

基于动态物质流分析的中国铁二次资源回收潜力研究

韩中奎^{1,2)}, 代 涛^{1,2)*}, 李强峰^{2,3)}, 陈 伍⁴⁾, 潘昭帅¹⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2) 中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心, 北京 100037;
3) 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北武汉 430073; 4) 南丹麦大学生命周期工程中心, 欧登塞 5230

摘 要: 新时代背景下, 增强铁资源二次循环利用率, 是中国钢铁工业摆脱国外铁矿石依赖, 同时实现绿色低碳高质量发展的重要途径。为揭示铁资源二次回收规模, 本文利用动态物质流分析(Material Flow Analysis, MFA), 对中国铁循环规律、社会存量和二次资源潜力进行了分析。结果显示: ①国内铁矿石供应不足, 国外铁矿石进口为中国铁循环的重要来源。建国以来, 中国累计净进口铁矿石中的铁物质达 90.7 亿 t, 实际铁资源消费量累计为 120.2 亿 t。②2021 年中国铁社会存量达 97.9 亿 t, 人均铁社会存量也达到了 6.9 t/人, 但人均存量尚未达到发达国家平均水平, 未来, 铁社会存量会进一步增加, 同时也将继续刺激铁矿石资源的大量消耗。③建国以来, 中国铁资源理论报废量持续上升, 累计达 22.2 亿 t。到 2050 年, 中国铁二次资源报废量达 4.4 亿~5.6 亿 t, 铁社会存量规模也将达 141.0 亿~199.9 亿 t, 充足的铁二次资源规模是缓解初级供应短缺的重要基础条件。基于研究结果, 中国应该加快构建旧废钢回收体系, 引导新型全废钢电弧炉冶炼工艺的开发设计, 全面提高铁二次资源循环利用效率。同时, 以“双碳”目标为契机, 倒逼落后产能退出市场, 化解产能过剩矛盾。

关键词: 铁; 物质流分析; 中国; 社会存量; 二次资源

中图分类号: F426.31 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.121201

Study on the Recycling Potential of Iron Secondary Resources in China Based on Dynamic Material Flow Analysis

HAN Zhong-kui^{1,2)}, DAI Tao^{1,2)*}, LI Qiang-feng^{2,3)}, CHEN Wu⁴⁾, PAN Zhao-shuai¹⁾

1) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;
2) Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;
3) School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430073;
4) SDU Life Cycle Engineering, Department of Green Technology, University of Southern Denmark, Odense, Denmark 5230

Abstract: Due to the high dependence on foreign iron ore, enhancing the recycling utilization rate of secondary iron resources is critical in China. At the same time, improving low-carbon transformation and high-quality development is also an effective strategy. In this study, dynamic material flow analysis (MFA) was applied to characterize the available scale of secondary iron resources and the iron stock and flow in China from 1949 to 2021 were analyzed. The results show that: ① Domestic iron ore and imported resources are the main source of the Chinese iron cycle. The cumulative net import of iron material and iron ore amounted to 9.07 billion tons and the actual consumption of iron resources in China from 1949 to 2021 was 12.02 billion tons. ② In 2021, China's iron stock had reached 9.79 billion tons, and the per capita stock of iron reached 6.9 tons/person. However, the per capita stock has not reached the average level of developed countries. Therefore, the iron stock will increase further, and will continue to stimulate the massive consumption of iron ore resources. ③ In recent years, the

本文由国家重点研发计划课题“全球战略性矿产大数据平台和预警与决策支持技术”(编号: 2021YFC2901801)、国家自然科学基金重大项目“新时代战略性关键矿产资源安全与管理”(编号: 71991480)及其课题 5“新时代中国战略性关键矿产资源全球治理体系研究”(编号: 71991485)和国家社会科学基金重大项目“自然资源高效利用与经济安全 and 高质量发展机制研究”(编号: 21&ZD104)联合资助。

收稿日期: 2022-09-23; 改回日期: 2022-11-28; 网络首发日期: 2022-12-13。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 韩中奎, 男, 1992 年生。博士研究生。研究方向为资源产业经济与可持续发展。E-mail: 1942601794@qq.com。

*通讯作者: 代涛, 男, 1980 年生。博士, 研究员。研究方向为资源经济与资源战略。E-mail: eagledai@126.com。

theoretical volume of iron scrap resources has continued to increase, reaching a total of 2.22 billion tons. By 2050, it is predicted that the scrap capacity of secondary iron resources will reach 440–560 million tons, and the scale of iron stock will reach 14.10–19.99 billion tons in China. Sufficient secondary iron resources are essential to alleviating the primary supply gap. The research results indicate that strategies are required to accelerate the construction of secondary iron resource recycling systems, guide the development and design of new all-scrap electric arc furnace smelting processes, and comprehensively improve the recycling efficiency of secondary iron resources. At the same time, the “double carbon” target is also an opportunity to force backward production capacity out of the market to resolve the problem of overcapacity.

Key words: iron; material flow analysis; China; social stock; secondary resources

铁是当今世界消费量最大的基础性金属材料,在社会经济发展中不可或缺。21 世纪以来,随着中国社会经济快速发展,在城镇化和工业产业发展的双重驱动下,中国已成为世界上最大铁资源消费国。铁资源消费需求的快速增长造成了铁矿石消耗量的大幅增加,而国内铁矿石供应严重不足。2000—2021 年期间,中国铁矿石(标矿)进口量从 0.7 亿 t 增长到 11.2 亿 t,铁矿石对外依存度日益攀升,严重危及了中国钢铁冶炼行业以及钢铁产业链下游相关行业的安全。大规模生产和消费钢铁的同时,也产生了一系列能源安全及环境污染问题,给国家经济安全和国民健康带来了挑战。

大量铁矿石从地质矿山(初级资源供给)转移到社会经济系统中建筑、机械设备、汽车、家电、船舶等行业实物,并以存量资源的形式积蓄其中,形成规模庞大的“城市矿产”。随着工业化和城镇化进程持续推进,建筑、机械等终端应用实物也在不断代谢,产生了大量的旧废钢(铁二次资源)。旧废钢是一种可回收利用的资源,在钢铁工业的可持续发展中有着重要的使用价值(Ren et al., 2021)。再生铁与原生铁在全生命周期相比,节能率、二氧化硫减排率和二氧化碳减排率分别达 84%, 92% 和 67%, 节能减排效果显著(王宪恩等, 2016)。在生态文明建设约束以及逆全球化浪潮侵袭持续加深,中国钢铁工业资源供给短板问题凸显的背景下,铁二次资源将成为钢铁工业发展不可分割的组成部分,提高其回收利用水平,是推动中国钢铁工业实现绿色转型升级、解决资源环境问题的重要举措。

MFA 是以“系统论”、“物质守恒论”为基础,通过对特定系统中的物质流动进行跟踪调查,进而分析物质使用效率、环境效应、社会存量和二次资源潜力等,促使提高资源利用效率,减少废物排放量,达到推动系统可持续发展的目的(文博杰和韩中奎, 2018)。21 世纪以来,经过学者们不断丰富 MFA 的理论、方法和内容,其已经成为可持续发展研究领域的重要工具。关于 MFA 的研究一般分为两类,一类是核算系统内整体物质的流入和流出,而不考虑

物质在系统内的具体变化过程。欧盟统计局(Eurostat)在 2001 年出版了第一部由区域国家联盟主导的经济系统内的物质流分析指导手册,并在资源效率评估领域获得了广泛应用。另一类则是通过追踪系统内某种特定材料或元素在全生命周期内的流动轨迹,表征流量和存量变化。根据时间序列的变化,研究又可以分为静态 MFA 和动态 MFA。静态 MFA 是以年(或者单位时间)为时间截面,基于当年数据分析系统中物质的资源效率、环境效应等。动态 MFA 则是分析系统内的物质随时间序列变化的输入、输出、贮存等过程中的物质流动与资源利用、环境效应之间的关系。其中,动态 MFA 能够有效识别社会系统中物质代谢动态变化、预测未来物质流动特征的发展趋势以及模拟情景设置导致的系统结构变化等特点,受到了国内外学者的广泛关注。

而在动态 MFA 刻画金属在生命周期内的流动和贮存情况方面,不少学者已经成功应用于铁(Pauliuk et al., 2012)、铜(Soulier et al., 2018; Dong et al., 2019)、铝(Liu et al., 2013a)、钴(Zeng et al., 2022)、锂(Sun et al., 2018)和稀土(Wang et al., 2020)等金属的资源效率、再生潜力、社会存量、未来需求以及资源节约调控路径等的模拟与评估。这些对特定国家、地区或部门的金属循环研究案例,深度加强了人们对金属可持续发展的理解。其中,动态 MFA 在中国铁循环的应用案例中,如 Wang et al.(2014)运用动态 MFA 结合情景分析方法,预测了至 21 世纪上半叶的中国铁循环结果,并指出铁二次资源的利用对未来钢铁工业节能减排至关重要。张超等(2018)采用动态 MFA,测算了 1950—2100 年的中国铁流量和社会存量,结果显示随着中国人均钢铁存量趋于饱和,国内铁需求也将下降;王琳等(2014)利用动态 MFA,研究了 1949—2012 年的中国铁社会存量变化规律,结果表明铁存量变化与中国国家工业化进程的所处阶段高度相关。Li et al.(2019)基于动态 MFA 核算了 1949—2015 年的中国铁社会存量以及铁循环过程中不同环节的损失量,同时也估算了铁二次资源的产生潜力,为综合利用铁二次

资源提供了相关数据支持。Pauliuk et al.(2012)基于动态 MFA, 估算了中国 1940—2009 年的铁社会存量, 同时又以存量驱动模型预测了 2010—2100 年铁在全生命周期内的生产、回收和消费, 系统阐述了铁物质循环特征。

通过梳理动态 MFA 在中国铁循环的应用研究, 可以发现学者们从不同角度出发, 阐述了中国铁流量、流式、存量、存式、时空变化以及贸易等特征, 为后续开展中国铁产业链可持续发展研究提供了可借鉴的科研成果和理论依据。但是, 已有的研究多侧重于中国铁资源社会存量核算以及在存量驱动下的铁资源需求变化, 没有突出铁二次资源的规模和可供性, 这也限制了我们对二次资源回收在经济发展中的功能与效果的洞察和理解。其次, 由于含铁系数变异度大以及贸易数据获取和处理困难等原因, 大部分文献忽略了国际贸易中的隐含铁资源进出口情况, 或者对含铁商品类别进行简单归类致使终端部门分辨率低下, 此举也扩大了中国铁 MFA 研究结果的不确定性。因此, 在新时代矿产资源国内外供需形势正在发生显著变化的背景下, 厘清全生命周期内的中国铁资源流动规律和结构变化, 刻画铁二次资源可用性规模, 有助于综合研判未来中国铁产业链演变态势, 为进一步优化铁资源来源构成, 完善铁资源循环利用体系, 助力钢铁工业实现绿色转型具有重要意义。

鉴于上述的重要性, 本文利用动态 MFA, 在参考 Pauliuk et al.(2013)、Maung et al.(2017a, b)对二次资源分类框架研究的基础上, 建立了基于全生命周期贸易关联的中国铁 MFA 框架, 描述铁循环变化趋势, 更新新时代下的铁社会存量数据, 测算铁二次资源的可供应规模, 以期为钢铁工业可持续发展提供战略支撑基础。

1 研究方法数据来源

1.1 系统边界

中国铁 MFA 框架由采选、炼铁、炼钢(精炼/

连铸、电路炼钢/轧钢和高炉炼钢/轧钢)、加工制造、使用和废物管理 6 个关键过程以及贯穿于全生命周期的含铁商品贸易构成, 如图 1 所示。岩石圈中的铁矿石资源以露天开采或者地下开采的方式将铁矿石原矿带到地面, 经过破碎、筛分、选别等工序后变为铁精矿; 铁精矿经过烧结、球团等工序后进入高炉炼铁后生成生铁; 生铁经过进一步精炼、连铸等环节生产铸钢等, 或者经过炼钢、轧钢环节生产钢材; 钢材则进一步用于生产制造各种终端产品(包括建筑、交通运输、机械设备、其他产品); 终端产品在使用阶段提供服务的同时也形成了铁的社会存量, 当其产品寿命结束时, 废弃产品中的铁资源就会变成垃圾, 可以回收利用, 或者进入垃圾填埋场。此外, 加工制造过程中产生的新废料以及废物管理阶段的旧废料可以重新进入炼钢环节。本文的空间边界为中国(不包括台湾, 香港和澳门), 时间范围为 1949—2021 年。由于含铁商品种类繁多, 每类含铁商品含铁系数各不相同。因此本文从铁全产业链的角度出发, 将含铁商品划分为 6 大类 21 小类。铁产业链前端的铁矿石、生铁、粗钢和钢材四大类材料含铁系数根据文献(Zhong et al., 2018; Li et al., 2019)划定。终端含铁商品和废钢含铁系数主要参考相关文献资料(Pauliuk et al., 2013; Wang et al., 2015; Li et al., 2019)确定。含铁商品贸易清单及相关参数设定如表 1 所示。

1.2 计算方法

中国铁循环遵循质量守恒定律进行, 即总输入等于总输出与存量变化之和。因此对于某一个过程 i 中的产物 j , 可用下列公式(1)(2)(3)计算:

$$F_i^{\text{in}}(t) - F_i^{\text{out}}(t) = \Delta S(t) \quad (1)$$

$$F_{i,j}^{\text{in}}(t) = F_{i-1}^{\text{in}}(t) \times P_j(t) + NI_j(t) \quad (2)$$

$$F_{i,j}^{\text{out}}(t) = F_{i,j}^{\text{in}}(t) \times P_{i,j}^{\text{loss}}(t) + F_{i+1}^{\text{in}}(t) \quad (3)$$

$F_i^{\text{in}}(t)$ 和 $F_i^{\text{out}}(t)$ 分别表示过程 i 在 t 年的流入和流出, $\Delta S(t)$ 表示 t 年的存量变化; $F_{i,j}^{\text{in}}(t)$ 和 $F_{i,j}^{\text{out}}(t)$ 分别表示过程 i 中的产品 j 在 t 年的流入和流出; $P_j(t)$ 表示产品 j 在所有半成品或最终产品国内消费中的份额。

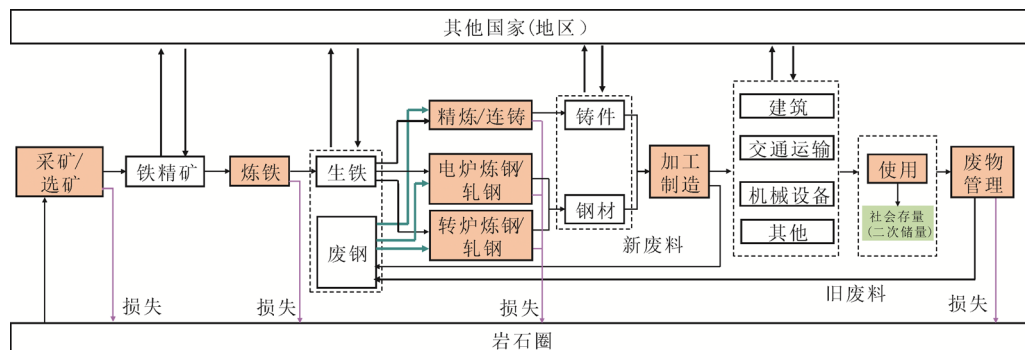


图 1 中国铁 MFA 框架

Fig. 1 MFA framework for the iron cycle in China

表 1 铁全产业链含铁商品分类及含铁系数
Table 1 Iron commodity classification and iron intensity in the entire iron industry chain

大类名称	小类名称	含铁系数	回收率
铁矿石	铁矿石	0.62	0.7
	国内生产铁矿石	0.31~0.35	
生铁	普通生铁	0.96~0.99	0.91
	炼钢生铁	0.98~0.99	
	铸造生铁	0.99	
	合金生铁	0.2~0.6	
粗钢	粗钢	0.98	0.92~0.95
钢材	长材	0.98~0.99	0.92~0.95
	板材	0.98~0.99	
	窄带	0.98~0.99	
	管材	0.98~0.99	
含铁终端产品	建筑预制结构	0.35	0.73~0.93
	工具用品	0.45~0.5	
	五金制品	0.20~0.67	
	机械设备	0.20~0.65	
	电子设备	0.30~0.60	
	交通设备	0.40~0.70	
	仪器仪表	0.20	
	家用电器	0.58	
	电力设备	0.66	
	石油化工	0.45	
废料	铁废料	0.15~0.50	0.5~0.7

$NI_j(t)$ 表示产品 j 的净进口量, $pl_{i,j}^{loss}(t)$ 表示产品 j 在工序 i 中的损失率。

国际贸易中隐含的铁资源净进口量由下面的公式(4)计算:

$$NI_j(t) = (Im_h(t) - Ex_h(t)) \times M_h(t) \times MI_h \quad (4)$$

$Im_h(t)$ 和 $Ex_h(t)$ 分别表示所有属于海关编码为 h 的商品在 t 年的进出口量(件数); $M_h(t)$ 表示在 t 年, 产品 j 在所有属于商品类别 h 的商品的市场份额; MI_h 表示产品 j 的含铁系数。此外, 为了填补贸易数据中缺失的物理值(重量、件数或者体积), 本文遵循了已有研究(Liu et al., 2013b)中提出的原则, 即根据单价系数将所有缺失的物理单位转化为物理重量单位。在终端产品生产环节, 铁流入量是利用自上而下的方式估计, 而流出量(理论报废量)则是由流入量和寿命函数确定, 如公式(5)所示:

$$Outflow(t) = \int_0^t Inflow(t) \times pdf(t, t') dt' \quad (5)$$

$pdf(t, t')$ 为寿命函数; t' 为终端产品从生产到第 t 年的寿命。而第 t 年的铁理论报废量中可回收利用量(TC)和铁社会存量则如公式(6)(7)所示:

$$TC = \sum_j Outflow(t) \times SR(t) \quad (6)$$

$$S(t) = \int_0^t (Inflow(t) - Outflow(t)) dt \quad (7)$$

式中 $SR(t)$ 表示第 t 年的铁社会回收率。

未来的铁循环预测采用动态 MFA 中存量驱动方法模拟, 即依据存量变化估算流量的发展(Liu et

al., 2013)。因此, 未来的铁需求变化趋势由寿命分布函数、人口前景和人均铁社会存量假设得出的未来社会存量模式决定。Logistic 曲线是最常用的描述人均存量的“S”型增长模型(张超等, 2018; Zeng et al., 2022)。假设未来中国人均铁社会存量 $s(t)$ 增长变化符合公式(8)的 Logistic 曲线微分形式:

$$s(t) = \frac{K}{1 + \left(\frac{K}{s_0} - 1\right) \times e^{-a \times (t - t_0)}} \quad (8)$$

其中, 其中 $s(t)$ 是第 t 年人均铁社会存量, s_0 是初始人均铁社会存量, K 是假设的人均存量饱和水平, a 是一个常数。

1.3 数据来源

本文使用的原始数据可以分为 6 类: (1)生产数据; (2)损失率; (3)贸易数据; (4)含铁系数; (5)寿命函数; (6)中间产品和最终产品的自上而下市场份额。其中, 生产数据为铁矿石生产, 来自于中国钢铁工业协会; 损失率主要包括了国内铁矿石采选、炼铁、炼钢、加工制造以及回收利用环节的损失, 数据来源于文献资料(Wang et al., 2007; Pauliuk et al., 2012); 各环节的贸易数据来自于联合国商品贸易数据库(UN Comtrade Database, 2022); 含铁系数是参考不同文献资料得出; 四类终端产品的寿命函数由双参数 weibull 分布函数表征(王俊博等, 2016); 中间产品和最终产品自上而下统计的市场份额是来自文献(Pauliuk et al., 2012; Li et al., 2019)。由于部分历史统计数据无法全部获取, 因此本文假设历史渗透率数据遵循线性增长趋势。另外, 若无特殊说明, 本文中的铁数据均是金属量。

2 结果与分析

2.1 中国铁产业链物质平衡

1949—2021 年中国铁循环如图 2 所示, 国外进口铁矿石资源中的铁物质量达 90.7 亿 t, 是中国铁循环的主要来源, 占整个循环初始值(进入炼铁环节的 59.4%)。而国内铁矿石资源供应不足, 1949—2021 年中国累计开采铁物质量 88.8 亿 t, 在选矿阶段损失 26.5 亿 t, 仅有 62.3 亿 t 流入冶炼环节。在炼铁、炼钢和废物管理阶段损失铁资源分别为 13.8 亿 t、17.5 亿 t 和 8.3 亿 t。炼钢/轧钢、加工制造阶段回收铁新废料分别为 13.2 亿 t、20.9 亿 t, 废物管理阶段回收旧废钢 13.8 亿 t。中国主要进口铁产业链前端炼铁、炼钢环节中的原料, 出口产业链中游、下游的钢材和终端含铁产品。建国以来, 中国从生铁/废旧钢中的累计净进口铁资源 1.4 亿 t, 净出口钢材中的铁资源达 5.3 亿 t, 而净出口终端产品中隐含的铁资源 11.5 亿 t。各行业累计实际消费铁资

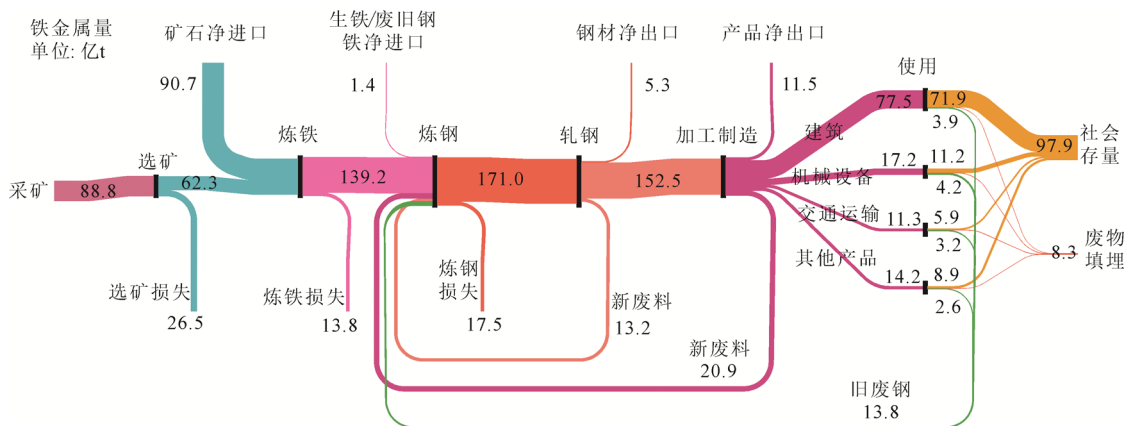


图2 1949—2021年中国铁循环
Fig. 2 Iron cycle in China from 1949 to 2021

源为 120.2 亿 t, 其中建筑行业消费量占比最大, 为 77.5 亿 t(64.5%), 其次为机械设备、其他产品和交通运输, 分别为 17.2 亿 t(14.3%)、14.2 亿 t(11.8%) 和 11.3 亿 t(9.4%)。大规模铁资源的消耗, 也促进了各行业铁社会存量的增加, 2021 年中国铁社会存量达 97.9 亿 t。

2.2 铁社会存量历史变化

本文以 1949 年为研究的时间序列起点, 利用 1949 年当年的消费量产生中国铁的初始社会存量。图 3 显示了建国以来中国铁社会存量分部门以及人均存量的变化趋势。建国至今, 在国内巨大的消费驱动背景下, 中国铁社会存量呈现持续增长的趋势。2000 年之前, 由于国内铁资源需求较小, 中国铁社会存量增长相对较慢。2000 年中国铁社会存量为 15.1 亿 t, 人均铁社会存量为 1.2 t/人, 其中建筑中铁存量为 10.5 亿 t, 占总存量的 69.2%, 机械行业铁存量为 2.3 亿 t, 占比为 15.4%, 交通行业铁存量为 1.8 亿 t, 占比 11.6%, 其他行业中铁存量较小, 为 0.6 亿 t, 占比仅为 3.8%(图 3a)。进入 21 世纪以来, 中国经济高速增长的同时, 拉动了铁资源的强劲需求, 铁社会存量也呈现快速增长趋势。2000—2021 年, 中国铁社会存量年均增速达 9.3%, 在 2007 年之后, 年均增速更是达到 10.1%。2021 年中国铁社会存量为 97.9 亿 t, 较 2000 年增长了 5.5 倍, 人均铁社会存量也达到了 6.9 t/人(图 3b)。其中, 建筑中铁存量达到了 71.9 亿 t, 占总存量的比例进一步上升, 达到了 73.4%, 机械行业铁存量为 11.2 亿 t(11.5%), 交通行业铁存量为 5.9 亿 t(6.0%), 其他行业中铁存量为 8.9 亿 t(9.1%)。未来中国各部门的铁社会存量增长趋势明显。

人均能源和重要矿产资源消费的“S”型曲线, 从宏观层面上体现了一国从农业社会、工业社会到后工业化社会的物质需求特征, 揭示了人类经济社会发展过程中资源消费增长的极限问题(王安建等,

2017)。而社会经济系统中的物质存量或人均存量同样呈现近似“S”型曲线的增长轨迹, 即存在起飞点、转折点和零增长点的规律。但是, 由于生命周期迭代的滞后性, 物质存量的“S”型曲线零增长点的出现也会晚于矿产资源消费轨迹。

基于 Pauliuk et al.(2013)的研究成果, 图 4 显示了典型国家的人均铁社会存量在工业化进程(人均 GDP 发展)中的演化规律。可以看出德国、加拿大、日本、澳大利亚和美国等发达国家人均铁社会存量已趋于饱和水平, 韩国的人均铁社会存量随着经济的腾飞也在快速增长。中国人均铁社会存量正处于快速增长阶段。2021 年中国人均 GDP(1990GK 美元, 下同)约为 1.7 万美元/人, 人均铁社会存量为 6.9 t/人, 与同等经济发展水平时期的日本(6.5 t/人)、韩国(6.4 t/人)相近, 而低于德国(10.1 t/人)、加拿大(10.2 t/人)、美国(10.0 t/人)和澳大利亚(9.8 t/人), 这种差异的主要原因是日本、韩国快速工业化的发展模式和起步时间不同于欧美等国家。当人均铁社会存量超过 2 t/人的临界值, 国家经济就会进入持续的快速增长时期(Müller et al., 2011)。在工业化快速增长阶段, 大量的铁矿石资源从岩石圈进入到经济社会系统, 并在其生命周期服务时间内进行积蓄, 铁社会存量增长进入“起飞”阶段。日本和韩国的人均铁社会存量分别在上世纪 70 年代初和 90 年代初达到 2 t/人的水平, 在进入快速工业化发展阶段的 20 年内, 以远低于欧美发达国家完成相似存量增长所用的时间, 快速达到了 8 t/人左右水平, 之后进入了缓慢增长的阶段。随着进入后工业化社会, 城镇化基本完成, 耐用消费品市场趋于饱和, 铁社会存量累积速度将会显著下降, 最终趋于“零增长”, 并达到 10~14 t/人的饱和水平范围(张超等, 2018)。中国人均铁社会存量历史增长轨迹与日韩相似, 在 2008 年前后达到了 2 t/人的水(即起飞点), 之后进入快速增长的阶段。2021 年中国人均铁社会存

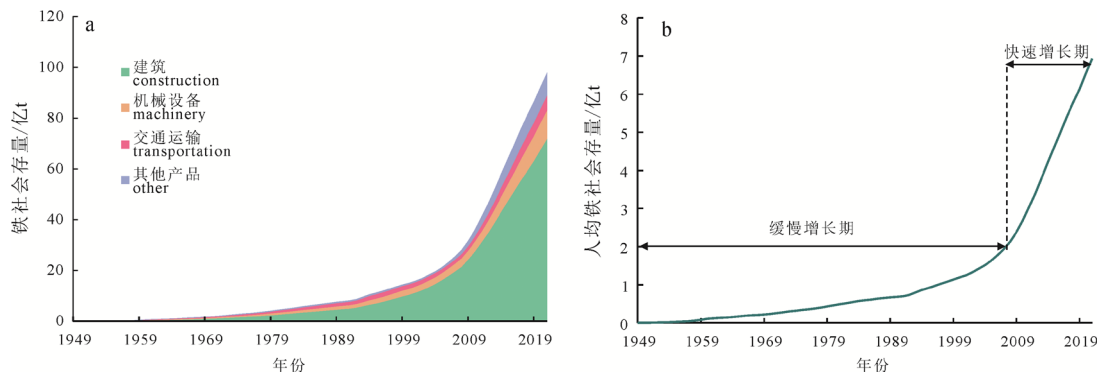


图3 1949—2021年中国分部门铁社会存量(a)以及人均铁存量(b)变化趋势

Fig. 3 Changes in trend of iron stock by sector(a) and per capita iron stock(b) in China from 1949 to 2021

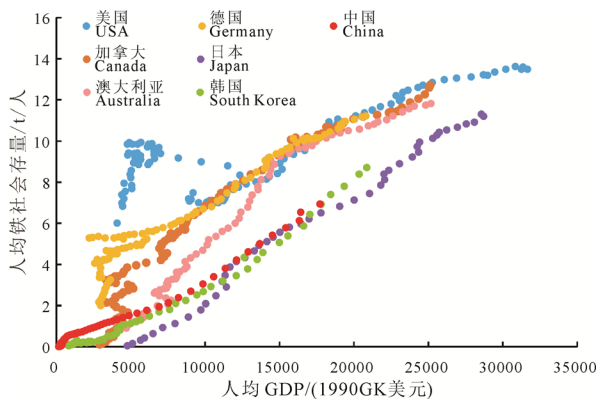


图4 中国与典型发达经济体人均铁社会存量对比

Fig. 4 Comparison of per capita iron stock between China and typical developed countries

量水平距“转折点”(8 t/人)和“零增长点”(10~14 t/人)仍有一定差距。可以预见中国人均铁社会存量将会继续增长,同时也将继续刺激铁矿石资源的大量消耗。因此,未来一段时间内,中国钢铁行业原料端供应高度依赖进口铁矿石的局面不会改变。

2.3 铁二次资源供应潜力

根据中国铁 MFA 框架中的报废量模型测算结果显示:建国以来中国铁资源理论报废量持续上升,特别是 21 世纪以来增幅明显加大(如图 5 所示)。1949—1978 年,铁资源理论报废量较小,呈现低速增长趋势,30 年来累计仅为 0.7 亿 t,占研究期内总报废量的 3.3%。1979—2010 年,理论报废量平稳增长,由 0.09 亿 t 增加至 0.6 亿 t,增长了 5.2 倍,累计报废量达到 9.9 亿 t,占总报废量的 44.7%。2011—2021 年,铁资源理论报废量快速增长,2021 年达到 1.7 亿 t 的规模,11 年间累计报废量达到 11.5 亿 t,占总报废量的 51.9%。其中,机械设备行业对铁资源理论报废累计量的贡献最大,为 6.0 亿 t(26.8%),其次为建筑行业 5.6 亿 t(25.2%),交通运输和其他产品紧随其后,分别为 5.4 亿 t(24.3%)和 5.3 亿 t(23.7%)。从分部门铁资源理论报废量产生轨迹来看,建筑行业和机械设备呈现逐年增长的趋势,交通运输和其他产品行业出现波动现象,这与历史时期各行业对

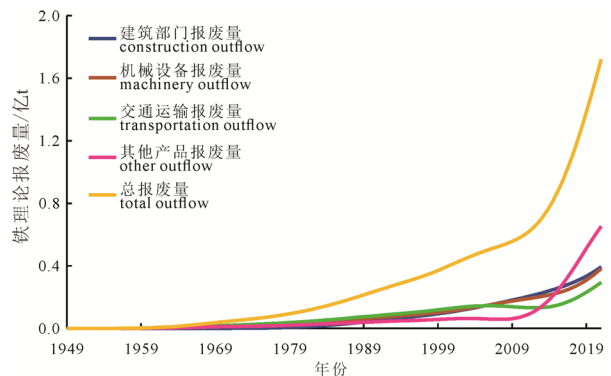


图5 1949—2021年中国铁资源理论报废量变化

Fig. 5 Change in the theoretical scrap quantity of iron in China from 1949 to 2021

铁资源的消费量相关,也与不同类型含铁产品的寿命分布差异较大有关。例如,城市住宅建筑设计寿命普遍五十年,大型基础设施寿命甚至达到上百年之久,机床工具约为二十五年,而交通工具、冰箱和洗衣机等消费耐用品仅为十年左右。因此,在低水平代谢速率影响下,建筑行业消耗了一半以上的铁资源量,但大部分年份报废量仍然低于其他行业。而交通运输和其他产品行业随着铁资源消费量逐年增加,在快速的代谢速率作用下,报废量则会出现骤增现象。

受经济、技术、市场等因素限制,理论报废量不等于社会可回收量,通过对比 1990—2021 年中国铁资源理论报废量与二次资源社会回收量,可以看出明显的变化趋势(图 6)。1990—2016 年铁二次资源社会回收量低于理论报废量,2017—2021 年回收量大于理论报废量。其中,1990—2011 年社会回收量变化幅度较小,从 0.1 亿 t 增长至 0.5 亿 t,年均增长 8.1%。进入 21 世纪后,中国城镇化速度加快,大拆大建现象普遍,在开发过程中导致很多建筑、机械设备、电器等含铁产品在未达到其报废年限时候被强制报废,同时,大量的铁资源需求,也促使处于“沉寂”模式的已报废含铁产品快速进入钢铁回收企业,铁二次资源社会回收量稳步上升。2012—2016 年铁二次资源社会回收量出现下降现

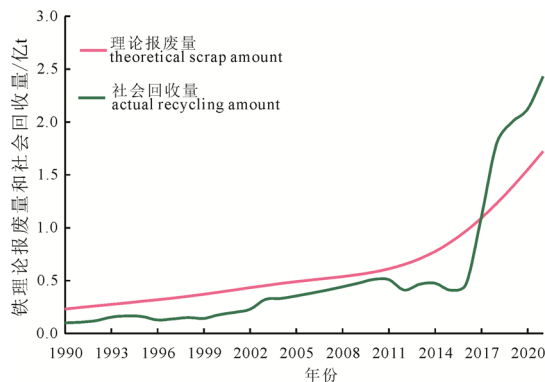


图6 1990—2021年中国铁资源理论报废量与二次资源社会回收量的变化趋势

(数据来源: BIR, 2022; 本文计算结果)

Fig. 6 Trends in theoretical scrap and actual recycling quantities of iron secondary resources in China from 1990 to 2021 (Data source: BIR, 2022; this paper)

象,这也与“地条钢”生产企业规模不断扩大有关,大量的旧废钢和低品位矿石进入非法“地条钢”冶炼,使得社会回收统计值较小。2017年中国开始全面取缔、关停“地条钢”生产,大量旧废钢涌入正规回收体系,使得2017—2021年旧废钢社会回收量统计量大幅上升,2021年达2.4亿t是理论报废量的1.4倍,这也验证了2017—2021年回收量快速上升并超出理论报废量的结果。

需要注意的是,Pauliuk et al.(2013)评估的中国铁二次资源回收率约为63%,Ciacci et al.(2015)对全球层面铁二次资源回收率估计约为26.4%。按照已有研究结果测算中国铁二次资源理论回收量,其数值在多数年份低于社会回收量统计结果。铁二次资源社会回收量与理论回收情景不匹配现象,与中国城镇化的快速扩张,以及“地条钢”生产企业的非法存在密不可分。另外,假设当前在经济和技术上

铁二次资源社会回收率为65%,2021年中国铁二次资源可回收规模(包括当年铁资源报废量和社会存量)达64.8亿t。

为了充分反映未来铁二次资源回收潜力变化,本文利用动态MFA中存量驱动方法模拟2022—2050年的中国铁社会存量和流量。需要注意的是,由于无法获得未来各终端部门需求比例、含铁产品寿命分布、国际贸易隐含铁资源量、资源效率等可靠数据,本文假定含铁产品的综合平均寿命符合韦伯分布,在参考文献资料(张超等,2018)和咨询专家的基础上,设定其平均寿命为30年。然后根据Song et al.(2017)对韦伯分布的参数求解过程得出形状参数和尺度参数分别为2.832和34.988。虽然单一的综合寿命设定在一定程度上会扩大中国铁循环预测的不确定性,并且引起与前文描述的铁理论报废量有些许差别,但是在整体上并不能影响未来中国铁社会存量、需求量和报废量的发展趋势。参照发达经济体发展趋势,本文的人均铁社会存量饱和水平低、中、高情景分别设定为10 t/人、12 t/人和14 t/人,人均存量则是在2040年前后趋于饱和水平。其中,中情景的12 t/人大致相当于日本、德国和澳大利亚人均存量饱和水平,高情景的14 t/人大致相当于美国饱和水平,而10 t/人是发达国家历史趋势下限水平。中国人口未来发展趋势采用联合国2021年人口报告中的中等发展情景。

根据上述约束条件,2022—2050年中国铁社会存量不断增加,到2030年、2040年和2050年中国铁社会存量规模将分别达126.1亿~152.0亿t、140.0亿~187.8亿t和141.0亿~199.9亿t,如图7a所示。随着大规模进入社会经济系统的含铁产品

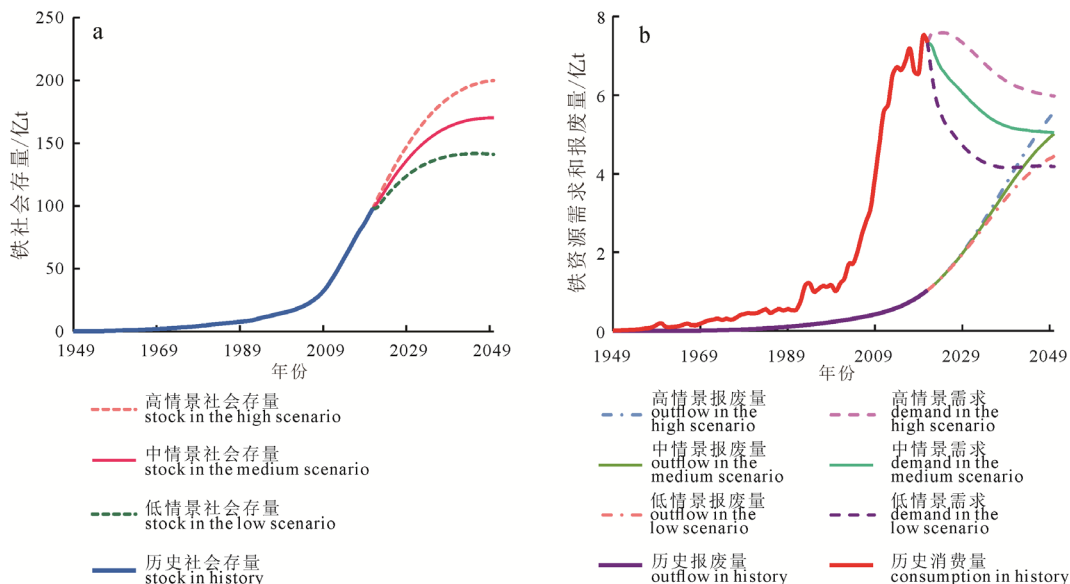


图7 1949—2050年中国铁资源存量流量变化趋势

Fig. 7 Trends in iron stocks and flows in China from 1949 to 2050

进入报废期, 2022—2050 年铁资源理论报废量不断增加, 2030 年、2040 年和 2050 年将分别达 2.0 亿 ~ 2.1 亿 t、3.5 亿 ~ 3.9 亿 t 和 4.4 亿 ~ 5.6 亿 t, 而在同时期的铁资源需求量则分别为 4.6 亿 ~ 7.2 亿 t、4.2 亿 ~ 6.3 亿 t 和 4.2 亿 ~ 6.0 亿 t, 如图 7b 所示。以人均饱和存量中情景为例, 在 65% 的回收率水平下, 2030 年中国铁资源总需求中的 77% 比例仍需要铁矿石供应, 在 2040 年、2050 年, 这一比例将会下降到 53%、35%。如果考虑铁回收率的提高, 中长期时间内对铁矿石的依赖程度将会进一步降低。因此, 在短期内, 一次资源(铁矿石)稳定供应对于确保未来铁资源供需平衡非常重要。而在未来的中长期时间内, 回收利用将有效缓解一次资源供给压力。需要指出的是, 不同于国内铁矿石可供应规模受国内地质、经济和技术等因素的限制, 以及海外进口铁矿石的稳定供给受巴西、澳大利亚等铁矿石资源丰富国家政治变化影响, 国内铁二次资源可回收规模仅受进入废物管理阶段含铁产品数量以及社会回收能力的影响。因此, 扩大铁二次资源利用率, 需要废旧含铁产品产生者(个人)、回收商、电炉钢生产企业和政府决策部门等所有利益相关者参与进来, 建立覆盖全社会的资源循环利用体系, 全面提高社会回收量水平。

3 讨论与结论

3.1 讨论

钢铁工业是国民经济的重要基础产业, 保障铁产业链原料端安全稳定供应, 对于国家整体经济的发展和稳定具有非常重要的意义。目前, 在面对大规模的铁资源需求背景下, 中国国内铁矿石供应能力明显不足, 高度依赖海外进口。2021 年中国铁矿石(标矿)对外依存度达 72%。澳大利亚和巴西对中国铁矿海运市场供应严重垄断和集中, 两国占比超过 84%, 中国铁产业链安全严重受这两国地缘政治环境的限制。面对矿石断供风险, 这也迫切需要钢铁企业充分利用“两个市场、两种资源”实现经营发展目标。其中, 旧废钢作为一种可大量替代铁矿石原料的再生资源, 充分发挥其市场调节作用, 不仅可以缓解铁矿石对外依赖度极高带来的隐患, 也可以增强中国在铁矿石贸易中的主动权和话语权, 是推动解决钢铁原材料保障问题的重要手段之一(邢凯等, 2022)。同时, 在钢铁行业实现“双碳”目标背景下, 增强旧废钢循环利用效率更是钢铁工业实现可持续发展的主要路径。另外, 中国铁社会存量规模大, 未来旧废钢产业发展容易形成规模优势, 完善的旧废钢产业链将会促进钢铁行业降本增效。

因此, 中国应该积极谋划, 加快构建旧废钢回收体系, 强化旧废钢加工行业规范管理, 科学有序引导新型全废钢电弧炉冶炼工艺的开发设计, 全面提高铁二次资源循环利用效率。

在铁二次资源循环利用方面, 欧美和日本等发达国家走在前列, 美国在炼钢过程中使用的铁二次资源比例超过 63%, 日本和欧盟则分别为 33% 和 55% 左右(Xuan and Yue, 2016)。2019 年中国在炼钢过程中铁二次资源使用比例为 26.8%, 如若去除企业自产废钢部分, 使用比例仅为 17.6%, 远低于西方发达国家平均水平。另外, 随着中国生态文明建设约束的加大, 中国固体废物进口监管标准日益严格, 2018 年旧废钢被列入《限制进口类固体废物目录》后, 中国旧废钢进口量大幅减少, 2021 年净进口量仅 2.7 万 t, 进一步加剧了旧废钢供应短缺问题。因此, 适度扩大旧废钢进口规模, 有助于缓解国内旧废钢供应紧张局面, 规范和提升国内旧废钢回收利用水平, 降低钢铁企业利用旧废钢成本, 也有利于平抑进口铁矿石价格不合理的上涨, 缓解铁矿石严重依赖进口的压力。

特别注意的是, 随着中国人均钢铁存量趋向饱和, 届时国内铁资源需求将会显著下降, 铁资源的消耗也仅用于各类含铁产品的更新替换, 钢铁产能过剩将会是无法回避的问题(张超等, 2018)。因此, 中国也应该积极拓展海外市场, 尤其是“一带一路”沿线广大的发展中国家, 加强基础设施建设合作, 化解未来钢铁部分产能。在“双碳”目标背景下, 政府应该引导钢铁生产企业制定“碳达峰”“碳中和”目标任务, 倒逼落后产能退出市场, 以顺应国内钢铁需求下降的趋势。

3.2 结论

本文基于动态 MFA, 建立了中国铁 MFA 框架, 系统阐述了铁资源循环规律, 评估了铁社会存量和报废量的历史变化趋势, 测算了铁二次资源可供性规模。主要结论如下:

(1) 1949—2021 年, 中国累计净进口铁矿石资源中蕴含的铁物质量达 90.7 亿 t, 而国内铁矿石资源供应不足, 仅有 62.3 亿 t 的铁物质流入炼铁环节; 选矿、炼铁、炼钢和废物管理环节损失铁资源分别为 26.5 亿 t、13.8 亿 t、17.5 亿 t 和 8.3 亿 t; 中国累计从生铁/旧废钢中净进口铁资源 1.4 亿 t, 从钢材净出口铁资源 5.3 亿 t, 从终端产品中净出口隐含的铁资源 11.5 亿 t; 各行业实际消费铁资源为 120.2 亿 t, 其中建筑行业、机械设备、其他产品和交通运输分别 77.5 亿 t、17.2 亿 t、14.2 亿 t 和 11.3 亿 t。

(2) 城镇化和工业化推动铁资源的使用与消费,

促使各类含铁产品在其生命周期内积蓄于社会经济系统之中。进入 21 世纪, 随着中国社会经济快速发展, 铁社会存量蓄积速度持续增加, 2021 年达到 97.9 亿 t, 较 2000 年的 15.1 亿 t 增长了 5.5 倍, 人均铁社会存量也达到了 6.9 t/人。但是, 在人均铁社会存量增长趋势方面, 仍未达到典型发达国家饱和水平(10~14 t/人)。可以预见的是, 随着中国城镇化建设和工业产业发展, 人均铁社会存量将会继续增长, 同时也将带动铁矿石资源的大量消耗, 未来中国铁矿石供给形势依然严峻。

(3)建国以来, 中国铁资源理论报废量持续上升, 累计达 22.2 亿 t。特别是 21 世纪以来增幅显著, 2000—2021 年期间的报废量达 16.9 亿 t, 占总报废量的 76.0%。受经济、技术、市场等因素限制, 报废产品中旧废钢只能部分回收, 回收量变化与中国快速的城镇化、工业化演进阶段性特点以及旧废钢产业政策相关。到 2050 年, 中国铁资源需求为 4.2 亿~6.0 亿 t, 而理论报废量将会达到 4.4 亿~5.6 亿 t, 届时回收利用将有效缓解一次资源供给压力。另外, 2050 年中国铁社会存量规模约为 141.0 亿~199.9 亿 t, 充足的铁二次资源规模是缓解初级供应短缺的重要基础条件。

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research and Development Program (No. 2021YFC2901801), National Natural Science Foundation of China (Nos. 71991480 and 71991485), and National Social Science Fund of China (No. 21&ZD104).

参考文献:

- 王安建, 王高尚, 周凤英. 2017. 能源和矿产资源消费增长的极限与周期[J]. 地球学报, 38(1): 3-10.
- 王俊博, 范蕾, 李新, 柳群义, 邢万里, 赵琪. 2016. 基于物质流方法的中国铜资源社会存量研究[J]. 资源科学, 38(5): 939-947.
- 王琳, 齐中英, 潘峰. 2014. 基于动态物质流的钢沉淀运动规律分析[J]. 中国人口·资源与环境, 24(12): 164-170.
- 王宪恩, 栾天阳, 陈英姿, 段海燕. 2016. 基于 LCA 的废旧资源循环利用节能减排效果评估模式与方法研究——以吉林省某钢铁企业为例[J]. 中国人口·资源与环境, 26(10): 69-77.
- 文博杰, 韩中奎. 2018. 2015 年中国钴物质流研究[J]. 中国矿业, 27(1): 73-77.
- 邢凯, 朱清, 邹谢华. 2022. 我国铁素资源供给态势分析[J]. 中国国土资源经济, 35(8): 27-37.
- 张超, 王韬, 陈伟强, 刘刚, 杜欢政. 2018. 中国钢铁长期需求模拟及产能过剩态势评估[J]. 中国人口·资源与环境, 28(10): 169-176.

References:

- BIR. 2022. The bureau of international recycling[EB/OL]. 2022. [2022-09-15]. <https://www.bir.org/the-industry/ferrous-metals>.
- CIACCI L, RECK B K, NASSAR N T, GRAEDEL T E. 2015. Lost by design[J]. Environmental Science & Technology, 16: 9443-9451.
- DONG Di, TUKKER A, VAN DER VOET E. 2019. Modeling copper demand in China up to 2050: A business-as-usual scenario based on dynamic stock and flow analysis[J]. Journal of Industrial Ecology, 23(6): 1363-1380.
- LI Qiang-feng, GAO Tian-ming, WANG Gao-shang, CHENG Jin-hua, DAI Tao, WANG Huan. 2019. Dynamic analysis of iron flows and in-use stocks in China: 1949-2015[J]. Resources Policy, 62: 625-634.
- LIU Gang, BANGS C E, MÜLLER D B. 2012. Stock dynamics and emission pathways of the global aluminium cycle[J]. Nature Climate Change, 3: 338-342.
- LIU Gang, MÜLLER D B. 2013. Centennial evolution of aluminium in-use stocks on our aluminized planet[J]. Environmental Science & Technology, 47(9): 4882-4888.
- MAUNG K N, HASHIMOTO S, MIZUKAMI M, MOROZUMI M, LWIN C M. 2017a. Assessment of the secondary copper reserves of nations[J]. Environmental Science & Technology, 51(7): 3824-3832.
- MAUNG K N, YOSHIDA T, LIU Gang, LWIN C M, MULLER D B, HASHIMOTO S. 2017b. Assessment of secondary aluminium reserves of nations[J]. Resources, Conservation & Recycling, 126: 34-41.
- MÜLLER D B, WANG Tao, DUVAL B. 2011. Patterns of iron use in societal evolution[J]. Environmental Science & Technology, 45(1): 182-188.
- PAULIUK S, WANG Tao, MÜLLER D B. 2012. Moving toward the circular economy: The role of stocks in the Chinese steel cycle[J]. Environmental Science & Technology, 46(1): 148-154.
- PAULIUK S, WANG Tao, MÜLLER D B. 2013. Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries[J]. Resources, Conservation & Recycling, 71: 22-30.
- REN Ming, LU Pan-tao, LIU Xiao-rui, HOSSAIN M S, FANG Yan-ru, HANAOKA T, O'GALLACHOIR B, GLYNN J, DAI Han-cheng. 2021. Decarbonizing China's iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality[J]. Applied Energy, 298: 117209.
- SONG Xiao-xu, HU Shan-ying, CHEN Ding-jiang, ZHU Bing. 2017. Estimation of waste battery generation and analysis of the waste battery recycling system in China[J]. Journal of Industrial Ecology, 21(1): 57-69.
- SOUPLIER M, GLÖSER-CHAHOU D, GOLDMANN D, ESPINOZA L A T. 2018. Dynamic analysis of European copper flows[J]. Resources, Conservation & Recycling, 129: 143-152.
- SUN Xin, HAO Han, ZHAO Fu-quan, LIU Zong-wei. 2018. Global lithium flow 1994-2015: Implications for improving resource efficiency and security[J]. Environmental Science & Technology, 52(5): 2827-2834.
- UN Comtrade Database. 2022. [2022-09-15].

- <https://comtrade.un.org/db/syslogin.aspx?ReturnUrl=%2fdb%2fdqQuickQuery.aspx>.
- WANG An-jian, WANG Gao-shang, ZHOU Feng-ying. 2017. The limits and cycles of the growth of energy and mineral resources consumption[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(1): 3-10(in Chinese with English abstract).
- WANG Jun-bo, FAN Lei, LI Xin, LIU Qun-yi, XING Wan-li, ZHAO Qi. 2016. Research on the social stock of copper resources in China based on the material flow analysis[J]. *Resources Science*, 38(5): 939-947(in Chinese with English abstract).
- WANG Lin, QI Zhong-ying, PAN Feng. 2014. Pattern analysis of steel anthropogenic precipitation movement based on dynamics material flow analysis[J]. *China Population, Resources and Environment*, 24(12): 164-170(in Chinese with English abstract).
- WANG Peng, JIANG Ze-yi, GENG Xin-yi, HAO Shi-yu, ZHANG Xin-xin. 2014. Quantification of Chinese steel cycle flow: Historical status and future options[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 87: 191-199.
- WANG Qiao-chu, WANG Peng, QIU Yang, DAI Tao, CHEN Wei-qiang. 2020. Byproduct surplus: Lighting the depreciative europium in China's rare earth boom[J]. *Environmental Science & Technology*, 54(22): 14686-14693.
- WANG Tao, MÜLLER D B, GRAEDEL T E. 2007. Forging the anthropogenic iron cycle[J]. *Environmental Science & Technology*, 41(14): 5120-5129.
- WANG Tao, MÜLLER D B, HASHIMOTO S. 2015. The ferrous find: Counting iron and steel stocks in China's economy[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 19(5): 877-889.
- WANG Xian-en, LUAN Tian-yang, CHEN Ying-zi, DUAN Hai-yan. 2016. Research on the evaluation pattern and method of the energy conservation and emission reduction effects of waste resources recycling based on life cycle assessment: a case study of an iron and steel industry enterprise in Jilin Province[J]. *China Population, Resources and Environment*, 26(10): 69-77(in Chinese with English abstract).
- WEN Bo-jie, HAN Zhong-kui. 2018. Substance flow analysis of cobalt in China in 2015[J]. *China Mining Magazine*, 27(1): 73-77(in Chinese with English abstract).
- XING Kai, ZHU Qing, ZOU Xie-hua. 2022. Analysis of supply situation of iron resources in China[J]. *Natural Resource Economics of China*, 35(8): 27-37(in Chinese with English abstract).
- XUAN Yan-ni, YUE Qiang. 2016. Forecast of steel demand and the availability of depreciated steel scrap in China[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 109: 1-12.
- ZENG An-qi, CHEN Wu, RASMUSSEN K D, ZHU Xue-hong, LUNDHAUG M, MÜLLER D B, TAN Juan, KEIDING J K, LIU Li-tao, DAI Tao, WANG An-jian, LIU Gang. 2022. Battery technology and recycling alone will not save the electric mobility transition from future cobalt shortages[J]. *Nature Communications*, 13: 1341.
- ZHANG Chao, WANG Tao, CHEN Wei-qiang, LIU Gang, DU Huan-zheng. 2018. Simulation of China's long-term steel demand and evaluation of the trend of overcapacity of steel industry[J]. *China Population, Resources and Environment*, 28(10): 169-176(in Chinese with English abstract).
- ZHONG Wei-qiong, DAI Tao, WANG Gao-shang, LI Qiang-feng, LI Dan, LIANG Liang, SUN Xiao-qi, HAO Xiao-qing, JIANG Mei-hui. 2018. Structure of international iron flow: Based on substance flow analysis and complex network[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 136: 345-354.