng 等^[50]核算了 2016 年中国钕元素的全生命周期流动, 发现为满足下游需求当年上游产量应为 3 万 t, 而官方统计产量仅 1.5 万 t

——无指标超指标稀土产量占实际产量的 50%, 并强调了未来风机和新能源汽车将进一步驱动钕需求持续快速增长。Mancheri 等^[52]认为中国无指标超指标稀土产量占实际产量 40%~50%, 其原因在于钕、镨等元素的实际产量受钕铁硼需求的驱动超过其生产配额。Nguyen 等^[58]则发现分轻重、分元素的无指标超指标产量差异极大, 其中轻稀土的无指标超指标产量占实际产量的 22%~25%, 而重稀土的这一比例为 59%~65%。在稀土元素去向方面, Lee 等^[87]认为中国无指标超指标稀土生产很大程度上受海外市场需求驱动, Wang 等^[51]发现中国以含稀土的中间和最终产品形态向全球各国出口大量稀土资源。

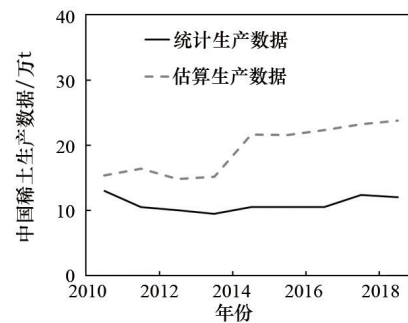


图4 中国稀土行业数据不平衡现象

第二, 稀土双边贸易数据不对称。资源的贸易流一般通过联合国贸易数据库(UN Comtrade Database)或各国海关统计的贸易数据进行核算, 然而, 不同数据源下的中国稀土出口数据存在明显的不对称性。例如, 《中国的稀土状况与政策》显示, 2006—2008 年国外海关统计的来自中国的稀土进口量比中国海关统计的出口量分别高出 35%、59% 和 36%, 2011 年更是高出 120%, 这意味着存在大规模未被中国海关统计到的稀土出口行为^[6]。

大规模无指标超指标的稀土生产与出口行为既对中国稀土资源安全与生态环境造成重大影响, 也是中国作为稀土大国却长期缺失定价权的重要原因之一。因此, 中国历史及当前未被统计的稀土生产与出口规模、途径及相应对策将是本领域的重要研究内容。

第三, 稀土下游产业数据不完备。首先, 稀土

是“小产业,大行业”,其下游应用涉及航空航天、电子信息、能源、交通、医疗等数十个领域,包括数百种产品,实际研究时完整准确识别其下游产品难度极大。其次,稀土在军工、航空航天、核能等关键技术领域的技术参数、实际消费量等数据的可获取性极低。再次,稀土应用涉及发光、玻璃、冶金、永磁、催化等多个部门,然而这些领域的下游产品却不都含有稀土金属,核算过程中稀土产品的市场渗透率与稀土含量存在不确定性。最后,回收端的稀土部件种类及其可回收程度目前大多也是不确定的。

4.2 量化模型不完善和未来供需预测研究不足

不同国家针对本国实际情况开展了大量稀土资源未来需求预测、未来供需匹配、资源回收潜力分析等研究。然而,受当前量化模型不完善的限制,这些研究往往存在许多局限性,主要表现在以下2个方面。

在需求侧,稀土各个元素不同应用部门的中长期发展预测缺失。不同稀土元素应用于冶金机械、石油化工、陶瓷玻璃、农业轻纺、永磁体、储氢合金材料、发光材料、净化催化剂等不同产业,这些稀土下游产业发展状况各不相同,相应地,不同稀土元素的需求变化趋势也呈现差异性。特别是,当前各国纷纷承诺碳达峰、碳中和目标,要求大力发展风能、储氢、新能源汽车等低碳能源产业,相应带动稀土元素的需求快速增长。全面量化稀土元素的未来需求及其结构是保障稀土下游产业安全、健康发展的基础,然而,现有稀土需求预测模型大多仅考虑个别产业、仅针对少数元素,尚缺乏将稀土全应用、全元素的需求纳入预测体系的流动模拟模型。

在供给侧,稀土原生和再生矿产供应模型开发与关联分析不足。资源安全是指一个国家可以稳定且经济地获取所需资源的能力,是国家安全的重要组成部分^[88],稀土作为重要的战略资源,如何保障其供应安全是各国关注的重要问题。目前全球稀土矿产开发潜力较大但空间分布不均,开展全球稀土矿分布及其供应潜力评估研究是促进原生矿产合理开发利用的基础。此外,稀土产品报废后产生大量的可再生利用的稀土资源,量化这些报废产品的时空分布有助于促进资源再生,进而起到减缓

原生资源消耗的作用。然而,目前尚缺乏高空间分辨率的稀土原生与再生矿产分布和供应潜力的量化分析模型。

4.3 国内研究力度与我国稀土产业发展需求不匹配

经过几十年的发展,中国稀土行业在资源生产、产业结构调整、管理体系建设等方面取得了较大进展,然而,目前依然面临生产环境影响严重、国际市场定价权缺失、元素下游应用不平衡等重要问题。国内现有稀土物质流分析研究主要关注稀土元素历史流动与未来供应风险,尚未向稀土产业健康发展方向延伸,无法适配当前稀土产业发展的需求。因此,为促进中国稀土产业持续健康发展,稀土物质流分析研究亟需紧密关联下列战略需求:

1) 服务稀土产业安全发展。充足的资源供应是保障稀土产业安全发展的基础,中国虽然是稀土储量与生产大国,却也面临未来稀土资源供应不足的风险。在此背景下,深入剖析中国原生与再生稀土资源的供应潜力,动态评估海外国家的稀土生产潜力以及潜在合作可行性,从国内、国际2个视角开展稀土资源供应安全分析,为稀土产业的安全发展提供数据基础与科学支撑,是未来稀土物质流分析研究的重要内容。

2) 服务稀土产业高值发展。从价值的角度看,中国稀土在国际市场处在稀土价值链的中低端,没发挥“稀”的优势,仅卖出了“土”的价格^[89]。在此背景下,开展稀土分元素全产品的贸易流分析,追踪中国各类稀土产品的价值流动,识别中国稀土产业价值提升的路径,促进中国稀土产业高值发展极为重要。

3) 服务稀土产业绿色发展。中国《稀土行业发展规划(2016—2020年)》^[90]指出,要坚持稀土产业绿色发展,减少污染物产生和排放,拓展稀土材料在节能环保领域的应用。在此背景下,物质流分析需要同生命周期评价方法紧密结合,完善稀土全生命周期环境影响因子清单,识别稀土生产的污染排放与重要污染节点,量化稀土环境污染成本,开展稀土环境污染全球责任共担机制研究,提升中国稀土绿色话语权。

4) 服务稀土元素均衡发展。作为共生矿产,稀土元素共同开采又各为所用。目前,稀土元素供需不平衡十分突出,钕、镨、镱、铽、铈、钇供不应求,而镧、铈、钇等大量积压。当前研究多数仅关注钕、镨等少数元素,刻画多种稀土元素供需情况的研究更为稀少。因此,综合对比不同元素的供需情况,系统分析不同稀土元素供需不平衡状况,探究稀土元素的产业延伸和管理策略,将是未来稀土物质流分析研究的重点方向。

5) 服务稀土战略储备体系建设。工业和信息化部2021年《稀土管理条例(征求意见稿)》指出要实行稀土资源地和稀土产品战略储备^[9]。物质流分析在识别不同稀土元素的需求缺口或过剩程度方面具有独特优势,可以为稀土收储的时间节点、总体规模、元素种类、产品类型的分析提供方法支撑。因此,发挥物质流在稀土储备体系建设中的应用价值,是未来稀土物质流分析的重要方向。

5 结论

综述了稀土物质流分析领域的研究进展,得到如下结论:首先,现有稀土物质流分析研究以全球尺度和国家/地区尺度为主;从关注元素看,钕、镨、镱元素的研究数量最多。其次,从发展历程看,稀土物质流分析经历了“以科研兴趣为导向”和“以现实需求为导向”2个阶段,研究重点也由稀土物质流的历史分析转向稀土资源的未来供应风险及其缓解策略分析。最后,由于稀土产业发展状况与各国国内需求的差异性,中、美、欧、日等国的研究重点也存在差异。其中,美国的特征在于集合政府机构与顶尖院校等多方力量,开展稀土金属的关键性评估、未来需求预测与产业发展的全方位研究。欧盟的重点在稀土元素关键性的动态评估、稀土资源的供应风险分析2个方面。日本的研究以报废产品的稀土回收潜力及其经济性评估为主。中国相关研究包括3类:首先是稀土元素历史流动的量化,其次是稀土资源未来需求预测与供应风险评估,最后是中国稀土政策对国际稀土供应格局的影响分析。

研究现存不足:首先,现有基础数据不完备,具体包括稀土下游产业统计数据不完备、稀土上游生产与下游消费数据不平衡、双边稀土贸易数据不对称;其次,现有元素流动模拟模型不完善,包括需求侧与供给侧模块的不完善;最后,现有研究内容与中国稀土产业发展不匹配。

基于此,对中国稀土物质流分析领域的未来发展提出以下建议:

1) 推动稀土行业大数据平台的建设。利用物质流分析方法,集成稀土生产、消费、贸易、回收、环境、经济、专利等数据,开展全产业链、全元素、长时间序列、分国别的稀土物质流分析研究,开发无指标超标稀土生产与出口开采与走私量核算模块,建设稀土行业数据库,定期开展全球稀土格局演变的追踪研究。

2) 延伸稀土物质流分析的分析边界和应用范围。在需求侧,将稀土全部门、分元素的未来需求纳入预测体系;在供应侧,充分考虑原生再生2种资源、国内国外2个市场的稀土供应潜力,完善全球视角下的高空间分辨率的稀土原生与再生矿产供应模型,开展稀土多国别、分元素的物质流动的历史分析和未来预测。

3) 提升物质流分析服务稀土产业实际需求的能力。结合生命周期评价、投入产出分析、复杂网络分析、系统动力学、情景分析等跨学科的方法,开展稀土物质流与环境流、贸易流、价值流耦合研究,核算稀土生产的环境影响与生态成本,为中国稀土产业高质量发展与战略决策提供研究支撑。

参考文献(References)

- [1] 苏文清. 中国稀土产业经济分析与政策研究[M]. 北京: 中国财政经济出版社, 2009.
- [2] 中国科学院科技战略咨询研究院. 日本《绿色增长战略》提出2050碳中和发展路线图[EB/OL]. (2021-03-22) [2021-05-01]. http://www.casisd.cn/zkcg/ydkb/kjqykb/2021kjqykb/202102/202103/t20210322_5981073.html.
- [3] European Commission. European climate law[EB/OL]. (2021-03-22) [2021-05-01]. https://ec.europa.eu/clima/eu-action/european-green-deal/european-climate-law_en.

- [4] 腾讯网. 拜登新政: 2035 美国无碳发电, 2050 实现碳中和 [EB/OL]. (2021-01-26) [2021-05-01]. <https://new.qq.com/omn/20210126/20210126A02JTC00.html>.
- [5] Graedel T E, Harper E M, Nassar N T, et al. Criticality of metals and metalloids[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(14): 4257-4262.
- [6] 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 [EB/OL]. (2012-06-20) [2021-05-01]. http://www.gov.cn/zhengce/2012-06/20/content_2618561.htm.
- [7] United States Geological Survey. Geological survey mineral commodity summaries 2020[R]. Reston: US Geological Survey, 2021.
- [8] European Commission. Critical minerals for the EU economy: Foresight to 2030[R]. Brussels: EU, 2013.
- [9] European Commission. Study on the EU's list of critical raw materials-Final report (2020)[R]. Brussels: EU, 2020.
- [10] 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(4): 75-77.
- [11] 李永绣, 张玲, 周新木. 南方离子型稀土的资源 and 环境保护性开采模式[J]. *稀土*, 2010, 31(2): 80-85.
- [12] 邹国良, 吴一丁, 蔡嗣经. 离子型稀土矿浸取工艺对资源、环境的影响[J]. *有色金属科学与工程*, 2014, 5(2): 100-106.
- [13] 高志强, 周启星. 稀土矿露天开采过程的污染及对资源和生态环境的影响[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(12): 2915-2922.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 张丹琳. 当前稀土资源现状与供需形势分析[J]. *国土资源情报*, 2020(5): 37-41.
- [19] Frosch R A, Gallopoulos N E. Strategies for manufacturing[J]. *Scientific American*, 1989, 261(3): 144-153.
- [20] Graedel T E. Material flow analysis from origin to evolution[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 53 (21): 12188-12196.
- [21] Graedel T E, van Beers D, Bertram M, et al. Multilevel cycle of anthropogenic copper[J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, 38(4): 1242-1252.
- [22] 沈镛, 刘晓洁. 资源流研究的理论与方法探析[J]. *资源科学*, 2006, 28(3): 9-16.
- [23] 刘刚. 推进物质流和社会经济代谢研究, 助力实现联合国可持续发展目标[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33 (1): 30-39.
- [24] 陆钟武, 岳强. 物质流分析的两种方法及应用[J]. *有色金属再生与利用*, 2006(2): 27-28.
- [25] Wang T, Müller D B, Graedel T E. Forging the anthropogenic iron cycle[J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(14): 5120-5129.
- [26] 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(1): 1-11.
- [27] 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.
- [28] Johnson J, Schewel L, Graedel T E. The contemporary anthropogenic chromium cycle[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(22): 7060-7069.
- [29] 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.
- [30] Mao J S, Dong J, Graedel T E. The multilevel cycle of anthropogenic lead. II. Results and discussion[J]. *Resources, conservation and recycling*, 2008, 52(8/9): 1050-1057.
- [31] 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.
- [32] Chen W-Q, Graedel T E. Anthropogenic cycles of the elements: A critical review[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46(16): 8574-8586.
- [33] Center for Industrial Ecology. Stocks and flows project (STAF)[EB/OL]. [2021-05-01]. <https://cie.research.yale.edu/research/stocks-and-flows-project-staf>.
- [34] Nansai K, Nakajima K, Kagawa S, et al. Global flows of critical metals necessary for low-carbon technologies: The case of neodymium, cobalt, and platinum[J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, 48(3): 1391-1400.
- [35] Du X, Graedel T E. Uncovering the global life cycles of the rare earth elements[J]. *Scientific Reports*, 2011, 1: 1-5.
- [36] Du X, Graedel T E. Global in-use stocks of the rare

- earth elements: A first estimate[J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45(9): 4096–4101.
- [37] 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.
- [38] 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 and Technology*, 2012, 46(6): 3406–3414.
- [39] Zimmermann T. Uncovering the fate of critical metals: Tracking dissipative losses along the product life cycle [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2017, 21(5): 1198–1211.
- [40] Sprecher B, Daigo I, Murakami S, et al. Framework for resilience in material supply chains, with a case study from the 2010 rare earth crisis[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49(11): 6740–6750.
- [41] 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]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 47(6): 2939–2947.
- [42] Sommer P, Rotter V S, Ueberschaar M. Battery related cobalt and REE flows in WEEE treatment[J]. *Waste Management*, 2015, 45: 298–305.
- [43] Qiu Y, Suh S. Economic feasibility of recycling rare earth oxides from end-of-life lighting technologies[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 150: 104432.
- [44] Pavel C C, Lacal-Arántegui R, Marmier A, et al. Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines[J]. *Resources Policy*, 2017, 52: 349–357.
- [45] Rademaker J H, Kleijn R, Yang Y. Recycling as a strategy against rare earth element criticality: A systemic evaluation of the potential yield of Nd-Fe-B magnet recycling[J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 47(18): 10129–10136.
- [46] Schulze R, Buchert M. Estimates of global REE recycling potentials from Nd-Fe-B magnet material[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016, 113: 12–27.
- [47] Sabbaghi M, Cade W, Olson W, et al. The global flow of hard disk drives: Quantifying the concept of value leakage in e-waste recovery systems[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2019, 23(3): 560–573.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] Geng J X, Hao H, Sun X, et al. Static material flow analysis of neodymium in China[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2020, 25(1): 114–124.
- [51] Wang Q C, Wang P, Qiu Y, et al. Byproduct surplus: Lighting the depreciative europium in China's rare earth boom[J]. *Environmental Science and Technology*, 2020, 54(22): 14686–14693.
- [52] Mancheri N A, Sprecher B, Bailey G, et al. Effect of Chinese policies on rare earth supply chain resilience[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 142: 101–112.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] Wang P, Chen L Y, Ge J P, et al. Incorporating critical material cycles into metal-energy nexus of China's 2050 renewable transition[J]. *Applied Energy*, 2019, 253: 113612.
- [56] 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.
- [57] Qiu C, Gong X Z, Chen W J, et al. Materials flows analysis on the beneficiation and roasting processes of a typical rare earth mineral[J]. *Materials Science Forum*, 2016, 847: 352–357.
- [58] Nguyen R T, Imholte D D. China's rare earth supply chain: Illegal production, and response to new cerium demand[J]. *JOM: the Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2016, 68(7): 1948–1956.
- [59] 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.
- [60] Chen W J, Nie Z R, Wang Z H, et al. Substance flow analysis of neodymium based on the generalized entropy in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 133(1): 438–443.

- [61] Shi W, Daigo I, Matsuno Y, et al. Substance flow analysis of dysprosium in Japan[J]. *Journal of the Japan Institute of Metals and Materials*, 2010, 2: 758–765.
- [62] Sekine N, Daigo I, Goto Y. Dynamic substance flow analysis of neodymium and dysprosium associated with neodymium magnets in Japan[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2017, 21(2): 356–367.
- [63] Seo Y, Morimoto S. Comparison of dysprosium security strategies in Japan for 2010–2030[J]. *Resources Policy*, 2014, 39(1): 15–20.
- [64] Yano J, Muroi T. Rare earth element recovery potentials from end-of-life hybrid electric vehicle components in 2010–2030[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2020, 18(4): 655–664.
- [65] Seo Y, Morimoto S. Domestic Yttrium consumption trends in Japan[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, 20(5): 1064–1071.
- [66] European Commission. Study on data for a raw material system analysis: Roadmap and test of the fully operational MSA for raw materials[R]. Brussels: EU, 2015.
- [67] Ciacci L, Vassura I, Passarini F. Shedding light on the anthropogenic europium cycle in the EU–28. Marking product turnover and energy progress in the lighting sector[J]. *Resources*, 2018, 7(3): 59.
- [68] 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.
- [69] Rollat A, Guyonnet D, Planchon M, et al. Prospective analysis of the flows of certain rare earths in Europe at the 2020 horizon[J]. *Waste Management*, 2016, 49: 427–436.
- [70] 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.
- [71] Fishman T, Myers R J, Rios O, et al. Implications of emerging vehicle technologies on rare earth supply and demand in the United States[J]. *Resources*, 2018, 7(1): 1–15.
- [72] Nassar N T, Wilburn D R, Goonan T G. Byproduct metal requirements for U. S. wind and solar photovoltaic electricity generation up to the year 2040 under various Clean Power Plan scenarios[J]. *Applied Energy*, 2016, 183: 1209–1226.
- [73] Swain B, Kang L, Mishra C, et al. Materials flow analysis of neodymium, status of rare earth metal in the Republic of Korea[J]. *Waste Management*, 2015, 45: 351–360.
- [74] Lee I S, Kim J G. Industrial demand and integrated material flow of terbium in Korea[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing–Green Technology*, 2014, 1(2): 145–152.
- [75] 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.
- [76] Cao Z, O’Sullivan C, Tan J, et al. Resourcing the fairy-tale country with wind power: A dynamic material flow analysis[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 53: 11313–11322.
- [77] Habib K, Schibye P K, Vestbø A P, et al. Material flow analysis of Nd–Fe–B magnets for Denmark: A comprehensive waste flow sampling and analysis approach[J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, 48(20): 12229–12237.
- [78] U. S. Department of Energy. Critical materials strategy [R]. Washington DC: DOE, 2010.
- [79] National Science and Technology Council. Assessment of critical minerals: Screening methodology and initial application[R]. Washington D. C: National Science and Technology Council, 2017: 57.
- [80] Nassar N T, Du X, Graedel T E. Criticality of the rare earth elements[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2015, 19(6): 1044–1054.
- [81] Trump D J. A federal strategy to ensure secure and reliable supplies of critical minerals[EB/OL]. (2017–12–20) [2021–05–01]. <https://www.federalregister.gov/documents/2017/12/26/2017-27899/a-federal-strategy-to-ensure-secure-and-reliable-supplies-of-critical-minerals>.
- [82] Trump D J. Executive order on addressing the threat to the domestic supply chain from reliance on critical minerals from foreign adversaries[EB/OL]. (2020–10–05) [2021–05–01]. <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/executive-order-addressing-threat-domestic-supply-chain-reliance-critical-minerals-foreign-adversaries>.
- [83] Joseph R, Biden J R. Executive order on America’s supply chains[EB/OL]. (2021–02–24) [2021–05–01]. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2021/02/24/executive-order-on-americas-supply-chain-s>.
- [84] European Commission. Report on critical raw materials

- for the EU: Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials[R]. Brussels: EU, 2014.
- [85] European Commission. Study on the review of the list of critical raw materials[R]. Brussels: EU, 2017.
- [86] European Commission. Critical raw materials resilience: Charting a path towards greater security and sustainability[R]. Brussels: EU, 2020.
- [87] Lee J C K, Wen Z. Pathways for greening the supply of rare earth elements in China[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(10): 598–605.
- [88] 谷树忠, 李维明. 实施资源安全战略 确保我国国家安全 [EB/OL]. (2014-04-29) [2021-05-01]. <http://finance.people.com.cn/n/2014/0429/c1004-24953710.html>.
- [89] 邱晨辉. 国新办发布会回应工信领域热点关切 [EB/OL]. (2021-03-02) [2021-05-01]. <https://news.chinadaily.com.cn/a/202103/02/WS603decb0a3101e7ce9741be6.html>.
- [90] 工业和信息化部. 工业和信息化部关于印发稀土行业发展规划(2016—2020年)的通知 [EB/OL]. (2016-10-18) [2021-05-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-10/18/content_5120998.htm.
- [91] 工业和信息化部. 公开征求对《稀土管理条例(征求意见稿)》的意见 [EB/OL]. (2021-01-15) [2021-05-01]. https://www.miit.gov.cn/gzcy/yjzj/art/2021/art_863f0f1671cf44b28e6ed8cb60eae7f6.html.

Material flow analysis of rare earth elements: A comprehensive review

CHEN Wei^{1,2,3}, WANG Peng^{1,3,4*}, ZHAO Shen^{4,5}, CHEN Weiqiang^{1,2,3,4}

1. Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Life Sciences College of Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China
4. Ganjiang Innovation Academy, Chinese Academy of Sciences, Ganzhou 341000, China
5. Jiangxi University of Science and Technology, Faculty of Materials Metallurgy and Chemistry, Ganzhou 341000, China

Abstract Rare earth (RE) resources become increasingly critical for emerging and low-carbon technologies. With the rapid development of the global pattern of the rare earth production, consumption and trade, the basic significance of the studies of the flow of the rare earth materials is increasingly recognized at home and abroad in promoting the security of the RE resource supply and the sustainable development of the RE industry, with a great number of papers on the material flow analysis (MFA) focusing on the rare earth elements. This paper firstly reviews the related literature on the origin and the evolution of the REMFA, followed by an in-depth analysis of the limitations of the essential data, the quantitative model and the demand orientation. The following suggestions are made: (1) integrating the data on the RE resource and environment and developing a data platform for the rare earth industry; (2) developing a rare earth quantitative model including a supply-side module consisting of the domestic and foreign virgin and recycled minerals as well as a demand-side module coupling with the industrial revolution and resource; (3) enriching the researches embodying the environmental flow, the value stream and the trade flow of the rare earth elements, to support the high-quality development of the rare earth industry in China.

Keywords rare earth; material flow analysis; resource management ●



(责任编辑 刘志远)