

引用格式: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.] DOI: 10.18402/resci.2021.03.09

1995—2015年美国钴物质流演变

刘立涛¹,赵慧兰²,刘晓洁¹,代涛^{3,4},刘刚^{1,5}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101;2. 华北油田分公司勘探开发研究院,沧州 061000;3. 中国地质科学院矿产资源研究所,自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京 100037;4. 中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心,北京 100037;5. 南丹麦大学工学院 生命周期工程研究中心,丹麦欧登塞 5230)

摘要:钴作为最重要的汽车电池材料之一,其供需平衡和物质流对全球主要国家交通绿色转型和应对气候变化至关重要。为揭示区域钴物质流的变化趋势,刻画其供应格局,本文以典型发达国家美国为例,构建了基于全生命周期贸易关联的钴物质流分析框架,开展了1995—2015年美国钴物质流量、存量和供应格局分析。研究显示:①从流量分析来看,美国采矿及精炼阶段由国内供应为主导向进口为主导转变,一次资源开采量呈递减趋势,二次资源利用规模逐渐扩大;制造阶段以高温合金和其他为主导;表观消费实现了从高温合金驱动向电池驱动的转变;含钴废弃物从其他与高温合金占主导向电子产品电池占主导转变。②从存量分析来看,终端消费品在用存量实现了从高温合金和其他驱动向高温合金和电池驱动的转换。③无论从流量还是存量来看,电动汽车电池表观消费及在用存量的总量占比在2011—2015年均增长了15%,需引起特别关注。④从供应格局来看,过去20年,美国净进口规模前3的含钴产品依次为材料、电子产品电池和电动汽车电池;材料进口80%依赖欧洲的供应格局转变为亚洲占主导(35%),美洲(27%)和欧洲(22%)为辅,供应来源日趋多元化;电池供应则进一步向亚洲集中,源自亚洲的电动汽车电池和电子产品电池进口占比分别从1995年的82%和57%提升至2015年的96%和91%。截至2015年,中国已经成为了美国最大的材料和电子产品电池供应国,第二大电动汽车电池供应国;中国供应了美国31%的材料,74%的电子产品电池和36%的电动汽车电池。在中美贸易摩擦加剧背景下,“美中”脱钩对全球、中国以及美国钴物质流的作用和影响值得深入研究和高度重视。厘清近20年来美国钴物质流变化趋势,有助于研判美国钴产业链演变态势,为进一步完善中国战略性关键矿产管理体制机制,制定适应性政策提供支撑。

关键词:钴;物质流分析;全生命周期;贸易关联;美国

DOI: 10.18402/resci.2021.03.09

1 引言

钴矿储、产高度集中,且与消费在空间上的错位引起了学界和各国政府对钴物质流及其供应安全的高度重视。钴被广泛用于电池、镍基合金、硬质材料、颜料、催化剂、磁性合金和其他高技术行业^[1]。钴储量、产量和消费量空间分异显著。从供给来看,刚果(金)拥有占世界51%左右的钴矿储

量,2017年和2018年,其产量世界占比分别达到60%和70%以上^[1];从消费来看,2016年,世界84%的钴被中国(48%)、日本(14%)、美国(12%)和欧洲(10%)消耗^[2]。

早在20世纪80年代,美国国会出于对钴断供的担忧,要求美国矿冶局开展钴物质流研究^[3]。物质流分析(Material Flow Analysis, MFA)是根据物

收稿日期:2020-10-25;修订日期:2021-03-11

基金项目:国家自然科学基金项目(71991484;71991481;41401644);中国地质调查局地质调查项目(DD20190676;DD20201147);国家重点研发计划项目(2016YFC0503505)。

作者简介:刘立涛,博士,助理研究员,主要研究方向为能矿资源流动与管理。E-mail: liult@igsnr.ac.cn

通信作者:刘刚,教授,主要研究方向为产业生态与资源环境管理。E-mail: geoliugang@gmail.com

2021年3月

质守恒定理,系统且定量地评估物质在特定系统中的源、路径和汇,分析其环境、经济和社会影响的一种有效工具^[4]。该方法逐渐成为分析金属物质流最基础和重要的方法,如钢铁^[5]、铝^[6-8]、铜^[9]、锌^[10]、银^[11]、铬^[12]、镍^[13]、铅^[14]等研究案例,并被广泛应用于金属的全生命周期效率、再生潜力、未来需求以及关键调控政策的评估和模拟^[15]。早期美国的钴物质流分析侧重于美国境内含钴材料的流量研究,以及采矿、使用、废弃处置过程的损失^[3,16]。随后,全生命周期视角^[17,18]、存量^[19-21]和贸易^[22,23]等3个维度被引入到钴物质流研究之中。

自2008年以来,美国以钴为代表的战略性关键矿产治理体系日臻完善。迄今为止,美国已经建立了关键矿产筛选方法^[24,25],制定了35种关键矿产清单^[26],开展了制造业和国防供应链弹性评估^[27,28],构建了确保安全供应的国家战略^[29-31]等较完备的国内管理体制机制。随后,关键矿产相关高科技产业供应链的国际治理成为美国政策制定关注焦点。2019年,为了构建更有弹性的能矿供应链,降低全球高科技产业如电动汽车和清洁能源技术在关键原材料上对中国的依赖,由美国国务院和能源资源局牵头搭建了关键矿产国际治理平台——“能源资源治理倡议(Energy Resource Governance Initiative)”^[32]。2020年9月特朗普签发了13953号总统令《解决依赖外国关键矿物对国内供应链构成威胁

的行政命令》^[33]。2021年2月拜登签发《关于美国供应链的行政命令》,特别提及对包括电动汽车电池在内的大容量电池供应链风险进行为期100天的审查^[34]。

钴物质流研究呈现从侧重静态流量描述到动态存量流量分析并重,从侧重单个含钴产品如电池^[19,35]到覆盖全生命周期主要含钴产品的转变,综合性和系统性不断加强。然而,当前研究案例区以全球、中国和日本为主,基于全生命周期贸易关联的美国钴动态物质流仍未有报道。有鉴于此,在中美贸易摩擦加剧背景下,厘清近20年来美国钴物质流总量和结构如何变化,有助于研判美国钴产业链演变态势,为进一步完善中国战略性关键矿产管理体制机制,制定适应性政策提供借鉴。本文刻画了1995—2015年基于生命周期贸易关联的美国钴物质流格局,分析了美国钴物质流量、存量和供应格局变化趋势,并对未来研究方向进行了展望。

2 研究方法数据来源

2.1 系统边界及行业分类

基于全生命周期贸易关联的美国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个阶段以及贯穿于各阶段的贸易所构成(图1)。其中,贸易涵盖的含钴产品包括3种矿石流、6种精炼材料流、8类终端产品流以及2类废弃物流,涉及HS六位码标识的84种细分产品(表1)。其中,采矿

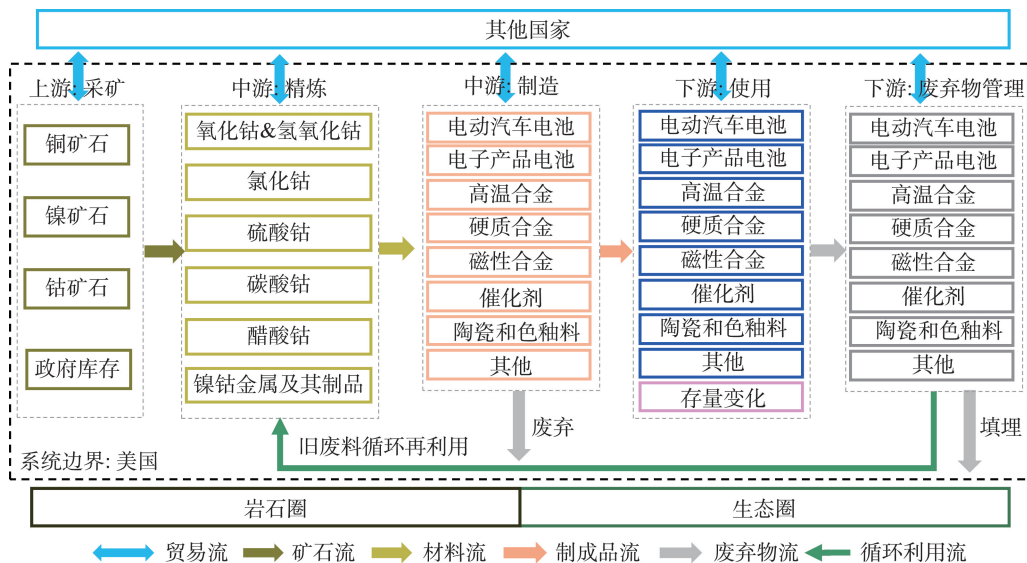


图1 基于全生命周期贸易关联的美国钴物质流分析框架

Figure 1 Life cycle and international trade based cobalt material flow analysis (MFA) framework for the United States

表1 全生命周期钴贸易清单及相关参数

Table 1 Cobalt containing commodity list, cobalt content, and related parameters

大类名称	小类名称	钴含量/%	寿命/年	回收率/%	
				1995—2000年	2001—2015年
矿石	铜矿石	0.15	—	—	—
	镍矿石	0.07	—	—	—
原材料	钴矿石	7.60	—	—	—
	氧化钴及氢氧化钴	72.00	—	—	—
	氯化钴	7.20	—	—	—
	硫酸钴	6.00	—	—	—
	碳酸钴	13.50	—	—	—
	醋酸钴	6.90	—	—	—
	镍钴金属及其中间制品	0.59~20.00	—	—	—
终端产品	电动汽车电池	0.03~6.85	8.0	70.0	70.0
	电子产品电池	0.02~6.85	2.5	5.0	10.0
	高温合金	0.13~11.00	5.0	45.0	40.0
	硬质合金	0.15	1.0	25.0	25.0
	磁性合金	0.02~0.90	5.0	10.0	10.0
	催化剂	0.45	2.0	5.0	5.0
	陶瓷和色釉料	0.10~0.35	1.0	0.0	0.0
	其他	0.02~5.00	1.0	0.0	0.0
废弃物	含钴废弃物	12.00~32.00	—	—	—

注:含钴系数、含钴产品使用寿命及回收率根据文献[17,20,23,42]整理。

阶段3类矿石流主要包括铜矿石、镍矿石和钴矿石;精炼阶段6类材料流主要包括氧化钴及氢氧化钴、氯化钴、硫酸钴、碳酸钴、醋酸钴、镍钴金属及其中间制品;制造和使用阶段8大类终端产品流主要包括电动汽车电池,电子产品电池,高温合金,硬质合金,磁性合金,催化剂,陶瓷和色釉料,其他;废弃物管理阶段2类含钴废弃物流主要包括含钴废弃物及材料和含钴废旧电池。本文的空间边界为美国领土范围,时间范围为1995—2015年,该时期涵盖了钴在美国高新技术行业的发展。

2.2 计算方法

采用动态物质流刻画1995—2015年美国含钴产品流量和在用存量。含钴产品流量和存量之间严格遵守物质守恒定律,其恒等式如下所示^[17,20,23]:

$$Stock_{i,t}^{Co} = \int_{t_0}^t (AC_{i,t}^{Co} - R_{i,t}^{Co}) dt \quad (1)$$

$$R_{i,t}^{Co} = \int_{t_0}^t L_i(t, t') \times AC_{i,t'}^{Co} dt' \quad (2)$$

式中: $Stock_{i,t}^{Co}$ 、 $AC_{i,t}^{Co}$ 和 $R_{i,t}^{Co}$ 分别为 t 年以钴质量衡量的 i 类含钴产品在用存量、表观消费量和废弃量;

$L_i(t)$ 是定义在离散时间序列 $[0, 1, 2, \dots, t, \dots]$ 上的寿命分布函数,表示 $t=0$ 年产生的 i 类在用存量在第 t 年被废弃的概率。 $L_i(t, t')$ 中 t 为时间步长,设定为年份, t' 为新流量输入系统中的具体年份。

各类含钴初级产品(矿石及材料)和终端产品表观消费量等于终端产品产量加上净进口,其计算如公式(3)–(5)所示。

$$AC_{i,t}^{Co} = P_{i,t}^{Co} + I_{i,t}^{Co} - E_{i,t}^{Co} \quad (3)$$

$$I_{i,t}^{Co} = I_{i,t}^p \times C_{i,t}^p \quad (4)$$

$$E_{i,t}^{Co} = E_{i,t}^p \times C_{i,t}^p \quad (5)$$

式中: $P_{i,t}^{Co}$ 、 $I_{i,t}^{Co}$ 、 $E_{i,t}^{Co}$ 分别为 t 年以钴质量衡量的第 i 类含钴产品国内产量、进口量和出口量; $I_{i,t}^p$ 、 $E_{i,t}^p$ 分别为 t 年第 i 类含钴产品 p 的进口量和出口量; $C_{i,t}^p$ 为 t 年第 i 类含钴产品 p 中钴质量百分比含量。

动态物质流通常采用威布尔分布、正态分布等作为常用的寿命分布函数。本文采用正态分布作为寿命分布函数^[17,36](公式(6))。寿命分布函数在其定义域上加总等于1,其计算如公式(7)所示。

2021年3月

$$L_i(t, t') = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t')^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

$$\sum_{t=0}^{\infty} L_i(t) = 1 \quad (7)$$

式中: μ 为第 i 类含钴产品的平均寿命; σ 为正态分布标准差, 本文取值 0.3μ [37]。全生命周期含钴产品净交易量可以反映美国在全球钴市场中的地位及其依赖性。 t 年以钴质量衡量的 i 类产品净进口 $NI_{i,t}^{Co}$ 与净出口 $NE_{i,t}^{Co}$ 如公式(8)–(9)所示。

$$NI_{i,t}^{Co} = \sum_i (I_{i,t}^{Co} - E_{i,t}^{Co}) \quad (8)$$

$$NE_{i,t}^{Co} = \sum_i (E_{i,t}^{Co} - I_{i,t}^{Co}) \quad (9)$$

借助文献调研获取含钴废料 w 回收利用率 $RR_{i,t}^w$ (表1), 含钴废料量 $P_{i,t}^w$ 中含钴质量 $W_{i,t}^{Co}$ 的计算公式如下:

$$W_{i,t}^{Co} = P_{i,t}^w \times RR_{i,t}^w \times C_{i,t}^p \quad (10)$$

2.3 数据来源及处理

全生命周期含钴产品贸易数据来自联合国贸易商品统计数据库[38]。政府库存和表观消费及其结构数据来自USGS[1]。据USGS数据显示, 美国仅在1940—1971年以及2014—2015年期间存在钴矿开采。美国原生钴矿开采及精炼分别止于1971年和1985年底。然而, 仍有少量钴伴随其他矿石和金属如铅、铜、金、锌、铁矿石和煤等在选矿或冶金加工过程中被分离出来[16]。由于美国地质调查局在统计钴表观消费量时不包括电动汽车电池和电子产品电池, 无法通过国际贸易数据和表观消费量计算美国本地产量; 且基于联合国贸易商品统计数据库(UN Comtrade Database)[38]计算显示, 2015年全球电动汽车和电子产品电池95%左右出口源自亚太地区, 故本文暂不考虑美国电动汽车和电子产品电池的本地制造。

由于缺乏可靠数据来源, 暂不考虑美国采矿和精炼阶段损耗, 而制造阶段损耗及废弃主要在参考文献[39–41]的基础上, 根据物质守恒定律计算。此外, 由于缺乏新废料循环利用相关信息, 因此忽略精炼和制造过程新废料的循环利用。钴废料进出口包括HS810530(钴废料)和HS854810(废旧电池)2类。由于1995—2015年期间, 钴废弃物净出口总额为废弃物管理阶段废弃流(旧废料再生除外)总额

的3倍以上, 且废旧电池占钴废弃物净出口97%以上, 考虑到巨额钴废弃物净出口的形成源自长期消费存量, 无法在一年内平衡, 因此, 本文将每年源自电池(电动汽车和电子产品电池)的废弃物流扣除旧废料循环利用部分, 其余全部出口进行平衡。

3 结果与分析

3.1 流量分析

本文选取1995、2005以及2015年作为典型年份, 绘制基于全生命周期贸易的美国钴物质流图(图2), 并针对贸易, 开采和精炼, 制造, 使用, 废弃阶段流量开展具体分析。

(1) 贸易阶段

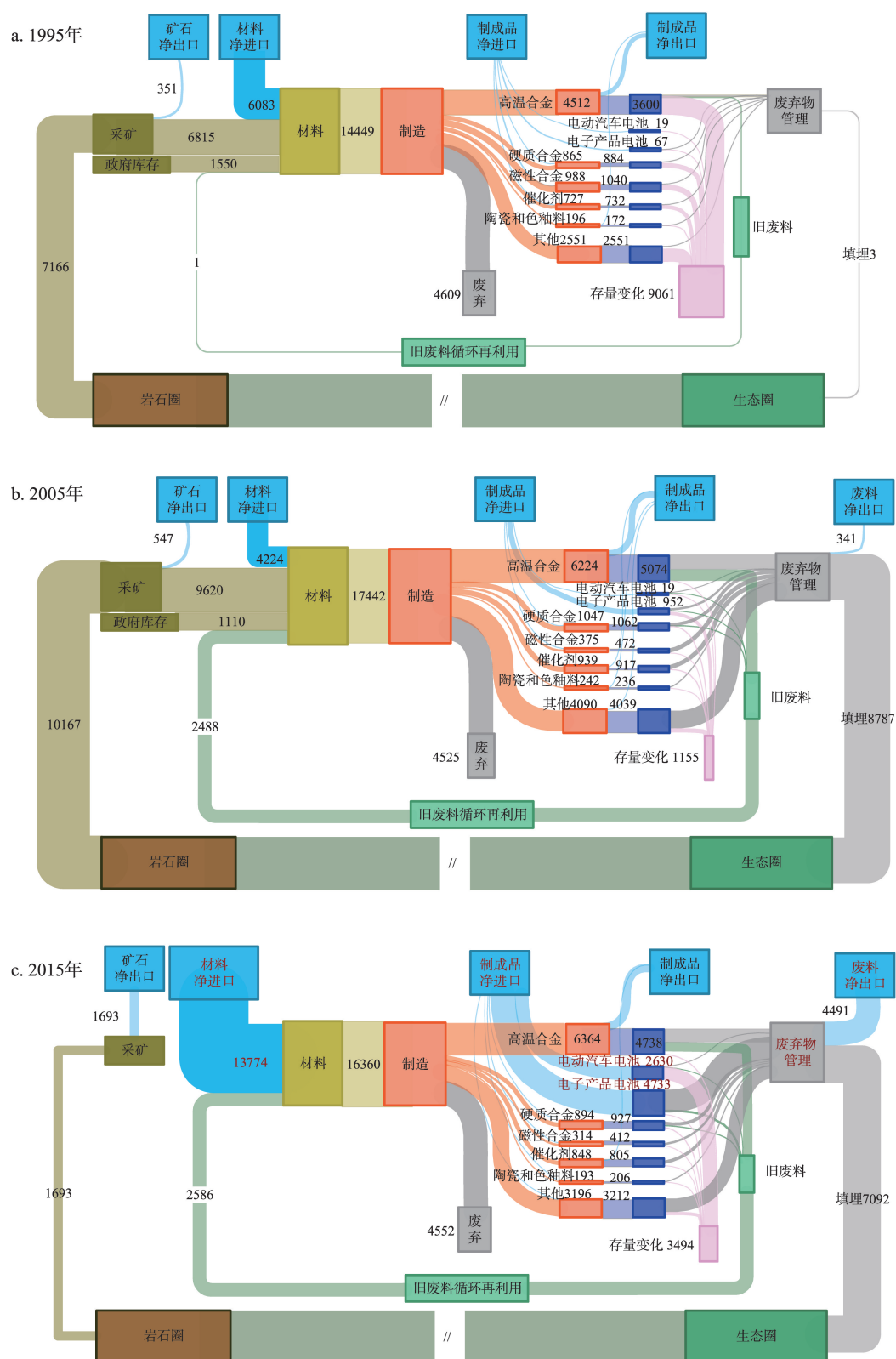
1995—2015年, 美国含钴产品贸易规模以年均10%左右的速度扩大, 从1995年的不足30000 t增长至2015年的130000 t以上(图3a)。从贸易结构来看, 以材料流和废弃物流占主导。其中, 材料流在贸易总额中占比从1995年的89%逐步下降至2015年的25%; 而废弃物流则稳步上升, 从1995年的0%大幅提升至2015年的61%。

1995—2015年, 美国净进口规模前3的含钴产品依次为材料、电子产品电池和电动汽车电池(图2, 图3b)。其中, 材料净进口量增幅最大, 从1995年的6083 t增长至2015年的13774 t; 电子产品电池其次, 以年均超过30%的增速, 从1995年的67 t增长至2015年的4733 t; 值得注意的是, 美国电动汽车电池净进口规模在2011年以前均保持在19 t左右, 2012年开始出现大幅提升, 截至2015年, 美国电动汽车电池净进口量达到2630 t。

此外, 美国含钴废弃物流净出口规模急剧扩大, 从1995年的不足6 t扩大到2015年的70000 t以上; 含钴矿石和高温合金净出口规模也有不同程度的增加, 分别从1995年的351 t和912 t增长至2015年的1693 t和1626 t(图3b)。

(2) 采矿和精炼阶段

采矿和精炼阶段由国内供应为主导向进口为主导转变(图2, 图4a)。流入精炼阶段的国内矿产开采(一次和二次)及库存供应总量从1995年的8366 t先上升至2005年的13218 t, 而后下降至2015年的2586 t; 相应地, 国内供应占比从1995年的58%先升至2005年的76%, 而后下降至2015年的16%。



绘图工具: CircularSankey^[43]

图2 1995—2015年基于全生命周期贸易的美国钴物质流动时序变化(单位:t)

Figure 2 Change of cobalt material flow in the United States based on trade through the entire life cycle, 1995-2015 (Unit: t)

2021年3月

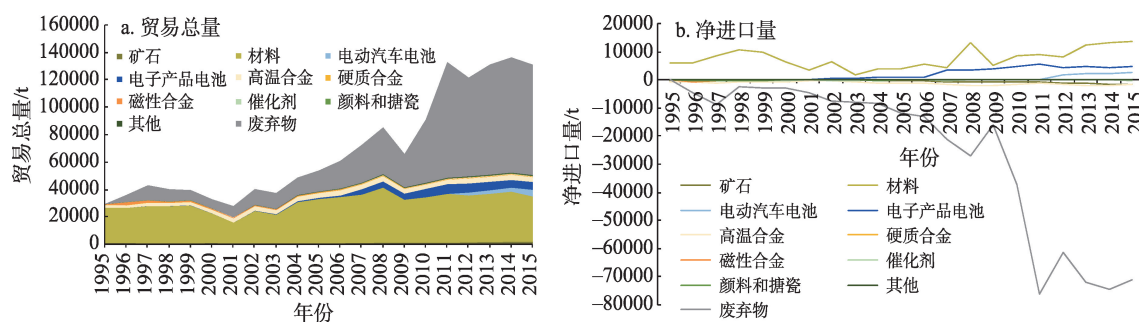


图3 全生命周期含钴产品贸易流变化

Figure 3 Variation of U.S. cobalt containing product trade flows through the entire life cycle

总体而言,国内供应呈递减趋势,而随着进入使用寿命终结阶段的含钴产品增加,旧废料再生规模逐渐扩大。具体而言,旧废料再生规模从1995年的1 t增长至2015年的2586 t。

(3) 制造阶段

美国含钴产品制造以高温合金和其他为主导,制造阶段所产生的废弃物不容忽视(图2,图4b)。高温合金和其他用途类别稳步提升,分别从1995年的4512 t(总产量占比为31%)和2551 t(18%),增长至2015年的6364 t(39%)和3196 t(20%);近20年来,制造阶段产生的废弃物占比达30%左右,不容忽视。硬质合金,催化剂,陶瓷和色釉料在总产量中占比较稳定,分别在5%、5%和1%左右小幅波

动。此外,磁性合金占比大幅下降,从1995年的7%下降至2015年的2%。

(4) 使用阶段

美国含钴产品表观消费实现了从高温合金驱动向电池驱动的转变(图2,图4c)。除电动汽车电池及电子产品电池占比大幅提升外,其他含钴产品均呈不同程度下降趋势。电池占比从1995年的不足2%(86 t),大幅提升至2015年的42%(7363 t),其中,电动汽车电池和电子产品电池分别从1995年的不足1%和1%提升至2015年的15%和27%。此外,表观消费占比降幅最大的为高温合金和其他,分别从1995年的40%(3600 t)和28%(2551 t)降至2015年的27%(4738 t)和18%(3212 t)。

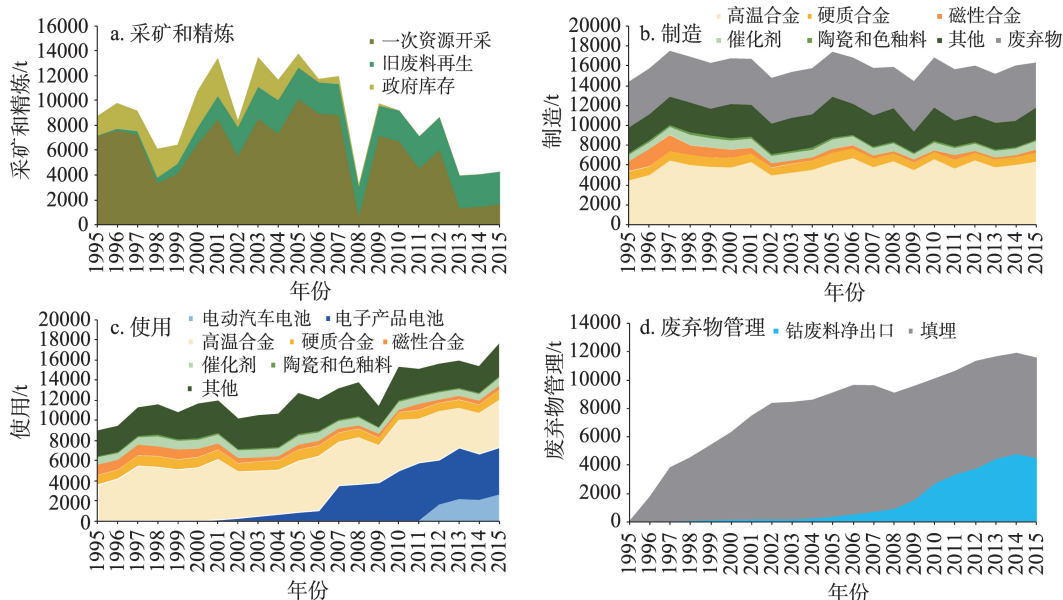


图4 分阶段分产品流量变化

Figure 4 Variation of cobalt flow by phase and product

(5) 废弃物管理阶段

与表观消费演变类似,流入到废弃物管理阶段的含钴废弃物从其他与高温合金占主导向电子产品电池占主导转变(图2)。具体而言,源自电子产品电池的废弃物占比从1995年1%左右大幅增至2015年的39%(4475 t);而源自其他和高温合金的废弃物则分别从1995年的36%和28%降至2015年的23%(2665 t)和23%(2679 t)。

随着钴废弃物净出口规模的稳步增长,从废弃物管理阶段流出到填埋的规模先增后降,废弃物管理仍以填埋占主导(图2,图4d)。从结构上看,钴废料净出口占比从1995年的不足1%快速提升至2015年的39%;填埋占比则从超过99%大幅降低至2015年的61%。从规模上看,填埋先从1995年的3 t增长至2006年的峰值9150 t后持续下降至2015年的7092 t。

3.2 存量分析

终端消费品在用存量实现了从高温合金和其他驱动向高温合金和电池驱动的转变(图5)。电动汽车电池和电子产品电池在用存量占比,从1995年不足1%快速提升至2015年的15%(8581 t)和25%(14368 t);同期,高温合金占比从40%(3598 t)小幅提升至43%(24403 t)。而其他占比却大幅下降,从28%(2550 t)降至8%(4527 t)。与表观消费类似,电动汽车电池在用存量占比在2011—2015年实现了接近15%的提升,需引起特别关注。

3.3 供应格局分析

鉴于材料、电动汽车电池和电子产品电池为美国净进口规模前3的含钴产品,针对上述3种含钴产品,采用美国某年从某国的进口量与当年美国

进口总量之比构建供应保障度指标^[44],识别美国钴的境外主要供应来源,刻画其供应格局(图6)。1995—2015年,美国材料、电动汽车电池和电子产品电池主要境外供应来源及其份额如图6所示。

(1)材料对外依存度大幅升高,供应风险加大;进口来源趋于多元化,且由以欧洲供应为主,转为亚洲占主导,美洲、欧洲为辅。伴随着美国材料消费的逐年增长,以及一次资源开采的大幅减少,美国材料对外依存度从1995年的1%升至2015年的84%,供应风险持续增加。从供应时空格局来看,1995年美国80%左右材料源自欧洲,依次为芬兰(51%)、德国(11%)、西班牙(7%)、英国(7%)、荷兰(4%);9%源自美洲,其中,墨西哥和加拿大分别为7%和2%;不足6%源自亚洲,其中从中国进口5%,源自印度的份额不足1%。过去20年,美国原材料进口高度依赖欧洲的供应格局大幅改变,2015年,美国材料进口35%左右源自亚洲,其中,中国和印度分别为31%和4%;27%源自美洲,其中,墨西哥和加拿大分别为14%和13%;仅22%源自欧洲,依次为德国(7%)、芬兰(6%)、荷兰(4%)、英国(3%)和西班牙(2%)。美国境外材料供应时空格局的转变,一方面,是美国多元化供应来源以保障其供应链安全的内在需求;另一方面,外部供应来源的增加也为美国钴进口多元化提供了可能。

(2)电池供应格局进一步向亚洲集中。从电动汽车电池供应时空格局来看,1995年,美国82%进口源自亚洲,依次为中国(49%)、日本(16%)、泰国(10%)、越南(5%)和韩国(2%);6%源自美洲,其中墨西哥和加拿大分别为4%和2%;4%源自德国。2015年,美国96%进口电动汽车电池供应源自亚洲,依次为中国(55%)、日本(36%)和韩国(5%)。从电子产品电池供应时空格局来看,1995年,美国57%左右进口源自亚洲,依次为中国(44%)、日本(6%)、韩国(4%)、马来西亚(2%)和越南(不足1%);30%源自墨西哥。2015年,亚洲供应份额升高至91%,依次为中国(74%)、日本(7%)、韩国(5%)、越南(4%)和马来西亚(1%);墨西哥供应降至1%,摩纳哥供应2%。美国电池进口主要源自亚洲,原因在于世界锂电池生产高度集中。早在1995年,日本生产了世界约88%的锂电池;而到了2017年,中

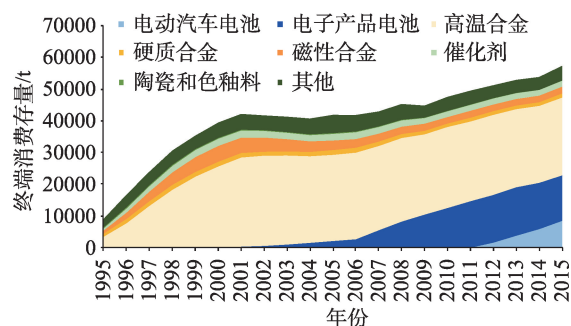


图5 1995-2015年美国终端消费存量变化

Figure 5 Variation of in use stock in the United States

2021年3月

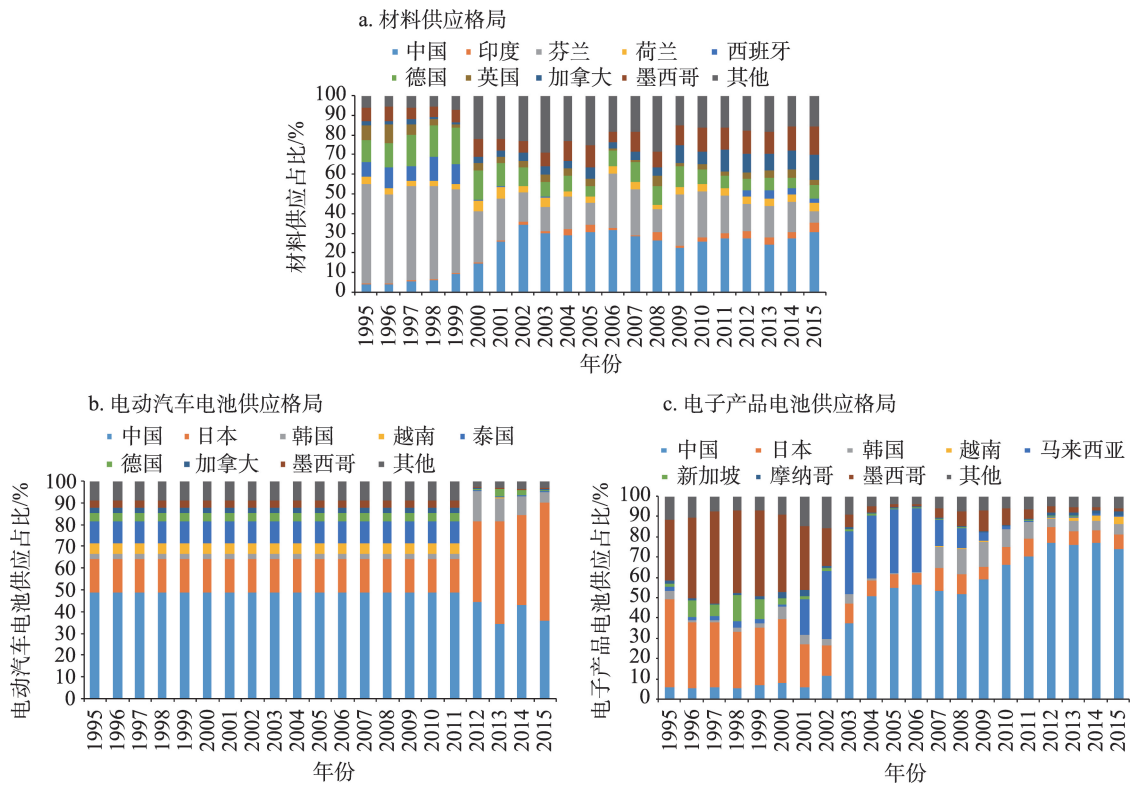


图6 1995-2015年美国材料(a)、电动汽车电池(b)和电子产品电池(c)供应格局变化

Figure 6 Variation and change of Material (a), electric vehicle battery (b), and consumer electronics battery (c) suppliers for the United States

国(65%)、日本(17%)和韩国(14%)锂电池产量世界占比已超过95%。

4 结论与讨论

4.1 结论

在明晰4大类18小类以及84种含钴产品清单及相关参数的基础上,构建了基于全生命周期贸易关联的美国钴物质流分析框架,开展了1995—2015年美国钴物质流量、存量和供应格局分析,主要结论如下:

(1)美国全生命周期主要含钴产品流量、流向和结构均发生了较大变化。采矿和精炼由国内供应为主导向进口为主导转变,一次资源开采量呈递减趋势,随着进入使用寿命终结阶段的含钴产品增多,二次资源开采规模逐渐扩大;制造阶段以高温合金和其他为主导;表观消费结构实现了从高温合金驱动向电池驱动的转变;流入到废物管理阶段的含钴废物则从其他与高温合金占主导向电子产品电池占主导转变。

(2)终端消费品中钴的蓄积呈现从高温合金和

其他占主导向高温合金和电池占主导的转换。需特别注意的是,电动汽车电池表观消费及在用存量占比均在2011—2015年实现了接近15%的提升。

(3)在材料供应来源趋于多元化的同时,电池供应格局进一步向亚洲集中,其中的供应风险受到美国有关方面的重视。1995—2015年,美国材料进口趋于多元化,从80%依赖欧洲转变为亚洲占主导(35%),美洲(27%)和欧洲(22%)为辅。电池供应格局则进一步向亚洲集中,电动汽车电池和电子产品电池亚洲供应占比分别从1995年的82%和57%升至2015年的96%和91%。

截至2015年,中国已经成为了美国最大的材料(31%)和电子产品电池(74%)供应国,第二大电动汽车电池(36%)供应国。在中美贸易摩擦加剧背景下,“美中”脱钩对全球、中国以及美国钴物质流的作用和影响值得深入研究和高度重视。

4.2 讨论

随着技术进步和高技术产业飞速发展,含钴产品清单及其相关参数处于动态变化中。尤其是随

着全球电动汽车行业的迅速发展,其如何影响区域(包括本案例中的美国)钴物质流及供需平衡尤其值得进一步研究。此外,本文还存在以下几方面局限性,有待在未来的研究中提高:首先,本文含钴产品清单及其相关参数设置基于文献调研,文献系统边界的不一致及不同数据来源等多重因素影响导致本文研究结果存在一定不确定性;其次,由于数据限制,暂未考虑采矿阶段、精炼阶段的损失,制造阶段的损失基于物质守恒推算且未考虑新废料循环利用,未来需要进一步深入开展全生命周期钴利用效率研究;第三,虽然本文考虑了美国全生命周期贸易关联,却没有进一步将贸易网络打开,阐述不同环节不同含钴产品从哪里来、供应风险如何,供应格局变化的驱动因素;第四,未来需进一步立足于全生命周期视角,从动态、存量和贸易3个维度开展更加综合、系统的其他典型国家和区域钴物质流研究。

参考文献(References):

- [1] U.S.Geological Survey. National Minerals Information Center: Cobalt Statistics and Information[EB/OL]. (2018-01-01) [2020-10-30]. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/cobalt-statistics-and-information>.
- [2] 王京, 石香江, 王寿成, 等. 未来中国钴资源需求预测[J]. 中国国土资源经济, 2019, 32(10): 28-33. [Wang J, Shi X J, Wang S C, et al. Demand forecast of China's cobalt resource in the future[J]. Natural Resource Economics of China, 2019, 32(10): 28-33.]
- [3] Gabler R C, Riley W D. A Cobalt Commodity Recycling Flow Model[R/OL]. (1990-01-01) [2020-11-02]. https://books.google.com.hk/books/about/A_Cobalt_Commodity_Recycling_Flow_Model.html?id=dId64X96UigC&printsec=frontcover&source=kp_read_button&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [4] Brunner P H, Rechberger H. Practical handbook of material flow analysis[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2004, 9(5): 337-338.
- [5] Wang T, Müller D B, Graedel T E. Forging the anthropogenic iron cycle[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(14): 5120-5129.
- [6] Chen W Q, Shi L. Analysis of aluminum stocks and flows in mainland China from 1950 to 2009: Exploring the dynamics driving the rapid increase in China's aluminum production[J]. Resource Conservation and Recycling, 2012, 65: 18-28.
- [7] Cullen J M, Allwood J M. Mapping the global flow of aluminum: From liquid aluminum to end use goods[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(7): 3057-3064.
- [8] Liu G, Müller D B. Mapping the global journey of anthropogenic aluminum: A trade-linked multilevel material flow analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(20):11873-11881.
- [9] Graedel T E, van Beers D, Bertram M, et al. Multilevel cycle of anthropogenic copper[J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(4): 1242-1252.
- [10] 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.
- [11] Johnson J, Jirikowic J, Bertram M, et al. Contemporary anthropogenic silver cycle: A multilevel analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(12): 4655-4665.
- [12] Johnson J, Schewel L, Graedel T E. The contemporary anthropogenic chromium cycle[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(22): 7060-7069.
- [13] Reck B K, Müller D B, Rostkowski K, et al. Anthropogenic nickel cycle: Insights into use, trade, and recycling[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(9): 3394-3400.
- [14] Mao J S, Dong J, Graedel T E. The multilevel cycle of anthropogenic lead: II. results and discussion[J]. Resource Conservation and Recycling[J]. 2008, 52(8-9): 1050-1057.
- [15] Baccini P, Brunner P H. Metabolism of the Anthroposphere: Analysis, Evaluation, Design[M]. Massachusetts: The MIT Press, 2012.
- [16] Shedd K B. The Materials Flow of Cobalt in the United States[R/OL](1993-01-01)[2020-12-02] <https://pubs.usgs.gov/usbmic/ic-9350/ic-9350.pdf>
- [17] Harper E M, Kavlak G, Graedel T E. Tracking the Metal of the Goblins: Cobalt's Cycle of Use[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(2):1079-1086.
- [18] 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.]
- [19] Asari M, Sakai SI. Li-ion battery recycling and cobalt flow analysis in Japan[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2013, 81: 52-59.
- [20] Zeng X L, Li J H. On the sustainability of cobalt utilization in China[J]. Resources Conservation and Recycling, 2015, 104: 12-18.
- [21] 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.
- [22] 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, 48(3): 1391-1400.

2021年3月

- [23] Sun X, Hao H, Liu Z W, et al. Tracing global cobalt flow: 1995–2015[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 149: 45–55.
- [24] Committee on Earth Resources, Committee on Critical Mineral Impacts of the U.S. Economy, Board on Earth Sciences and Resources, Division on Earth and Life Studies, National Research Council. Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy[M]. Washington D C: National Academies Press, 2008.
- [25] National Science and Technology Council. Assessment of Critical Minerals: Updated Application of Screening Methodology [R/OL]. (2018–02–10) [2020–12–20]. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2018/02/Assessment-of-Critical-Minerals-Update-2018.pdf>.
- [26] Department of the Interior. Final List of Critical Minerals 2018[R/OL]. (2018–05–18) [2020–12–20]. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2018-05-18/pdf/2018-10667.pdf>.
- [27] The Department of Defense. Executive Order 13806: Assessing and Strengthening the Manufacturing and Defense Industrial Base and Supply Chain Resiliency of the United States[R/OL]. (2018–10–31) [2020–12–20]. <https://www.businessdefense.gov/News/News-Display/Article/1676687/executive-order-13806-report-released/>.
- [28] U.S. Department of Energy. Critical Materials Strategy[R/OL]. (2010–12) [2020–12–20]. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/edg/news/documents/criticalmaterialsstrategy.pdf>.
- [29] Trump D J. Executive Order 13817: A Federal Strategy to Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals[R/OL]. (2017–12–20) [2020–12–20]. <https://www.presidency.ucsb.edu/documents/executive-order-13817-federal-strategy-ensure-secure-and-reliable-supplies-critical>.
- [30] Bureau of Energy Resources (ENR). Energy Resource Governance Initiative[R/OL]. (2019–06–20) [2020–12–20]. <https://www.state.gov/wp-content/uploads/2019/06/Energy-Resource-Governance-Initiative-ERGI-Fact-Sheet.pdf>.
- [31] The White House. Executive Order on Addressing the Threat to the Domestic Supply Chain from Reliance on Critical Minerals from Foreign Adversaries[EB/OL]. (2020–09–30) [2020–12–20]. <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/executive-order-addressing-threat-domestic-supply-chain-reliance-critical-minerals-foreign-adversaries/>.
- [32] The White House. Executive Order on America's Supply Chains [EB/OL]. (2021–02–24) [2021–03–20]. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2021/02/24/executive-order-on-americas-supply-chains/>.
- [33] Sommer P, Rotter V S, Ueberschaar M. Battery related cobalt and REE flows in WEEE treatment[J]. *Waste Management*, 2015, 45: 298–305.
- [34] Melo M T. Statistical analysis of metal scrap generation: The case of aluminium in Germany[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 1999, 26(2): 91–113.
- [35] Pauliuk S, Wang T, Müller D B. Moving toward the circular economy: The role of stocks in the Chinese steel cycle[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(1):148–154.
- [36] United Nations Comtrade. International Trade Statistics Database [DB/OL]. (2018–03–30) [2020–11–15]. <https://comtrade.un.org/>.
- [37] 陈伟强, 石磊, 常晶宇, 等. 1991年–2007年中国铝物质流分析(I): 全生命周期进出口核算及其政策启示[J]. *资源科学*, 2009, 31(11): 1887–1897. [Chen W Q, Shi L, Chang X Y, et al. Substance flow analysis of aluminium in China for 1991–2007(I): Trade of aluminium from a perspective of life cycle and its policy implications[J]. *Resources Science*, 2009, 31(11): 1887–1897.]
- [38] 陈伟强, 石磊, 钱易. 1991年–2007年中国铝物质流分析(II): 全生命周期损失估算及其政策启示[J]. *资源科学*, 2009, 31(12): 2120–2129. [Chen W Q, Shi L, Qian Y. Substance flow analysis of aluminium in China for 1991–2007(II): Quantity Loss of aluminium from a perspective of life cycle and its policy implications[J]. *Resources Science*, 2009, 31(12): 2120–2129.]
- [39] 贾冯睿, 郎晨, 刘广鑫, 等. 基于物质流分析的中国金属铜资源生态效率研究[J]. *资源科学*, 2018, 40(9): 1706–1715. [Jia F R, Lang C, Liu G X, et al. Assessment of copper resources ecological efficiency based on material flow analysis in China[J]. *Resources Science*, 2018, 40(9): 1706–1715.]
- [40] United Nations Environment Programme(UNEP), International Resource Panel(IRP). Recycling Rates of Metals:A Status Report[R/OL]. (2015–01–01) [2020–12–20]. <https://mmta.co.uk/wp-content/uploads/2015/01/UNEP-Report-Recycling-rates-of-metals-2011.pdf>.
- [41] Industrial Ecology Freiburg. CircularSankey[R/OL]. (2017–01–01) [2020–12–20]. <http://www.visualisation.industrialecology.uni-freiburg.de/>.
- [42] 赵亚博, 刘晓凤, 葛岳静. “一带一路”沿线国家油气资源分布格局及其与中国合作中的相互依赖关系[J]. *地理研究*, 2017, 36(12): 2305–2320. [Zhao Y B, Liu X F, Ge Y J. Analysis of the oil and gas resource distribution pattern along the Belt and Road and the interdependence relationship with China[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(12): 2305–2320.]

Cobalt material flow in the United States from 1995 to 2015

LIU Litao¹, ZHAO Huilan², LIU Xiaojie¹, DAI Tao^{3,4}, LIU Gang^{1,5}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Huabei Oilfield Company, Cangzhou 061000, China; 3. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 5. SDU Life Cycle Engineering, Department of Green Technology, University of Southern Denmark, 5230 Odense, Denmark)

Abstract: As a key enabling material for automotive battery, cobalt has attracted increasing governmental and academic attention in recent years, because understanding its supply and demand balance and material flow is crucial for the green transition of transportation in major countries around the world. In order to reveal the change of regional cobalt material flow and identify its supply pattern, we deployed a material flow analysis (MFA) methodology that considers international trade of all cobalt containing products through the entire life cycle for a case of the United States from 1995 to 2015. We found that: (1) From a flow perspective, the mining and refining phase has shifted from domestic supply to imports in the United States, primary production has decreased gradually, and as more cobalt containing products reach their end of life, secondary production has increased. The losses from manufacturing, particularly for superalloys and other end-uses, are significant and deserve further investigation. As apparent consumption of batteries increases, their end-of-life waste flows have gradually replaced those from superalloys and other end-uses. (2) From a stock perspective, the dominant sectors have changed from superalloys and other end-uses to both superalloys and batteries. (3) For both stocks and flows, automotive batteries have shown an increase of 15% during 2011 to 2015, which should be paid special attention to in the future. (4) From a supply pattern point of view, the top three commodities for net import of the United States are raw materials, consumer electronics batteries, and automotive batteries. The dominant source of raw materials supply has shifted from Europe (80%) to Asia (35%), supplemented by the Americas (27%) and Europe (22%). Battery supply is further concentrated in Asia, with the share of imported automotive batteries and consumer electronics batteries rising from 82% and 57% respectively in 1995, to 96% and 91% respectively in 2015. By 2015, China had become the largest supplier for consumer electronics batteries (74% in total) and raw cobalt materials (31% in total), and the second largest supplier for automotive batteries (36% in total) for the United States. In the context of expected increasing trade conflicts between China and the United States, it will be important to better understand the role of “US-China” decoupling in securing the world, China and the United States cobalt supply and material flows. Our characterization of the past cobalt material flows can help reveal the dynamics of U.S. cobalt value chain and inform China’s critical raw materials regulatory framework and policymaking.

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