

引用格式:徐大兴,代涛,刘立涛,等. 2000—2020年日本钴物质流演变特征[J]. 资源科学, 2023, 45(11): 2264–2275. [Xu D X, Dai T, Liu L T, et al. Evolution of cobalt material flow in Japan from 2000 to 2020[J]. Resources Science, 2023, 45(11): 2264–2275.] DOI: 10.18402/resci.2023.11.13

2000—2020年日本钴物质流演变特征

徐大兴^{1,2,3}, 代涛¹, 刘立涛², 杜力普^{1,3}, 罗凡杰⁴, 欧阳铎², 田楠¹, 刘刚⁵

(1. 中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心, 北京 100037; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 4. 成都理工大学管理科学学院, 成都 610059; 5. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

摘要:【目的】钴是绿色低碳能源转型中不可或缺的关键金属之一。日本是全球钴资源主要消费和贸易国,厘清日本钴资源在全生命周期中流量和存量演变特征以及贸易格局动态变化,对了解全球钴物质循环具有重要意义。【方法】本文采用动态物质流分析方法,构建了基于全生命周期贸易关联的日本钴物质流分析框架,揭示了2000—2020年日本钴物质流演变特征。【结果】①流量分析表明,2000—2020年日本累计消费272000 t钴,日本钴资源流量、流向均发生大幅转变,精炼阶段钴盐产量大幅增长,制造阶段电动汽车电池逐渐取代消费电子电池占据主导地位,使用阶段钴资源消费呈“先增后降”的演变趋势,始终以消费电子电池为主体,废弃物管理阶段旧废料若可以100%循环利用,则可以满足日本本土需求。②存量分析表明,传统应用在用存量“先增后降”,新兴应用在用存量稳步提升,在用存量结构仍以消费电子电池为主,电动汽车电池超越高温合金位居第二。③贸易格局分析显示,日本进口来源国日趋多元化,但日本对中国的材料依赖却大幅增加;同时,日本含钴终端产品出口市场则由亚洲占主导转向美欧。【结论】长期以来,日本钴产业链形成了“上中游进,下游出,两头在外”的深加工发展模式,在交通领域能源转型和产业政策驱动下,电动汽车电池逐渐成为拉动制造阶段钴资源消耗的主要驱动力,日本通过资源外交、替代品和减量化技术研发等手段以保障钴供应链的稳定。本文既可以为系统、动态开展细粒度国别尺度钴物质流研究奠定基础,又可以为精准研判日本钴供应链产业链演变态势,不断完善以钴为代表的战略性关键矿产安全保障机制提供参考。

关键词:钴; 生命周期; 贸易关联; 物质流分析; 日本

DOI: 10.18402/resci.2023.11.13

1 引言

钴作为电动汽车电池与储能系统中重要的原材料之一,是支撑低碳能源转型不可或缺的关键金属^[1-3]。钴资源储量和产量高度集中于刚果^[4],而消费却主要发生在中国(32%)、欧盟(23%)、美国(18%)、日本和韩国(18%)等^[5],供需错位,再叠加世纪疫情和大国竞争,已被欧盟^[6]、美国^[7]、日本^[8]、中国^[9]和澳大利亚^[10]等主要国家和经济体编列为战略性关键矿产,全球钴供应安全面临严峻挑战^[11]。日本和中国钴资源对外依存度均超过80%^[12],作为全球主

要的钴资源消费和贸易国,两国钴供应链和产业链既互相依存,又相互竞争。开展日本钴物质流研究,对于优化中国钴资源产业链和供应链管理,保障中国钴资源供应安全,助力低碳能源转型,具有重要现实意义。

为了保障以钴为代表的战略性关键金属稳定供应,日本立足于全生命周期储、产、消、回收关键环节及各环节贸易出台了一系列保障措施。早在1983年,日本经济产业省就建立了稀有金属储备制度,明确将以钴为代表的7种金属作为国家储备矿

收稿日期:2023-07-18 修订日期:2023-11-03

基金项目:国家自然科学基金项目(52270191;71991484;71991480);中国地质调查局地质调查项目(DD20221795)。

作者简介:徐大兴,男,辽宁大连人,硕士研究生,研究方向为关键金属物质流及全球贸易网络分析。E-mail: xudaxing815@163.com

通讯作者:刘立涛,女,湖南岳阳人,博士,助理研究员,研究方向为能矿资源流动与管理。E-mail: liult@igsnnr.ac.cn

2023年11月

种^[13];2012年,日本正式颁布《稀有金属保障战略》,系统构建了包括钴在内的30种“关键矿产”筛选方法,并将获取海外矿产资源权益、资源储备、替代和回收技术研发作为保障关键金属供应的四大支柱^[14];为保障绿色低碳转型过程中所需关键金属的安全供应,助力实现日本2050年“零碳”目标,日本经济产业省于2020年制定了《新国际资源战略》^[15];2022年,日本经济产业省发布了《蓄电池产业战略》,计划到2030年将动力电池生产规模提高至150 GWh,届时电动汽车电池每年将消耗2万t钴^[16]。此外,为减少对中国的依赖,保障以钴为代表的电池关键金属供应安全,日本积极参与美国和加拿大等西方国家组建的产业联盟^[17,18]。近年来,日本战略性关键金属安全保障体系日臻完善,同时也将对中国相关产业链供应链产生潜在影响。

物质流分析(Material Flow Analysis, MFA)是追踪特定时空边界内物质流动的源、路径和汇^[19]最有效的方法之一^[20],已被广泛应用于铁^[21]、铜^[22]、铝^[23]、铅^[24]、锌^[25]和钨^[26]等金属物质流的研究案例中。当前,已有学者对全球^[27-29]、中国^[30-33]、美国^[34,35]和欧盟^[36]等不同区域的钴物质流进行了分析,然而,却鲜有学者对日本钴物质流进行系统、动态研究。日本金属与能源安全组织(Japan Organization for Metals and Energy Security, JOGMEC)在2005年对钴、铜、铅、锌、金等40种矿产资源物质流进行了调查,并发布了《矿产资源物质流》年度报告,静态分析了日本以钴为代表的战略性关键金属物质流^[37]。Harper等^[38]基于全生命周期视角,率先从全球和典型国家如美国、中国和日本两个空间尺度静态揭示了2005年钴物质循环特征;Asari等^[39]采用自下而上的方法开展了2002—2010年日本主要含钴消费电子电池产品钴物质流研究。受时间和数据可用性限制,现有研究大多侧重一年静态日本钴物质流分析或追踪单一含钴终端产品的钴物质循环,日本钴物质流的时空动态演变特征尚未得到系统和全面揭示。

本文基于全生命周期贸易关联的视角,应用动态物质流分析方法(Dynamic Material Flow Analysis, dMFA),聚焦日本钴物质流如何演变这一科学问题,系统、动态地刻画2000—2020年日本钴资源流量、存量和贸易格局,揭示日本钴物质流的演变

特征。本文建立的研究框架和数据集一方面可以为系统、动态开展细粒度国别尺度钴物质流分析奠定基础,另一方面又可以为中国不断完善以钴为代表的战略性关键矿产安全保障机制提供参考。

2 研究对象、研究方法数据来源

2.1 研究对象

本文的空间边界为日本全域,时间跨度为2000—2020年(图1)。日本钴物质流分析框架主要由采矿、精炼、制造、使用和废弃物管理5个阶段以及贯穿各个阶段的贸易所组成^[35]。在岩石圈中含钴矿石经过开采、破碎、选矿、冶炼和分离等一系列过程,被制成硫酸钴和氯化钴等钴盐产品后,经过精炼被进一步加工成氧化钴、三元前驱体、电解钴、碳酸钴和草酸钴等钴盐;在制造阶段,钴盐被添加到各终端产品中,含钴终端产品形成在用存量并提供服务。为了更好地分析技术变革对钴资源消费的影响,本文将含钴终端产品划分为新兴应用和传统应用两大类,新兴应用主要以电动汽车电池为代表,传统应用则包括消费电子电池、高温合金、硬质合金、磁性合金、催化剂和其他应用;一旦含钴终端产品的使用寿命结束,嵌入在废弃流中的钴将转变为旧废料被循环利用、填埋、焚烧或临时存储以及出口海外。

2.2 计算方法

物质流分析严格遵循质量守恒定律,本文从全生命周期视角将计算划分为四部分:

(1)贸易流量:贸易主要发生在采矿、精炼、制造和废弃物管理阶段。各阶段贸易流共涉及HS编码标识的82种细分含钴产品^[35],贸易流量等于贸易产品质量与相应钴强度的乘积。

$$IM_{i,t}^{Co} = I_{i,t} \times C_{i,t}^{Co} \quad (1)$$

$$EX_{i,t}^{Co} = E_{i,t} \times C_{i,t}^{Co} \quad (2)$$

式中: $IM_{i,t}^{Co}$ 和 $EX_{i,t}^{Co}$ 分别表示 t 年以钴当量衡量的第 i 类含钴产品日本国内进口量和出口量; $I_{i,t}$ 和 $E_{i,t}$ 分别表示 t 年第 i 类含钴产品的进口量和出口量; $C_{i,t}^{Co}$ 表示 t 年第 i 类单位含钴产品钴强度。

(2)损失流:损失主要发生在采矿、精炼、制造3个阶段。本文假设日本国内没有进行采矿活动,因此未考虑此部分的损失。精炼阶段的损耗,在参考

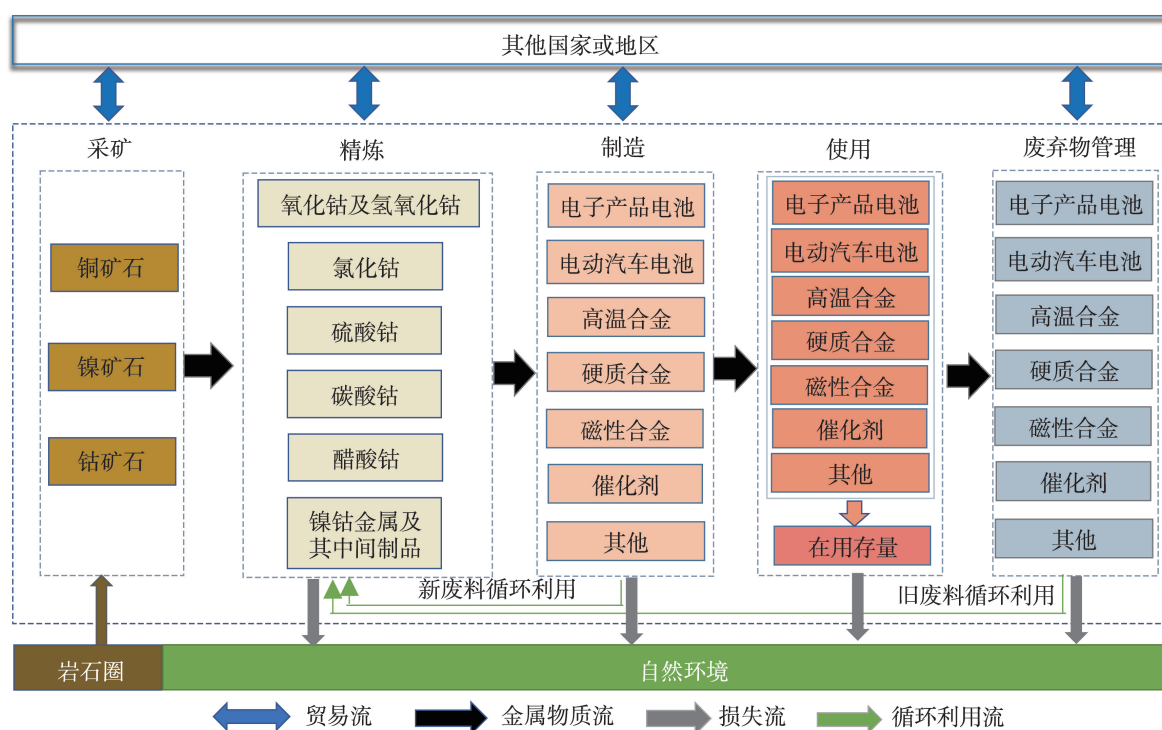


图1 日本钴资源全生命周期物质流分析框架

Figure 1 A framework of material flow analysis (MFA) for the whole life cycle of cobalt resources for Japan

文献[40]的基础上设定其损失率为20%;制造阶段不同终端产品的损失率参见文献[29],其计算公式如下:

$$L_{i,t} = DAC_{i,t}^{Co} \times LR_{i,t} \quad (3)$$

式中: $L_{i,t}$ 、 $DAC_{i,t}^{Co}$ 和 $LR_{i,t}$ 分别表示 t 年第 i 类含钴产品的损失量、表观消费量和损失率。

(3)表观消费量:涵盖采矿、精炼、制造和使用4个阶段;根据日本本土精炼钴产量和终端产品的表观消费量以及各阶段的贸易数据,通过质量守恒核算各阶段的流量。然而,由于日本统计数据未披露含钴电池的表观消费数据,因此本文借鉴文献[29,41,42]相关数据和技术参数自下而上核算电动汽车电池表观消费量;并采用自上而下和自下而上相结合的方法,推算出2012—2020年消费电子电池的表观消费量。各阶段含钴产品表观消费量计算公式如下:

$$DAC_{i,t}^{Co} = IM_{i,t}^{Co} - EX_{i,t}^{Co} + P_{i,t}^{Co} \quad (4)$$

式中: $P_{i,t}^{Co}$ 表示 t 年以钴当量衡量的第 i 类含钴产品的生产量。

(4)在用存量:本文在采用威布尔分布模拟含

钴电池寿命分布的同时,采用正态分布模拟其他类含钴产品的寿命分布^[43]。存量和流量之间遵循质量守恒,其恒等式如下所示^[27,28,30]:

$$Stock_{i,t}^{Co} = \int_{t_0}^t (DAC_{i,t}^{Co} - W_{i,t}^{Co}) dt \quad (5)$$

$$W_{i,t}^{Co} = \int_{t_0}^t L_i(t, t') \times DAC_{i,t}^{Co} dt \quad (6)$$

式中: $Stock_{i,t}^{Co}$ 和 $W_{i,t}^{Co}$ 分别表示第 t 年以钴当量衡量的第 i 类含钴产品的在用存量和废弃量; $L_i(t, t')$ 表示生命周期寿命分布函数^[35]。

2.3 数据来源及处理

本文数据主要包括:精炼阶段的生产数据、终端产品的消费数据、含钴产品的贸易数据和相关系数。其中,精炼钴生产数据源自日本金属与能源安全组织(Japan Organization for Metals and Energy Security, JOGMEC)^[37]和美国地质调查局(U.S. Geological Survey, USGS)^[44]。终端产品的表观消费及其结构数据来自于日本金属与能源安全组织(JOGMEC)和经济产业省自然资源和能源局有色金属供需统计年鉴^[45]。全生命周期含钴产品贸易数据源自联合国贸易商品统计数据库(UNComtrade)^[46]。含钴

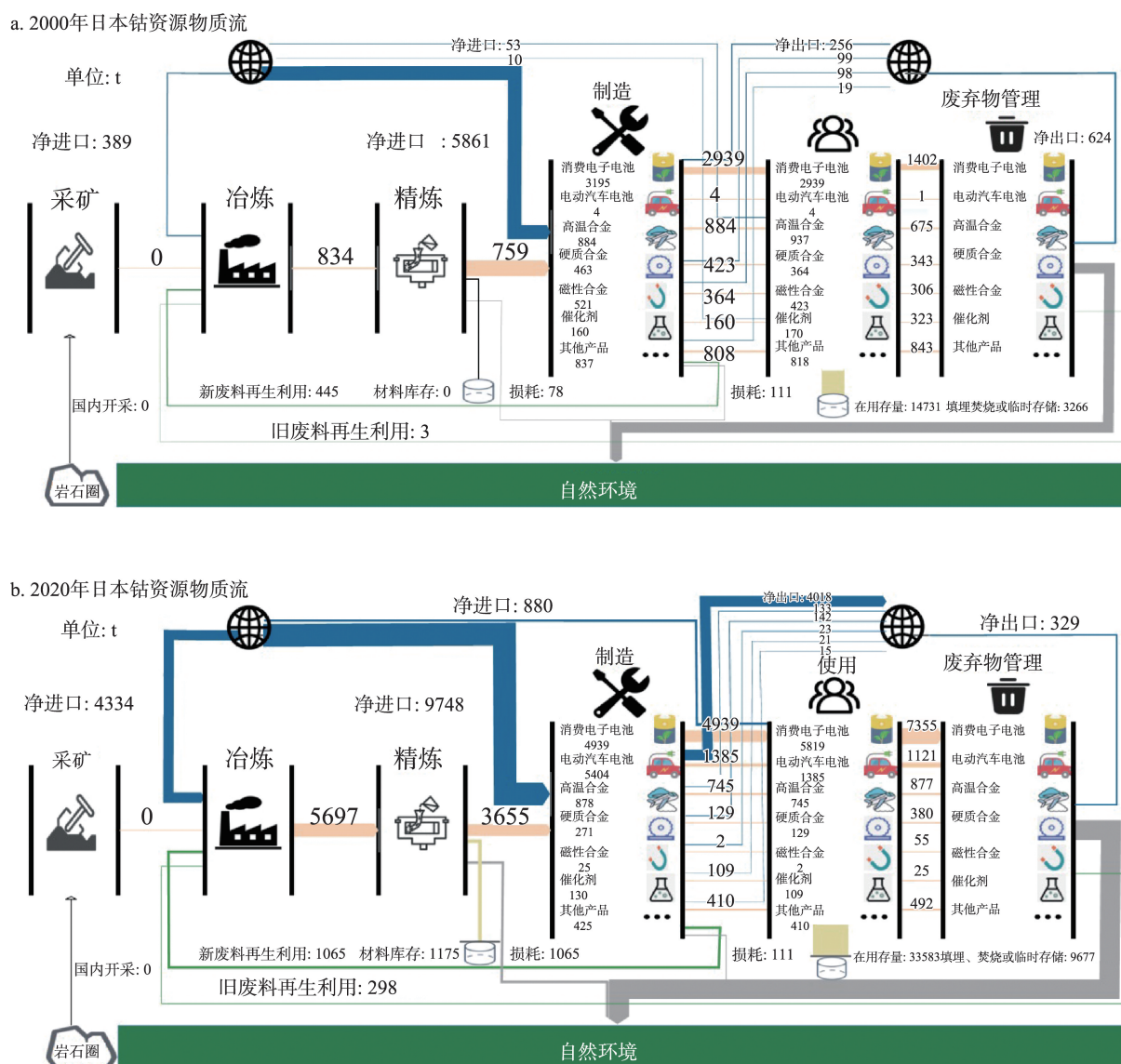


图3 2000、2020年日本钴资源全生命周期物质流

Figure 3 Change of cobalt material flow in the whole life cycle for Japan, 2000 and 2020

日本钴盐对外依存度^①由2000年的95%降至2020年的74%，然而，由于巨大供需缺口仍需依赖进口才能满足工业发展需求。

制造阶段：含钴产品制造先增后降，制造结构从消费电子电池和高温合金为主转向电动汽车电池和消费电子电池为主，出口成为拉动电动汽车电池制造的主要驱动力（图4b）。含钴产品制造规模从2000年的6064 t增长至2008年14811 t达到峰值后，尽管电气化浪潮助推含钴电动汽车电池自2012

年起波动增长，并于2020年超越消费电子电池（4939 t）达到5404 t，但是，依然无法改变本土消费不振和部分产业链迁移^[48]所造成的含钴产品制造下降的趋势。2000—2020年期间，制造结构从2000年消费电子电池（53%）占主导，高温合金（15%）和其他（13%）为辅，向2020年的电动汽车电池（45%）和消费电子电池（41%）为主，高温合金（7%）为辅转变（图3a、b）。与此同时，日本制造的含钴产品本土使用的份额从由2000年的93%下降至2020年的71%，

① 对外依存度用于衡量一个国家对国外供应的依赖程度， $NIR_{i,t}^{Co}$ 为t年i类含钴产品的对外依存度，计算公式为：
$$NIR_{i,t}^{Co} = \frac{IM_{i,t}^{Co} - EX_{i,t}^{Co}}{P_{i,t}^{Co} + IM_{i,t}^{Co} - EX_{i,t}^{Co}}$$

2023年11月

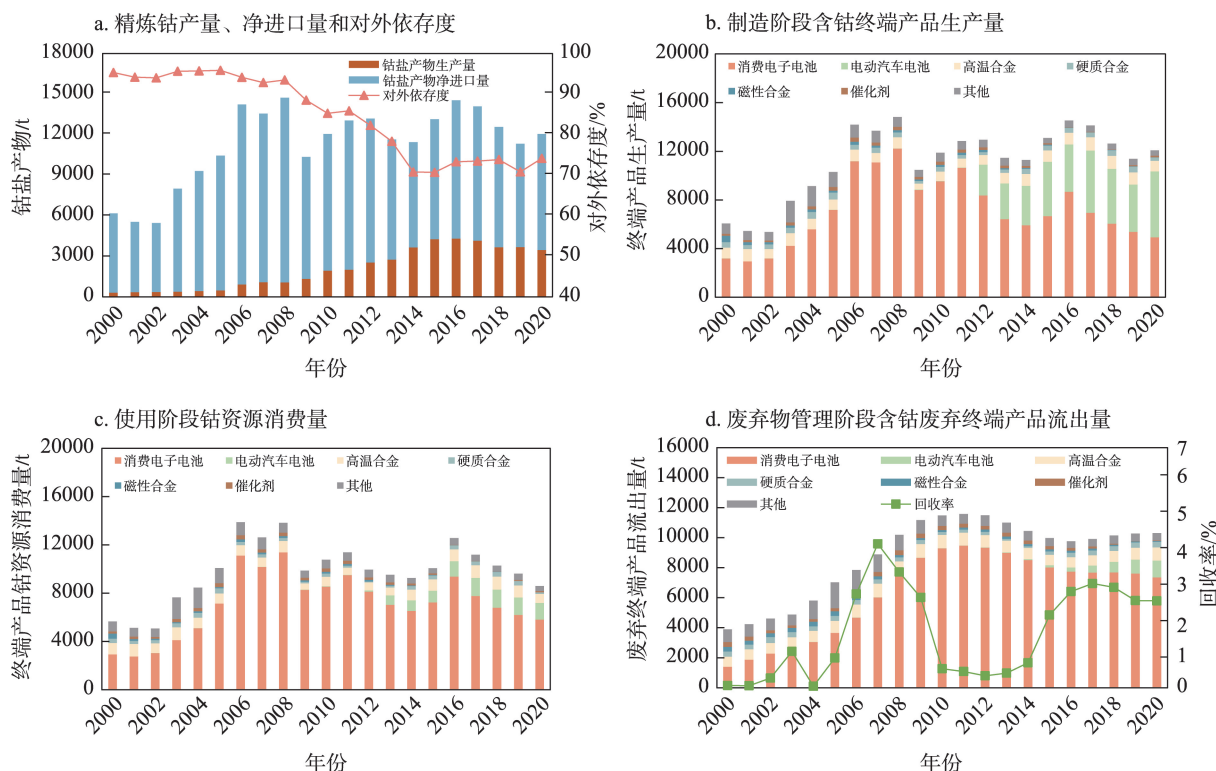


图4 2000—2020年生命周期各阶段含钴产品流量时序变化

Figure 4 Variation of cobalt-containing product flow by phase, 2000-2020

相应地,出口海外的份额从7%上升至29%。2000—2011年,日本制造的消费电子电池在出口中占主导。然而,随着日本将部分消费电子电池生产线转移至中国,自2012年起,日本由消费电子电池净出口国转变为净进口国,且净进口规模持续扩大;日本产电动汽车电池出口却由2012年的2798 t(54%)持续提升至2020年的6112 t(88%),出口成为拉动电动汽车电池制造的主要驱动力。

使用阶段:受传统应用消费疲软影响,日本含钴终端产品表观消费量“先增后降”,消费电子电池占据主导(图4c)。日本含钴终端产品国内表观消费量从2000年的5655 t,快速增长至2006年的13885 t达到峰值后,波动下降至2020年的8599 t。2000—2008年期间,在手机和笔记本电脑需求拉动下,消费电子电池需求年均增速超过了18%。受金融危机和人均手机保有量趋于饱和双重影响,2009年以后,日本手机、笔记本电脑和平板等电子产品销售量不同程度下滑,导致含钴终端产品表观消费量总体呈下降趋势^[49]。日本构建“氢能社会”,选择了与中国、美国和欧盟等经济体不同的汽车能源转

型路径,因此,相较于其他国家急剧增长的电动汽车电池消费量^[29],日本本土电动汽车电池消费量增加缓慢。除高温合金消费量稳定在900 t左右外,其他传统应用消费均不同程度下降:如硬质合金、磁性合金、催化剂和其他含钴产品消费量分别从2000年的463 t、521 t、160 t和837 t下降至2020年的271 t、25 t、130 t和425 t,替代品和减量化技术是其可能的原因之一。此外,使用阶段含钴终端产品的消费结构相对稳定,消费电子电池始终占主体。消费结构由2000年消费电子电池(52%)占主导,高温合金(17%)和其他应用(14%)为辅转向2020年消费电子电池(68%)占主导,电动汽车电池(16%)和高温合金(9%)为辅。

废弃物管理阶段:含钴旧废料大幅增长,若能实现100%循环利用,则可以满足日本本土表观消费需求(图4d)。日本含钴旧废料由2000年的3893 t大幅增长至2011年的11580 t达到峰值后,小幅下降至2020年的10304 t。由于消费电子电池平均寿命(2.5年)短,日本本土消费量大,使其在含钴旧废料构成中占主导。此外,随着电动汽车电池退役潮

的到来,2019年报废电动汽车电池(927 t)超越高温合金(793 t)成为第二大废弃流。理论上,若旧废料实现100%循环利用则可以满足日本本土表观消费需求。然而,由于当前日本钴废弃物管理体系无法实现对含钴废弃产品的有效回收,预计目前含钴废弃产品回收率不足5%,远低于中国^[12]和美国^[34]等钴资源消费大国,导致旧废料未能成为日本钴资源的主要供应来源。

3.2 在用存量变化

传统应用在用存量“先升后降”,以电动汽车电池为代表的新兴应用在用存量快速增长,消费电子电池主导地位进一步加强,电动汽车电池超越高温合金位居第二(图5)。过去20年,在用存量从2000年的14731 t增长至2008年的峰值38009 t后,波动下降至2020年的33583 t。其中,磁性合金、催化剂和其他含钴终端产品在用存量持续下降,高温合金和硬质合金趋于稳定,消费电子电池达到峰值后下降,而电动汽车电池在用存量却先从2000年的13 t缓慢增长至2011年的110 t后,快速增长至2018年的5406 t,超越高温合金5196 t位居第二。在用存量结构由2000年的消费电子电池(46%)为主体,高温合金(27%)和磁性合金(11%)为辅,转向2020年的消费电子电池(62%)占主导,电动汽车电池(18%)和高温合金(16%)为辅。

3.3 贸易时空格局演变

(1)贸易量上,进口增势放缓,出口和贸易总量

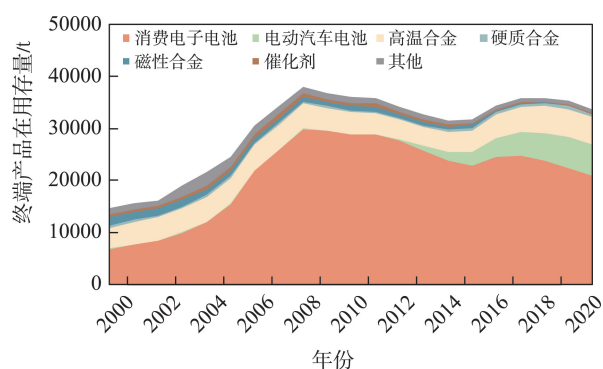


图5 2000—2020年含钴终端产品在用存量时序变化

Figure 5 Variation of cobalt-containing product in-use stock, 2000-2020

呈现先升后降的演变趋势(图6a、b)。2000—2020年,日本累计进口含钴产品359000 t,出口239000 t,是钴资源净进口国。2000—2006年,日本含钴材料进口量快速增长,从2000年的10317 t快速增长至2006年的18386 t后,由于受金融危机和含钴终端传统应用消费趋于饱和、需求疲软等综合影响,含钴材料进口规模小幅回落至2020年的16686 t;同时,日本含钴材料出口量呈下降趋势,从2000年的4067 t降至2020年的2604 t。过去20年间,含钴终端产品进口量增长了15倍,出口量增长了10倍;含钴废弃终端产品的进口量稳定在200 t左右,出口量“先升后降”,从2000年的624 t大幅增长至2017年的10705 t达到峰值后,受2019年日韩贸易摩擦影响^[50],日本含钴废弃物出口量骤减;相应地,日本含钴产品年贸易总量从2000年的21000 t先大幅增加至2017年的51000 t后,下降至2020年的40000 t。总体来看,日本不同含钴产品的进口增势趋缓,出口和贸易总量先升后降。

(2)贸易结构上,以含钴材料为主导转向含钴材料和含钴终端产品双驱动。含钴材料贸易占比大幅下降,从2000年的91%稳步下降至2020年的61%;而含钴终端产品贸易占比却急剧攀升,从2000年的6%增长至2020年的34%。含钴废弃物贸易占比先升后降,由2000年的4%增长至2017年的31%后,骤降至2020年的2%。相应地,材料贸易结构由2000年镍钴金属及其中间制品(56%)占主导,氧化钴及氢氧化钴(18%)和硫酸钴(12%)为辅向2020年镍钴金属及其中间制品(45%)占主体,硫酸钴(25%)和碳酸钴(13%)为辅转变(图6c)。此外,含钴终端产品贸易由2000年消费电子电池(37%)占主导磁性合金为辅(27%),向2020年电动汽车电池(78%)占主导转变(图6d),电动汽车电池出口急剧增长是驱动贸易结构发生大幅变化的原因所在。

(3)贸易格局上,日本含钴材料进口来源地进一步向亚洲集中,终端产品出口重心则由亚洲转向美欧,废弃物贸易从韩国转向加拿大和菲律宾。①从国家尺度来看,材料的进口集中度从2000年的28%降至2020年的21%,趋于多元化^②。在《资源保

② 赫芬达尔-赫希曼指数(HHI)是一种评估产业集中度的综合指数,能够反映钴进口来源国的市场规模及结构。 $HHI = \sum_i (\frac{I_{it}}{I_{it}})^2$,式中:

I_{it} 表示*t*年日本从*i*国含钴产品进口量; I_{it} 表示*t*年日本含钴产品的进口总量。

2023年11月

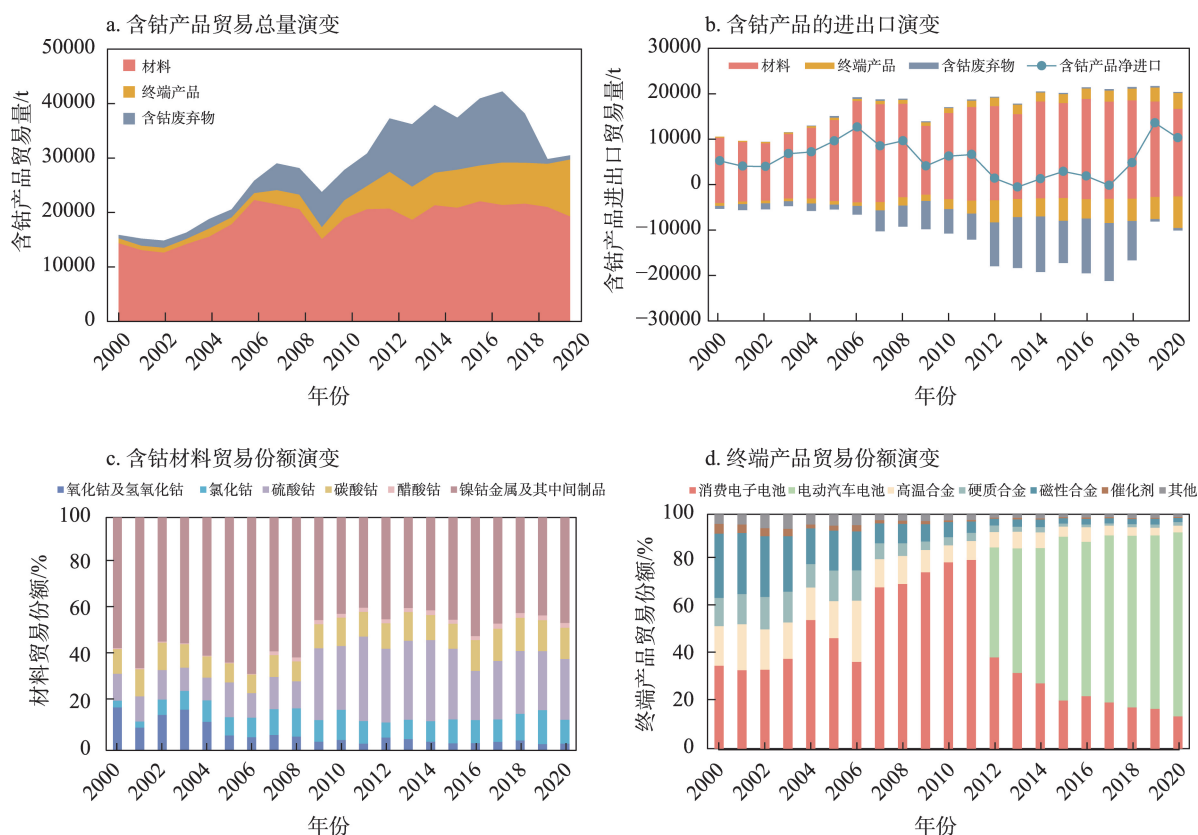


图6 2000—2020年贸易量和贸易结构变化

Figure 6 Variation and change of trade volume and trade structure, 2000-2020

障战略》助推下,日本通过加大海外投资,收购菲律宾、新喀里多尼亚和印度尼西亚等国多家镍精炼厂和矿山的股份,上游材料的供应渠道趋于多元化^[51,52]。然而,日本对中国含钴材料的依赖却持续增加,2010年,中国超越芬兰和韩国成为日本最大的材料进口来源国,份额从2000年的7%大幅提升至2020年的31%。②从区域尺度来看,材料进口来源由2000年欧洲(49%)为主,亚洲(33%)和大洋洲(13%)为辅,向2020年亚洲(82%)占主导,欧洲(11%)为辅转变。日本含钴终端产品出口贸易伙伴从2000年的137个缩减至2020年的122个,出口重心由亚洲向美欧转移。日本含钴终端产品出口由2000年亚洲(50%)占主导,北美(31%)和欧洲(17%)为辅,向2020年北美(34%)和亚洲(33%)为主,欧洲(27%)为辅转变;亚洲份额急剧降低,美欧份额大幅提升。其中,美国(16000 t)、中国(11000 t)和德国(6000 t)为日本含钴终端产品累计出口前三贸易伙伴。此外,含钴旧废料出口格局由韩国(87%)为主转向加拿大(66%)和菲律宾(22%)。值

得注意的是,中国已经成为日本最主要的含钴产品贸易伙伴,截至2020年,中国已经成为日本最大的钴盐(4882 t)和消费电子电池(1032 t)供应国,以及第二大电动汽车电池(1407 t)出口国。

4 结论、讨论与启示

4.1 结论

本文借助动态物质流分析,在明晰含钴产品贸易清单及其强度的基础上,构建了基于生命周期贸易关联的日本钴物质流分析框架,对2000—2020年日本钴资源流量、流向、存量及贸易格局展开系统分析。主要结论如下:

(1)日本全生命周期主要含钴产品的流量和流向均发生显著变化。精炼阶段钴盐生产规模大幅增长;在以汽车电气化转型和出口双重驱动下,制造阶段生产结构逐渐由传统应用驱动转向以电动汽车电池为代表的新兴应用驱动;使用阶段,本土传统应用消费疲软,新兴应用消费增长缓慢,导致含钴终端产品表观消费先升后降;废弃物管理阶段,回收利用率不足5%,含钴旧废料未能得到有效

利用。

(2)传统应用在用存量先升后降,新兴应用在用存量持续增加,在用存量结构仍以消费电子电池为主。截至2020年,日本在用存量为33583 t,其中,超过60%为消费电子电池。

(3)从贸易来看,进口增势放缓,出口和贸易总量先升后降;在电动汽车电池出口拉动下,贸易结构由材料驱动向材料和终端产品双驱动转变;贸易格局上,日本材料进口对亚洲和中国的依赖大幅提高,而含钴终端产品出口则由亚洲占主导转向美欧。

4.2 讨论

受数据可得性和可用性限制,本文存在如下局限性和不确定性:①由于数据无法涵盖日本钴产业链所有流程和环节,以精炼阶段为例,我们将其简化为冶钴中间品直接加工生成氧化钴、三元前驱体、电解钴、碳酸钴和草酸钴等钴盐,省略了冶钴中间品生成硫酸钴和氯化钴等钴盐产品后再加工生成钴盐产物的过程,进而忽略了该过程的损失;②由于缺乏特定国家钴强度的动态时间序列数据,本文借鉴文献采用全球该类含钴产品的平均强度,并假设过去20年中钴的强度保持不变,然而,日本《新国际资源战略》表明,替代产品和资源减量化是减少以钴为代表的战略性关键金属需求的有效手段^[15],日本部分传统应用中钴强度呈下降趋势,因此,本文测算的传统应用出口量在一定程度上高于实际结果;③由于缺乏精炼阶段新废料回收相关数据,我们忽略了精炼阶段新废料的循环利用;此外,本文根据官方报告披露的数据仅考虑了报废电池和催化剂的回收,因此旧废料实际回收率要高于本文现有研究结果。

本文积累、整合、编制了日本钴贸易关联钴物质流长时序数据,系统、动态揭示了日本钴物质流量、流向、存量和贸易格局演进特征,为进一步精细化深入研究全球钴资源物质循环,开展细粒度国别尺度钴物质流分析提供了数据积累。

4.3 对中国的启示

中日两国钴产业链均为“上游进,下游出,两头在外”发展模式,二者相互依存,又互相竞争。①从上游看,全球70%的钴矿产自刚果,70%精炼钴产自中国^[29],一旦刚果钴矿供应中断将直接对中国钴供

应产业链造成严重影响^[28];当前,中国已成为日本最大的精炼钴和消费电子电池供应国,以及第二大电动汽车电池出口国,中国钴产业链供应链风险也将传导并对日本钴产业链供应链产生冲击。②从下游看,中日两国含钴终端产品出口均由电动汽车电池驱动,且美国和德国是其主要贸易伙伴,出口格局高度重叠互相竞争^[32];含钴终端产品制造趋同而消费却不断分异。在含钴终端产品制造上,中日两国均呈现传统应用逐渐被以电动汽车电池为代表的新兴应用取代的趋势;在含钴终端产品消费上,中国在消费电子产品电池和电动汽车电池拉动下钴资源消费持续增长^[12],而日本却在以消费电子电池为代表的传统应用需求不振、减量化、替代品和“氢能”转型路径等综合影响下,其钴资源消费呈现下降趋势。有鉴于此,日本贸易关联钴物质流演变特征及管理经验可以为中国提供以下启示:

(1)拓宽钴矿供应渠道,提高供应来源多元化。充分考虑国内和国际两个市场,既要降低国内精炼和制造阶段损失率,提高尾矿利用率和二次资源循环利用率,又要通过外交、经济等多个维度拓宽供应渠道。

(2)多措并举,减少对钴资源的需求量。①加大技术研发力度,加快推进低“钴”或无“钴”正极材料的研发,降低汽车电气化转型对钴资源的消费需求;②开展替代品和关键金属减量化技术的研发,减少传统应用对钴资源的需求;③面对低碳能源转型过程中技术路径选择的高度不确定性,中国宜采取综合战略,既兼顾氢能路线,又引领电动汽车发展,始终保持绿色低碳能源技术的国际竞争力。

(3)构建钴资源物质流全生命周期动态监测体系,提升产业链供应链风险管控能力。动态监测中国钴资源开采、精炼、制造、使用和废弃物管理全生命周期过程及各阶段贸易,上下游产业联动,全面提升中国钴资源产业链供应链风险管控能力。

参考文献(References):

- [1] Hao H, Cheng X, Liu Z, et al. China's traction battery technology roadmap: Targets, impacts and concerns[J]. Energy Policy, 2017, 108: 355-358.
- [2] Watari T, Nansai K, Nakajima K. Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements[J]. Resources, Conservation and Recy-

2023年11月

- cling, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104669.
- [3] Hao H, Geng Y, Tate J, et al. Securing platinum-group metals for transport low-carbon transition[J]. *One Earth*, 2019, 1(1): 117–125.
- [4] United States Geological Survey. Mineral Commodity Summaries, 2022[R/OL]. (2022-01-31) [2023-04-18]. <https://pubs.usgs.gov/publication/mcs2022>.
- [5] Cobalt Institute. Cobalt Market Report, 2022[R/OL]. (2022-05-01) [2023-05-20]. <https://www.cobaltinstitute.org/resource/cobalt-market-report-2022/>.
- [6] European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. Study on the EU's List of Critical Raw Materials (2020) Final Report[R/OL]. (2020-01-20) [2022-08-23]. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/11619>.
- [7] Executive Office of the President of the United States Federal Government. Addressing the Threat to the Domestic Supply Chain From Reliance on Critical Minerals From Foreign Adversaries and Supporting the Domestic Mining and Processing Industries[R/OL]. (2020-10-05) [2022-09-10]. <https://www.federalregister.gov/documents/2020/10/05/2020-22064/addressing-the-threat-to-the-domestic-supply-chain-from-reliance-on-critical-minerals-from-foreign>.
- [8] The Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan, (METI). New International Resource Strategy[R/OL]. (2020-03-30) [2022-05-10]. <https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/special/article/detail158.html>.
- [9] 自然资源部. 全国矿产资源规划(2016–2020年)[EB/OL]. (2016-11-15) [2021-03-31]. <https://m.mnr.gov.cn/dt/zb/2016/kczygh/>. [Ministry of Natural Resources. National Mineral Resources Planning (2016–2020) [EB/OL]. (2016-11-15) [2021-03-31]. <https://m.mnr.gov.cn/dt/zb/2016/kczygh/>.]
- [10] Mudd G M, Werner T T, Weng Z H, et al. Critical Minerals in Australia: A Review of Opportunities and Research Needs[R/OL]. (2019-03-16) [2022-06-18]. <https://doi.org/10.11636/Record.2018.051>.
- [11] Fu X, Beatty D N, Gaustad G G, et al. Perspectives on cobalt supply through 2030 in the face of changing demand[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, DOI: 10.1021/acs.est.9b04975.
- [12] 邢欣然, 汤林彬, 汪鹏, 等. 基于物质流分析的中国钴资源供需形势[J]. *科技导报*, 2022, 40(21): 120–128. [Xing X R, Tang L B, Wang P, et al. Supply and demand situation of cobalt resources in China based on material flow analysis[J]. *Science & Technology Review*, 2022, 40(21): 120–128.]
- [13] 张雅丽, 陈丽萍, 陈静, 等. 主要发达国家矿产资源安全保障战略[J]. *国土资源情报*, 2019, (11): 24–30. [Zhang Y L, Chen L P, Chen J, et al. Security strategy of mineral resources in major developed countries[J]. *Natural Resources Information*, 2019, (11): 24–30.]
- [14] The Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan, (METI). Strategy for Securing Rare Metals[R/OL]. (2009-07-29) [2023-03-15]. <https://www.meti.go.jp/>.
- [15] The Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan, (METI). Japan's new international resource strategy to secure rare metals[R/OL]. (2020-09-30) [2023-03-15]. https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/special/article/detail_158.html.
- [16] The Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan, (METI). Storage battery industry strategy[R/OL]. (2022-08-31) [2023-03-15]. https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/battery_strategy/battery_saisyu_torimatome.pdf.
- [17] The Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan, (METI). Energy White Paper[R/OL]. (2023-03-01) [2023-05-18]. <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/>.
- [18] METI, Agreement between the Government of Japan and the Government of the United States of America to Strengthen Supply Chains for Critical Minerals[R/OL]. (2023-03-28) [2023-04-20]. <https://www.meti.go.jp/press/2022/03/20230328007/20230328007.html>.
- [19] Brunner P H, Rechberger H. Handbook of Material Flow Analysis: For Environmental, Resource, and Waste Engineers[M]. Florida: CRC Press, 2016.
- [20] Liu M, Li H J, Zhou J S, et al. Analysis of material flow among multiple phases of cobalt industrial chain based on a complex network[J]. *Resources Policy*, 2022, DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.102691.
- [21] Wang T, Müller D B, Graedel T E. Forging the anthropogenic iron cycle[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(14): 5120–5129.
- [22] 安紫瑶, 闫晶晶, 安海忠, 等. 中国新能源汽车中铜资源循环利用策略有效性评估[J]. *资源科学*, 2022, 44(12): 2440–2455. [An Z Y, Yan J J, An H Z, et al. Effectiveness evaluation of copper resource recycling strategies for China's new energy vehicles[J]. *Resources Science*, 2022, 44(12): 2440–2455.]
- [23] Liu G, Müller D B. Mapping the global journey of anthropogenic aluminum: A trade-linked multilevel material flow analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, DOI: 10.1021/es4024404.
- [24] 李新, 康欣宇, 林靖, 等. 中国铅资源流动及其循环效率[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 535–545. [Li X, Kang X Y, Lin J, et al. China's lead resource flow and its recycling efficiency[J]. *Resources Science*, 2021, 43(3): 535–545.]
- [25] Guo X, Zhong J, Song Y, et al. Substance flow analysis of zinc in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(3): 171–177.
- [26] 汤林彬, 汪鹏, 陈伟强. 中国钨贸易格局演变及启示: 基于物质流与价值流分析[J]. *科技导报*, 2022, 40(8): 70–77. [Tang L B, Wang P, Chen W Q. Evolution of China's tungsten trade pattern

- and its implications based on the perspectives of material flow and value flow[J]. *Science & Technology Review*, 2022, 40(8): 70–77.]
- [27] 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 & Technology*, 2014, DOI: 10.1021/es4033452.
- [28] Sun X, Hao H, Liu Z W, et al. Tracing global cobalt flow: 1995–2015[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 149: 45–55.
- [29] Zeng A Q, Chen W, Rasmussen K D, et al. Battery technology and recycling alone will not save the electric mobility transition from future cobalt shortages[J]. *Nature Communications*, 2022, DOI: 10.1038/s41467-022-29022-z.
- [30] Zeng X L, Li J H. On the sustainability of cobalt utilization in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 104: 12–18.
- [31] Chen Z Y, Zhang L G, Xu Z M. Tracking and quantifying the cobalt flows in mainland China during 1994–2016: Insights into use, trade and prospective demand[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 672: 752–762.
- [32] Qiao D, Dai T, Wang G, et al. Exploring potential opportunities for the efficient development of the cobalt industry in China by quantitatively tracking cobalt flows during the entire life cycle from 2000 to 2021[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115599.
- [33] 文博杰, 韩中奎. 2015 年中国钴物质流研究[J]. *中国矿业*, 2018, 27(1): 73–77. [Wen B J, Han Z K. Substance flow analysis of cobalt in China in 2015[J]. *China Mining Magazine*, 2018, 27(1): 73–77.]
- [34] Graedel T E, Miatto A. US cobalt: A cycle of diverse and important uses[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106441.
- [35] 刘立涛, 赵慧兰, 刘晓洁, 等. 1995–2015 年美国钴物质流演变[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 524–534. [Liu L T, Zhao H L, Liu X J, et al. Cobalt material flow in the United States from 1995 to 2015[J]. *Resources Science*, 2021, 43(3): 524–534.]
- [36] León M F G, Blengini G A, Matos C T, et al. Long-term retrospective analysis of the societal metabolism of cobalt in the European Union[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130437.
- [37] Japan Organization for Metals and Energy Security, (JOGMEC). Metal Resource Information[R/OL]. (2022–10–26) [2023–02–15]. https://mric.jogmec.go.jp/news/material_flow2022/.
- [38] Harper E M, Kavlak G, Graedel T E. Tracking the metal of the globlins: Cobalt's cycle of use[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2): 1079–1086.
- [39] Asari M, Sakai S. Li-ion battery recycling and cobalt flow analysis in Japan[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, 81: 52–59.
- [40] Shedd K B. The Materials Flow of Cobalt in the United States[R/OL]. (1993–01–01) [2022–05–10]. <https://pubs.usgs.gov/usbm/9350/ic-9350.pdf>
- [41] Sato F E K, Nakata T. Recoverability analysis of critical materials from electric vehicle lithium-ion batteries through a dynamic fleet-based approach for Japan[J]. *Sustainability*, 2019, 12(1): 147.
- [42] Next Generation Vehicle Promotion Center. Investigation and Statistics, Statistics of EV and Other Sales[DB/OL]. (2022–11–01) [2023–01–18]. <http://www.cev-pc.or.jp/tokei/hanbai3.html>.
- [43] Wang Y B, Ge J P. Potential of urban cobalt mines in China: An estimation of dynamic material flow from 2007 to 2016[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104955.
- [44] U.S. Geological Survey. Rare Earths Data Sheet—Mineral Commodity Summaries, 2021[R/OL]. (2022–01–01) [2022–08–18]. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/cobalt-statistics-and-information>.
- [45] Ministry of Economy, Trade and Industry Natural Resources and Energy Bureau[R/OL]. (2021–09–30) [2022–09–18]. <https://www.enecho.meti.go.jp/>.
- [46] UN. Commodity Trade Statistics Database[DB/OL]. [2022–08–18]. <http://comtrade.un.org/db>.
- [47] U.S. Geological Survey. Cobalt Minerals Yearbook, 2018[R/OL]. (2022–09–01) [2022–10–18]. <https://pubs.usgs.gov/myb/vol1/2018/myb1-2018-cobalt.pdf>.
- [48] 中国有色金属工业协会. 中国有色金属工业年鉴, 2018[M]. 北京: 中国有色金属工业协会, 2019. [China Nonferrous Metals Industry Association. *China Nonferrous Metals Industry Yearbook* [M]. Beijing: China Nonferrous Metals Industry Association, 2019.]
- [49] Morita Y, Saito Y, Yoshioka T, et al. Estimation of recoverable resources used in lithium-ion batteries from portable electronic devices in Japan[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105884.
- [50] The Maritime Executive. Trade War: South Korea Targets Japanese Waste[N/OL]. (2019–08–17) [2022–06–10]. <https://indoshippinggazette.com/2019/trade-war-south-korea-targets-japanese-waste/>.
- [51] 方晓霞, 杨丹辉. 中日在稀有金属领域的战略博弈: 兼评中国稀土产业政策效果[J]. *日本问题研究*, 2016, 30(5): 1–7. [Fang X X, Yang D H. Strategic game between China and Japan in rare metal field: Comments on effects of China's rare earth industrial policy[J]. *Japanese Research*, 2016, 30(5): 1–7.]
- [52] Hatayama H, Tahara K. Evaluating the sufficiency of Japan's mineral resource entitlements for supply risk mitigation[J]. *Resources Policy*, 2015, DOI: 10.1016/j.resourpol.2015.02.004.

Evolution of cobalt material flow in Japan from 2000 to 2020

XU Daxing^{1,2,3}, DAI Tao¹, LIU Litao², DU Lipu^{1,3}, LUO Fanjie⁴, OUYANG Xin², TIAN Nan¹, LIU Gang⁵

(1. Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 4. College of Management Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 5. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: [Objective] Cobalt stands as a critical metal in the transition toward green, low-carbon energy. Japan, a significant consumer and trading hub for global cobalt resources, plays a pivotal role in elucidating the flow and evolutionary traits of global cobalt resources across the lifecycle, as well as the dynamic shifts in trade patterns. [Methods] This study employed the dynamic material flow analysis method to construct a framework analyzing the flow of cobalt within Japan's trade network across its life cycle. It examined the evolution of cobalt material flow in Japan from 2000 to 2020. [Results] The flow analysis showed that Japan's cobalt consumption totaled 272000 tons, showcasing notable alterations in flow and direction. The production of cobalt salt surged in the refining stages, witnessing a transition from consumer electronics batteries to electric vehicle batteries in manufacturing. Cobalt resource consumption during the usage stage demonstrated an initial increase followed by a subsequent decline, consistently led by consumer electronics batteries. With full recycling of waste in the waste management stage, the domestic demand of Japan could be met. The stock analysis showed that conventional applications experienced an initial rise followed by a decline, while emerging applications steadily grew. Consumer electronics batteries continued to dominate the stock structure, with electric vehicle batteries surpassing superalloys to secure the second position. The trade pattern analysis showed that despite a diversification of Japan's import sources, material reliance on China surged significantly. Simultaneously, Japan's cobalt-containing terminal product export market shifted from Asia to the United States and Europe. [Conclusion] Japan's cobalt industry established a comprehensive processing model of "upper- middle stream in- flow and lower stream out- flow". Driven by transportation energy shifts and industrial policies, electric vehicle batteries emerged as the primary driver for cobalt resource consumption in manufacturing. Japan ensures cobalt supply chain stability through resource diplomacy, substitution, and research and development in reduction technologies. On the one hand, the relevant conclusions can lay the foundation for global systematic and dynamic research on fine-grained country-scale cobalt material flows. On the other hand, this analysis of Japan's cobalt material flow serves as a reference for China to accurately examine and evaluate the evolution of Japan's cobalt supply and industrial chain. This knowledge may foster the improvement of strategic mineral security, particularly concerning cobalt.

Key words: cobalt; life cycle; trade link; material flow analysis; Japan