中国铝生命周期能耗与碳排放的情景分析及减排对策

卢浩洁[1,2,3],王婉君[1,2,3*],代 敏[4],陈伟强[1,2,3*],石 磊[5] (1.中国科学院城市环境研究所,城市环境与健康重点实验室,福建 厦门 361021；2.厦门市城市代谢重点实验室,福建 厦门 361021；3.中国科学院大学,北京 100049；4.复旦大学环境科学与工程系,复旦丁铎尔中心,上海 200438；5.清华大学环境学院,国家环境保护生态工业重点实验室,北京 100084)

摘要：铝工业是高能耗高排放工业,探索铝工业的节能减排路径有助于我国实现《巴黎协定》中的温室气体减排承诺.采用物质流分析和生命周期评价方法,基于存量水平、技术水平和能源结构设置了 15 种情景,研究了我国铝工业 1990~2100 年的能耗和碳排放量,探索不同路径下的节能减排潜力.我国铝在用存量将在 2040~2050 年达到峰值(4.6~7.3 亿 t);原生铝产量在 2030 年前达到峰值(27~41 百万 t);再生铝产量在 2050~2060 年达到峰值(23~48 百万 t),在 2035~2040 年超过原生铝产量;在所有情景下,铝工业都可实现能耗和碳排放在 2030 前达峰的目标,但只有在存量水平最低、技术水平最高和能源结构最优的情景下才可实现减排目标;技术水平的节能减排潜力最大(>45%).为了完成铝工业低碳转型,首要任务是提高技术水平,尤其是提高报废产品的回收利用率,进而提高原料中再生铝的比例.

关键词：铝；情景分析；物质流分析；生命周期评价；节能减排

中图分类号：X32 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2021)01-0451-12

Scenario analysis of energy consumption and carbon emissions in Chinese aluminum life cycle and emissions reduction measures. LU Hao-jie[1,2,3], WANG Wan-jun[1,2,3*], DAI Min[4], CHEN Wei-qiang[1,2,3*], SHI Lei[5] (1.Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Xiamen 361021, China；2.Xiamen Key Lab of Urban Metabolism, Xiamen 361021, China；3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China；4.Fudan Tyndall Center, Department of Environmental Science & Engineering, Fudan University, Shanghai 200438, China；5.Ministry of Environmental Protection Key Laboratory on Eco-industry, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2021,41(1)：451~462

Abstract：Exploring the energy conservation and emission reduction pathways of aluminum industry with high energy consumption and emissions intensity will help China to meet the greenhouse gas emission reduction commitment under the Paris Agreement. By applying the material flow analysis (MFA) and life cycle assessment (LCA), this study sets 15 scenarios based on stock, technology, and energy structure to quantify the energy consumption and carbon emissions of Chinese aluminum industry during 1990~2100. This study also explores the potential of energy conservation and emission reduction in different pathways. Chinese aluminum stock will peak during 2040~2050 (455~733 million tons);the primary aluminum production will peak before 2030 (27~41 million tons); the secondary aluminum production will peak during 2050~2060(23~48 million tons), and will exceed the primary aluminum production during 2035~2040. The aluminum industry can achieve the target that energy consumption and carbon emissions should reach the peak by 2030, but only in the scenario which has lowest stock level, the most advanced technology and the optimal energy structure , can China achieve the emission reduction goal. Improving technology is the optimal measure of energy conservation and emission reduction (>45%). To complete the low-carbon transformation of aluminum industry, the main task is to improve technology level, especially improve the recycling rate of aluminum scrap and the proportion of secondary aluminum.

Key words：aluminum；scenario analysis；material flow analysis；life cycle assessment；energy conservation and emission reduction

2016 年 4 月 22 日,包括我国在内的 175 个国家签署了《巴黎协定》,致力于将全球平均气温升高幅度控制在 2℃以内,并争取在 21 世纪下半叶实现温室气体零排放.作为最大的温室气体排放国[1],我国减排目标的制定不仅关乎自身的可持续发展,更影响全球控温目标的达成.为此,我国政府向联合国承诺:2030 年前碳排放达到峰值,单位国内生产总值 CO_2 排放比 2005 年下降 60%~65%[2].铝工业是发展国民经济与提高人民物质和文化生活水平的基础工业,但铝工业也是高能耗高排放工业,其能源需求占全球工业能源总需求的 3%,CO_2 排放量占全球工业总排放量的 4%[3].2016 年我国铝消费量占全球消费量的 54%[4],探索铝工业的节能减排路径,促进铝

收稿日期：2020-06-09

基金项目：中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDB-SSW-DQC012)

* 责任作者, 博士, wjwang@iue.ac.cn ; 研究员, wqchen@iue.ac.cn

工业低碳转型和可持续发展,对实现我国的节能减排目标至关重要.为此,国务院在《“十三五”节能减排综合工作方案》中针对铝工业提出优化产业的能源结构、促进传统产业转型升级、落实节能减排目标责任等要求[5].

现有关于铝工业能耗和碳排放的研究多局限于铝生命周期的特定阶段,如生产阶段[6-8]、产品使用阶段[9-11]、废料回收和再利用阶段[12-15]等,没有分析铝在全生命周期的能耗和碳排放量;同时研究的数据来源于采矿公司[7]、国家年鉴[8]、欧洲铝业协会[9]、Ecoinvent 数据库[12]等,数据获取方式不同使结果易出现偏差;环境影响评价框架的生命周期边界、地域和时间边界以及环境负荷边界不同[6,10,12],边界具有不完整性、不统一性;清单分析中的能源种类[8]不同,缺乏统一的标准,研究结果的可比性差.仅有少量文献对铝工业能耗碳排放量进行预测[16-19],且通常通过建立社会经济指标(如人均 GDP、人口、价格等)与能耗和碳排放量的统计关系来预测未来变化[14,19],但这些方法在选取和分解指标时主观性强;经济指标间的关系通过历史数据获得,不一定适用于未来预测的情景;影响因子受突发性事件影响大,如金融危机、贸易战等;外部条件变化会产生异常值,降低其预测数据的准确度[20].

通过融合物质流分析和生命周期评价可以解决上述问题.物质流分析通过分析含铝产品在全生命周期各阶段的输入输出量以及社会累积量,将铝的生产、加工制造、使用、报废与再生等环节联系起来,能较好预测外部变化对各阶段流量的影响;通过与生命周期评价结合,可以计算铝在全生命周期各阶段的能耗和碳排放量.早期的铝物质流分析多通过社会经济指标与铝消费量的关系,从流量角度预测铝工业的能源环境影响,忽视了铝在用存量的驱动作用.铝的在用存量是指累积在社会经济系统中服务于人类的含铝成品,包括建筑、基础设施、交通工具、耐用消费品等中的金属铝质量.这些含铝成品给人类提供服务,受社会经济指标变化的直接影响.随着城市化和工业化水平提高,汽车、建筑、耐用消费品等含铝成品在经济系统中不断累积,在用存量持续增加,人类的需求逐渐得到满足,含铝成品的消费量下降,铝原材料以及半成品的消费量也随之减少,从而减轻铝工业的能源环境压力.此外,铝的在用存量决定了铝废料的产生量,而铝废料的回收利用可降低对原生铝的需求.再生铝生产能耗仅为原铝生产总能耗的 4.86%,温室效应仅为原铝生产的 1/24[21],再生铝产量增加将大大降低铝工业的能源消耗和碳排放量.长期的金属消费量和废料的回收利用量从根本上取决于社会经济系统中在用存量的变化,因此存量驱动模型逐渐被认可并广泛用于推算物质流动态变化的研究中[22-23].

Liu 等[20]基于存量驱动模型预测了铝在生命周期各阶段的存量和流量,并结合生命周期评价法对铝工业能耗和碳排放量进行了分析.该研究考虑了城市化和工业化对铝在用存量的影响,通过在用存量饱和水平和存量增长速度设定了未来铝需求量的边界,探索了不同情境下产品从“摇篮到坟墓”的碳排放量和减排潜力.但该研究未能全面考察技术水平、能源结构等因素对碳排放量的影响.其中,技术水平除了该研究提到的使用阶段回收率、各阶段含铝产品的产出率、能源和排放强度、脱碳技术外,还应包括铝土矿开采、加工、废料预处理、再生铝熔铸阶段和报废产品的回收利用率.随着技术水平提高,生产加工以及回收处理阶段中的回收利用率会上升,可降低各环节铝流量,进而降低能耗和碳排放量.水电、气电、核电等清洁能源的使用也可以降低能耗和碳排放量,并且提高清洁能源占比一直是我国节能减排的重要措施之一.

基于存量水平、技术水平和能源结构的长期变化趋势,针对上述 3 类参数设置了四大类共 15 种情景,采用物质流分析法计算不同情景下 1990~2100 年铝在生命周期各阶段的存量与流量,并结合生命周期评价法对比分析不同情景下的能耗与碳排放量,探索铝工业的节能减排路径,为实现中长期节能减排目标提出对策建议.

1 研究方法与数据来源

1.1 系统定义

铝在社会经济系统中的生命周期包括四个主要阶段[24](图 1):(1)生产阶段,指铝土矿开采出来生产氧化铝,再电解氧化铝得到生产原铝的原料;该阶段考虑了铝土矿的贸易和以尾砂、赤泥、粉末或浮渣形式存在的铝损失.(2)加工与制造阶段,指未锻轧铝通过铸造、轧制、挤压或其他加工等子工序制成

半成品后,再利用其他原材料生产出最终产品;该阶段考虑了未锻轧铝、铝半成品的贸易和铝在熔融氧化、变形加工过程的机械损失.(3)使用阶段,指最终产品投入到市场中使用,主要包括交通工具、建筑、机械设备、耐用消费品、电力电子设备、包装和其他七个部门;该阶段考虑了最终产品的贸易和铝被应用于钢材氧化剂、热剂、涂层等消耗品的损失.(4)废物管理与循环阶段,包括铝废料和最终产品回收、铝废料预处理、再生铝熔铸;该阶段考虑了废料和最终产品的贸易,也考虑了铝难以被识别分拣,累积在某个地方或被丢弃到垃圾填埋场的损失以及铝在高温熔融时的损失.含铝产品作为铝的载体出现在生命周期不同阶段,本研究选取含铝产品中铝的质量作为系统投入和产出的功能单位,用来计算含铝产品的能耗和碳排放量.

与铝物质流分析框架不同,铝生命周期评价还包括阳极泥生产过程和能量生产过程,这两个过程为含铝产品的生产流动提供动力,同时消耗能源、排放温室气体.能源消耗分为直接能源消耗和间接能源消耗.直接能源消耗是铝在生命周期不同阶段以及阳极泥生产过程中所消耗的能源,间接能源消耗指生产和运输直接能源所需要加工的电力、燃料、辅助原材料.在铝电解和燃料燃烧过程中会产生 CO_2、CO、NO_x、CH_4、CF_4、C_2F_6 等温室气体,本研究将 CO_2 作为温室效应的影响基准和计算当量.温室气体排放分为三类,一是在铝工艺现场生产含铝产品时使用直接能源的排放,二是在电解和阳极泥生产过程中的排放,三是电力生产和其他能源生产的排放.温室气体排放分为直接温室气体排放和间接温室气体排放.直接温室气体排放是主产品生产过程和阳极效应直接排放的温室气体,即消耗直接能源引起的温室气体排放.间接温室气体排放是为了给直接能源生产提供能量所消耗的电力、燃料、辅助原材料排放的温室气体,即消耗间接能源引起的温室气体排放.与之前研究相同[20],不考虑制造与使用阶段的能耗与温室气体排放.

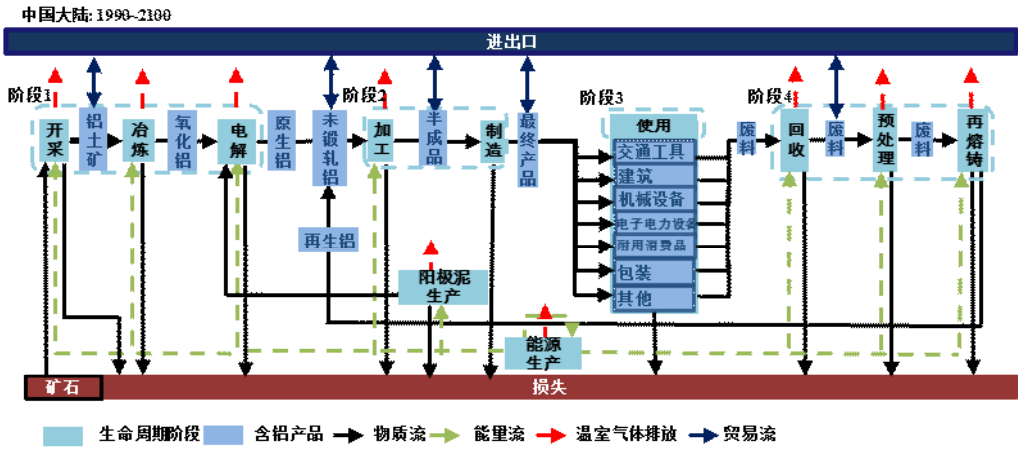


图 1　铝生命周期评价的边界

Fig.1　System boundary in life cycle assessment of aluminum cycle in mainland China

1.2　计算模型

首先通过物质流分析中的“存量驱动流量”模型和产品寿命模型预测经济系统中铝的在用存量、消费量和报废量,然后根据质量守恒原理计算出各阶段含铝产品中铝的质量,最后结合能耗和碳排放系数量化铝工业的能耗和碳排放量,涉及的变量如表 1 所示.

铝流量和存量的计算方法基于之前的研究[25-27],在用存量(TS)由人口(P)与人均在用存量(SPC)相乘得到.有研究认为人均在用存量的生长模式遵循“S”形曲线并最终趋于饱和[20].人均在用存量的饱和水平(SL)决定人均在用存量曲线的上渐近线,人均在用存量的增长速度(S)决定曲线达到的饱和水平的时间,$t_{SL/2}$ 为人均在用存量达到饱和水平二分之一时的年份,取决于给定饱和水平和增长速度的最佳拟合曲线,是内生参数.

$$TS_t = P_t \times \frac{SL}{1+\exp(-S(t-t_{SL/2}))} \quad (1)$$

i 代表生命周期阶段的编号,从 1 到 4 分别代表生产阶段、加工与制造阶段、使用阶段和废物管理与循环阶段.在用存量的变化量等于使用阶段(i=3)铝的消费量($F_{i=3}^{\text{input}}$)减去使用阶段铝的报废量($F_{i=3}^{\text{output}}$),其中报废量可以由消费量和寿命模型计算得到.假设相应部门的服务年限与该部门最终产品平均寿命相同,且产品寿命服从正态分布[28-30].产品寿命模型由 L_{t-t_0} 表示,是正态分布的概率密度函数.假设 t_0 时刻的存量水平等于输入量,通过铝在用存量、铝消费量和铝报废量的迭代关系可以推算未来数值:

表 1 铝循环参数

Table 1 Basic indicators in the aluminum cycle

	参数	英文全称	缩写
存量	人均在用存量	Stock per capita	SPC
	人均在用存量的饱和水平	Saturation level of stock per capita	SL
	人均在用存量的增长速度	Growth rate of stock per capita	S
	在用存量	Total stock	TS
流量	输入流量	Input flow	F^{input}
	输出流量	Output flow	F^{output}
	损失流量	Loss flow	F^{loss}
	进口流量	Import flow	F^{import}
	出口流量	Export flow	F^{export}
能耗环境影响	能源消耗量	Energy use	EU
	碳排放量	Carbon emission	CE
	能源消耗系数	Energy use intensity	EI
	碳排放系数	Carbon intensity	CI

$$\mathrm{TS}_t - \mathrm{TS}_{t-1} = F_{i=3,t}^{\text{input}} - F_{i=3,t}^{\text{output}} \tag{2}$$

$$F_{i=3,t}^{\text{output}} = \sum_{t_0=1990}^{t} \left(F_{i=3,t_0}^{\text{input}} \times L_{t-t_0} \right) \tag{3}$$

假设各阶段的库存量不变,铝从生命周期上一阶段的输出量等于下一阶段的输入量.根据质量守恒原则可以推算铝在各个阶段的输入输出量,计算公式如下:

$$F_{i,t}^{\text{output}} = F_{i+1,t}^{\text{input}} = F_{i,t}^{\text{input}} - F_{i,t}^{\text{loss}} + F_{i,t}^{\text{import}} - F_{i,t}^{\text{export}} \tag{4}$$

铝的能源消耗(EU)和碳排放量(CE)通过含铝产品中铝的质量与能耗系数(EI)、碳排放系数(CI)相乘得到[20].含铝产品指的是生产阶段的铝土矿、氧化铝,加工与制造阶段原生铝、再生铝和铝半成品,以及废物管理与循环阶段中的铝废料,计算公式如下:

$$\mathrm{EU}_t = \sum_{i=1,2,4} \mathrm{F}_{i,t}^{\text{input}} \times \mathrm{EI}_{i,t} \tag{5}$$

$$\mathrm{CE}_t = \sum_{i=1,2,4} \mathrm{F}_{i,t}^{\text{input}} \times \mathrm{CI}_{i,t} \tag{6}$$

1.3 历史数据来源与核算

历史流量和存量的量化(1950~2009 年)基于文献[31],并且根据国际铝业协会的数据更新到 2016 年[32].通过国际铝业协会的中国铝在用存量数据[32]推算铝在各个阶段的流量[式(1)-(4)].其中损失率、回收利用率[33-37]、产品服务年限[25,28-30]和贸易量[25]的历史数据来自年鉴和已有研究.生命周期评价中能源结构的历史数据来源于《中国能源统计年鉴》[38],采矿、冶炼、阳极制造、电解和铸造阶段的能耗系数来自于国际铝业协会,铝的半成品和再生铝生产阶段的能耗系数来自于欧洲铝业协会的能源调查统计表[32,39].碳排放系数的计算方法来源于国际铝业协会发布的碳足迹技术支持文件[32].

1.4 未来数据来源与估算

1.4.1 参数设置 如前文所述,在用存量水平、技术水平和能源结构对铝行业能耗和碳排放有较大影响.基于已有对在用存量水平、技术水平参数设置的研究[25],本研究考虑了能源结构的影响,通过设置 2017~2100 年在用存量水平、技术水平和能源结构变化的不同情景,来对比分析铝行业能耗和碳排放量.

人均在用存量的饱和水平和增长速度决定了各年份在用存量的规模,人均在用存量饱和水平越高,增长速度越快,各年份在用存量越大.在用存量的预测数据(2017~2100 年)根据人均铝在用存量与联合国人口署预测的中等水平人口[40]相乘得到.本研究基于“存量饱和度假设”[21,26,41]设置人均铝在用存量水平,即发展中国家的人均铝存量的增长模式类似发达地区人均铝存量的历史增长模式,并最终趋于饱和.基于已有研究[25],中国人均铝在用存量饱和水平依据北美、欧洲、日本的人均在用存量拟合,最低、中等和最高饱和水平设置为 3 个地区平均水平的 75%、100%和 125%.人均铝在用存量的增长速度通过中国历史数据与饱和水平拟合得到.

把损失率、回收利用率和产品服务年限作为技术水平参数.损失率、回收利用率和产品服务年限的预测数据主要基于各种统计年鉴、文献和报

告[25,28-30,42].基于已有研究[25,42],技术水平设置为高、中、低三种.高技术水平代表最理想的状态,即各种损失率到 2050 年线性下降至零后不变;报废产品回收率到 2050 年线性上升至 100%后不变[42];产品服务年限最长.中技术水平代表技术水平参数达到世界先进水平,即各种损失率到 2050 年线性下降至世界先进水平后不变;报废产品回收率到 2050 年线性上升至世界先进水平后不变;产品服务年限为中等水平.低技术水平代表技术停滞,所有参数与 2016 年一样,即各种损失率和报废产品回收率与 2016 年相同;产品服年限最低.具体数值如表 2 所示.

表 2　技术水平参数

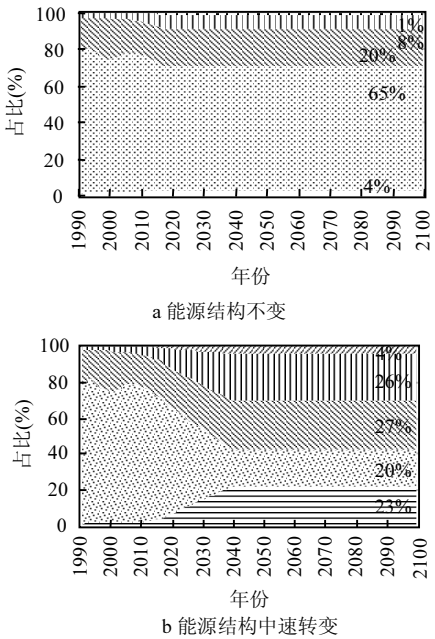
Table 2　Parameter settings of the technology

技术水平	年份	铝土矿开采损失率	氧化铝冶炼损失率	原生铝电解损失率	加工损失率	报废产品回收率	废料预处理损失率	再生铝熔铸损失率	产品服务年限
高	1991~2016	0.06~0.59	0.1~0.36	0.004~0.03	0.05	0.8	0.05	0.07	高
	2050	0	0	0	0	1	0	0	
中	1991~2016	0.06~0.59	0.1~0.36	0.004~0.03	0.05	0.8	0.05	0.07	中
	2050	0.05	0.05	0.002	0.03	0.95	0.03	0.05	
低	1991~2016	0.06~0.59	0.1~0.36	0.004~0.03	0.05	0.8	0.05	0.07	低
	2050	0.06	0.2	0.004	0.05	0.8	0.05	0.07	

表 3　产品服务年限参数

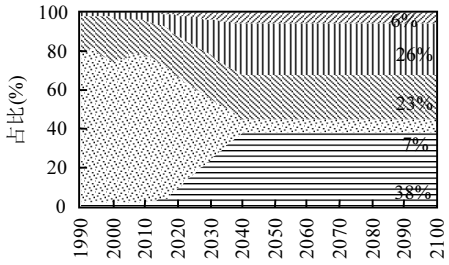
Table 3　Parameter settings of the lifetimes of products

最终消费部门	均值			标准差		
	低	中	高	低	中	高
交通运输	10.0	15.0	20.0	0.5	1.5	2.5
建筑	30.0	40.0	50.0	3.0	6.0	9.0
机械与设备	10.0	20.0	30.0	1.0	2.5	4.0
耐用消费品	8.0	12.0	16.0	0.5	1.5	2.5
电力与电子设备	10.0	20.0	30.0	1.0	2.5	4.0
包装	1.0	1.0	1.0	—	—	—
其他	5.0	10.0	15.0	0.5	2.0	3.5



a 能源结构不变

b 能源结构中速转变



c 能源结构快速转变

图 2　能源结构参数

Fig.2　Parameter settings of the energy structure

= 可再生能源 ▽ 煤炭 ▽ 石油 ▽ 天然气 ▽ 核电

进一步假设产品中铝部件的寿命与其部门的寿命相同[43-46],且寿命不会随着时间而改变.技术水平越高,产品服务年限越长.最终产品根据部门分为 7 类,产品的服务年限参数如表 3 所示.

根据《BP 世界能源展望》[47],能源结构假设可以分为不变(与 2017 年一致)、中等转变速度和快速转变速度三种,不同能源的比例呈线性变化且到 2040 年后趋于稳定.能耗系数和碳排放系数的计算方法与已有研究一致[20],与能源结构有关.能源结构如图 2 所示.

贸易量的预测数据根据已有研究设定[25].2050 年之后我国铝废料可以满足铝需求,假设铝废料净进口量为 0.根据《我国现代化报告》,我国将在 2050 年跨入发达国家行列,假设最终产品净出口量为 0.其余含铝产品贸易量假设与 2016 年相同.

1.4.2 情景设置 根据各参数取值的不同,设置了四大类 15 种情景.每一种情景代表了一条节能减排路径.现行政策情景由参数的中等水平值组成,是按照现有政策最有可能达到的情景.在现行政策情景的基础上设置了调整一类、两类和三类参数的单情景、双情景和三情景.当一类参数取最值时,对应单情景中能耗和碳排放最高和最低的两种情景,这两种情景会形成一个范围的边界,代表了这一参数对铝工业能耗和碳排放的影响范围;当两类参数同时取最值时,对应双情景中能耗和碳排放最高和最低的两种情景,这两种情景也形成一个范围的边界,代表了这两类参数对铝工业能耗和碳排放的影响范围.三情景是调整所有参数所对应的能耗和碳排放最高(HSTE)和最低(LSTE)的情景,是最大影响范围的边界.通过一类或两类参数取最值形成的范围与三类参数取最值形成范围的比值来代表这些参数节能减排潜力的大小.情景设置如表 4 所示.

表 4 情景设置

Table 4 Scenarios settings

情景类别	情景代码	情景含义	情景参数		
			存量水平(S)	技术水平(T)	能源结构(E)
现行政策	CP	按照现有政策最有可能达到的情景	中	中	中速
单情景	LS	只调整存量水平参数的最低能耗和碳排放情景	低	中	中速
	HS	只调整存量水平参数的最高能耗和碳排放情景	高	中	中速
	LT	只调整技术水平参数的最低能耗和碳排放情景	中	高	中速
	HT	只调整技术水平参数的最高能耗和碳排放情景	中	低	中速
	LE	只调整能源结构参数的最低能耗和碳排放情景	中	中	快速
	HE	只调整能源结构参数的最高能耗和碳排放情景	中	中	不变
双情景	LST	调整存量水平和技术水平参数的最低能耗和碳排放情景	低	高	中速
	HST	调整存量水平和技术水平参数的最高能耗和碳排放情景	高	低	中速
	LSE	调整存量水平和能源结构参数的最低能耗和碳排放情景	低	中	快速
	HSE	调整存量水平和能源结构参数的最高能耗和碳排放情景	高	中	不变
	LET	调整能源结构和技术水平参数的最低能耗和碳排放情景	中	高	快速
	HET	调整能源结构和技术水平参数的最高能耗和碳排放情景	中	低	不变
三情景	LSTE	调整全部参数的最低能耗和碳排放情景	低	高	快速
	HSTE	调整全部参数的最高能耗和碳排放情景	高	低	不变

2 结果与分析

2.1 生命周期铝存量与流量分析

2016 年,电解环节(原生铝生产)是最大的能耗和碳排放生命周期阶段,其能耗和排放量分别占全生命周期总量的 76.0%(图 3a)和 88.9%(图 3b).电解环节对总排放量的影响大于对总能耗的影响.回收预处理以及熔铸环节(再生铝生产)是能耗和碳排放量最小的生命周期阶段,仅占能耗和碳排放总量的 0.8%(图 3a)和 0.2%(图 3b).因此,以再生铝替代原生铝能极大降低铝工业的能耗和碳排放量,尤其是对减排影响更大.2016 年,我国回收利用再生铝 4.4×10^6t,仅占原料总量的 13.4%(图 3c).

铝在用存量只和人均在用存量饱和水平有关,15 种情景分为低、中、高三类(图 4a).铝各阶段流量与在用存量水平和技术水平均有关,15 种情景分为 7 类:中存量中等技术、高存量低技术、高存量中技术、低存量高技术、低存量中技术、中存量低技术、中存量高技术(图 4b).

我国铝在用存量将在 2040~2050 年达到峰值,峰值为 4.6~7.3 亿 t(图 4a).各情景下,我国原生铝在 2030 年前达峰,再生铝在 2050~2060 年达峰(图 4b).我国 2018 年再生铝产量占在未锻轧铝的 19.4%,在低存量高技术水平下,2030 年再生铝在未锻轧铝中的比例为 33.0%,存在 13%的缺口.在高存量低技术水平下再生铝最晚(2040)超过原生铝数量,这表明随着我国铝废料大量报废,再生铝最迟在 2040 年可成为主要的原料.

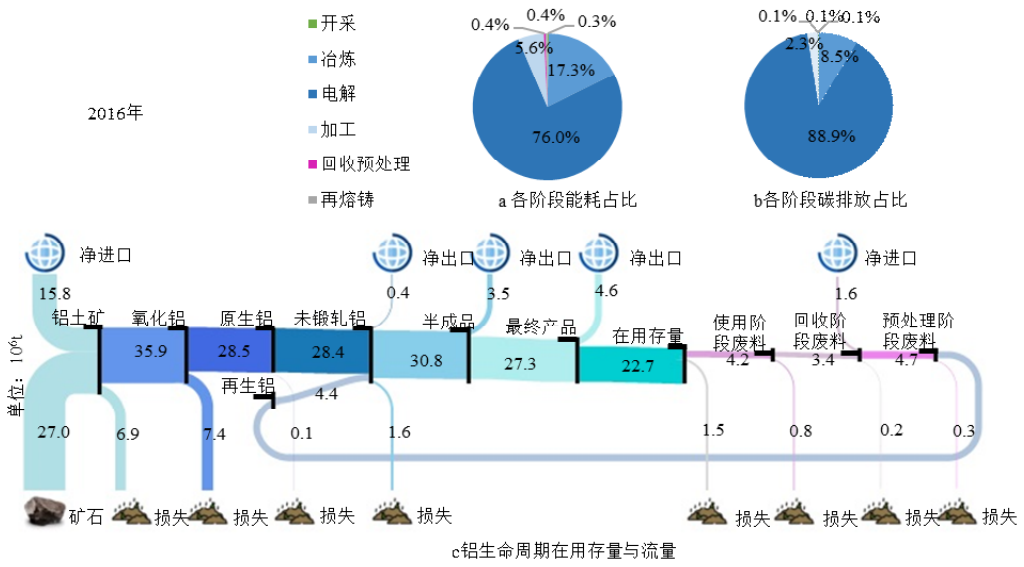


图 3　2016 年铝各生命周期阶段的在用存量、流量及其能耗和碳排放占比

Fig.3　Aluminum stock and flows of each life stage and their energy consumption and carbon emissions proportions in 2016

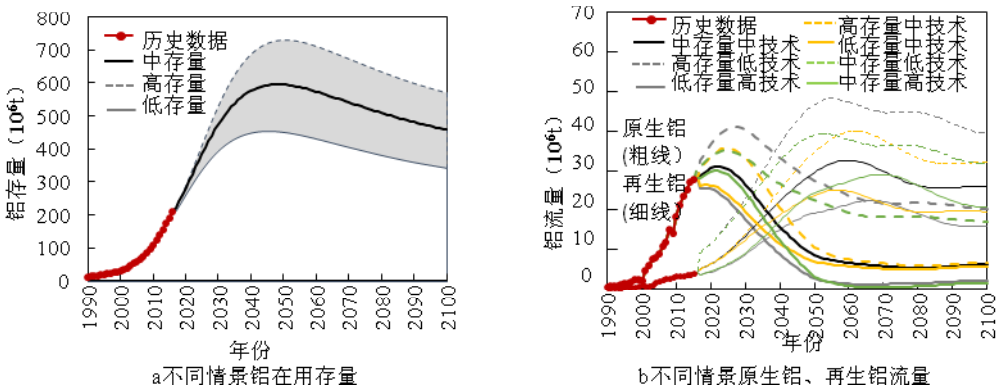


图 4　我国 1990~2100 年铝存量和原生铝、再生铝流量

Fig.4　Scenarios on aluminum stock, primary aluminum production, and secondary aluminum production in China from 1990 to 2100

2.2　能源消耗情景分析

2.2.1　节能目标分析　各情景下,我国铝工业均可以实现 2030 前能耗达峰的目标.现行政策下,铝工业能耗将于 2021 年达峰;单情景的能耗最晚在 2025 年达峰;双情景和三情景的能耗最晚在 2028 年达峰.这意味着按照现有状况,不做任何调整,我国仍能实现在 2030 年前达峰的目标.达峰的关键在于原生铝产量.如前文所述,原生铝生产是生命周期中能耗最大的阶段.随着原生铝逐步被再生铝替代,原生铝产量将 2030 年前达到峰值,推动了总能耗达峰.

根据世界银行的预测,我国 2030 年国内生产总值将达到 64.2 万亿美元,是 2005 年国内生产总值的 3.5 倍.能源消耗过程会伴随碳排放,为了实现 2030 年单位国内生产总值 CO_2 相较于 2005 年下降 60%~65%的目标,假设单位 GDP 能耗目标下降程度与其相同,2030 年铝工业的能源消耗水平应该在 2.3~2.7 万亿兆焦耳.通过图 5 可以看出,在所有情景下,铝工业都无法实现 2030 年单位 GDP 能耗下降的目标.

2030 年,单情景中 LS 最接近目标,三情景中 LSTE 最接近目标,但两者离目标差距都比较大(>10%).LS 在 2030 年的能耗为 4.3 万亿兆焦,单位 GDP 能耗比 2005 年下降了 34.9%,与 60%的目标相差 25.1%.LSTE 在 2030 年的能耗为 3.6 万亿兆焦,单位 GDP 能耗比 2005 年下降了 45.7% ,与 60%的目标差 14.3%.无论存量水平和能源结构参数如何变化,只要技术水平维持现有的低水平状态,在 2100 年前就无法实现单位 GDP 能耗下降的目标.而技术水

平指标中,报废产品回收利用率是关键.提高报废产品的回收利用率,提高再生铝产量以替代原生铝是节能的根本.

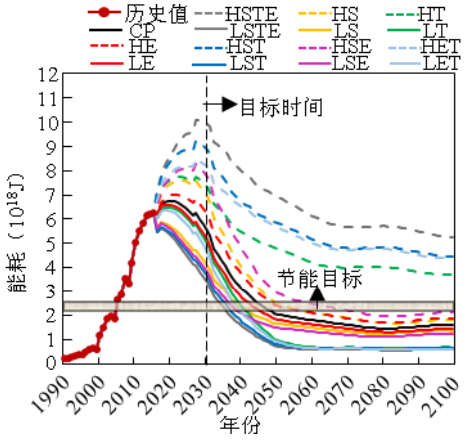


图 5 不同情景的能耗与节能目标对比

Fig.5 Comparison of energy consumption and energy saving target of different scenarios

2.2.2 节能潜力分析 单情景中技术水平的节能潜力最大,其次是存量水平,最后是能源结构,分别为55.7%、20.3%和 10.8%(图 6).提高技术水平是节能的根本.从时间上看,存量水平的节能潜力逐渐降低,2033 年之前约为 50%,大于其余参数的节能潜力.这是由于,在低存量水平下再生铝最早超过原生铝的产量,成为主要原料,在前期大幅降低了能耗.因此,在前期,降低存量水平的节能效果大于优化能源结构和提高技术水平的节能效果.能源结构的节能潜力最小且随时间变化不大,一直维持在 10%左右.技术水平的节能潜力逐渐增加并趋于稳定,在 2035 年后超过 60%,占主导地位.我国将在 2050 年左右迎接铝的大量报废时代,使铝循环经济的实现成为可能[25].技术水平提高意味着在生命周期过程中有更多铝可以被循环利用.未锻轧铝中再生铝的比率越高,社会经济系统对原生铝的需求相对越少,能源消耗越少.

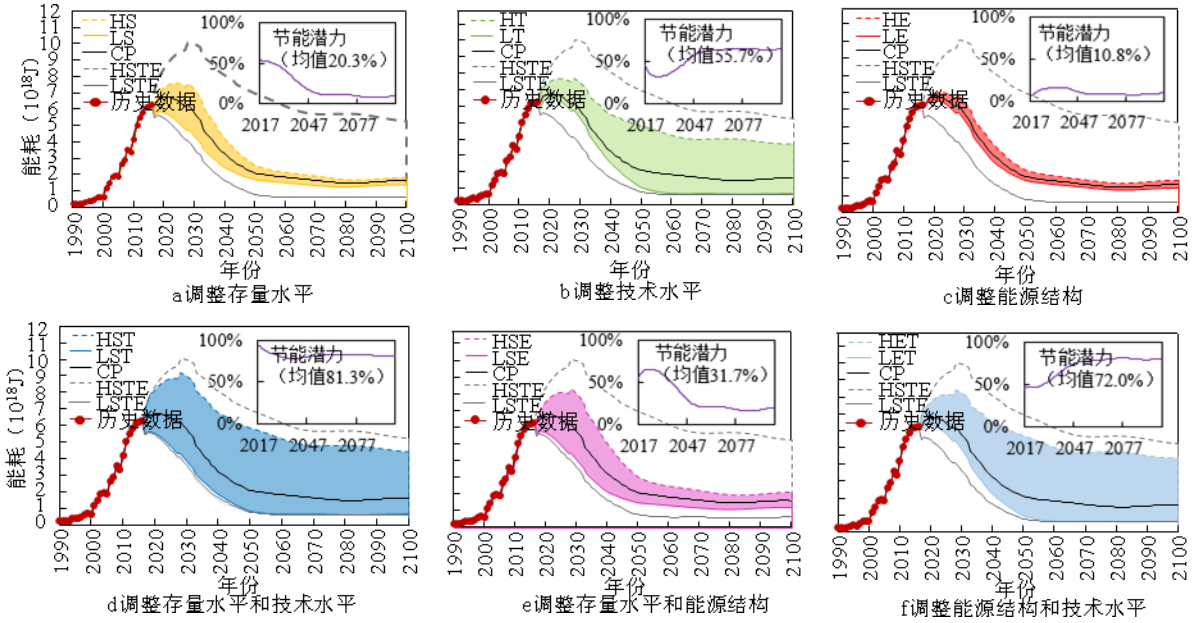


图 6 存量、技术与能源结构的节能潜力

Fig.6 The energy saving potential of stock, technology, and energy structure

双情景中存量水平和技术水平的节能潜力最大(81.3%),其次是能源结构和技术水平(72.0%),最后是存量水平和能源结构(31.7%).存量水平越低,能源消耗在前期越接近最低能耗水平;技术水平越高,能源消耗在后期越接近最低能耗水平.

2.3 碳排放情景分析

2.3.1 减排目标分析 与能耗类似,我国铝工业碳排放也将在 2030 年前达到峰值.单情景碳排放最晚在 2022 年达到峰值;双情景中 HSE 的碳排放在 2025 年达到峰值,HET 和 HST 的碳排放在 2023 年达到峰值;三情景中 HSTE 的碳排放达峰时间最晚,在 2027 年达到峰值 20 亿 t(图 7).与能耗的达峰时间相比,不同情景碳排放的达峰时间较早.这是由于原生铝生产对排放总量的影响更大,以再生铝替代原生铝对

减排更为有效.

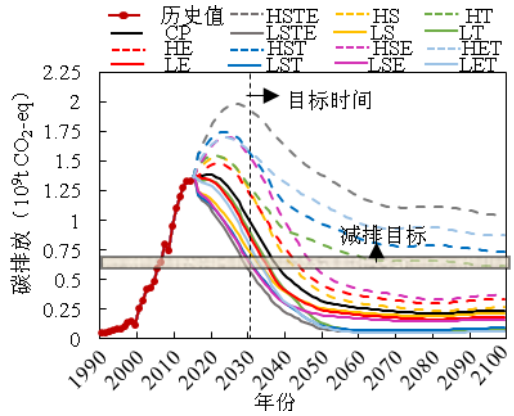


图 7　不同情景的碳排放与减排目标对比

Fig.7　Comparison of carbon emission and emission reduction target of different scenarios

为了实现 2030 年单位国内生产总值 CO_2 排放比 2005 年下降 60%~65%的目标,2030 年的 CO_2 排放水平应该在 6~7 亿 t 内,只有三情景中 LSTE 可以在 2030 年实现目标.双情景中 LSE 的碳强度(单位国内生产总值 CO_2 排放量)比 2015 下降了 59.9%,十分接近目标(<1%),LST 和 LET 的碳强度分别下降了 56.2%、50.4%.单情景中 LS 在 2030 年最接近目标,碳排放量为 8 亿 t,碳强度比 2005 年下降 54.5%,与目标差距较小(<6%).无论存量水平和能源结构如何变化,只要技术水平维持现有的低水平状态,就无法在 2100 年前实现碳强度下降的目标.

2.3.2　减排潜力分析　单情景中技术水平的减排潜力最大,其次是能源结构,最后是存量水平.减排潜力由大到小的均值分别为 47.0%、17.3%和 16.7%(图 8).从时间上看,存量水平的减排潜力在 2034 年之前超过 30%,大于其余参数的减排潜力.这是由于再生铝在低存量水平下最早超过原生铝的数量,在前期大幅降低了碳排放量.能源结构的减排潜力一直维持在 17%左右.与节能潜力不同,能源结构的减排潜力在 2038 年之后大于存量水平的减排潜力,转变以煤炭为主的能源结构的减排效果好于节能效果.技术水平的节能潜力逐渐增加并趋于稳定,在 2035 年后达到 31.2%,占主导地位.2034~2100 年间,延长含铝产品的服务年限、降低各阶段损失、提高报废产品的回收利用率、增加再生铝生产比例依旧是最有效的减排路径.

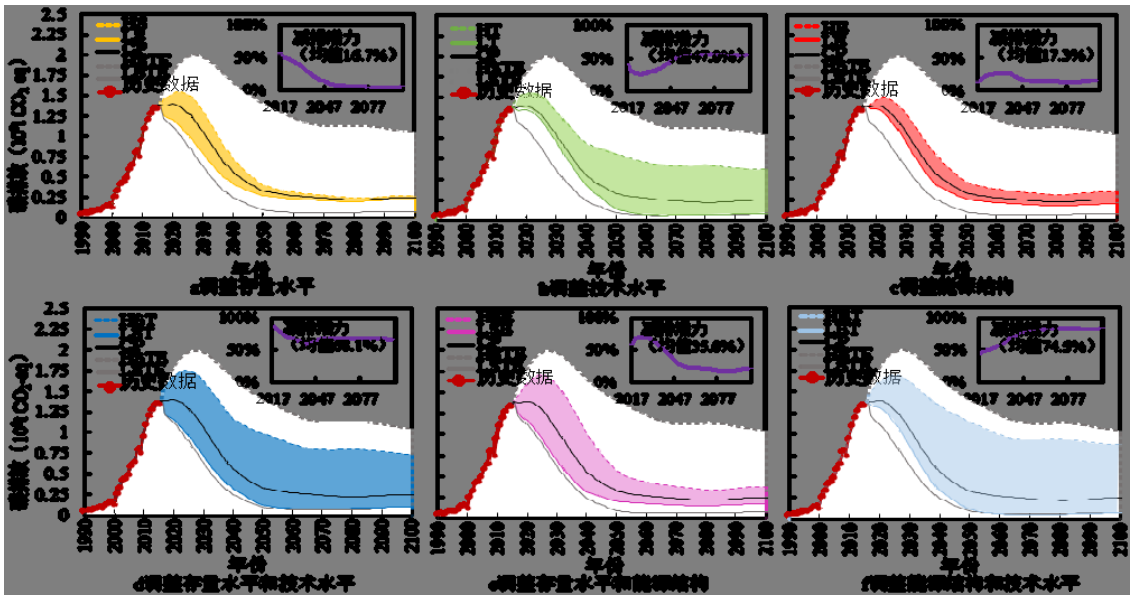


图 8　存量、技术与能源结构的减排潜力

Fig.8　The emission reduction potential of stock, technology, and energy structure on carbon emission

双情景中能源结构和技术水平的减排潜力最大(74.5%),其次是存量水平和技术水平(68.1%),最后是存量水平和能源结构(35.0%).调整存量水平的最低碳排放情景(LST 、LSE)在前期最接近最低碳排放情景(LSTE),调整技术水平的最低碳排放情景(LST、LET)在后期最接近最低碳排放情景(LSTE).

3 讨论

按照现有的经济增长速度、技术水平和能源结构,不采取任何措施,我国铝工业仍能实现能耗和碳排放在2030年前达峰的目标.铝工业在2030年无法实现单位GDP能耗比2005年下降60%~65%的目标.但在技术水平最高、存量水平最低和能源结构最优的情景下,铝工业可以在2030年实现单位国内生产总值CO_2比2005年下降60%的目标.这是由于原生铝生产对碳排放影响大于对能耗的影响,以再生铝替代原生铝对减排更为有效.然而我国很难达到铝存量水平最低、技术水平最高、能源结构最优的情景(LSTE).因为我国仍处于工业化中期发展阶段,正在向中等发达国家迈进,同时我国居民消费处于以住房、汽车为标志的消费升级阶段,控制人均在用存量水平是一个巨大挑战;该情景的平均损失率仅为2016年58.3%,低于目前最先进技术水平所能达到的损失率最小值[48],需大幅提升现有铝工业全产业链技术水平;该情景2030年天然气比例为18.3%,煤炭比例为31.2%,我国在“十三五”规划中指出,2020年天然气消费比重力争达到10%,煤炭消费比重降低到58%以下[17],随着时间推移,能源结构转变速度下降,与该情景存在较大差距.

双情景中最优的节能路径是提高技术水平和降低存量水平,最优的减排路径是提高技术水平和快速转变能源结构,提高技术水平是节能减排的最优路径,转变能源结构的减排效果好于节能效果.单情景中最优的节能减排路径是提高技术水平,且该路径的节能减排潜力大于双情景中存量水平和能源结构的节能减排潜力.综合考虑所有情景,技术水平的节能减排潜力最大.

值得一提的是,如果技术水平维持现有的低水平状态,在2100年前就无法实现单位GDP能耗和碳排放量下降的目标.节能减排的首要任务是提高技术水平,建立完整的回收、运输、处理、利用废旧产品的铝回收利用体系,提高报废产品的回收利用率和再生铝的替代比率;发展分类技术、冶炼技术等,降低各阶段铝产品的损失率,延长铝产品的使用寿命.其次,政府应盘活社会经济系统中的铝存量,推动共享经济的发展,提高闲置产品的利用效率,由扩张增量转向优化存量.最后,能源结构对碳排放有较大影响,政府除了改善电力结构,降低煤炭消费占比,还应完善市场机制在节能减排方面的作用,如建立完善的碳交易市场、对于高能耗高排放企业征收环境税、补贴新能源企业.

本研究情景分析具有不确定性:(1)没有关注铝土矿和铝半成品未来贸易量的变化;(2)没有区分不同部门的铝回收率;(3)情景假设参数没有考虑单位能耗和碳排放的变化;(4)假设我国人均铝在用存量与工业化国家模式相同,但实际存在差异[49].尽管存在以上局限性,但2017~2019铝流量的真实数据[37,50-51]和相关研究[52]中2020年铝流量数据都落在模型模拟的范围内,表明模型的短期预测合理,并且对未来中国铝循环的变化进行了更广泛的估计.铝存量的长期趋势与之前研究结果相同,即铝存量将于2040年至2050年左右达到饱和[53].预测的减排潜力也与之前研究结果类似[20],即发展中国家在十分乐观的回收利用情况和技术假设下也无法实现减排目标,且原生铝生产中技术革新的减排影响最大.由上述对比可知,虽然研究结果存在一定的不确定性,但所得研究结果有较大的可信度.

4 结论

4.1 我国铝在用存量将在2040~2050年达到峰值;原生铝在2030年前达到峰值;再生铝在2050~2060年达到峰值,在2035~2040年超过原生铝的数量,成为主要的原料.原生铝生产是能耗和排放最高的生产环节,以再生铝替代原生铝能极大地降低能耗和碳排放.

4.2 所有情景下,我国铝工业都可以实现能耗和碳排放在2030前达峰的目标,但无法实现单位国内生产总值能耗下降的目标,只有在技术水平最高、存量水平最低和能源结构最优的情景下才可以实现2030年单位国内生产总值碳排放比2005年下降60%的目标.

4.3 双情景中存量水平和技术水平的节能潜力最大,能源结构和技术水平的减排潜力最大;单情景中技术水平的节能减排潜力最大.

4.4 技术水平的节能减排潜力随时间推移逐渐变大;存量水平在前期的节能减排潜力较大,后期逐渐缩小.总体上看,提高铝工业技术水平、提高报废产品的回收利用率、增加再生铝在原料中的比例是节

能减排的根本.

参考文献：

[1] 舟　丹.中国是世界上最大的碳排放国之一 [J]. 中外能源, 2015, 20(1):56.
Zhou D, 2015, China is one of the largest carbon emitters in the world [J].Sino-Global Energy, 20(1):56.

[2] 强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献 [N]. 2015-07-01.
Strengthening action to deal with climate change - China's national independent contribution [N]. 2015-07-01.

[3] IEA I. Energy technology perspectives 2017 [J]. Catalysing Energy Technology Transformations, 2017.

[4] 杨　毅,郭尧琦,朱文松,等.我国铝工业经济增长与碳排放脱钩的时空分异研究 [J]. 矿冶工程, 2018,38(6):168-72.
Yang Y, Guo Y Q, Zhu W S, et al. Discussion of spatio-temporal differentiation for decoupling carbon emissions from economic growth in China's aluminum industry [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018,38(6):168-72.

[5] “十三五”节能减排综合工作方案 [J]. 有色冶金节能, 2017, 33(2):1-9.
Comprehensive work plan for energy conservation and emission reduction in the 13th five year plan [J]. Energy saving in Nonferrous Metallurgy, 2017,33(2):1-9.

[6] Tan R B, Khoo H H. An LCA study of a primary aluminum supply chain [J]. Journal of Cleaner Production, 2005,13(6):607-18.

[7] Norgate T, Haque N. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations [J]. Journal of Cleaner Production, 2010,18(3):266-74.

[8] Yi Y, Guo Y-Q, Zhu W-S, et al. Environmental impact assessment of China's primary aluminum based on life cycle assessment [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019,29(8): 1784-92.

[9] Niero M, Negerelli A J, Hoffmeyer S B, et al. Closing the loop for aluminum cans: Life cycle assessment of progression in cradle-to-cradle certification levels [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 126:352-362.

[10] PauliukK S, Müller D B. The role of in-use stocks in the social metabolism and in climate change mitigation [J]. Global Environmental Change, 2014,24:132-142.

[11] 韩永鹏,李会泉,陈　波,等.高铝粉煤灰资源化过程重金属环境影响研究 [J]. 中国环境科学, 2013,33(11):2013-7.
Han Y P, Li H Q, Chen B, et al. Migration and emission of heavy metal elements in the multi-resource utilization of high alumina fly ash process [J]. China Environmental Science, 2013,33(11):2013-7.

[12] Paraskevas D, Kellens K, Dewulf W, et al. Environmental modelling of aluminium recycling: a life cycle assessment tool for sustainable metal management [J]. Journal of Cleaner Production, 2015,105(3): 57-70.

[13] Damgaard A, Larsen A W, Christensen T H. Recycling of metals: accounting of greenhouse gases and global warming contributions [J]. Waste Management & Research, 2009,27(8):773-80.

[14] Luo Z, Soria A. Prospective study of the world aluminium industry [R]. Institute for Prospective Technological Studies, European Commission Joint Research Centre, 2007,

[15] Sevigné-itoiz E, Gasol C M, Rieradevall J, et al. Environmental consequences of recycling aluminum old scrap in a global market [J]. Resources, conservation and recycling, 2014,89:94-103.

[16] Elshkaki A, Vandervoet E, Timmermans V, et al. Dynamic stock modelling: A method for the identification and estimation of future waste streams and emissions based on past production and product stock characteristics [J]. Energy, 2005,30(8):1353-63.

[17] Elshkaki A, Vandervoet E, Vanholderbeke M, et al. The environmental and economic consequences of the developments of lead stocks in the Dutch economic system [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2004,42(2):133-54.

[18] Schwarz H-G, Briem S, Zapp P. Future carbon dioxide emissions in the global material flow of primary aluminium [J]. Energy, 2001,26(8): 775-95.

[19] Menzie W, Barry J, Bleiwas D, et al. The global flow of aluminum from 2006 through 2025 [M]. US Department of the Interior, US Geological Survey, 2010.

[20] Liu G, Bangs C E, Müller D B. Stock dynamics and emission pathways of the global aluminium cycle [J]. Nature Climate Change, 2013,3(4):338-42.

[21] 丁　宁,高　峰,王志宏,等.原铝与再生铝生产的能耗和温室气体排放对比 [J]. 中国有色金属学报, 2012,22(10):2908-15.
Ding N, Gao F, Wang Z H, et al. Comparative analysis of primary aluminum and recycled aluminum on energy consumption and greenhouse gas emission [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals., 2012,22(10):2908-15.

[22] Müller E, Hilty L M, Widmer R, et al. Modeling metal stocks and flows: a review of dynamic material flow analysis methods [J]. Environmental Science & Technology, 2014,48(4):2102-13.

[23] Wiedenhofer D, Fishman T, Lauk C, et al. Integrating material stock dynamics into economy-wide material flow accounting: concepts, modelling, and global application for 1900~2050 [J]. Ecological Economics, 2019,156:121-33.

[24] 陈伟强,石　磊,钱　易.国家尺度上铝的社会流动过程解析 [J]. 资源科学, 2008,(7):1004-12.
Chen W-Q, Shi L, Qian Y. Description of anthropogenic aluminum cycles [J]. Resource Scinece, 2008,(7):1004-12.

[25] Dai M, Wang P, Chen W-Q, et al. Scenario analysis of China's 2019, aluminum cycle reveals the coming scrap age and the end of primary aluminum boom [J]. Journal of Cleaner Production, 226:793-804.

[26] 蒋晓斌,江　健,陈定江,等.中国乘用车塑料的动态物质流分析 [J]. 中国环境科学, 2020,40(9):4106-14.
Jiang X B, Jiang J, Chen D J, et al. Dynamic material flow analysis of Chinese passenger car plastics [J]. China Environmental Science, 2020,40(9):4106-14.

[27] 刘满芝,谈　帅,栾常锦,等.中国废纸回收系统物质流分析与评价 [J]. 中国环境科学, 2020,40(1):439-52.
Liu M Z, Tan S, Luan C J, et al. Material flow analysis and evaluation of waste paper recycling system in China [J]. China Environmental Science, 2020,40(1):439-52.

[28] Melo M. Statistical analysis of metal scrap generation: the case of aluminium in Germany [J]. Resources, Conservation and Recycling,

1999,26(2):91−113.

[29] Moujahid Y, Bouabid R. Mineralogy and charge of Moroccan vertisoil smectite [J]. Journal of Materials and Environmental Science, 2015, 6(11):3328−37.

[30] Hatayama H, Daigo I, Matsuno Y, et al. Assessment of the recycling potential of aluminum in Japan, the United States, Europe and China [J]. Materials transactions, 2009,0901260657.

[31] 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]. Resources Conservation and Recycling, 2012,65:18−28.

[32] IAI, 2018. The website of the international aluminium Institute [WWW Document]. http://www.world−aluminium.org.

[33] Chen W−Q, Shi L, Qian Y.Substance flow analysis of aluminium in mainland China for 2001, 2004 and 2007: Exploring its initial sources, eventual sinks and the pathways linking them [J]. Resources Conservation and Recycling, 2010,54(9):557−70.

[34] 陈伟强,万红艳,武娟妮,等.铝的生命周期评价与铝工业的环境影响 [J]. 轻金属, 2009,5:3−10.
Chen W−Q, Wan H Y, Wu J N, et al. Life cycle assessment of aluminium and the environmental impacts of aluminium industry [J]. Resource Scinece, 2009,5:3−10.

[35] 王祝堂.铝型材挤压的废品量与金属损失 [J]. 轻合金加工技术, 1999,(10):43.
Wang Z T. Scrap quantity and metal loss of aluminum profile extrusion [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 1999,(10):43.

[36] 王祝堂.中国的再生铝工业 [J]. 有色金属加工, 2015,44(6):4−5.
Wang Z T. Secondary Aluminum Industry in China [J]. Nonferrous Metals Processing, 2015,44(6):4−5.

[37] 中国有色金属工业协会.中国有色金属工业年鉴 [M]. 北京:《中国有色金属工业年鉴》社, 2018.
China Nonferrous Metals Industry Association. China nonferrous metals industry yearbook [M]. Beijing: Metals Industry Association. China Nonferrous Metals Industry Yearbook press, 2018.

[38] 国家统计局能源统计司.中国能源统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2018.
Department of energy statistics, National Bureau of Statistics. China energy statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.

[39] IAI, 2018. The website of the International Aluminium Institute [WWW Document]. http://www.world−aluminium.org/publications/#data.

[40] Nations U. World population prospects, 2017 Revision [J]. New York: United Nations, 2017.

[41] Pauliuk S, Wang T, Müller D. Moving toward the circular economy: The role of stocks in the Chinese steel cycle [J]. Environmental Science & Technology, 2012,46(1):148−54.

[42] 陈伟强.中国铝存量与流量分析:环境影响、需求模拟及政策启示 [D]. 北京:清华大学, 2010.
Chen W Q. Stocks and flows analysis of aluminum in China: Environmental impacts, future demand modelling and policy implications [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.

[43] Dahlström K, Ekins P. Combining economic and environmental dimensions: Value chain analysis of UK aluminium flows [J]. Resources, conservation and recycling, 2007,51(3):541−60.

[44] 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.

[45] Ciacci L, Chen W−Q, Passarini F, et al. Historical evolution of anthropogenic aluminum stocks and flows in Italy [J]. Resources, conservation and recycling, 2013,72:1−8.

[46] Wang J, Graedel T E. Aluminum in−use stocks in China: a bottom−up study [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2010, 12(1):66−82.

[47] AGENCY(IEA). World energy outlook 2019 [M]. 2019.

[48] 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): 2120−9.
Chen W−Q, Shi L, Qian Y. Substance flow analysis of aluminiumin China for 1991−2007 (Ⅱ): quantity loss of aluminium from a perspective of life cycle and its policy implications [J]. Resource Scinece, 2009,31(12):2120−9.

[49] Chen W−Q. Dynamic product-level analysis of in-use aluminum stocks in the United States [J]. Journal of Industrial Ecology, 2018, 22(6):1425−35.

[50] 中国有色金属工业协会再生金属分会.2018 年中国再生有色金属产业发展报告 [M]. 2019.
China Nonferrous Metals Industry Association, Renewable Metals Branch. Report on the development of China's renewable nonferrous metals industry in 2018 [M]. 2019.

[51] 中国有色金属工业协会再生金属分会.2019 年中国再生有色金属产业发展报告 [M]. 2020.
China Nonferrous Metals Industry Association, Renewable Metals Branch. Report on the development of China's renewable nonferrous metals industry in 2019 [M]. 2020.

[52] 张浩钰.中国铝资源需求预测与保障性分析 [J]. 西部资源, 2018, (1):189−91,97.
Zhang H Y. Demand forecast and supportability analysis of aluminum resources in China [J].Western Resources, 2018,(1):189−91,97.

[53] 代 敏,汪 鹏,陈伟强,等.原生铝的拐点和铝废料的时代即将到来 [J]. 资源再生, 2019,(8):26−31.
Dai M, Wang P, Chen W−Q, et al. The era of inflection point and aluminum scrap of primary aluminum is coming soon [J]. Resource Recycling , 2019,(8):26−31.

作者简介：卢浩洁(1997−),女,山东滨州人,中国科学院大学硕士研究生,研究方向为城市代谢及物质流分析.