

中国汽车、船舶和家电中钢铁的存量与流量

宋璐璐^{1,2}, 陈伟强^{1,2,3}, 代敏^{1,2,3}

(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, 厦门 361021;
2. 厦门城市代谢重点实验室, 厦门 361021; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 存量是指社会经济系统中正在被使用的产品(或物质)的数量(或重量)。人类不断增长的物质需求推动了存量的消耗和更新, 最终导致了物质在社会经济系统中的流动。本文利用存量驱动的动态物质流模型分析了1949—2050年中国汽车、船舶和家电行业终端产品中钢铁的存量、理论报废量和理论需求量的变化趋势。研究表明: 汽车、船舶和家电中的钢铁理论需求量在2020—2030年之间达到峰值后呈现降低的趋势。三个行业终端产品中钢铁的理论报废量将在2040年之后逐渐超越理论需求量, 并在2050年分别达到8300万t/年(汽车)、2700万t/年(船舶)和441万t/年(家电)。研究结果可为我国典型行业钢铁的可持续生产与利用提供政策启示, 为有效推动循环经济的开展提供数据基础。

关键词: 钢铁; 在用存量; 理论报废量; 理论需求量; 典型行业

自工业革命以来, 社会经济的快速发展所带来的资源短缺问题逐渐成为可持续发展的障碍^[1,2]。出于对城市化和工业化所导致的社会经济系统与自然生态系统之间物质循环代谢问题的关注, 20世纪60年代学者们发展出了城市代谢、社会代谢和工业代谢等分析方法^[3]。其中, 物质流分析(Material Flow Analysis, MFA)是产业生态学中常用的分析方法, 是一种根据物质守恒定理定量评估具有时空边界的经济—环境系统中物质的存量与流量, 从而追踪物质在该系统内流动的源、路径和汇的研究方法^[4]。

存量与流量的估算是物质流分析的重要内容。流量是指产品或物质在不同过程或子系统之间的输入量和输出量。存量是指社会经济系统中正在被使用的产品的数量或者材料的重量^[4-6], 比如汽车的辆数或者钢铁的吨数等。人类不断增长的物质需求促使各种物质材料源源不断的被开采并加工制造后堆积到产品存量中, 当产品达到服务年限之后, 产品及其中所含物质可被回收和循环利用^[7,8], 因此, 存量又被看作是“城市矿产”, 是未来再生资源的储量。存量在社会经济系统中的不断消耗和更新, 持续地为人类生产与消费活动提供服务, 是流量产生的发动机^[5,9]。

钢铁以其特有的机械特性成为使用量最大的金属, 广泛应用在建筑、交通和基础设施等国民经济部门, 预计到2050年仍是人类生产生活中不可替代的材料^[10-12]。钢铁工业对环境影响较大, 属于高耗能、高污染产业。钢铁生产过程中所释放的CO₂占所有工业

收稿日期: 2019-02-26; 修订日期: 2019-10-05

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(121201103000150015); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDB-SSW-DQC012); 福建省科技计划对外合作项目(2018I00020)

作者简介: 宋璐璐(1985-), 女, 山西长治人, 博士, 助理研究员, 主要从事物质在全国或者城市尺度的存量与流量估算研究。E-mail: llsong@iue.ac.cn

通讯作者: 陈伟强(1981-), 男, 福建漳州人, 博士, 研究员, 主要从事产业生态学、城市资源循环利用和循环经济研究。E-mail: wqchen@iue.ac.cn

CO₂排放的25%，占人为温室气体排放的9%^[13]。近年来，我国的钢铁消费量连续多年位居世界之首^[14]，但人均钢铁存量水平仍大幅落后于发达国家^[9,11,15]。可以预见，随着城市化进程的持续和人民生活水平的提高，我国未来钢铁需求量仍会处于较高水平。开展钢铁存量和流量的估算可对我国未来原生钢铁的需求量和再生钢铁生产量做出预判。

以往所开展的钢铁存量和流量的研究多以国家为系统边界，分部门（例如建筑部门、交通设备部门和工业机械部门等）对钢铁的存量和流量进行估算^[7,10-12,16-21]，而针对典型行业终端产品中钢铁的存量和流量的研究尚未大量开展。因此，本文选取汽车、船舶和家电行业中的钢铁作为研究对象，利用存量驱动的动态MFA模型估算过去以及未来各行业终端产品中钢铁的存量和流量。研究结果拟为钢铁行业未来钢铁需求量和报废量的评估提供数据基础，同时为循环经济的开展提供政策启示。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 系统边界和研究对象

本文将汽车、船舶和家电行业的主要终端产品（表1）作为研究对象，利用存量驱动的动态MFA模型估算了各产品及其中钢铁的存量和流量（包括理论报废量和理论需求量）。整个研究的空间边界为除港澳台地区的中华人民共和国全境，时间边界为1949—2050年。

1.2 研究方法

(1) 产品保有量的核算

产品保有量（ S ）是指某系统边界内在某个时间结点上处于使用状态的某种产品的数量，例如，汽车保有量或家电保有量。产品保有量的核算分为两个阶段：历史（1949—2018年）和未来（2019—2050年）。1949—2018年产品保有量取自历史阶段的统计数据。2019—2050年的产品保有量（ S ）根据未来人口数量（ P ）和产品保有率（ c ）^[22]估算所得：

$$S(t) = P(t) \times c(t) \quad (1)$$

通过文献调研等方式确定未来不同产品保有率的饱和水平（ N ），并通过Logistic方程估算未来的产品保有率（ c ）的发展趋势^[11,12]：

$$c(t) = \frac{N}{1 + \left(\frac{N}{c_0} - 1 \right) \times \exp \left(- \frac{N \times d_0}{c_0 \times (N - c_0)} \times (t - t_0) \right)} \quad (2)$$

式中： $c(t)$ 为第 t 年的产品保有率； c_0 是 t_0 年（2018年）的产品保有率； d_0 是 t_0 年保有率的初始变化率。

(2) 产品理论报废量和理论需求量的核算

理论报废量（ F_{out} ）是指使用状态的产品达到服务年限之后变成报废产品的数量以及产品中所包含的物质重量。理论需求量（ F_{in} ）是指投入使用的产品数量以及产品中所包

表1 不同产品的钢铁使用强度

Table 1 Steel intensity for different products

行业	产品	钢铁使用强度
汽车	载客汽车	2.1±0.4 t/辆
	载货汽车	9.2±1.5 t/辆
	其他	2.5±0.8 t/辆
船舶	机动船	0.42±0.10 t/载重吨
家电	电冰箱	30±6 t/1000台
	空调	26±6 t/1000台
	洗衣机	18±4 t/1000台
	电视机	0.8±0.2 t/1000台

注：表中每类产品的钢铁使用强度数据参照Wang等^[19]对我国汽车、船舶和家电产品中钢铁强度的抽样调查数据所得，其中载客和载货汽车的钢铁使用强度是按照不同车型（大型、中型、小型和微型车）中钢铁强度的权重计算所得。

含物质的重量。理论报废量和理论需求量分别是存量的输出和输入流量。

理论报废量是基于产品的服务年限模型估算所得。服务年限模型即为“时滞模型”，表达了产品投入使用后在社会经济系统中“服务时间的非瞬时性”。Melo^[23]曾给出了表达产品服务年限所服从的三种概率分布：正态分布、韦伯分布和贝塔分布，其中最常用的是正态分布 $[\lambda(t, t', \tau, \sigma)]$ 。本文根据文献调研等手段，将正态分布函数作为三个行业中所有产品的服务年限模型。

理论报废量、理论需求量和在用存量之间的关系如下：

$$F_{out}(t) = \sum_{t' \leq t} F_{in}(t') \times \lambda(t, t', \tau, \sigma) \quad (3)$$

$$F_{in}(t) = S_{(t)} - S_{(t-1)} + F_{out}(t) \quad (4)$$

$$\lambda(t, t', \tau, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \times \exp\left(\frac{-(t-t'-\tau)}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

式中： F_{out} 为第 t 年的理论报废量； F_{in} 为第 t 年的理论需求量； $S_{(t)}$ 、 $S_{(t-1)}$ 分别为第 t 、 $t-1$ 年的在用存量； t' 为初始年； τ 为产品的平均使用寿命； σ 为使用寿命的标准差。

(3) 钢铁存量和流量的核算

本文利用自下而上法估算钢铁的在用存量。自下而上法依赖于研究系统内部工业终端产品的拓扑结构以及相应钢铁在产品中使用强度的确定。通过确定产品拓扑结构单元的数量和钢铁的使用强度，逐层累加即为研究系统内钢铁的存量：

$$M(t) = I(t) \times S(t) \quad (6)$$

式中： $M(t)$ 为第 t 年的在用存量； $I(t)$ 为第 t 年产品中物质的使用强度； $S(t)$ 为第 t 年的产品保有量。

钢铁的理论需求量(M_{in})和理论报废量(M_{out})可以根据式(6)以及产品的理论需求量(F_{in})和理论报废量(F_{out})获得：

$$M_{in}(t) = F_{in}(t) \times I_{in}(t) \quad (7)$$

$$M_{out}(t) = F_{out}(t) \times I_{out}(t) \quad (8)$$

在估算1949—2050年钢铁的理论报废量和理论需求量时，本文假设 I_{in} 、 I_{out} 与 I 取值相同。

1.3 数据来源

历史数据(1949—2018年)：载客、载货和其他汽车保有量、机动船净载重量、家电户均保有量以及全国人口数量来自于《中国统计年鉴》^[24]，其中家电户均保有量分为城镇和农村家电保有量进行统计；不同产品中的钢铁使用强度通过文献调研的方法获取，我们用平均值±标准差表征每种产品中钢铁使用强度的不确定性(表1)。

未来数据(2019—2050年)：本文将估算未来存量和流量的参数设置为不同的发展前景。其中，全国总人口、城镇和农村人口取自联合国2017年的预测数据^[25]。未来城镇和农村的家庭人口数假设与2018年保持一致(用于估算城镇和农村户数)；载货汽车、载客汽车、其他汽车保有率、机动船人均净载重量、城镇和农村主要家电产品户均保有率的饱和水平均设置为高、中、低三种情景；三个行业主要产品的平均寿命设置为高、中、低三种情景(表2)。“中等水平”情景取每个参数的中间值，其他不同情景与“中等水平”相比只改动一个参数的取值，且分别取该参数的最高和最低值以表征某情景的最高和最低状况。例如，“少人口”情景即为人口取值为最低值(12.3亿)，其他参数设

表2 未来情景参数设置

Table 2 List of parameters for different industries in future scenarios

典型行业	情景设置	参数选择		
		人口 (P) /亿	产品保有率饱和水平 (N)	平均寿命 (τ) /年
汽车行业	中等水平	13.6	450/60/5/(辆/1000人) ^a	15/20/10 ^b
	少人口	12.3	450/60/5/(辆/1000人)	15/20/10
	多人口	15.1	450/60/5/(辆/1000人)	15/20/10
	低保有量	13.6	300/40/4/(辆/1000人)	15/20/10
	高保有量	13.6	600/80/6/(辆/1000人)	15/20/10
	短寿命	13.6	450/60/5/(辆/1000人)	12/15/5
	长寿命	13.6	450/60/5/(辆/1000人)	18/25/15
	最小值	12.3	300/40/4/(辆/1000人)	18/25/15
	最大值	15.1	600/80/6/(辆/1000人)	12/15/5
船舶行业	中等水平	13.6	1.5/(t/人)	25
	少人口	12.3	1.5/(t/人)	25
	多人口	15.1	1.5/(t/人)	25
	低保有量	13.6	1.0/(t/人)	25
	高保有量	13.6	2.0/(t/人)	25
	短寿命	13.6	1.5/(t/人)	20
	长寿命	13.6	1.5/(t/人)	30
	最小值	12.3	1.0/(t/人)	30
	最大值	15.1	2.0/(t/人)	20
家电行业	中等水平	10.3 (城镇) +3.3 (农村)	1或2台/户 ^c	10
	少人口	9.5 (城镇) +2.8 (农村)	1或2台/户	10
	多人口	11.6 (城镇) +3.5 (农村)	1或2台/户	10
	短寿命	10.3 (城镇) +3.3 (农村)	1或2台/户	5
	长寿命	10.3 (城镇) +3.3 (农村)	1或2台/户	15
	最小值	9.5 (城镇) +2.8 (农村)	1或2台/户	15
	最大值	11.6 (城镇) +3.5 (农村)	1或2台/户	5

注: a. 三个不同数值分别代表载客、载货和其他汽车的保有率饱和水平, 例如450/60/5 (辆/1000人) 代表载客、载货和其他类型汽车的保有率在2050年分别达到450辆/1000人、60辆/1000人和5辆/1000人。b. 三个不同数值分别代表载客、载货和其他汽车的平均寿命。c. 本文基于Chen等^[9]对美国户均家电保有量的分析假设未来我国户均家电保有量为: 洗衣机和冰箱为1台/户; 电视机和空调为2台/户。

置与“中等水平”相同; “多人口”情景即为人口取值为最高值(15.1亿), 其他参数设置与“中等水平”相同。此外, 每个行业的最大和最小发展情景是通过结合高(低)人口、高(低)汽车拥有量及短(长)寿命来获得相应情景参数。

2 结果分析

2.1 汽车中钢铁的存量和流量

本文分析了载客、载货以及其他类型(包括牵引车、消防车等特种车)汽车的保有量变化趋势(图1a)。研究表明, 建国以来我国汽车保有量逐年递增, 由1949年的5.1万辆增加至2018年的2.3亿辆。其中, 载客汽车保有量由1949年的1.7万辆增加到

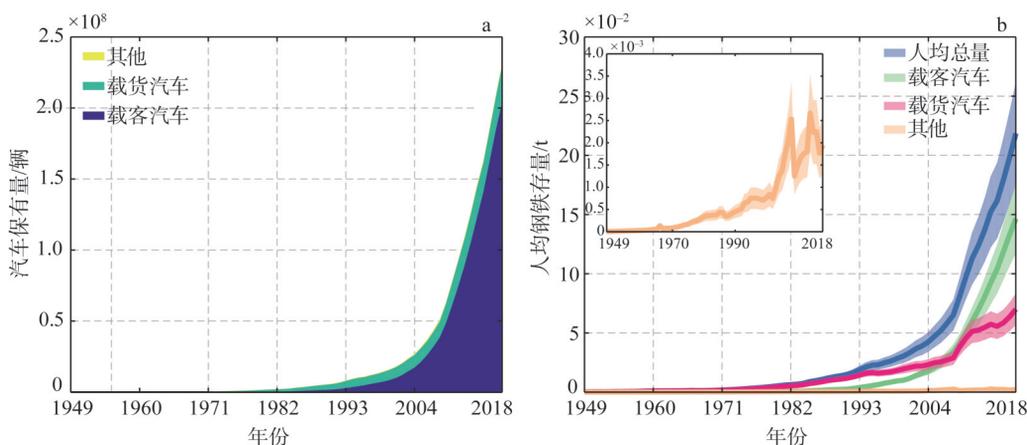


图1 1949—2018年全国汽车保有量和人均钢铁存量

Fig. 1 Product stocks and per-capita steel stocks in automobiles in China from 1949 to 2018

2018年的2.0亿辆(144辆/1000人),年均增长率为21.2%。载货汽车保有量由1949年的3.3万辆增加到2018年的0.3亿辆(18辆/1000人),年均增长速率为6.1%。载货汽车在汽车行业中的比例相对较小,并且其占比呈现持续下降的趋势(由1949年的64%降低至2018年的11%)。其他类型的汽车在整个汽车行业中的比例最小(<10%),其数量从1949年的1300辆增加到2018年的108万辆(0.8辆/1000人),年均增长率为0.3%。

汽车中的钢铁存量呈现逐年递增的趋势,由1949年的<0.01 t/人增加到2018年的 0.22 ± 0.03 t/人。其中载客汽车的人均钢铁存量最大,在2018年达到 0.15 ± 0.02 t/人;载货汽车的人均钢铁存量次之,在2018年达到 0.07 ± 0.02 t/人;其他类型汽车的人均钢铁在用存量最小,仅为 1.95 ± 0.62 kg/人(图1b)。

我国汽车保有量预计在2040年达峰后缓慢降低并在2050年达到4.4亿~10.7亿辆(中等水平为7.3亿辆),其中人均保有率情景对汽车保有量的发展趋势影响较大,约是人口发展情景的2倍(图2a)。为了维持社会汽车保有量的需求,汽车理论需求量逐年增加并在2022年达峰,达峰后出现明显降低趋势并在2050年达到0.2亿~0.9亿辆/年。汽车理论

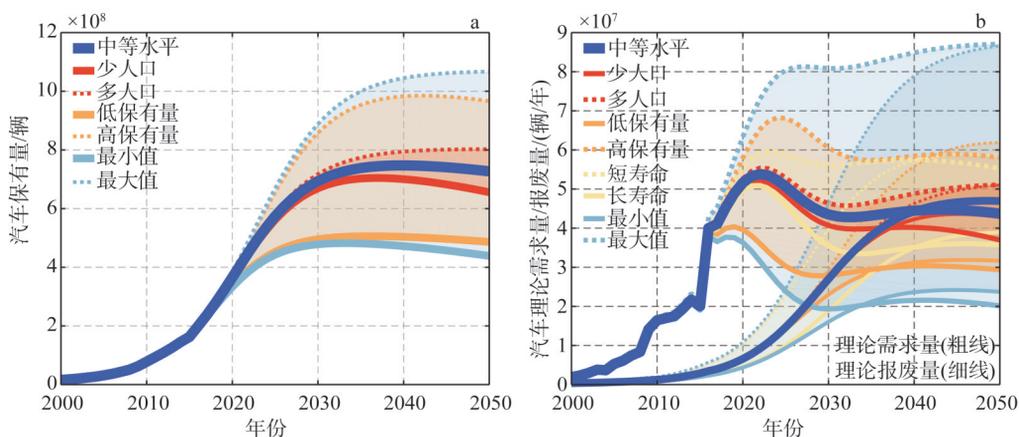


图2 2000—2050年全国汽车在用存量和流量

Fig. 2 Product stocks and flows in automobiles in China from 2000 to 2050

报废量逐年递增并在2040年超过理论需求量，2050年汽车理论报废量将达到2300万~8600万辆/年（图2b）。

随着汽车保有量的逐年增加，汽车中的钢铁存量也在增加，并在2050年达到7.9亿~19.3亿t（图3a）。钢铁理论需求量在2022年达到峰值后逐年下降，并在2050年达到0.4亿~1.5亿t/年。钢铁理论报废量自2000年后逐年增加并在2040年超过理论需求量，2050年钢铁理论报废量将达到0.4亿~1.5亿t/年（图3b）。

2.2 船舶中钢铁的存量和流量

1978—2018年机动船的净载重量逐年增加，由0.1亿t增加至2.4亿t，年均增长率为12.3%（图4a）。相对于汽车行业而言，机动船的人均钢铁存量较小，2018年仅达到0.08±0.02 t/人，年增长率为5%（图4b）。

2050年全国机动船的净载重量将达到12.2亿~29.1亿t（中等水平为20.0亿t）。人均保有量对机动船净载重量的发展趋势影响较大（图5a）。2020年后机动船净载重量的理论需求量持续增加并在2028年左右达峰，此后呈现逐年减少的趋势并在2050年达到

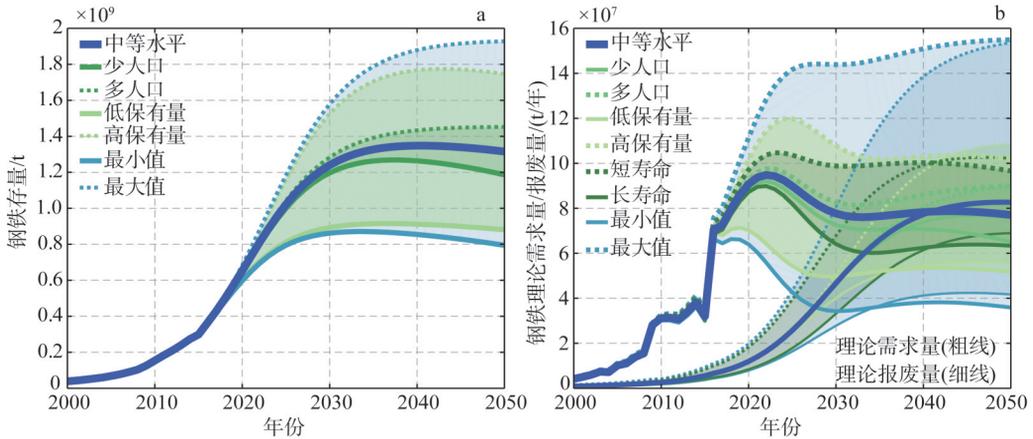


图3 2000—2050年全国汽车行业钢铁存量和流量

Fig. 3 Steel stocks and flows in automobiles in China from 2000 to 2050

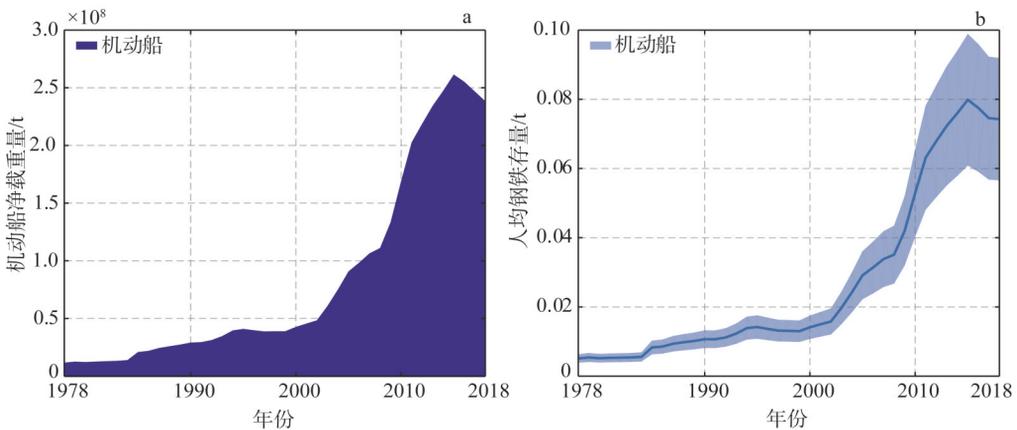


图4 1978—2018年全国船舶行业净载重量和人均钢铁存量

Fig. 4 Stocks of deadweight tonnage and per-capita steel stocks in vessels in China from 1978 to 2018

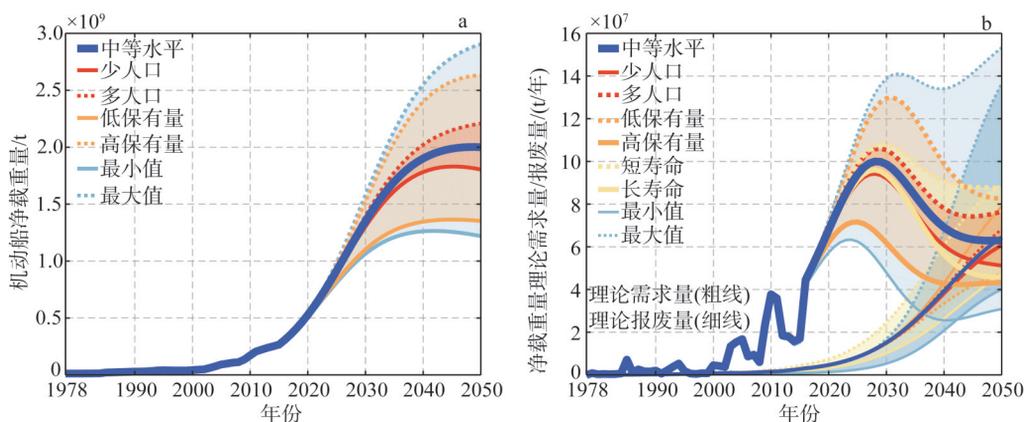


图5 1978—2050年全国船舶行业净载重量和流量

Fig. 5 Stocks of deadweight tonnage and flows in vessels in China from 1978 to 2050

0.3亿~1.5亿t/年。2019—2050年机动船的理论报废量呈现逐年增加的趋势,预计到2050年报废量将达到0.7亿~1.4亿t/年(图5b)。

机动船中钢铁存量将在2050年达到5.1亿~12.2亿t(中等水平为8.4亿t)(图6a)。钢铁理论需求量在2028年达峰后呈现逐年减小的趋势,并在2050年达到0.2亿~0.6亿t/年,而钢铁理论报废量则呈现逐年递增的趋势,并在2050年与理论需求量持平(图6b)。

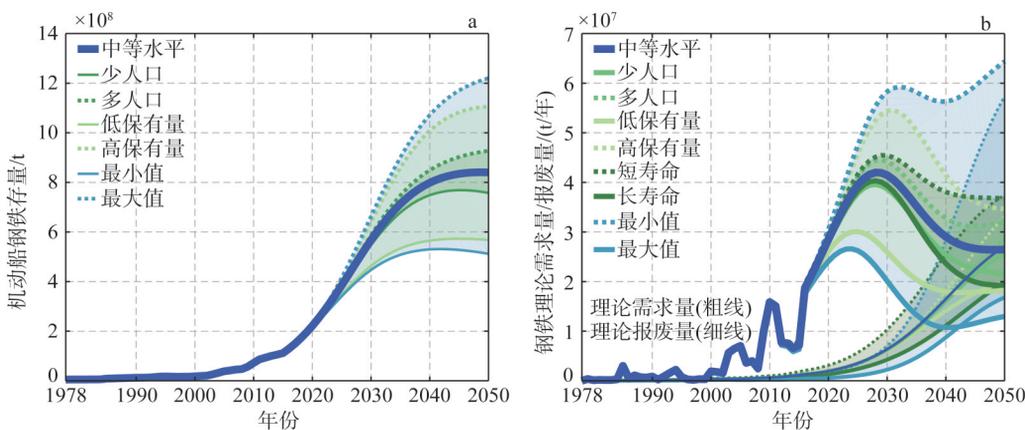


图6 1978—2050年全国船舶行业钢铁存量和流量

Fig. 6 Steel stocks and flows in vessels in China from 1978 to 2050

2.3 家电中钢铁的存量和流量

1980—2018年全国城镇洗衣机保有量由301万台(0台/户)增加至2.5亿台(1.0台/户);电冰箱保有量由9.6万台(0台/户)增加至2.5亿台(1.0台/户);电视机由28.6万台(0台/户)增加至3.8亿台(1.5台/户);空调由26.4万台(0台/户)增加至4.1亿台(1.6台/户)。2018年城镇中洗衣机和电冰箱的户均保有量已经呈现饱和状态(图7a)。

与城镇家电保有量的变化趋势不同,1983—2018年农村家电保有量呈现持续增加的趋势。其中,洗衣机保有量从59.7万台(0台/户)增加到1.5亿台(0.8台/户),年均增长率为7%;电冰箱保有量由16.0万台(0台/户)增加到1.5亿台(0.9台/户),年均增长率为

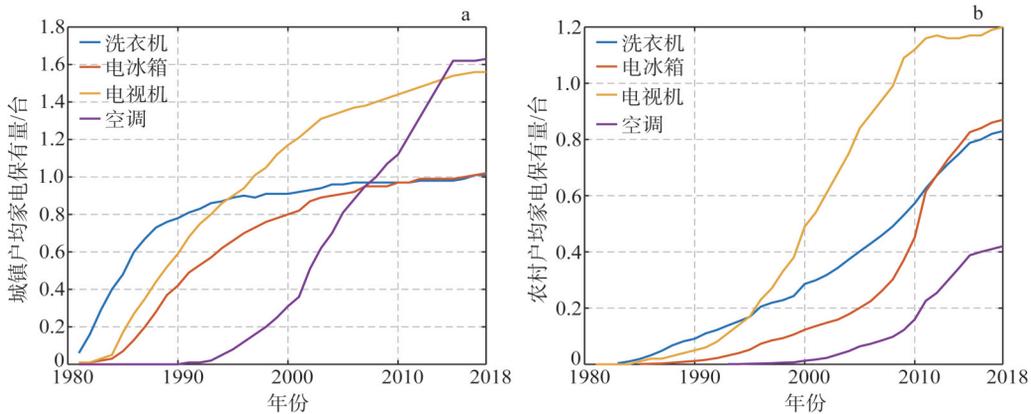


图7 1980—2018年城镇和农村主要家电产品户均保有量

Fig. 7 Stocks of main household appliances in urban and rural China from 1980 to 2018

14%；电视机保有量由128.5万台（0台/户）增加到2.1亿台（1.2台/户），年均增长率为6%；空调保有量由18.7万台（0台/户）增加到0.7亿台（0.4台/户），年均增长率为25%（图7b）。

由于家电中的钢铁使用强度相对较低（3辆小型载客汽车与100台电冰箱中的钢铁使用强度相同），因此家电行业的人均钢铁存量较小。城镇家电中的人均钢铁存量在2010年之后增加速率变缓并在2018年达到0.03 t/人（图8a）。农村的人均钢铁存量在2010年之后呈现显著上升的趋势并到2018年达到0.02 t/人（图8b）。

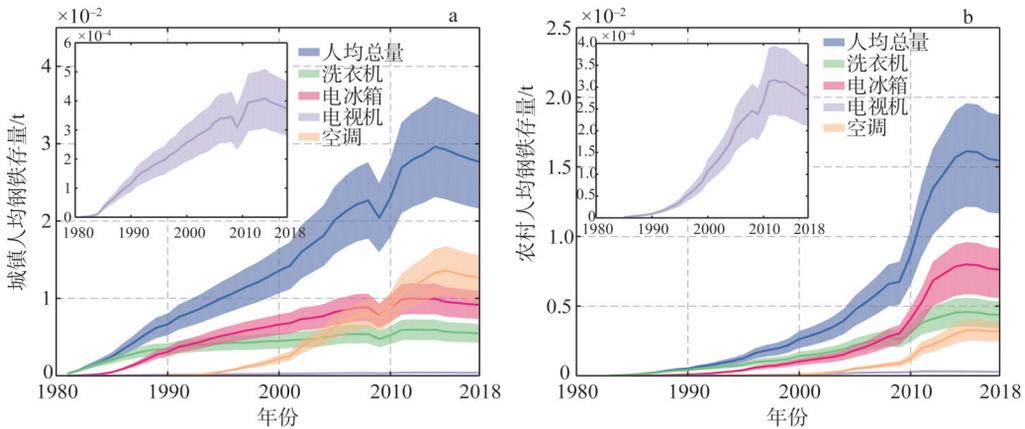


图8 1980—2018年城镇和农村人均家电钢铁存量

Fig. 8 Per-capita steel stocks of main household appliances in urban and rural China from 1980 to 2018

未来情景预测的结果显示，城镇家电产品保有量呈现S型增长趋势并在2050年达到 21.9 ± 1.8 亿台（图9a）。随着城市化率的提高和农村人口的降低，农村家电产品保有量在2020年之后持续减少并在2050年达到 4.8 ± 0.5 亿台（图9b）。保有量的不同发展趋势导致了未来城镇和农村家电产品理论需求量和报废量的不同发展趋势：2030年后城镇家电产品理论需求量的增长趋势变缓，同时理论报废量不断增加，2050年城镇家电产品的理论报废量将与理论需求量持平达到1.3亿~4.8亿台（图10a）；农村家电产品的理论需求量在

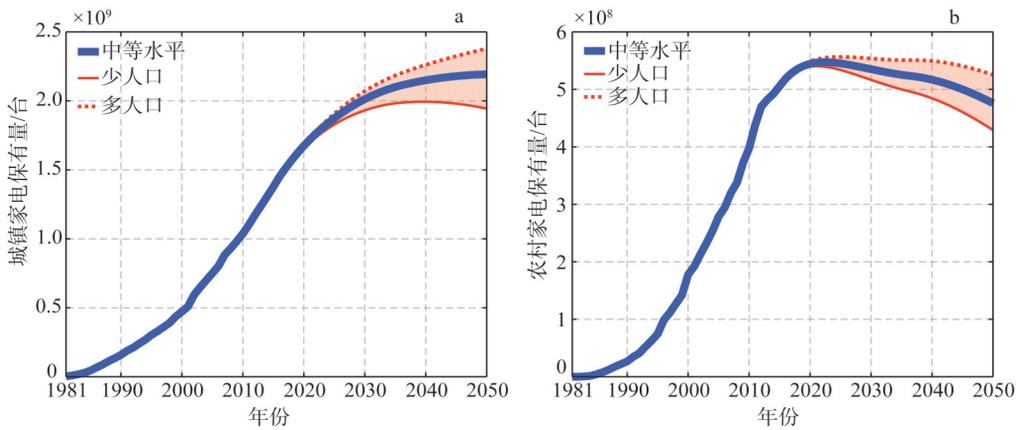


图9 1980—2050年城镇和农村家电保有量

Fig. 9 Stocks of main household appliances in urban and rural China from 1980 to 2050

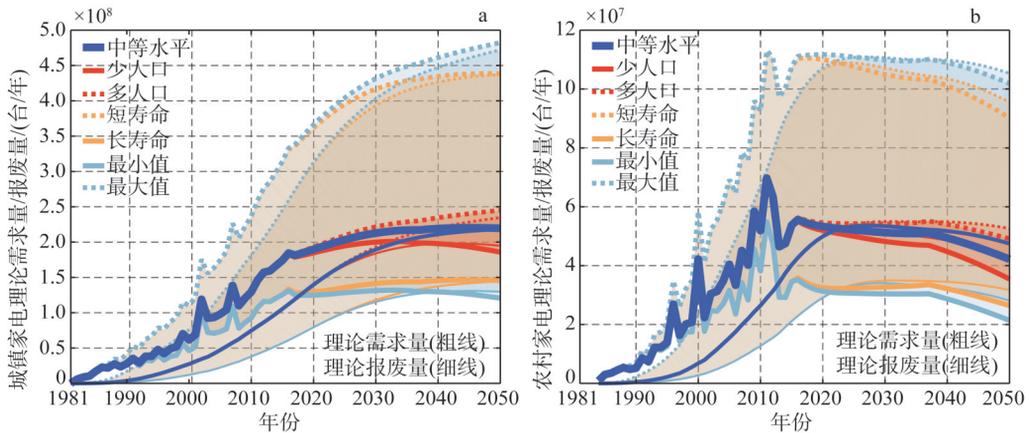


图10 1980—2050年城镇和农村家电流量

Fig. 10 Flows of main household appliances in urban and rural China from 1980 to 2050

2020年达到峰值后呈现持续降低的趋势,2050年理论报废量(0.3亿~1.1亿台/年)将超过理论需求量(0.2亿~1.0亿台/年)(图10b)。

与家电产品存量的变化趋势相似,城镇家电中的钢铁存量在2050年呈现饱和趋势并达到 3.7 ± 0.4 亿t(图11a),而农村家电中的钢铁存量在2020年后逐渐降低并在2050年达到 780.0 ± 80.9 万t(图11b)。城镇家电产品中钢铁理论需求量在2020年之后呈现饱和趋势,在2050年达到204.5万~821.5万t/年,而钢铁报废量在2020年之后持续增加,并在2050年与理论需求量持平(图12a)。农村家电的钢铁理论报废量在2050年将达到46.7万~172.2万t/年,显著高于钢铁理论需求量(37.2万~168.4万t/年)(图12b)。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文利用存量驱动的动态MFA模型分析了1949—2050年汽车、船舶和家电行业主要

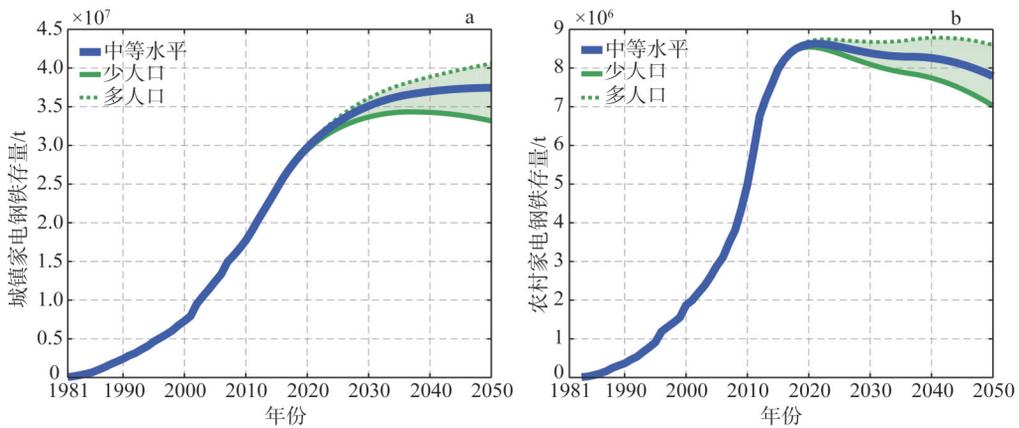


图 11 1980—2050年城镇和农村家电行业钢铁存量

Fig. 11 Steel stocks of main household appliances in urban and rural China from 1980 to 2050

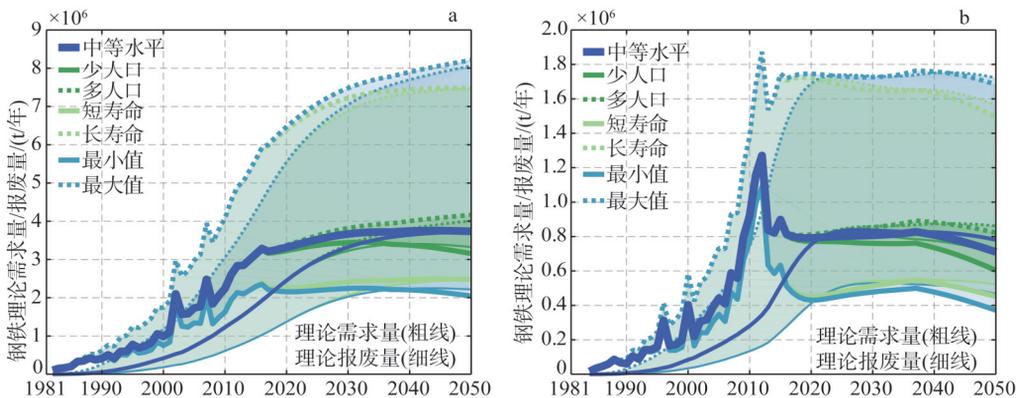


图 12 1980—2050年城镇和农村家电行业钢铁流量

Fig. 12 Steel flows of main household appliances in urban and rural China from 1980 to 2050

产品中钢铁的存量、理论报废量和理论需求量的变化趋势。研究结果表明：

(1) 1949—2018年三个行业主要产品中的钢铁存量均呈现持续增加趋势，其中汽车行业的钢铁存量最大，2018年达到0.22 t/人，船舶和家电行业人均钢铁在用存量分别达到0.08 t/人和0.05 t/人。

(2) 汽车、船舶和家电行业中的钢铁理论需求量在2020—2030年之间达峰后呈现逐渐降低的趋势，2050年三个行业的钢铁理论需求量将达到1.08亿t/年。

(3) 2030年后汽车、船舶和家电行业中的钢铁理论报废量将快速增加，2040—2050年三个行业的钢铁理论报废量将逐渐超越理论需求量，并在2050年达到1.14亿t/年。不同行业中产品寿命的长短对钢铁报废量影响较大，产品寿命越短产生的报废量越多。

3.2 讨论

(1) 与以往预测产品需求量和报废量的研究相比，本文对预测结果增加了不确定性分析，提高了结果的可靠性。例如，刘学敏和张晨阳对中国汽车报废量的研究表明，2025年我国汽车报废量将达到2095万辆/年^[26]，该结果在本文的预测范围之内——2025年我国汽车报废量将达到1000万~2295万辆/年。同时，《汽车产业中长期发展规划》中

预计2025年我国汽车产量将达到3500万辆,该规划结果也在本文的预测范围之内——2025年汽车需求量将达到2400万~8000万辆。此外, Li等^[27]预测2050年我国家电产品保有量(电冰箱、洗衣机、电视机和空调)将达到23.2亿~37.5亿台,该结果与本文预测结果相近(本文结果表明家电产品保有量将达到23.8亿~29.4亿台)。

(2) 本文结果表明,2050年汽车、船舶和家电中钢铁的理论报废量将超过理论需求量并达到1.14亿t/年。该结论与Pauliuk等^[11]对中国1900—2100年所有钢铁终端部门的报废量的估算结果一致,即中国在2050年左右可能会全面进入钢铁报废时代。这种发展趋势将促使钢铁行业大力落实循环经济策略,由以铁矿石等为原材料的生产工艺转向以废钢为原料的二次资源的生产工艺。但由于二次资源的质量较高,加之不同产品的废钢质量参差不齐,因此回收和利用报废的产品和材料可能需要更多成本和更复杂的技术。例如,回收的钢废料通常含有铜和锡,这可能导致材料再生产过程中的结构缺陷。此外,从对不同产品钢铁的存量和报废量的预测情景来看,人均产品保有量的大小对存量预测结果的影响较大,降低人均产品保有量,同时延长产品使用寿命,会降低产品报废量的产生。但在实际生活中,使得家庭或者个人降低终端消费品的保有量并非易事,例如随着经济水平的不断提高,越来越多的家庭偏好乘坐私家车出行。这就要求城市设计者在做规划时,激发人们选择公共交通出行方式的意愿,从而提高资源的利用效率,同时提高大众的环保意识,延长产品的服务年限,最终实现资源的可持续利用^[28-30]。

(3) 存量驱动的动态MFA模型中参数的取值会引起估算结果的不确定性。首先,理论报废量和理论需求量的不确定性主要来自产品平均寿命的取值。虽然相关研究结果表明,不同的服务年限模型(例如正态分布、韦伯分布函数等)不会造成理论报废量的巨大差异,但是产品的平均寿命作为服务年限模型的关键参数会对理论报废量的估算产生较大影响^[3,23]。例如,本文中家电产品的短寿命和长寿命情景对家电报废量的产生有较大影响,产品平均寿命取值越小,理论报废量的产生量就越大(图3);其次,产品中钢铁使用强度的取值会直接影响钢铁存量的估算结果。因此,本文根据文献资料^[19]将产品中的钢铁使用强度取值为一个变化区间(载客汽车中的钢铁使用强度为 2.1 ± 0.4 t/辆)从而估算钢铁存量的不确定性;最后,本文对未来钢铁存量的模拟并非是准确的预测,而是根据不同的情景模拟钢铁存量的变化趋势以及不确定性。在现实生活中,钢铁存量的变化受诸多因素影响,而对这些影响因素进行定量评估是一项复杂的内容。因此,在开展对未来存量和流量预测的工作中,丰富存量的驱动要素从而完善未来的情景假设是以后开展相关工作的重点。

参考文献(References):

- [1] 沈镭,张红丽,钟帅,等. 新时代下中国自然资源安全的战略思考. 自然资源学报, 2018, 33(5): 721-734. [SHEN L, ZHANG H L, ZHONG S, et al. Strategic thinking on the security of natural resources of China in the new era. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 721-734.]
- [2] 曾现来,闫晓宇,张宇平,等. 中国资源的进出口与产出率: 演化、挑战及对策. 自然资源学报, 2018, 33(4): 552-562. [ZENG X L, YAN X Y, ZHANG Y P, et al. Importation, exportation, and productivity of resources in China: Evolution, challenges, and solutions. Journal of Natural Resources, 2018, 33(4): 552-562.]
- [3] 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. 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. Beijing: Tsinghua University, 2010.]

- [4] BRUNNER P H, RECHBERGER H. Practical Handbook of Material Flow Analysis. New York: Lewis Publishers, 2003.
- [5] MÜLLER E, HILTY L M, WIDMER R, et al. Modeling metal stocks and flows: A review of dynamic material flow analysis methods. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(4): 2102-2113.
- [6] CHEN W Q, GRAEDEL T E. In-use product stocks link manufactured capital to natural capital. *Proceedings of the National Academy of Science*, 2015, 112(20): 6265-6270.
- [7] GRAEDEL T E, CAO J. Metal spectra as indicators of development. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(49): 20905-20910.
- [8] PAULIUK S, MÜLLER D B. The role of in-use stocks in the social metabolism and in climate change mitigation. *Global Environmental Change*, 2014, 24(1): 132-142.
- [9] MÜLLER D B, LIU G, LOVIK A N, et al. Carbon emissions of infrastructure development. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(20): 11739-11746.
- [10] PAULIUK S, WANG T, MÜLLER D B. Moving toward the circular economy: The role of stocks in the Chinese steel cycle. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(1): 148-154.
- [11] PAULIUK S, MILFORD R L, MÜLLER D B, et al. The steel scrap age. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(7): 3448-3454.
- [12] PAULIUK S, WANG T, MÜLLER D B. Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries. *Resources Conservation & Recycling*, 2013, 71(1): 22-30.
- [13] ALLWOOD J M, CULLEN J M, MILFORD R L. Options for achieving a 50% cut in industrial carbon emissions by 2050. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(6): 1888-1894.
- [14] World Steel Association. *Steel Statistical Yearbook 2016*. Brussels, Belgium: World Steel Committee on Economic, 2016.
- [15] WANG T, MÜLLER D B, HASHIMOTO S. The ferrous find: Counting iron and steel stocks in China's economy. *Journal of Industrial Ecology*, 2015, 19(5): 877-889.
- [16] HU M, PAULIUK S, WANG T, et al. Iron and steel in Chinese residential buildings: A dynamic analysis. *Resources Conservation & Recycling*, 2010, 54(9): 591-600.
- [17] CHEN W Q, GRAEDEL T E. Anthropogenic cycles of the elements: A critical review. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(16): 8574-8586.
- [18] CHEN W Q, GRAEDEL T E. Dynamic analysis of aluminum stocks and flows in the United States: 1900-2009. *Ecological Economics*, 2012, 81(5): 92-102.
- [19] 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. *Resources, Conservation and Recycling*, 2012, 65: 18-28.
- [20] 陈伟强, 石磊, 常阜宇, 等. 1991—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. *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. *Resources Science*, 2009, 31(11): 1887-1897.]
- [21] 陈伟强, 石磊, 钱易. 1991—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. *资源科学*, 2009, 31(12): 2120-2129. [CHEN W Q, SHI L, QIAN Y. Substance flow analysis of aluminum in China for 1991-2007(II): Quantity loss of aluminum from a perspective of life cycle and its policy implications. *Resources Science*, 2009, 31(11): 2120-2129.]
- [22] MÜLLER D B, WANG T, DUVAL B, et al. Exploring the engine of anthropogenic iron cycles. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(44): 16111-16116.
- [23] MELO M T. Statistical analysis of metal scrap generation: The case of aluminium in Germany. *Resources Conservation & Recycling*, 1999, 26(2): 91-113.
- [24] 国家统计局. *中国统计年鉴*. 北京: 中国统计出版社, 2017. [National Bureau of Statistics of China. *China Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2017.]
- [25] United Nations. *World Population Prospects 2017*. <https://esa.un.org/unpd/wpp/>.
- [26] 刘学敏, 张晨阳. 中国“城市矿产”开发潜力研究: 以报废汽车、家电、电子产品为例. *开发研究*, 2016, (4): 121-127.

- [LIU X M, ZHANG C Y. The development of urban mining potential in China: A case study of vehicles, household appliances, and electronic products . *Research on Development*, 2016, (4): 121-127.]
- [27] LI M, SHAN R, HERNANDEZ M, et al. Effects of population, urbanization, household size, and income on electric appliance adoption in the Chinese residential sector towards 2050. *Applied Energy*, 2019, 236(15): 293-306.
- [28] MODARESI R, PAULIUK S, LØVIK A N, et al. Global carbon benefits of material substitution in passenger cars until 2050 and the impact on the steel and aluminum industries. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(18): 10776-10784.
- [29] PAULIUK S, DHANIATI N M, MÜLLER D B. Reconciling sectoral abatement strategies with global climate targets: The case of the Chinese passenger vehicle fleet. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(1): 140-147.
- [30] FIELD F R, WALLINGTON T J, EVERSON M P, et al. Strategic materials in the automobile: A comprehensive assessment of strategic and minor metals use in passenger cars and light trucks. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(24): 14436-14444.

Stocks and flows of steel in automobiles, vessels and household appliances in China

SONG Lu-lu^{1,2}, CHEN Wei-qiang^{1,2,3}, DAI Min^{1,2,3}

(1. Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, CAS, Xiamen 361021, Fujian, China; 2. Xiamen Key Lab of Urban Metabolism, Xiamen 361021, Fujian, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Material flow analysis (MFA) characterizes and quantifies flows of materials into, out of, and through a socio-economic system of interest, balancing all flows by stocks. Stocks are the amount of concerned manufactured products and materials in active use. Flows refer to the inflow (demand) and outflow (scrap) of products or materials between different processes. Stocks are the driving force for the flows and circulation of substances in the socio-economic system. In this paper, we analyzed steel stocks and flows in automobiles, vessels, and household appliances in the past (1949-2018) and future (2019-2050) by using the dynamic stock-driven model. The results showed that: (1) Steel demand in three industries will be saturated or decreased after reaching its peak; (2) Steel scrap of the three industries will exceed demand after 2040, (3) There will be a large amount of steel scrap produced in automobiles (83 million tons/year), vessels (27 million tons/year), and household appliances (4 million tons/year) by 2050. The results of this paper are intended to provide policy implications for sustainable production and utilization of steel.

Keywords: steel; stocks; inflow; outflow; typical industry