

全球稀土贸易的资源环境净效益与公平性

邸敬涵¹,温宗国^{2*} (1.中国人民大学环境学院,北京 100872; 2.清华大学环境学院,北京 100084)

摘要:为解决稀土资源贸易的资源环境不公平问题,结合生命周期评价方法与成本效益分析方法,核算了稀土资源产品国际贸易中所有国家的实际资源环境净效益,并判断未来国际制造业的三大主要发展趋势带来的影响。结果表明,2018年稀土资源产品国际贸易的实际资源环境净效益高达85亿美元,主要贡献来自于稀土原材料产品。未来国际制造业的发展格局下,尽管绿色发展与气候目标政策会降低17%的净效益,但依然是改善资源环境不公平问题的关键政策路径;产业链转移重构政策会减少11%的净效益,加剧经济水平较低国家的资源环境不公平问题;新兴制造业发展政策会增加76%的净效益,但经济水平较低国家的资源环境不公平问题依然较为严峻。

关键词: 稀土资源产品; 国际贸易; 生命周期评价; 成本效益分析

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2022)10-4909-10

Analysis on the resource-environment net benefit and equity in the global trade of rare earth. DI Jing-han¹, WEN Zong-guo^{2*} (1.School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2.School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2022,42(10): 4909~4918

Abstract: To solve the inequity of resource and environment in rare earth resource products trade, this research evaluated the actual net benefits in resource and environment of all countries involved using Life Cycle Assessment combined with Cost-Benefit Analysis. This paper also assessed the impacts of trending developments in the global manufacturing industry under three main scenarios. Results show that in 2018 the actual net benefits reached 8.5 billion dollars, mainly contributed by trading raw materials of rare earth. Under future scenarios, policies associated with green development and climate change goals are estimated to reduce net benefits by 17%, whereas they remain the predominant policy path for solving the inequity problem. The transfer and reconstruction of global industrial chains lead to an 11% decrease in net benefits, meanwhile exacerbating the inequity issue in low-income countries. Developments in the emerging manufacturing industry increase net benefits by 76% while leaving the severe inequity situation in low-income countries unresolved.

Key words: rare earth resource products; international trade; life cycle assessment; cost-benefit analysis

稀土是全球主要经济体国家社会经济发展建设的关键战略性金属资源,也是世界各国社会经济发展与竞争博弈的关键资源。我国的稀土资源禀赋较高,资源优势带来的出口贸易经济效益较高,但稀土资源开采、冶炼分离、加工制造等环节所产生的环境污染却留在国内,发达国家通过产业链的倒逼,设置稀土材料产品(如钕铁硼永磁体等)的技术与环境壁垒控制稀土原材料的价格,掌控全球稀土定价权,实现其利益最大化,这给我国的稀土行业带来极大的资源环境不公平问题。另一方面,随着我国稀土政策的收紧以及发达国家对我国稀土原材料产品的依赖减小,稀土资源全球分布与行业布局开始出现一定的变动与转移。以美国、澳大利亚为首的具有稀土资源禀赋的发达国家将开采后的稀土矿石转移至马来西亚等发展中国家进行分离冶炼,这些经济水平与环境治理水平较低的国家面临巨大的环境成本和污染负担问题,也同样面临发达国家通过

技术与环境壁垒控制稀土定价而带来的资源环境不公平问题。

目前,已有研究大多针对我国国内稀土矿的开采与冶炼所带来的直接环境损失进行环境成本的核算^[1-3],并从生态补偿的视角评估稀土资源价值^[4-8]。在对稀土资源的成本效益分析相关研究中,大多是从企业或行业的视角对包括直接成本、间接成本、管理成本、环境成本等的完全成本进行净利润的核算与分析^[9-14]。较少从全生命周期的角度核算环境影响^[5],大多采用直接生态环境损失;较少从贸易的角度^[12]评估各贸易国家在各类别稀土资源产品贸易中的资源环境净效益,大多仅关注国内稀土矿开采的环境问题与对应成本。

收稿日期: 2022-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72104241);中国人民大学科学研究基金(中央高校基本科研业务费专项资金资助)项目成果(22XNKJ22);中国博士后科学基金第15批特别资助(站中)项目成果(2022T150716)

* 责任作者, 教授, wenzg@tsinghua.edu.cn

本研究从全生命周期环境影响的角度,评估各类别稀土资源产品在国际贸易中带给各贸易国的实际资源环境净效益,并在未来国际制造业可能的发展情景下分析实际资源环境净效益的变化情况.

1 研究方法

1.1 生命周期评价

1.1.1 研究方法与系统边界 本研究应用生命周期评价方法对稀土资源产品在生产过程中的全生命周期环境影响进行评估,重点关注酸化、富营养化、生态毒性、人体毒性、全球变暖等环境影响类别.由于多种环境影响类别之间存在量纲差异,国别之间的贸易环境影响对比通常较难进行有效说明.因此,为使贸易的环境影响具有可比性和可加性,本研究对各类别环境影响潜值的评估结果进行了标准化和归一化处理,形成了无量纲化的总环境影响.根据一定的权重对无量纲化后的各项潜值进行加总,得到各国生产单位稀土资源产品的全生命周期综合环境影响,再根据各国的贸易量核算稀土资源产品贸易的总环境影响.

在进行标准化与归一化处理以及加权求和时,需选取有效且统一的环境影响评估模型来确定标准化因子与权重因子.国际上常用的评估模型有 ReCiPe、TRACI、CML、Eco-indicator99、IMPACT2002+等.综合考虑适用范围、时效性、指

标不确定性等因素,本研究选取 CML 模型,并参考前期研究^[15],分别设定标准化基准因子为 2000 年的全球平均环境影响潜值,权重因子为 Gabi 数据库中提供的 CML 模型对应的权重(表 1).

根据数据可得性,将 2018 年设定为研究的基准年,研究边界为从“摇篮到大门”的全过程环境影响,即仅考虑资源开采到产品生产出厂,而不考虑进入市场之后的使用与报废环节.

1.1.2 研究对象 本研究的研究对象选取为在国际贸易 4~6 位 HS 编码对应贸易产品中,以稀土元素为主体资源类别的产品.可根据其主要功能和产业链环节分为稀土化合物(2846)、稀土金属及合金(280530)、稀土材料(850511).

表 1 标准化基准因子与权重因子

Table 1 Normalisation factors of the baseline impact categories and weighting factors

环境影响类别	标准化基准因子	权重因子
酸化	$2.39 \times 10^{11} \text{kg SO}_2 \text{eq./a}$	6.5
富营养化	$1.58 \times 10^{11} \text{kg PO}_4^{3-} \text{eq./a}$	6.8
非生物性 元素	$3.61 \times 10^8 \text{kg Sb eq./a}$	6.4
资源耗损 化石燃料	$3.80 \times 10^{14} \text{MJ/a}$	7
生态毒性	淡水 $2.36 \times 10^{12} \text{kg 1,4-DCB eq./a}$	6.8
	海洋 $1.95 \times 10^{14} \text{kg 1,4-DCB eq./a}$	9.3
陆地	$1.09 \times 10^{12} \text{kg 1,4-DCB eq./a}$	7.1
	人体毒性 $2.58 \times 10^{12} \text{kg 1,4-DCB eq./a}$	6.6
全球变暖	$4.22 \times 10^{13} \text{kg CO}_2 \text{eq./a}$	6.1

表 2 稀土资源产品生产工艺技术及区域设定

Table 2 Settings for producing and manufacturing technologies and regions of rare earth products

稀土资源产品	清单产品	主要生产工艺技术	应用国家或地区
稀土化合物	氧化稀土	硫酸法+烧碱法	中国
		氧化焙烧盐酸浸出	
		萃取分离沉淀	巴西
		独居石-硫酸法	美国、澳大利亚、印度、泰国、马来西亚
稀土金属及合金	轻稀土	独居石-烧碱法	俄罗斯、越南
		氟碳铈矿-氧化焙烧法	
稀土材料	永磁材料	熔盐电解法	中国
		氧化钕永磁材料生产加工全流程	中国、美国、澳大利亚、俄罗斯等原材料生产国
		氧化钕永磁材料加工	日本等原材料依赖进口的国家

1.1.3 数据来源与基本假设 稀土资源产品的贸易数据来源为 UN Comtrade 数据库所提供的进出口数据;在核算各贸易国生产各类别稀土资源产品的全生命周期综合环境影响时,首先设定全生命周期环境影

响主要由上游能源供给水平和生产技术工艺水平决定.上游能源供给水平对应的生命周期环境影响清单在选取时,可由生命周期评价数据库(如 ecoinvent、Gabi 等)直接按国别,根据不同的能源情景选择进行

确定;而在生产技术工艺水平对应的生命周期环境影响清单的确定上,由于较难获得所有国家与地区的生产技术清单数据,则需通过生命周期评价数据库、文献调研、行业调研等获取清单信息,按照地理区域(如亚洲、欧洲、北美洲、非洲等),对区域内无法直接获取清单数据的国家采用地区平均生产技术水平进行替代,具体的设定情况如表 2 所示。

1.1.4 稀土化合物 基于我国是全球稀土资源的主要供应国家的事实,在稀土矿采选工艺和冶炼分离工艺的选取上,应用中国的工艺技术清单.我国的主要稀土矿包括包头白云鄂博稀土矿、四川氟碳铈稀土矿、南方离子吸附型稀土矿等,应用的采选矿工艺与稀土矿的类型及地理环境有关,具体工艺流程和比例设定如图 1^[16-17].

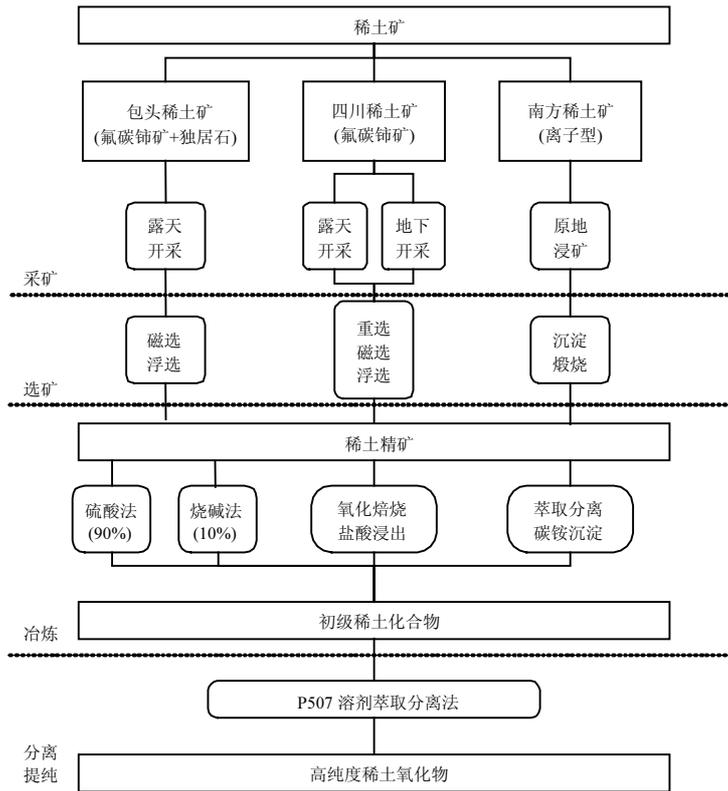


图 1 我国稀土氧化物生产工艺流程

Fig.1 Production techniques and processes of rare earth oxides in China

根据 2018 年我国稀土矿开采总量控制指标^[18], 设定生产稀土氧化物的 3 种稀土矿来源和采选冶炼工艺比例分配(表 3).内蒙古包头、四川、南方离子型稀土矿的开采量共占当年开采总量的 97%,因此将 3 种稀土矿作为我国稀土氧化物来源是合理的。

基于 Lee 等^[16]的研究中对我国 3 种稀土矿的采选和冶炼工艺物料投入与排放清单的分析,建立我国稀土氧化物生产的综合技术生命周期清单。

对 2018 年全球稀土矿分布的主要国家稀土矿产量(折合成稀土氧化物)以及主要的矿物类型进行分析^[19],假设全球各主要国家的稀土氧化物生产均根据不同的矿物类型应用我国对应类型矿物生产稀土氧化物的清单.由于我国在稀土采选、冶炼、分

离等具有绝对的资源和技术优势地位^[20],且有相当一部分国家将开采出的稀土金属矿出口至我国.根据我国海关数据统计,2018 年,我国的稀土金属矿贸易为净进口.基于我国的技术优势以及稀土冶炼分离技术的数据不可及性,将我国的稀土氧化物生产技术清单作为全球水平下的清单替代是合理的。

表 3 我国 3 种稀土矿 2018 年总量控制指标及比例

Table 3 Objectives and proportions of China's total mining control for 3 major rare earth mines in 2018

稀土矿	总量控制指标(t)	比例(%)
包头混合型	69250	59.5
四川氟碳铈	28000	24.1
南方离子型	19150	16.5

在对以独居石精矿为主要原料的冶炼方法选择上,根据已有文献研究^[21-23],设定国际上主要稀土矿分布国家中以独居石为主要稀土矿来源生产稀土氧化物的工艺技术选择,除巴西应用硫酸法外,其余均采用烧碱法为冶炼工艺。

1.1.5 稀土金属及合金 稀土金属及合金的制备工艺主要包括熔盐电解法(轻稀土,95%)和金属热还原法(重稀土)^[17,24]。综合考虑我国的稀土国家储备制度、主要中重离子型稀土矿的停止开采情况^[20]、以及国内下游高科技战略性行业的大量需求,假设2018年,我国出口的稀土金属及合金全部为轻稀土金属及合金,制备工艺为熔盐电解法,应用Lee等^[24]稀土氟化物和熔盐电解技术的生命周期清单。根据2018年世界各国稀土金属及合金的出口贸易情况,我国的出口贸易量占全球的95%,因此在稀土金属及合金的清单选取上仅考虑我国的工艺情景。

1.1.6 稀土材料 在我国的稀土材料类别分布中,永磁材料约占67%^[20],且中国在2018年出口贸易网络中依然具有较高的贸易量占比(64%)。因此,仅将永磁体材料作为本研究的稀土材料类别。稀土材料的生产工艺选取永磁材料的生产加工工艺,采用已有研究^[25-27]的中国钕铁硼永磁体生产工艺清单,并假设其他永磁体生产国家(如日本等)也应用此工艺清单。在确定稀土材料的全生命周期环境影响清单时,设定我国生产工艺的边界包括上游产品的生产。根据已有研究^[16],设定包头白云鄂博稀土矿生产的单位稀土氧化物中,氧化钕的比例为48%;四川氟碳铈矿生产的单位稀土氧化物中,氧化钕的比例为15%;南方离子型稀土矿生产的单位稀土氧化物中,氧化钕的比例为8%。对日本等原材料基本依赖进口的国家,仅考虑其在本国生产环节产生的环境影响,即单一技术流程的环境影响。对美国、澳大利亚、俄罗斯等其他稀土资源的原料来源国和生产国,由于其稀土矿中氧化钕含量未有公开统计数据,因此考虑应用中国的稀土矿氧化钕平均含量作为其氧化钕比例,且假设原料生产国出口的钕铁硼永磁体100%应用国内制备的钕铁硼合金进行生产与加工。

1.2 成本效益分析

结合经济学中的机会成本概念^[28],定义贸易资源环境机会成本为由于选择进口或出口某类稀土

资源产品而带来的资源环境净效益的变化,即不存在贸易关系时各国的资源环境净效益。而稀土资源产品贸易的实际资源环境净效益则为存在贸易关系时的资源环境效益减去机会成本。

为使得资源与环境效益具有可比性,首先需对二者的价值进行定量化估算。常见的资源环境价值定量估算方法包括成本核算法、市场价值法、机会成本法、替代市场法、影子工程法、费用分析法、条件价值法等^[29-30]。在对各国家和地区稀土资源产品的资源环境价值评估中,本研究应用市场价值法评估其资源价值,分别通过稀土资源产品的本国交易市场价格和国际贸易额表征其国内资源价值和国际资源价值;应用影子工程法评估其环境成本,由于无法获得各国家或地区在水污染、土壤污染等多种污染治理的成本数据,根据数据可得性,本研究采用生命周期评价数据库中提供的污染物治理成本,来表征稀土资源产品生产过程中的环境成本。

因此,在稀土资源产品 x 的贸易网络中,贸易国家 i 向贸易国家 j 出口 $\omega(i,j)$ 的产品 x ,贸易国家 i 生产产品 x 的环境成本为 δ_{x_i} ,贸易价值为 ϕ_{x_i} ;国家 j 生产产品 x 的环境成本为 δ_{x_j} ,贸易价值为 ϕ_{x_j} 。假设不考虑产品 x 的国内市场情况,分别考虑贸易关系不存在和存在的情景,则贸易国家 i 和 j 的资源效益、环境成本与资源环境净效益可表示为:

表4 不存在贸易关系的产品资源环境成本-效益分析

Table 4 Cost-benefit analysis without trade

参数	国家 i :不生产 x	国家 j :生产 x
资源效益	0	0
环境成本	0	δ_{x_j}
资源环境净效益	0	$-\delta_{x_j}$

表5 存在贸易关系的产品资源环境成本-效益分析

Table 5 Cost-benefit analysis with trade

参数	国家 i :生产 x ,出口	国家 j :不生产 x ,进口
资源效益	ϕ_{x_i}	$-\phi_{x_j}$
环境成本	δ_{x_i}	0
资源环境净效益	$\phi_{x_i} - \delta_{x_i}$	$-\phi_{x_j}$

因此贸易关系对出口国 i 和进口国 j 带来的实际资源环境净效益可分别为: $\phi_{x_i} - \delta_{x_i}$ 和 $-\phi_{x_j} + \delta_{x_j}$ 。

根据稀土资源产品生产的生命周期环境影响核算系统边界的设定,对进口国的稀土资源的补充所带来的资源效益不予考虑。

1.3 不确定性分析

根据资源环境净效益的定义,不确定性的主要来源包括生命周期环境影响的不确定性和各稀土资源产品贸易量的不确定性。生命周期环境影响的不确定性分析主要考虑原始数据的不确定性和对区域赋值的不确定性。

原始数据的不确定度采用 ecoinvent 数据库^[31]提供的基本不确定度来源及相应的谱系矩阵进行核算。区域赋值的不确定度通过对谱系矩阵中空间相关性的不确定度进行调整,贸易量的不确定性主要根据 UN Comtrade 提供的贸易数据 Flag 数据项中对应的数量与重量的估算情况,参考环境影响数据来源可靠性的不确定度定义。进行不确定性分析时,应用拉丁超立方采样方法对具有不确定性的变量进行大样本采样 1 万次,并假设数据均服从对数正态分布,不确定度定义为对应正态分布下的标准差。

1.4 情景分析

近年来,世界各主要经济体的制造业纷纷进行了调整转型,均体现了未来国际制造业的绿色发展与气候目标、全球产业链转移重构、以及新兴制造业发展等 3 大发展趋势^[32-34]。

在全球化大背景下,国际制造业出现了较大的变局,一方面,全球低端制造业的中心国家逐步从中国转移至印度等亚洲发展中国家,欧美发达国家陆续降低其产业链中产品加工环节对中国制造业的过度依赖^[35];另一方面,东南亚发展中国家也通过一系列的招商引资优惠政策吸引发达国家企业的投资,以保证本国自身的经济安全与优势地位。

因此,本研究设定 3 个未来发展情景,由于本文对政策情景设定与分析的目的在于识别各政策对贸易资源环境净效益的影响,因此,选取所有政策措施中设定目标的最终状态,即目标完全达成;或按当前已形成的某些趋势,分析各参数变动后,稀土资源产品在基准年(即 2018 年)的贸易中,实际资源环境净效益的变化情况。

1.4.1 绿色发展与气候目标政策情景(ENV) 在本情景的设定中,根据研究涉及的生命周期环境影响两方面决定因素设定政策情景参数。

(1) 削减由于生产工艺技术水平导致的污染排放。这一政策措施参数设定的主要政策依据包括:欧洲绿色新政实施路线图的“无毒环境零污染”目标,以及作为全球“领导者”对非洲地区实施的“绿色新政外交”等政策;我国“无废城市”的建设目标,大气污染、水污染等污染物的防治政策,以及中非合作七大工程中的生态环保合作政策等。设定在本情景下,发达国家的稀土资源产品生产工艺技术环境影响下降 90%,我国下降 50%,其他发展中国家下降 30%,最不发达国家下降 20%。

(2) 削减由于上游能源产品供给造成的温室气体排放:经测算,上游能源产品供给所带来的温室气体排放对全生命周期温室气体排放的影响更为显著,因此,本情景仅对上游能源产品的温室气体排放水平进行设定。在该政策措施下,参数设定根据巴黎气候变化大会后各缔约国提交的国家自主贡献目标,分别设定上游能源产品的温室气体减排水平为:发达国家平均减排 50%,发展中国家平均减排 20%,最不发达国家平均减排 10%。

1.4.2 全球产业链重构情景(IND) 在本情景的设定中,主要考虑发达国家采取削减全球化程度并转移全球产业链加工制造环节的政策措施。

在本情景中,基于 2020 年上半年,即疫情期间,UN Comtrade 发布的金属资源的国际贸易变动情况,设置该情景的参数。设定在稀土资源产品的贸易中,所有国家的贸易规模下降 20%;根据疫情期间我国具有出口规模优势的稀土资源产品贸易变化情况,考虑国际上美国、欧洲、日本等发达国家的“去中国化”情景,设定中国具有较高出口优势的稀土金属及合金、稀土材料,均全部转移至印度、马来西亚等进行生产出口。

1.4.3 新兴制造业发展政策情景(EMG) 未来世界主要经济体将加速在新兴制造业领域的发展,结合中国、美国、日本、韩国为首的主要经济体国家在近几年先后发布针对新兴制造业与新兴基础设施建设的政策规划目标以及近年来稀土资源产品的贸易趋势,设定在本情境下的相关参数,中国增加 90%的稀土化合物进口,美国增加 15%的稀土化合物进口和 5%的稀土金属进口,日本增加 20%的稀土化合物进口和 30%的稀土金属进口,韩国所有类型的稀土资源产品平均增加 30%。

2 结果与讨论

2.1 稀土资源产品贸易环境影响评估

如图 2 所示,稀土化合物和稀土材料的贸易给全球带来环境影响的显著增加,稀土化合物的贸易环境影响增加主要由缅甸(54%)、美国(38%)等主要原料来

源国承担,而中国虽同为原料来源国,总环境影响为净减少,且占环境影响减少量的 69%;稀土材料的贸易环境影响增加几乎全部由中国承担,而美国、越南等国则在稀土材料的贸易中享受了环境影响的减小,稀土金属及合金贸易带给全球的环境影响增加与减少量基本相当,且由中国承担了几乎所有的环境影响增加。

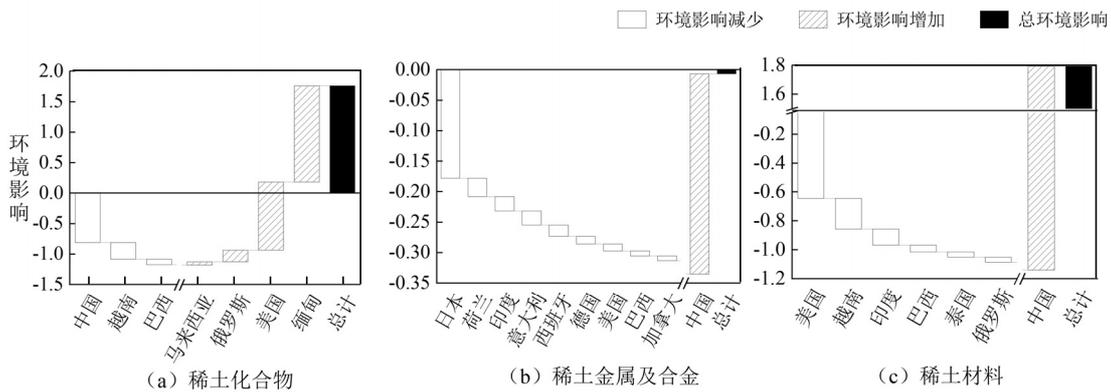


图 2 稀土资源产品主要贸易国家的环境影响变化(2018)

Fig.2 Changes in environmental impacts of major trading countries, 2018

横轴为按环境影响变化大小排列的具有显著环境影响变化的贸易国家;纵轴为无量纲化后加总的环境影响,无单位

2.2 稀土资源产品贸易的资源环境净效益

在全球尺度上(图 3),稀土化合物 2018 年的贸易给全球带来了实际资源环境净效益的显著增加,约为 46 亿美元,其中实际资源效益约为 0.2 亿美元,实际环境成本约为-46 亿美元;稀土金属及合金 2018 年的贸易带来了实际资源环境净效益,约为 49 亿美元,其中实际资源效益约为-1 亿美元,实际环境成本约为-50 亿美元;稀土材料 2018 年的贸易并未带来全球实际资源环境净效益的增加,实际资源环境净效益约为-12 亿美元,其中,实际资源效益约为 2 亿美元,实际环境成本约为 13 亿美元。

了资源和环境双重效益;马来西亚的稀土化合物为净出口,其资源效益大于环境成本。

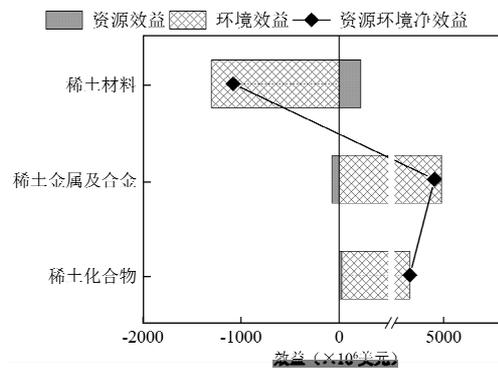


图 3 稀土资源产品贸易成本效益分析结果

Fig.3 Cost-benefit analysis for the trade of rare earth resource products

为表征清晰,取环境成本的相反数为环境效益,资源环境净效益=资源效益+环境效益;图 4 的解释与本书相同

对 2018 年稀土资源产品贸易中各国的实际资源效益、实际环境效益以及实际资源环境净效益进行分析,选取实际资源环境净效益较为显著的国家予以展示(图 4)。

图 4 (a)表明,稀土化合物的国际贸易带来了越南、中国、缅甸、马来西亚等国家的实际资源环境净效益显著增加,而俄罗斯、美国、韩国、日本、泰国等国家则承担了额外的环境成本.对于俄罗斯、美国、缅甸、越南等国家,环境成本是资源环境净效益的主要影响因素;中国的稀土化合物为净进口,带来

图 4(b)表明,稀土金属及合金的贸易中,马来西亚、日本、印度、葡萄牙、美国、德国、西班牙、巴西等国家的实际资源环境净效益显著增加,而中国、越南、泰国、荷兰、加拿大、法国等国家则付出了额外的环境成本.中国作为稀土金属及合金最

为主要的出口国家,尽管占 95%的出口量,但其所带来的资源效益远小于生产环境影响的治理成本.

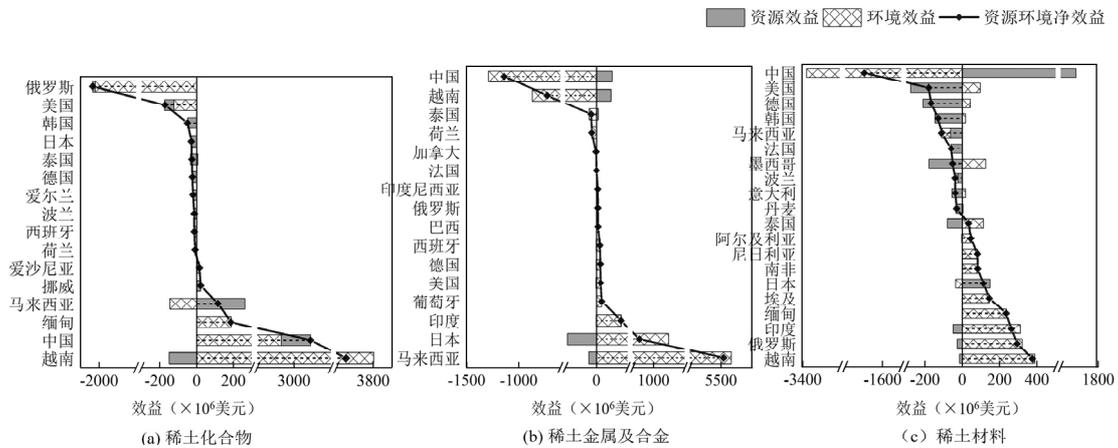


图 4 稀土资源产品贸易关键国家的成本效益分析

Fig.4 Cost-benefit analysis for the trade of rare earth resource products in predominant countries

图 4(c)表明,在稀土材料的国际贸易中,越南、俄罗斯、印度、缅甸等国家的实际资源环境净效益显著增加,而中国、美国、德国、韩国、马来西亚等国家承担了额外的环境成本.环境成本是中国、越南、印度、缅甸等国家贸易资源环境净效益的主要影响因素,美国、德国等发达国家则由于较高的技术水平和环境标准以及掌握了稀土产品的国际定价权,资源效益的影响远高于其环境成本.

2.3 不确定分析

对稀土资源产品贸易的实际资源环境净效益进行大样本采样(图 5),69%的采样方案结果表明稀土化合物的国际贸易显著增加了全球实际资源环境净效益;100%的采样方案结果表明稀土金属及合金的国际贸易显著增加了全球实际资源环境净效益;86%的采样方案结果表明稀土材料的国际贸易带来了额外的环境成本.总体上,本研究对稀土资源产品贸易的实际资源环境净效益的评估结果是可靠的.

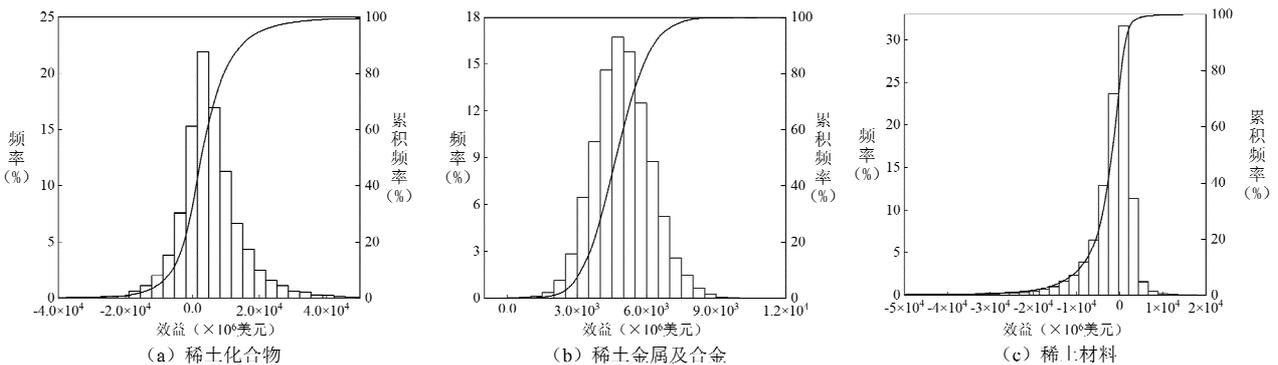


图 5 稀土资源产品贸易实际资源环境净效益概率分布

Fig.5 Probability distribution of actual net benefits of resource and environment in the trade of rare earth resource products

2.4 情景分析

基于联合国统计司 M49 标准对国家和地区的分类(包括发达国家、发展中国家和最不发达国家,2021 年联合国统计司将 M49 标准中的发展中地区和发达地区分类删除,但考虑到与研究基准年 2018 年的一致性,本研究继续沿用 2021 年之前的

国家与地区分类标准进行分类),评估情景分析结果,除中国外的发展中国家归类为其他发展中国家(图 6).

2.4.1 绿色发展与气候目标政策情景(ENV) 在该情景下,中国的稀土资源产品贸易将产生 6 亿美元的资源环境净效益,稀土金属和稀土材料的额外

环境成本相较于基础情景(BAU)分别减少了 24%和 43%,稀土化合物的资源环境净效益相较于基础情景减少了 20%。既承担了与我国经济发展水平相匹

配的环境责任,又显著改善贸易的资源环境不公平问题,因此总体上,相较于基础情景,资源环境净效益增加了 158%。

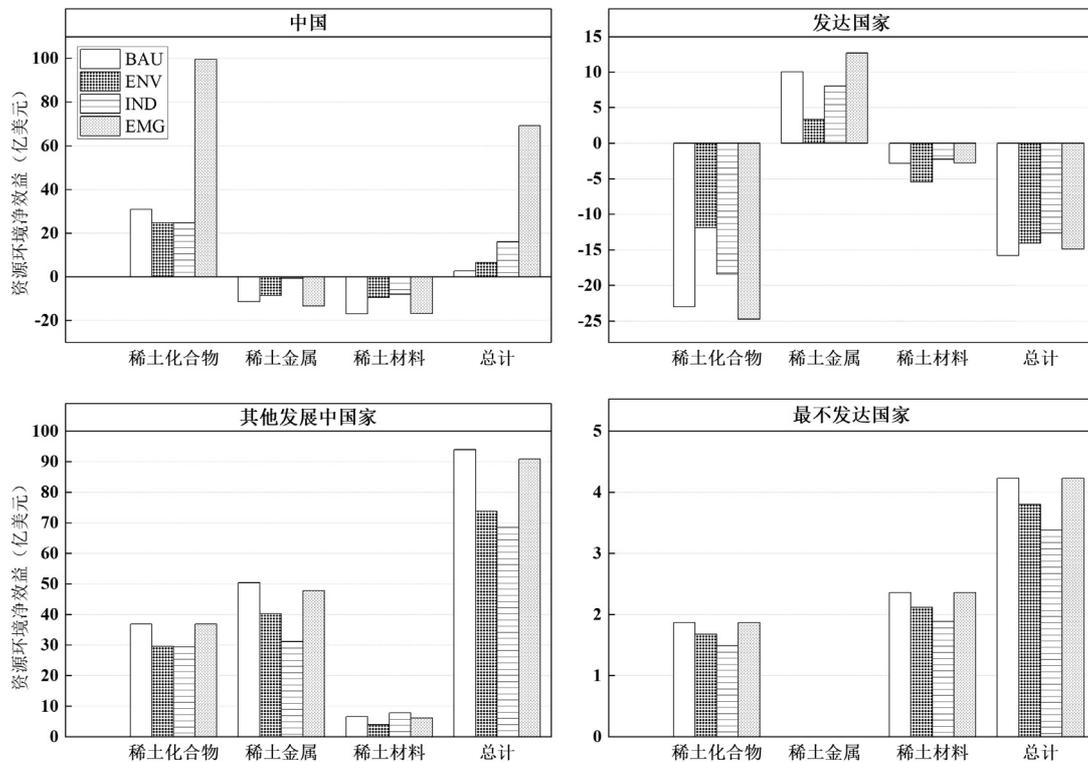


图 6 各别类国家贸易的资源环境净效益情景分析

Fig.6 Scenario analysis for the net benefits of resource and environment in the trade of different country types

发达国家将产生 14 亿美元的额外环境成本,相较于基础情景减少了 11%;其他发展中国家将获得 74 亿美元的资源环境净效益,相较于基础情景减少了 21%;最不发达国家将获得 4 亿美元的资源环境净效益,相较于基础情景减少了 10%。这说明,发达国家通过采取绿色发展与气候目标政策措施,有效地承担了与其经济发展水平相匹配的贸易环境责任,经济水平相对较低的国家作为这一政策的直接受益国,其所承担的与经济发展水平不相匹配的额外环境治理投入降低,从而改善贸易的环境不公平性,是“双赢”的政策选择。

2.4.2 全球产业链重构情景(IND) 在该情景下,对于中国而言,大幅减少了稀土金属和稀土材料的额外环境成本,分别减少了 94%和 53%,总体资源环境净效益也大幅提升,达 16 亿美元;发达国家的额外环境成本相较于基础情景减少了 20%,达 13 亿美元;但其他发展中国家与最不发达国家的资源环境净

效益分别减少了 27%和 20%,分别达 69 亿美元和 3 亿美元。

这说明发达国家实施“反全球化”与“去中国化”的产业链转移与重构的政策措施,尽管可以满足减少其对中国制造业过度依赖的需求,但却带给经济水平相对较低的国家额外的环境代价,加剧了稀土资源产品贸易的资源环境不公平性问题。

2.4.3 新兴制造业发展政策情景(EMG) 在该情景下,中国稀土资源产品贸易的资源环境净效益出现显著增加,达 69 亿美元,主要体现在稀土化合物的贸易中;发达国家贸易的额外环境成本将减少 6%,达 15 亿美元;其他发展中国家的实际资源环境净效益相比于基础情景将减少 3%,达 91 亿美元;而最不发达国家在该情景下总体的资源环境净效益变化不大。

这表明,经济发展水平较高的主要经济体实施发展新兴制造业的政策措施,将会导致对稀土资源

产品的需求增加,进而加大从经济发展水平较低国家进口资源的规模,并向其转移更多的环境影响,而经济发展水平较低的国家往往应用低成本、高污染的生产加工工艺技术和能源,从而带来更大的额外环境成本,在一定程度上加剧了其他发展中国家的资源环境不公平问题。

2.5 讨论

本研究在核算不同国别的全生命周期环境影响、资源环境价值估算中仍存在一定的局限性和不足。一方面,本研究所提出的区域性替代假设以及上游产品均为国内来源的基本假设,与现实情况下一些区域的实际情况可能存在较大差异,且未核算运输过程的环境影响;另一方面,对稀土产品的资源环境价值估算未充分考虑贸易价值作为资源价值的市场合理性,仍需评估除污染之外的其他环境成本。在未来的研究中,将进一步做出合理改进,形成更为具体的减缓贸易环境不公平性的政策路径与政策组合。同时,本研究提出的核算方法和思路可延伸至其他战略性金属资源产品的国际贸易中,为我国战略性金属资源的国内布局与产品级的贸易策略提供理论支撑。

3 结论

3.1 2018 年,稀土资源产品国际贸易带来了约 85 亿美元的全球资源环境净效益,且主要来源于稀土化合物、稀土金属及合金等原材料产品。

3.2 绿色发展与气候目标政策措施虽然促使全球资源环境净效益减少 17%,但有效改善全球的资源环境不公平问题。因此,对于经济发展水平较低的国家而言,可通过加强与发达国家,尤其是欧洲国家在绿色发展上的合作,进一步降低贸易的额外环境成本,实现共赢。

3.3 产业链转移与重构政策措施不仅促使全球资源环境净效益减少 11%,且加剧了全球的资源环境不公平问题。因此,面临发达国家的产业链重构,经济水平较低的国家应有足够的警惕,在国际稀土资源贸易博弈中加强对环境权益的诉求;而发达国家则应以更开放与包容的视角,开展促进全球资源环境公平的国际贸易合作。

3.4 新兴制造业产业发展政策措施虽然在一定程度上也会让经济水平相对较低的国家产生资源环

境不公平问题,但全球的资源环境净效益也会增加 76%。因此,主要经济体在未来发展新兴制造业时,对经济水平较低的国家应予以一定的清洁生产技术支持,承担与其经济发展水平以及经济效益相对应的环境责任。

参考文献:

- [1] 景建霞.包头稀土资源开发生态环境损害成本研究 [D]. 呼和浩特:内蒙古科技大学, 2021.
Jing J. Study on ecological environmental damage cost of rare earth resources development in Baotou [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2021.
- [2] 魏杰.中国离子吸附型稀土开发环境成本核算 [D]. 北京:中国地质大学(北京), 2021.
Wei J. Evaluating the environmental costs of ion-adsorption type rare earth development in China: a case study of Ganzhou [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [3] 徐丰,李恒凯,王秀丽.离子吸附型稀土开采的环境问题及成本评估进展 [J]. 稀土, 2020,41(4):119-127.
Xu F, Li H, Wang X. Progress in environmental problems and cost assessment of ion-adsorption rare earth mining [J]. Chinese Rare Earths, 2020,41(4):119-127.
- [4] Zhou L, Ge J. Estimating the environmental cost of mixed rare earth production with willingness to pay: A case study in Baotou, China [J]. The Extractive Industries and Society, 2021,8(1):340-354.
- [5] 罗宇洁,冯娜娜.生态补偿视角下的稀土资源价值评估 [J]. 内蒙古科技与经济, 2020,(10):65-68.
Luo Y, Feng N. Value evaluation of rare earth resources from the perspective of ecological compensation [J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2020,(10):65-68.
- [6] 闫光礼.离子型稀土矿山环境修复演化博弈模型与策略研究 [D]. 北京:北京科技大学, 2020.
Yan G. Research on game and strategy of environmental remediation evolution in ion-type rare earth mines [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [7] 赵静.赣南离子型稀土生态补偿价值评估研究 [D]. 南昌:江西理工大学, 2019.
Zhao J. Research on evaluation of ecological compensation value of ionic rare earths in south Jiangxi — taking the development of Longnan ZD rare earth mine as an example [D]. Nanchang: Jiangxi University of Science and Technology, 2019.
- [8] 葛察忠,张安文,董战峰,等.稀土资源开发生态环境成本核算研究:方法与实证 [M]. 北京:中国环境出版集团, 2018.
Ge C, Zhang A, Dong Z, et al. The ecological environment cost accounting of the development and utilization of rare earth resources: method and empirical [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018.
- [9] 马国霞,朱文泉,王晓君,等.2001~2013 年我国稀土资源开发生态环境成本评估 [J]. 自然资源学报, 2017,32(7):1087-1099.
Ma G, Zhu W, Wang X, et al. Evaluation of ecological and environmental cost of rare earth resource exploitation in China from 2001 to 2013 [J]. Journal of Natural Resources, 2017,32(7):1087-1099.
- [10] 刘虹桥,吴西顺.稀土矿产资源的新成本视角 [J]. 中国国土资源经济, 2018,31(2):29-34.
Liu H, Wu X. A view of new cost regarding rare earth mineral resources [J]. Natural Resource Economics of China, 2018,31(2): 29-34.

- [11] 吴一丁,钟怡宏.基于完全成本的稀土精矿成本与收益分析——以包钢稀土为例 [J]. 财会通讯, 2014,(17):99-101.
Wu Y, Zhong Y. Cost and benefit analysis of rare earth concentrates based on complete cost: an example of Baotou [J]. *Communication of Finance and Accounting*, 2014,(17):99-101.
- [12] 谢焱真.贸易全成本视角下江西赣州稀土产品出口定价权缺失研究 [D]. 南宁:广西大学, 2018.
Xie Y. Research on the absence of rare earth export pricing right in Ganzhou from the perspective of total trade cost [D]. Nanning: Guangxi University, 2018.
- [13] 赵汀,范振婷,刘超.稀土资源税费改革对我国稀土企业成本收益影响分析 [J]. 中国矿业, 2016,25(6):16-20.
Zhao T, Fan Z, Liu C. Analysis of the impact of rare earth resources tax and fee reform on the domestic rare earth enterprises' cost and benefit [J]. *China Mining Magazine*, 2016,25(6):16-20.
- [14] 钟怡宏,周小芳.国内外稀土企业成本收益的对比分析 [J]. 中国商贸, 2014,(17):107-108.
Zhong Y, Zhou X. Comparative analysis of cost-benefit of rare earth enterprises in China and abroad [J]. *China Journal of Commerce*, 2014,(17):107-108.
- [15] 邸敬涵,温宗国.资源产品贸易的环境影响及隐含环境流分析——以铜资源为例 [J]. 资源科学, 2021,43(3):612-625.
Di J, Wen Z. Environmental impacts and embodied environmental flows of the international trade of resource products: a case study of copper [J]. *Resources Science*, 2021,43(3):612-625.
- [16] 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.
- [17] 黄小卫.中国稀土 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2015.
Huang X. *China rare earth* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015.
- [18] 中华人民共和国自然资源部.自然资源部 工业和信息化部关于下达 2018 年度稀土矿钨矿开采总量控制指标的通知:自然资发[2018]4 号[EB/OL].(2018-07-23)[2020-07-20]. http://gi.mnr.gov.cn/201807/t20180730_2156421.html.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Notice of the Ministry of Natural Resources and the Ministry of Industry and Information Technology on Issuing the total amount control index of rare earth and tungsten mining in 2018: No. [2018] 4[EB/OL].(2018-07-23)[2020-07-20]. http://gi.mnr.gov.cn/201807/t20180730_2156421.html.
- [19] 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.
Zhang S, Zhang L, Zhang Y, et al. Summarize on rare earth mineral resources and their distribution at home and abroad [J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2020,52(1):9-16.
- [20] 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.
Zhang D. Current situation and supply-demand analysis of rare earth resources [J]. *Natural Resources Information*, 2020,(5):37-41.
- [21] 张福良,李政林.我国独居石资源开发利用现状及政策建议 [J]. 现代矿业, 2015,31(11):1-4.
Zhang F, Li Z. Exploitation and utilization status and policy suggestions of monazite resources [J]. *Modern Mining*, 2015,31(11):1-4.
- [22] Lima F M, Lovon-Canchumani G A, Sampaio M, et al. Life cycle assessment of the production of rare earth oxides from a Brazilian ore [J]. *Procedia CIRP*, 2018,69:481-486.
- [23] Haque N, Hughes A, Lim S, et al. Rare Earth Elements: Overview of mining, mineralogy, uses, sustainability and environmental impact [J]. *Resources*, 2014,3(4).
- [24] Lee J C K, Wen Z. Rare earths from mines to metals: comparing environmental impacts from China's main production pathways [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2017,21(5):1277-1290.
- [25] Sprecher B, Xiao Y, Walton A, et al. Life cycle inventory of the production of rare earths and the subsequent production of NdFeB rare earth permanent magnets [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014,48(7):3951-3958.
- [26] Jin H, Afiunoy P, McIntyre T, et al. Comparative life cycle assessment of NdFeB magnets: virgin production versus magnet-to-magnet recycling [J]. *Procedia CIRP*, 2016,48:45-50.
- [27] Bailey G, Orefice M, Sprecher B, et al. Life cycle inventory of samarium-cobalt permanent magnets, compared to neodymium-iron-boron as used in electric vehicles [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,286:125294.
- [28] Mankiw N G. *Principles of economics* [M]. Boston: Cengage Learning, 2020.
- [29] 尤琦.环境影响经济评价应用于规划环境影响评价的难点分析 [J]. 能源环境保护, 2017,31(2):55-57,44.
You Q. The environmental impact of economic evaluation is applied to the planning environmental impact assessment analysis of the difficulties [J]. *Energy Environmental Protection*, 2017,31(2):55-57,44.
- [30] 杨昔,喻建华,乔亮亮.自然资源资产价值评估初探 [J]. 中国国土资源经济, 2020,33(9):29-34,80.
Yang X, Yu J, Qiao L. A preliminary study on the evaluation of natural resources asset value [J]. *Natural Resource Economics of China*, 2020,33(9):29-34,80.
- [31] Wernet G, Bauer C, Steubing B, et al. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016,21(9):1218-1230.
- [32] National Science and Technology Council. Strategy for American leadership in advanced manufacturing [EB/OL]. (2018-10-05) [2022-03-09]. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2018/10/Advanced-Manufacturing-Strategic-Plan-2018.pdf>.
- [33] Department of Global Communication and Contents Division. Remarks by president Moon Jae-in at manufacturing renaissance vision declaration ceremony [EB/OL]. (2019-06-19)[2020-08-20]. <http://www.korea.net/Government/Briefing-Room/Presidential-Speeches/view?articleId=172021>.
- [34] European Commission. A European green deal [EB/OL]. (2019-11-11) [2020-08-16]. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en.
- [35] Mitchell W. Covid-19 is a chance for the U.S. and Europe to unite on China [EB/OL]. (2020-04-03)[2020-06-30]. <https://www.washingtonpost.com/opinions/2020/04/03/covid-19-is-chance-us-eur-ope-unite-china/>.

作者简介: 邸敬涵(1992-),女,吉林长春人,讲师,博士,主要从事资源环境管理政策研究.发表论文 11 篇.