

# 能源转型背景下的中国镍动态物质流分析

黄亚伟<sup>1</sup>, 汤林彬<sup>2</sup>, 王鹤鸣<sup>1\*</sup>, 汪鹏<sup>3,4</sup>, 岳强<sup>1</sup>, 杜涛<sup>1</sup>, 陈伟强<sup>3,4\*</sup>

1. 东北大学国家环境保护生态工业重点实验室, 沈阳 110819
2. 中国科学院赣江创新研究院, 赣州 341000
3. 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
4. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 基于动态物质流分析方法, 构建了镍的全生命周期物质流分析框架, 核算并分析了2000—2020年中国镍金属物质流各阶段格局变化情况。结果表明: (1) 生产视角下, 能源转型下镍矿需求出现回升; 2020年镍回收率已达20.4%; (2) 消费视角下, 加工阶段, 电池行业已超越电镀行业成为第二耗镍部门; 制造阶段, 工业机械部门耗镍占比下滑至2019年的28.9%, 新能源汽车耗镍量由2015年的4275 t连续上升至2020年1.6万t; (3) 贸易视角下, 近年来中国制造和加工阶段为净出口状态, 开采和冶炼加工阶段皆为净进口状态, 其中镍铁产品净进口量飞速增长, 由2000年的105.7 t增长到2020年的41.3万t; 不锈钢净出口量由2016年的21.3万t连续下降至2020年的10.9万t; (4) 存量视角下, 终端消费品在用存量变化主要由运输业和建筑与基础设施两大部门驱动, 新能源汽车在用存量5年增加了131倍。

**关键词** 镍; 物质流分析; 能源转型

全球能源需求快速增长和过度使用化石燃料引发了严重的环境污染和能源安全问题, 发展新能源技术已成为实现能源转型和改善能源安全的必

要条件。然而, 新能源技术的突破、推广和应用与镍金属密不可分<sup>[1-2]</sup>。一方面, 镍作为新能源汽车的关键材料, 能源转型下其需求快速增加, 导致物

收稿日期: 2022-06-03; 修回日期: 2022-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871204, 52070034)

作者简介: 黄亚伟, 硕士研究生, 研究方向为工业生态学, 电子信箱: 2071683@stu.neu.edu.cn; 王鹤鸣(通信作者), 教授, 研究方向为工业生态学, 电子信箱: wangheming2006@gmail.com; 陈伟强(共同通信作者), 研究员, 研究方向为环境系统工程、产业生态学与循环经济以及资源环境大数据, 电子信箱: wqchen@iue.ac.cn

引用格式: 黄亚伟, 汤林彬, 王鹤鸣, 等. 能源转型背景下的中国镍动态物质流分析[J]. 科技导报, 2022, 40(21): 110-119; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.21.011

质流各阶段的格局发生了一系列的变化;另一方面,中国镍矿对外依存度极高,镍回收量微乎其微,镍资源持续稳定供应存在很大的挑战。为了提高镍资源利用效率,减少资源浪费和环境影响,科学分析镍资源的生命周期代谢过程和厘清新形势下物质流各阶段格局变化情况至关重要。

物质流分析方法通过定量核算镍物质代谢过程中的流量和存量等信息,为更好地理解镍生命周期代谢过程和各阶段格局变化提供参考。近年来,物质流分析广泛应用于钨<sup>[3]</sup>、铝<sup>[4-5]</sup>、铁<sup>[6]</sup>、钴<sup>[7-8]</sup>、钒<sup>[9]</sup>、稀土<sup>[10-11]</sup>和铜<sup>[12]</sup>等金属的社会代谢分析。对于镍金属,现有中文文献大多数是从资源角度进行单阶段分析(开采阶段<sup>[13-15]</sup>、消费阶段<sup>[16-18]</sup>、镍矿供应<sup>[19]</sup>和镍回收情况<sup>[18,20-22]</sup>等)或从某个产品(镍铁<sup>[23]</sup>、不锈钢与合金<sup>[24-25]</sup>、电池<sup>[26-32]</sup>、电镀<sup>[33-34]</sup>等)角度进行研究。有学者对镍金属进行静态物质流<sup>[35]</sup>、动态物质流<sup>[36]</sup>和未来镍金属需求和回收情况进行研究<sup>[37]</sup>,其中动态物质流研究主要侧重于中国镍金属的供应量、通过消费结构和总消费量估算的消费量,并未详细考虑各阶段损失情况和回收等情况。综上所述,现有研究从单个含镍产品或单个阶段到覆盖整个生命周期都有涵盖,综合性和系统性不断增加。

当前,随着能源转型进入关键时期,中国镍的物质流各阶段格局发生变化,但现有研究很少有基

于物质流的方法深入分析中国2000—2020年镍金属全生命周期格局变化情况。基于此,本研究利用动态物质流分析方法构建2000—2020年中国镍金属物质流核算框架,更新和核算最新时间轴的镍金属物质流各阶段数据,进而厘清2000—2020年镍金属的全生命周期格局变化情况。

## 1 研究方法数据来源

### 1.1 研究方法

基于全生命周期贸易关联的中国镍物质流分析框架主要由采选、冶炼分离、产品加工、产品制造、使用和废弃管理6个阶段的贸易所组成<sup>[38-39]</sup>(图1)。研究的空间边界为中国大陆,时间边界为2000—2020年,该时间段涵盖了镍在不锈钢行业与能源转型的快速发展时期。

其中,采矿阶段的2类矿石主要包括硫化镍矿和红土镍矿:硫化镍矿通过火法冶炼的方法得到高冰镍,进一步加工得到电解镍和镍盐(硫酸镍、氯化镍和氢氧化镍)。红土镍矿有2种冶炼方法:一种是通过火法冶炼的方法得到镍铁;另一种是通过湿法冶炼得到镍钴中间品,镍钴中间品进一步加工成为电解镍和镍盐等产品。通过冶炼加工后的电解镍可用作生产不锈钢、电镀、镍基合金和硫酸镍等

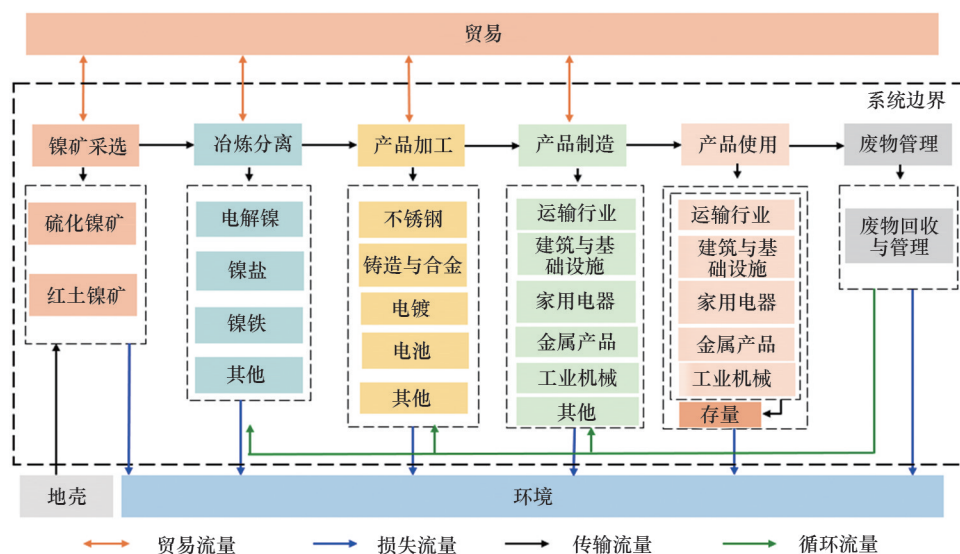


图1 基于全生命周期贸易关联的中国镍物质流分析框架

产品;镍铁主要被用作生产不锈钢;硫酸镍主要用于电池和电镀。不锈钢广泛应用于运输业、建筑与基础设施、家用电器与电子产品、金属产品和工业机械;电池主要用于运输业和家用电器与电子产品两大行业;镍基合金较多应用于航空航天、能源开发等;电镀则是为金属产品镀上金属镀层以达到装饰、修复磨损和增强性能的目的。应用在各大行业的终端产品以存量的方式存在于环境中,达到使用的年限后则会进入废物管理阶段,进入废物管理阶段的报废产品一部分通过回收实现资源再利用,另一部分则是被直接抛弃在环境中。

## 1.2 计算方法

通常地,进入每个阶段的总流入等于总流出

$$F_{N,i,j}^{\text{input}} + F_{N,i,j}^{\text{import}} = F_{N,i,j}^{\text{output}} + F_{N,i,j}^{\text{export}} + F_{N,i,j}^{\text{loss}} \quad (1)$$

式中, $i$ 为阶段; $j$ 为年份; $F_{N,i,j}^{\text{input}}$ 为第 $j$ 年 $i$ 阶段的流入量; $F_{N,i,j}^{\text{import}}$ 为第 $j$ 年 $i$ 阶段的进口量; $F_{N,i,j}^{\text{output}}$ 是第 $j$ 年 $i$ 阶段的流出量; $F_{N,i,j}^{\text{export}}$ 是第 $j$ 年 $i$ 阶段的出口量; $F_{N,i,j}^{\text{loss}}$ 为第 $j$ 年 $i$ 阶段的损失量。

根据图1,流动和库存分为以下3类。

1) 镍的转化流动与损失。包括从天然矿石、精矿、冶炼加工产品、制造加工产品和废弃物中的镍。流入流量和损失流量主要依靠直接计算,流入流量是生产数据与镍含量的乘积,损失流量是生产数据、损失率与含镍率的乘积。

2) 含镍产品的贸易流。根据镍的生命周期框架与先前学者的研究<sup>[35-38]</sup>确定了贸易产品清单。大多数贸易流是通过将含镍的产品的质量乘以平均含镍量来直接计算的。贸易代码为UN Comtrade(6位HS代码)。

3) 在用存量是指以制造阶段产品的形式在人类圈中累积的矿物量。在用存量的变化公式为

$$\Delta S_{EU,j,t}^{\text{inuse}} = F_{EU,j,t}^{\text{input}} - F_{EU,j,t}^{\text{output}} \quad (2)$$

$$F_{EU,j,t}^{\text{input}} = \sum_m F_{EU,j-m,t}^{\text{input}} P_{m,t} \quad (3)$$

$$\Delta S_{EU,j}^{\text{inuse}} = \sum \Delta S_{EU,j,t}^{\text{inuse}} \quad (4)$$

式中, $F_{EU,j,t}^{\text{input}}$ 为进入废物管理的废镍; $\sum_m F_{EU,j-m,t}^{\text{input}}$ 为在 $j$ 至 $m$ 年制造阶段产品的镍流入在用存量; $P_{m,t}$ 为终端产品的平均寿命值。 $\Delta S_{EU,j}^{\text{inuse}}$ 与 $\Delta S_{EU,j,t}^{\text{inuse}}$ 的等价关系

是使用阶段的流入与流出的质量守恒确定的。

## 1.3 数据来源

数据来源见表1,主要由一手数据和二手数据组成。一手数据来源于官方和相关公司披露的矿产数据信息,主要包含政府公布数据、公司年报、公司网站公开信息等。二手数据主要来源于:(1) 个人或机构的研究成果,如文献资料、商业数据、证券报告、咨询公司报告等;(2) 新闻报道或则相关研究人员的会议报告。为确保数据准确,本文主要选取一手数据,对于无一手数据的相关产品,通过对不同来源的同一种产品数据进行对比、互相验证、比例划分等,从而选取最新、较可靠的数据。

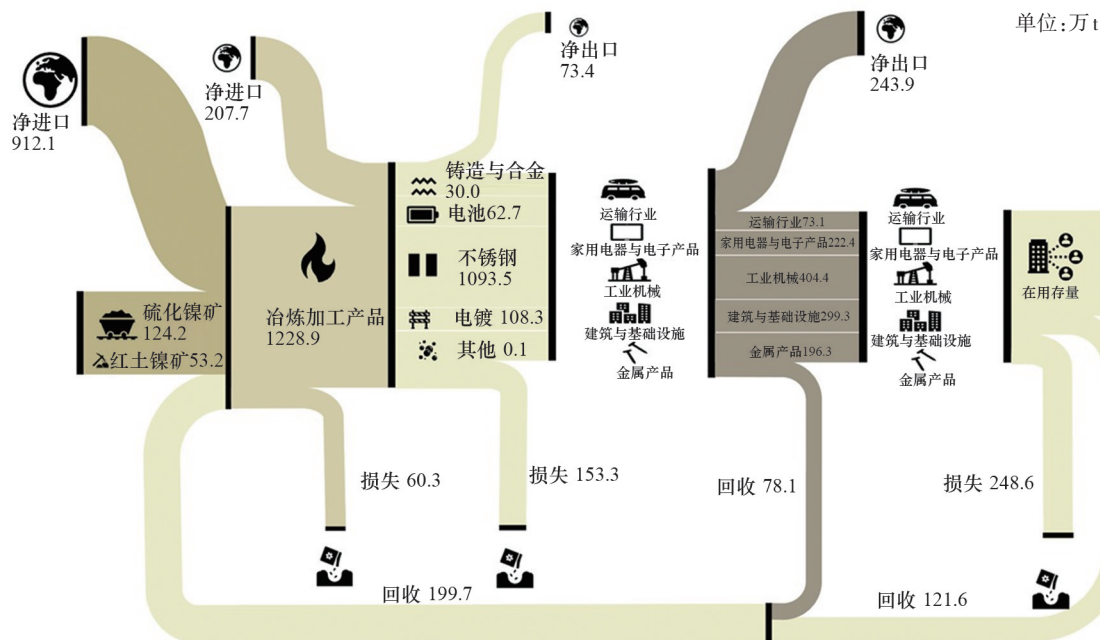
表1 数据来源

数据类型	数据来源
生产数据	美国地质调查局 <sup>[40-43]</sup> 、中国有色金属工业年鉴 <sup>[44]</sup> 、中国统计年鉴 <sup>[45]</sup> 、中国机械工业年鉴 <sup>[46]</sup> 、文献 <sup>[38]</sup>
贸易数据	中国海关年鉴 <sup>[47]</sup> 、UN Comtrade <sup>[48]</sup>
镍含量数据	文献 <sup>[38]</sup>
寿命数据	生产、回收、销售厂家等电话咨询、文献 <sup>[35,38]</sup>

## 2 结果与分析

收集并计算2000—2020年间中国镍金属全生命周期的流动情况,所有数据结果均为镍元素量。2000—2020年各阶段物质流入流出平衡计算结果如图2所示。

从生产和消费视角看:2000—2020年间,冶炼加工阶段投入自产镍矿、镍回收量、进口镍矿分别为177.4万、199.7万、912.1万t,产生冶炼加工产品1228.9万t,进口冶炼加工产品207.7万t;加工阶段不锈钢、电镀、电池、铸造与合金耗镍量分别为1093.5万、108.3、62.7、30.0万t,净出口为73.4万t,合计消耗镍量1367.9万t;制造部门消耗了1195.5万t镍,其中运输行业、家用电器和电子产品、工业机械、建筑与基础设施、金属产品分别消耗73.1万、222.4万、404.4万、299.3万、196.3万t;镍的报废量为370.2万t,其中以废料形式进入环境248.6万t,



所有数字均以镍元素量计算且为20年间的累计值

图2 2000—2020年镍物质流分析

有121.6万t得到回收利用,镍回收量仅占报废量的32.8%。

从损失视角看,各级生产过程造成镍资源损失,经3个阶段的加工之后,损失量达291.7万t,其中加工阶段损失量最高,达到153.3万t,冶炼加工和制造阶段损失分别为60.3万、78.1万t,制造阶段产生的损失可被直接回收。

## 2.1 生产格局

2000—2020年中国镍产量与净进口情况如图3所示。2000—2020年镍矿供应格局变化可以分为4个阶段:2000—2004年中国镍矿主要由国内开采供应,对外依存度不足1.0%;2005—2013年中国不锈钢需求快速增长导致对镍矿需求快速上升,在此期间,国内镍矿开采量较为稳定,但进口镍矿量到2013年大幅增加至117.5万t,对外依存度达92.7%;2014—2016年,中国镍主要进口国为印度尼西亚,但受印度尼西亚对外出口限令的影响,中国净进口镍矿大幅下滑至2016年的53.0万t,对外依存度下降至84.1%;2016年以后,受印度尼西亚政策限制放松和能源转型的双重驱动,镍矿净进口量逐渐回升至2019年的92.6万t,2016、2017、

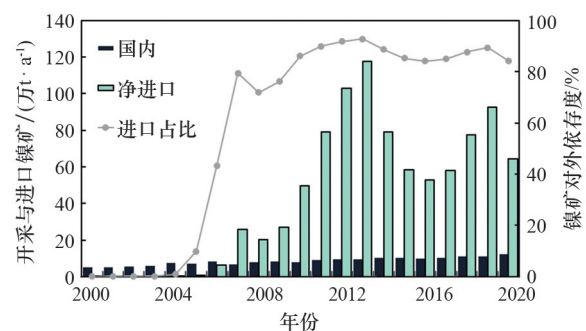


图3 2000—2020年国内镍矿供应量(以镍元素量计算)与对外依存度变化

2018、2019年对外依存度分别为84.1%、85%、87.6%、89.3%。

就国内主要矿点供应角度<sup>[49-52]</sup>(表2)和美国地质调查局(USGS)统计数据看<sup>[40-43]</sup>,2019年已探明的中国镍矿储量为1076.1万t,可开采镍矿维持在250万~300万t;从供应地区来看,中国镍矿资源主要分布于18个省区的83处矿山中。甘肃镍资源储量位居全国首位,约占全国镍总资源储量的62.2%,其中金川镍矿白家嘴子铜镍矿场拥有全国62%的保有储量;新疆、吉林、湖北、四川、陕西、青海等省(自治区),合计镍资源储量占全国总储量的

表2 中国镍矿储量基本情况(包含可开采和不可开采部分)

矿床	位置	规模	品位/%	利用情况	镍资源储量情况/万 t
白家嘴子铜镍矿	甘肃省金川市	大	0.5~1.6	已采	548.6
喀拉通克铜镍矿	新疆自治区富蕴市	大	0.6~0.9	已采	60.0
金厂、安定镍矿与外围	云南省墨江县、元江县	大	0.9	未采	52.6
黄山东铜镍矿	新疆自治区哈密	大	0.5	未采	36.4
煎茶岭镍矿	陕西省略阳县	大	0.6	未采	28.3
吕王银山寨镍矿	湖北省大悟县	大	0.3	未采	24.1
红旗岭七号岩体	吉林省磐石市	大	2.3	已采	24.0
杨柳坪铂镍矿区	四川省丹巴县	大	0.4~0.5	未采	19.0
长基镍矿	福建省莆田县	大	0.2	未采	14.0
元石山铁镍矿	青海省湟中县	大	0.8	未采	9.3
黄山铜镍矿	新疆自治区哈密市	大	0.5	未采	7.4
冷水菁镍矿	四川省盐边市	中	0.9	已采	5.4
白马寨铜镍矿	云南省金平县	中	1.1	已采	5.3
力马河镍矿	四川省会理县	中	1.0	闭坑	2.8
长仁镍矿	吉林省和龙市	中	0.4	未采	1.9
赤柏松镍矿	吉林省通化市	中	0.6	已采	1.9
拉水峡铜镍矿	青海省化隆县	小	—	闭坑	1.5
大坡岭铜镍矿	广西壮族自治区罗城县	小	0.5	未采	1.3
漂河川镍矿4号岩体	吉林省蛟河市	小	0.8	停采	—
小南山铜镍矿	内蒙古自治区四子王旗	小	0.6	闭坑	—
樟树墩镍矿	江西省弋阳县	中	0.2	已采	—
天门山镍矿区大坪—晓坪矿段	湖南省	大	0.4	已采	—

注:镍资源储量已换算成镍金属的质量。

34.5%,其中较大的镍矿有新疆喀拉通克、云南墨江等;其余的镍矿资源分布在江西、湖南、河北与福建等地区,合计镍矿资源储量占全国镍矿总储量的3.3%。从供应类型来看,中国镍矿资源类型主要分为硫化铜镍矿和红土型镍矿两大类,其中红土型镍矿主要分布在云南和四川等省份,镍矿资源储量约占全国总储量的9.6%,目前利用较少;硫化铜镍矿保有储量占全国总储量的86.0%。甘肃的金川镍矿、新疆的克拉通克镍矿和吉林的磐石镍矿是典型的硫化铜镍矿,矿石品位高、伴生矿种多(铂、碲等多种稀贵金属),可进行综合利用。

## 2.2 消费格局

在加工阶段,2000—2020年中国镍消耗情况如图4所示,中国镍消费格局主要分为2个阶段:第1个阶段为2000—2014年的不锈钢镍消耗快速增长期,在此期间不锈钢消耗占比呈现总体上升的状

态,由2000年的37.2%快速上升到2014年的88.8%;电镀耗镍和电池耗镍占比则出现明显下滑,其中电池耗镍占比由2001年的最大值23.1%下降至2012年的2.0%。第2个阶段为2015—2020年的电池行业镍消耗快速增长期,电池行业在2015年超越合金行业成为第三耗镍行业,在2018年超越电镀行业成为第二耗镍行业,总耗镍量由2015年的3.0万t增加至2020年9.1万t,年均增速达43.5%。在此期间,电池部门耗镍占比的快速上升是由于能源转型背景下含镍锂电池的需求持续增长所致。

对于制造阶段(图5),按能源转型为时间节点可划分为2个阶段:第1个阶段为2000—2014年中国经济快速发展期,在此期间工业机械部门耗镍占比由2000年的30.2%,增长至2007年的41.7%,但受2008年金融危机影响和信息技术产业发展影

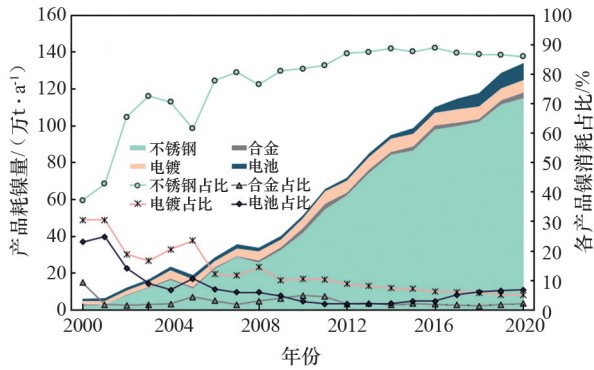


图4 2000—2020年产品加工阶段耗镍量  
(以镍元素量计算)及格局变化

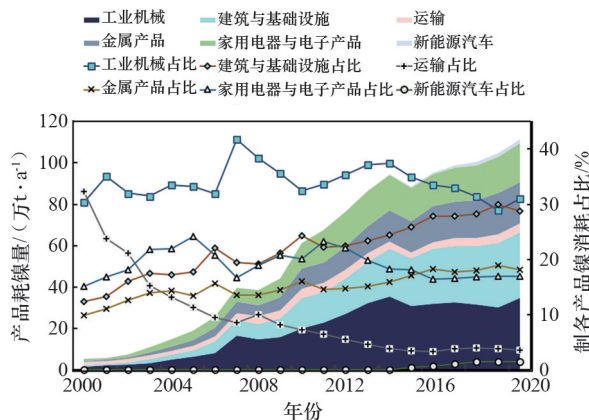


图5 2000—2020年制造阶段各产品耗镍量  
(镍元素量计算)及格局变化

响,工业机械耗镍占比下降至2010年的32.4%;由于耗镍量增幅低于工业机械和建筑与基础设施行业,运输行业耗镍占比由2000年的32.4%下降至2014年的3.8%;建筑与基础设施行业耗镍占比由2000年的12.3%增长至2014年的24.4%,2006年后常年位于第二耗镍行业。第2个阶段为2015—2020年工业化转型与能源转型期,在此期间,格局变化主要由工业机械、建筑与基础设施和新能源汽车引起,其中,工业机械部门耗镍占比连续5年下滑,2015、2016、2017、2018、2019年占比分别为34.9%、33.5%、33.0%、31.4%、28.8%;建筑与基础设施部门耗镍占比由2015年的25.9%稳步上升至2019年的30.0%;新能源汽车耗镍量由2015年的4275.0 t连续上升至2020年1.6万t。

### 2.3 贸易格局

综合图6可知,2000—2020年中国镍净进口变化呈现如下特征:(1)整体上,2000—2020年含镍产品的贸易规模不断增加,中国日益成为一个镍矿、冶炼加工产品进口国和初级镍产品、最终镍产品出口国;(2)每个阶段中仅有一种产品贸易量变化较大,其余产品变化较小。

就各个阶段具体产品而言,2014—2020年期

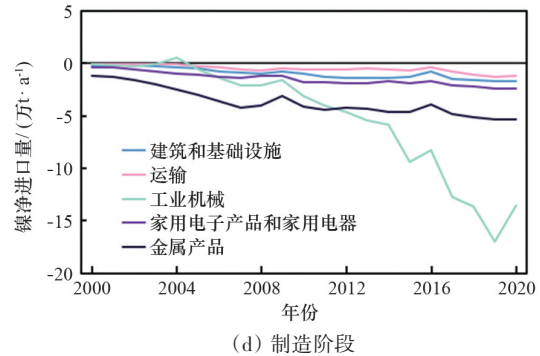
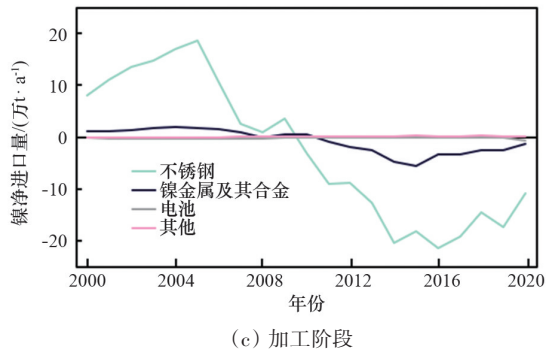
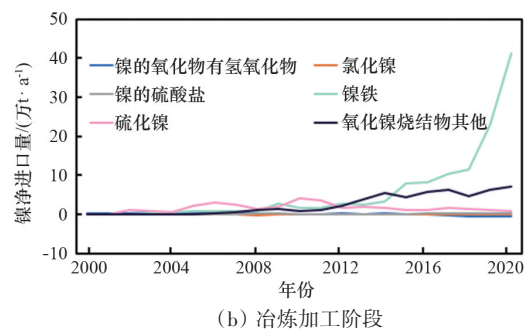
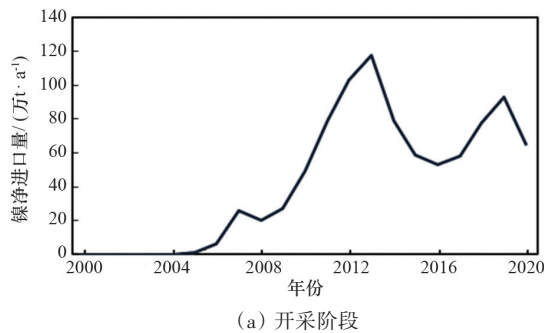


图6 2000—2020年中国镍金属净进口量(以镍元素量计算)

间,镍铁净进口由2014年的3.2万t,增加至2020年的41.3万t,增长了11.9倍(图6(b)),主要原因是中国从2013年起,开始在印度尼西亚、菲律宾等国家布局镍铁项目;对于加工阶段(图6(c)),2005年不锈钢净进口量达到最大为18.6万t,但2005年之后受镍生铁技术的进步和政策扶持,国内不锈钢产量不断上升,对外依存度逐渐降低,到2010年实现净进口为零,但2015年欧盟掀起的反倾销调查和反倾销裁定使得中国不锈钢出口量首次出现下滑,2016、2017、2018、2019、2020年净出口量分别为21.3万、19.1万、14.5万、17.2万、10.9万t;由图6(d)可知,工业机械部门从2005年开始对外净出口,到2011年超过金属产品部门成为净出口量最大的部门,2019年最大净出口量为17.0万t。

#### 2.4 存量格局

图7展示了2000—2020年中国使用阶段各部门镍的在用存量及占比情况:(1)截至2020年,共有825.3万t镍在各个部门中使用,工业机械(318.5万t)、建筑与基础设施(290.1万t)是镍在用存量最大的2个部门;(2)终端消费品在用存量格局变化主要由传统运输行业、建筑与基础设施行业和新能源汽车行业驱动。

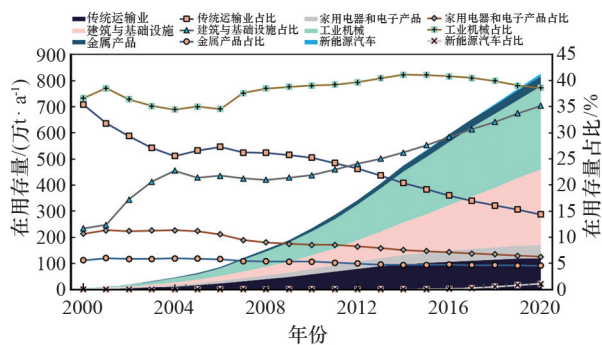


图7 2000—2020年各使用部门存量  
(以镍元素量计算)及格局变化

传统运输业在用存量占比由2000年的35.4%减少至2020年的14.4%,但其在用存量由2000年的1.9万t增加至2020年的118.6万t,主要是因为传统运输在用存量增长速度相对于机械和建筑与基础设施较为缓慢,在占比上体现为下降的趋势。

中国新能源汽车在用存量可分为2个阶段:第1个为2011—2015年新能源汽车开始投入全社会使用时期,在此期间在用存量从2011年不足0.01%(119.2 t)增长至2015年的0.14%(686.8 t);第2个阶段为中国新能源汽车快速发展时期,新能源汽车在用存量从2015年的686.8 t快速提升至2020年的9.0万t,增幅达131.0倍,需要特别关注。

建筑与基础设施作为增长最多的部门,在用存量占比由2000年的11.7%(0.6万t)快速增加至2020年的35.1%(290.1万t),其原因是进入21世纪以来,大量镍以不锈钢的形式储存于房地产、铁路和管道运输为首的建筑与基础设施中。

#### 2.5 回收格局

由图4可知,中国镍金属绝大部分应用于不锈钢行业,且其他产品的回收率较低<sup>[35]</sup>。因此假设中国未回收非合金最终产品中的镍产品,镍的回收主要来源是钢铁,因此只计算了钢铁中的回收量。

2000—2020年中国镍资源回收量如图8所示,中国镍资源回收可分为3个阶段:第1个阶段为2000—2003年的镍回收率(镍回收量占总供应的比例)明显上涨期,由2000年的13.6%上升至2004年的16.8%;第2个阶段为2005—2009年的不锈钢快速增长期,镍回收率由2005年的9.5%下降至2009年的0.3%,镍回收率快速降低的原因是在此期间中国回收量增长速度远小于镍消耗增长速度;第3个阶段为2010—2020年的废钢资源回收快速增长期,镍回收量与回收率到2020年已达31.6万t和20.4%。虽然相对于日本、美国等发达国家,中

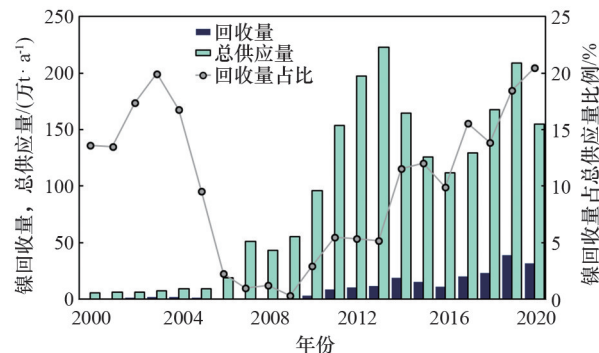


图8 2000—2020年镍资源回收量  
(以镍元素量计算)与镍回收量占比情况

国镍回收率较低,但正在以一个较快的速度增加。从存量角度考虑回收:由于近年来中国机械部门和基础设施建设部门快速发展,且2个部门使用年限较长,报废量相对于消费量大大滞后,未来回收潜力巨大,而对于寿命短的产品(例如手机电池、新能源汽车),其报废量在未来几年将会大量上升,应给予适当的重视。

### 3 结论与建议

构建了2000—2020年中国镍的物质流分析模型,研究了镍的生命周期代谢过程,核算了关键流量和存量,主要的研究结论如下。

1) 2000—2020年,累计镍矿供应量为1089.5万t,累计镍回收量为199.7万t;2010年以来国内镍矿供应占比处于15.1%以下,且集中在金川硫化铜镍矿,对外依存度一直稳定在84.9%以上。受能源转型的影响,中国电池已超越电镀行业成为第二大耗镍部门,工业机械部门耗镍占比近5年一直下滑,新能源汽车耗镍量近5年连续上涨。

2) 中国日益成为一个镍矿、冶炼加工产品进口国和初级镍产品、最终镍产品出口国。就具体贸易产品来说:矿石进口从2016年开始回升,2019年净进口量达92.6万t;镍铁净进口量2020年已达41.3万t,这将有可能会影响到以后的贸易格局;不锈钢产品贸易量在2010年开始由净进口转向净出口,2016年达到最大净出口量后逐年下降。

3) 2000—2020年,在用存量格局变化主要由传统运输行业、建筑与基础设施行业和新能源汽车行业驱动,2020年工业机械和建筑与基础设施两大部门合计在用存量73.4%,新能源汽车在用存量5年间增加了131.0倍,未来相关产品报废量会逐渐增大;报废镍主要存在于建材、家用电器和家用金属产品、电池、工业部门等相关产品中,2000—2020年镍回收量为199.7万t,其余产品回收量相对较少。

基于中国镍的流量及存量的变化情况,针对不同阶段的问题提出以下3点建议。

1) 对于镍矿高对外依存度问题,应加大投资

镍资源国外矿业项目。应积极将国外镍资源开发上升至战略高度,培养大型的镍矿业公司,采取矿产勘探、收购参股矿山、签订长期供应合同等方法来获得长期的稳定供应渠道;中国进口渠道单一,镍矿进口高度集中,为打破这种局面,可向俄罗斯、澳大利亚等周边镍资源丰富国家寻求合作。

2) 对于中国庞大的镍贸易规模,应加强各阶段贸易稳定性。针对今年来镍铁贸易规模大幅上升,应在全球合理布局镍铁企业及项目,避免供应过度集中问题;对于初级镍产品、最终镍产品出口,应建立健全产品储备制度应对各种不确定因素,保证稳定供应这一优势,同时要强化技术革新,抓住技术创新发展关键节点,提高中国出口产品竞争力和竞争优势。

3) 对于中国镍产品在用存量巨大但回收率低的情况,应尽快建立系统且完整的回收体系。积极推广“互联网+回收”新型商业模式,落实废物回收新途径建立,在再生镍产业链上下游共建公用回收网络,建设一批集中型回收服务网点;紧抓《“十四五”工业绿色发展规划》政策,严格要求再生镍企业建设一批大型一体化废钢铁、废有色金属、废电池等绿色分拣加工配送中心,积极规范再生镍行业发展;分类收集的废镍产品,应优先回收成本较低、回收技术较为成熟的产品,难以再回收利用的产品应尽可能做到集中处理,在未来技术进步时以便现在较难回收的产品得到回收。

### 参考文献(References)

- [1] 张超, 刘蓓蓓, 李楠, 等. 面向可持续发展的资源关联研究: 现状与展望[J]. 科学通报, 2021, 66(26): 3426-3440.
- [2] Wang P, Wang H, Chen W Q, et al. Carbon neutrality needs a circular metal-energy nexus[J]. Fundamental Research, 2022, 2(3): 392-395.
- [3] Tang L, Wang P, Graedel T E, et al. Refining the understanding of China's tungsten dominance with dynamic material cycle analysis[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 158: 104829.
- [4] Chen W Q. Dynamic product-level analysis of in-use aluminum stocks in the United States[J]. Journal of Industrial Ecology, 2018, 22(6): 1425-1435.

- [5] 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.
- [6] Song L, Wang P, Hao M, et al. Mapping provincial steel stocks and flows in China: 1978—2050[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: 121393.
- [7] 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.
- [8] Sun X, Hao H, Liu Z, et al. Tracing global cobalt flow: 1995—2015[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 149: 45–55.
- [9] 简小枚, 汪鹏, 陈玮, 等. 中国钒资源全生命周期动态物质流分析[J]. *科技导报*, 2022, 40(8): 127–136.
- [10] 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.
- [11] 赵桑, 汪鹏, 王路, 等. 美国关键矿产战略的演化特征及启示[J]. *科技导报*, 2022, 40(8): 91–103.
- [12] Hao M, Wang P, Song L, et al. Spatial distribution of copper in-use stocks and flows in China: 1978—2016[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 261: 121–260.
- [13] 马玉芳, 沙景华, 闫晶晶, 等. 中国镍资源供应安全评价与对策研究[J]. *资源科学*, 2019, 41(7): 1317–1328.
- [14] 孙涛, 王登红, 姜德波, 等. 中国镍矿成矿规律初探[J]. *地质学报*, 2014, 88(12): 2227–2251.
- [15] 寇奎峰, 王建平, 柳振江, 等. 我国镍矿资源形势与对策[J]. *中国矿业*, 2013, 22(6): 6–10.
- [16] 余良晖. 国内外镍资源供需格局分析[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(1): 155–162.
- [17] 张佳东, 于汶加, 代涛. 中国镍资源的供需分析[J]. *地质评论*, 2013, 59: 58–59.
- [18] Wang S, Yu J. Evaluating the electric vehicle popularization trend in China after 2020 and its challenges in the recycling industry[J]. *Waste Management & Research*, 2021, 39(6): 818–827.
- [19] Olafsdottir A H, Sverdrup H U. Modelling global nickel mining, supply, recycling, stocks-in-use and price under different resources and demand assumptions for 1850–2200[J]. *Mining, Metallurgy and Exploration, Mining, Metallurgy & Exploration*, 2021, 38(2): 819–840.
- [20] 曹洋. 废不锈钢产业链调研情况分析[J]. *资源再生*, 2018(8): 30–33.
- [21] 郑淑芳, 陈小娟, 魏富娟, 等. 钴镍金属二次资源回收利用现状及展望[J]. *化工管理*, 2020(7): 107–108.
- [22] Song X, Hu S, Chen D, et al. Estimation of waste battery generation and analysis of the waste battery recycling system in China[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2017, 21(1): 57–69.
- [23] 程明明. 中国镍铁的发展现状、市场分析与展望[J]. *矿业快报*, 2008(8): 1–3.
- [24] Nakajima K, Ohno H, Kondo Y, et al. Simultaneous material flow analysis of nickel, chromium, and molybdenum used in alloy steel by means of input-output analysis[J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 47(9): 4653–4660.
- [25] Reck B K, Rotter V S. Comparing growth rates of nickel and stainless steel use in the early 2000s[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(4): 518–528.
- [26] Song J, Yan W, Cao H, et al. Material flow analysis on critical raw materials of lithium-ion batteries in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 570–581.
- [27] 刘婉蓉, 王玉晶, 王海峰, 等. 涉重金属电池环境管理现状及对策[J]. *电池*, 2020, 50(6): 597–599.
- [28] 刘怡君, 彭频. 循环经济视角下车用动力电池逆向物流链的优化[J]. *江西理工大学学报*, 2015, 36(6): 61–65.
- [29] 康浩, 朱素冰. 我国锂离子电池正极材料发展历程回顾[J]. *新材料产业*, 2019(10): 21–27.
- [30] 卢强. 电动汽车动力电池全生命周期分析与评价[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [31] 宋永华, 阳岳希, 胡泽春. 电动汽车电池的现状及发展趋势[J]. *电网技术*, 2011, 35(4): 1–7.
- [32] Wang S, Yu J. A comparative life cycle assessment on lithium-ion battery: Case study on electric vehicle battery in China considering battery evolution[J]. *Waste Management and Research*, 2021, 39(1): 156–164.
- [33] 杨婧, 孙强, 汪涛, 等. 基于物质流分析的电镀行业重金属减排研究[J]. *电镀与涂饰*, 2014, 33(8): 346–349.
- [34] 杨婧, 温勇, 幸毅明. 电镀行业镍物质流模型的建立及减排对策[J]. *材料保护*, 2013, 46(1): 13–15, 18, 7.
- [35] Huang C L, Vause J, Ma H W, et al. Substance flow analysis for nickel in mainland China in 2009[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 84(1): 450–458.
- [36] Zeng X, Zheng H, Gong R, et al. Uncovering the evolution of substance flow analysis of nickel in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 135: 210–215.
- [37] Zeng X, Xu M, Li J. Examining the sustainability of China's nickel supply: 1950—2050[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 139: 188–193.
- [38] Reck B K, Müller D B, rostkowski K, et al. Anthropogen-

- ic nickel cycle: Insights into use, trade, and recycling[J]. Environmental Science and Technology, 2008, 42(9): 3394–3400.
- [39] 蔡刘, 华龙, 梁少俊. 镍的应用[J]. 化学教育, 2016, 37(18): 10–14.
- [40] US Geological Survey. Mineral Commodity Summaries, 2020[R]. Reston: US Geological Survey, 2020.
- [41] US Geological Survey. Mineral Commodity Summaries, 2019[R]. Reston: US Geological Survey, 2019.
- [42] US Geological Survey. Mineral Commodity Summaries, 2018[R]. Reston: US Geological Survey, 2018.
- [43] US Geological Survey. Mineral Commodity Summaries, 2017[R]. Reston: US Geological Survey, 2017.
- [44] 中国有色金属工业协会. 中国有色金属工业年鉴[M]. 北京: 中国有色金属杂志社, 2020.
- [45] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [46] 中国工程机械协会. 中国机械工业年鉴[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [47] 中华人民共和国海关总署. 中国海关统计年鉴[M]. 北京: 中国海关出版社, 2020.
- [48] UN Comtrade. International trade statistics database[EB/OL]. [2022-07-30]. <https://comtrade.un.org>.
- [49] 曾祥婷, 许虹, 田尤, 等. 中国镍资源产业现状及可持续发展策略[J]. 资源与产业, 2015, 17(4): 4–9.
- [50] 孔令湖, 邓文兵, 尚磊. 中国镍矿资源现状与国家级镍矿床实物地质资料筛选[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(2): 79–86.
- [51] 娄德波, 孙艳, 山成栋, 等. 中国镍矿床地质特征与矿产预测[J]. 地学前缘, 2018, 25(3): 67–81.
- [52] 刘贵清, 张邦胜, 张帆, 等. 中国镍矿资源与市场分析[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(7): 102–105.

## Dynamic material flow analysis of nickel in China under the background of energy transformation

HUANG Yawei<sup>1</sup>, TANG Linbin<sup>2</sup>, WANG Heming<sup>1\*</sup>, WANG Peng<sup>3,4</sup>, YUE Qiang<sup>1</sup>, DU Tao<sup>1</sup>, CHEN Weiqiang<sup>3,4\*</sup>

1. State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-Industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China
2. Ganjiang Innovation Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Ganzhou 341000, China
3. Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** To reveal the trend of material flow patterns at different stages of nickel resources in China, a life-cycle material flow analysis framework of nickel is constructed based on the dynamic material flow analysis method, and the change of material flow patterns at different stages of nickel resources in China from 2000 to 2020 is calculated and analyzed. The results are as follows. From a production perspective, nickel ore demand recovered under the new energy transition with nickel recovery being 20.4% in 2020. From a consumption perspective, the battery industry in the processing stage surpassed the electroplating industry to become the second nickel consuming sector while nickel consumption of manufacturing stage in the industrial sector decreased to 28.9% in 2019, and nickel consumption of new energy vehicles increased from 4275.0 t in 2015 to 16000 t in 2020. From a trade perspective, in recent years all stages of China except manufacturing and processing stages were net imported, among which net import products of nickel and iron increased rapidly from 105.7 t in 2000 to 413000 t in 2020, with a reduction of net export stainless steel from 213000 t in 2016 to 109000 t in 2020. From a stock perspective, the change in the in-use stock of terminal consumer goods was mainly driven by the transportation industry and construction and infrastructure, and the in-use stock of new energy vehicles increased by 131 times in five years.

**Keywords** nickel; material flow analysis; energy transformation ●



(责任编辑 刘志远)