

引用格式:宋璐璐,曹植,代敏.中国乘用车物质代谢与碳减排策略[J].资源科学,2021,43(3):501-512.[Song L L, Cao Z, Dai M. Material metabolism and carbon emission reduction strategies of passenger cars in China's mainland[J]. Resources Science, 2021, 43(3): 501-512.] DOI: 10.18402/resci.2021.03.07

中国乘用车物质代谢与碳减排策略

宋璐璐^{1,2}, 曹植³, 代敏^{1,4}

(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. 安特卫普大学可持续建筑与道路工程研究组, 比利时安特卫普 2020; 4. 复旦大学环境科学与工程系复旦丁铎尔中心, 上海 200438)

摘要:中国是全球最大的汽车制造和消费国,汽车行业带来的资源消耗和温室气体排放受到了学者的广泛关注。辨析汽车行业的物质资源代谢特征和碳减排潜力可为落实循环经济政策和实现可持续发展提供科学依据。本文基于动态物质流模型,预测了中国乘用车中21种物质材料的代谢特征,评估了乘用车使用过程中的碳减排潜力。研究结果表明:①1949—2019年中国乘用车中的物质存量呈现指数型增长趋势,由2.3万t增加至3.7亿t。2030年后物质存量逐渐饱和,并于2050年达到5.6亿~11.1亿t;②2050年乘用车中物质材料报废量将超过需求量并达到37.4百万~73.8百万t/年;其中,钢铁(包括高强度钢、普通钢和铁)报废量将达到21.2百万~42.4百万t/年;其他战略金属和稀贵金属报废量将达到36.8万~59.8万t/年;延长乘用车使用寿命以及较低的乘用车保有量可有效减少产废量;③提高汽油车的燃料效率是最有效的碳减排策略,其碳减排潜力高达3.3亿t,可降低40%的碳排放量。本文的研究结果可为汽车行业物质资源的有效管理以及碳减排策略的制定提供科学支撑。

关键词:物质资源代谢;存量;流量;乘用车;资源管理;碳减排;物质流分析;中国

DOI: 10.18402/resci.2021.03.07

1 引言

2015年9月25日,联合国193个成员国在纽约举行的联合国可持续发展首脑大会上通过并发布了可持续发展目标(SDGs),即《2030年可持续发展议程》。该议程包括17项可持续发展目标和169个具体目标,致力于从经济、社会和环境3个方面实现可持续发展^[1]。自SDGs提出以来,循环经济受到了全球学者和政府决策者的广泛关注。循环经济被认为是缓解环境与发展之间尖锐冲突的新型绿色经济发展模式,是实现可持续发展的重要途径^[2,3]。作为全球资源消耗第一大国,中国面临着经济增长和资源环境的双重压力,大力发展循环经济是缓解资源环境挑战和实现中国可持续发展的必然选择。

随着19世纪末以来汽车工业的迅速发展,汽车

逐渐成为人们日常生活的代步工具,为人类生活带来了巨大便利,随着汽车消费量的不断增加,汽车行业的资源消耗量引起了学者们的关注^[4-7]。例如,2005—2015年,全球汽车生产量达到7.5亿辆,约消耗了8亿t钢铁、2亿t橡胶、1.3亿t铝、1.1亿t塑料和0.3亿t玻璃^[5]。近年来,随着汽车制造行业高新技术的发展,除了以上这些大宗材料外,越来越多的新兴材料(包括稀土和稀贵金属等战略金属)被应用到发动机、传感器、电子设备等汽车部件中^[8,9]。作为不可再生的关键矿产资源,这些战略金属是国际争夺的重要战略资源,是发展新兴产业和国防科技工业不可或缺的物质材料。中国是全球最大的汽车及新能源车生产和消费国,汽车市场的消费潜力巨大^[10]。尽管目前已有学者对中国乘用车保有量

收稿日期:2020-10-09 修订日期:2020-12-01

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41801207);福建省科技计划对外合作项目(2018I0020);中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDB-SSW-DQC012)。

作者简介:宋璐璐,女,山西长治人,博士,副研究员,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

的未来发展趋势作了预测^[4],但由汽车需求量增长引起的物质资源(包括大宗材料和战略金属等)需求变化的研究鲜有开展。定量核算该行业物质资源的需求量和报废量可为行业的资源供需平衡提供数据基础,同时也为保障国家经济安全、促进产业发展、推动循环经济、提升社会效益提供抓手。

交通行业是全球能源消耗和温室气体排放的重要部门。国际能源署(International Energy Agency, IEA)的研究报告指出,2019年交通行业的CO₂直接排放量占全球CO₂排放总量的24%,其中乘用车的CO₂直接排放量在交通部门的占比高达50%^[11]。在乘用车使用过程中,其燃料使用所导致的CO₂排放量占其全生命周期CO₂排放量的68%~75%^[10]。可见,乘用车在燃料使用阶段的碳减排潜力最大。因此,定量核算乘用车在使用阶段的碳减排潜力、识别相关的碳减排策略是实现汽车行业“零排放”的重要前提^[7]。

物质流分析是一种根据质量守恒定律定量评估具有时空边界的社会-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^[12-14]。该方法不但能够定量刻画物质在“开采—制造—使用—报废—最终处置”阶段的代谢过程,而且可以精细描述不同的物质在生产与消费过程中的耦合与冲突关系^[12,14]。近年来,物质流分析常被用于探讨人类制造资本(社会经济系统

中的物质存量)的未来发展趋势,以及在不同的发展路径下,未来再生资源的利用潜力、原生资源的需求及其与产能配合的发展趋势^[5,15]。物质流分析方法是解析社会经济代谢过程的重要研究方法。

本文以中国乘用车及其21种物质材料为研究对象,基于物质流分析方法,预测了乘用车及其物质材料的存量和流量未来发展情景,分析了乘用车在使用阶段的碳减排潜力。本文所构建的物质代谢模型可推广应用于国家尺度上其他行业及其不同材料的存量和流量分析中。基于该模型所获得的估算结果可为促进物质资源的循环利用提供科学依据。

2 核算模型构建

2.1 系统边界

本文以乘用车(主要包括小型/微型载客汽车,占载客汽车总量的95%以上)及其主要物质材料(包括普通钢、高强钢、铁、铝、铜、塑料、橡胶、玻璃等21种物质)为研究对象(表1),构建了乘用车在“生产—使用—报废”阶段的产品和物质代谢模型,定量核算了不同阶段物质材料的存量和流量;同时,基于未来不同的乘用车保有量情景预测了乘用车使用过程中的碳排放变化趋势,识别了汽车行业未来的碳减排策略。模型核算的系统边界为不包括港澳台地区在内的中华人民共和国全境,时间边界为1949—2050年(图1)。

表1 乘用车物质使用强度情景设置

Table 1 Parameters for material content of passenger cars under different scenarios

序号	材料	使用强度/(kg/辆)			序号	材料	使用强度/(g/辆)		
		基准情景	低轻量化	高轻量化			基准情景	低轻量化	高轻量化
1	普通钢(Steel)	451	100	—	11	镁(Mg)	3000	3000	3000
2	高强钢(HSS)	250	339	424	12	钽(Nb)	100	100	100
3	铁(Fe)	77	77	77	13	镍(Ni)	2200	2200	2200
4	铝(Al)	180	250	200	14	锡(Sn)	530	530	530
5	铜(Copper)	31	31	31	15	轻稀土(LREE)	76	76	76
6	塑料(Plastic)	230	230	230	16	重稀土(HREE)	6	6	6
7	橡胶(Rubber)	41	41	41	17	钴(Co)	42	42	42
8	玻璃(Glass)	53	53	53	18	银(Ag)	17	17	17
9	其他材料(Misc)	43	43	43	19	钨(W)	10	10	10
10	锰(Mn)	7.5	7.5	7.5	20	钽(Ta)	6	6	6
					21	金(Au)	2	2	2

注:表中普通钢、高强钢和铝的使用强度参考Wang等^[18]和《节能与新能源汽车技术路线图2.0》^[19];其他物质和金属的使用强度参考Field等^[20]对乘用车材料强度的调研数据。

2021年3月

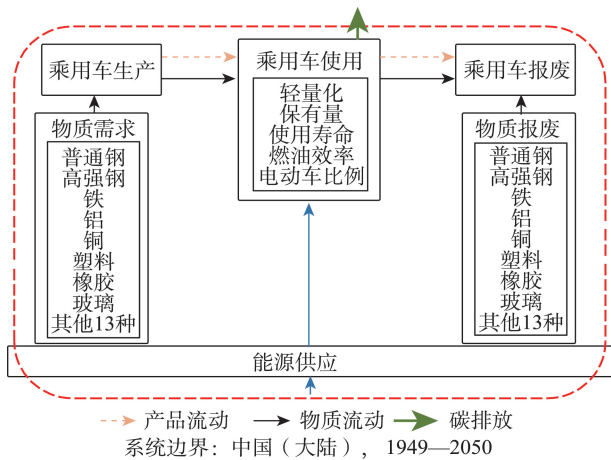


图1 1949—2050年乘用车物质代谢和碳排放核算模型

Figure 1 Dynamic model for the estimation of material metabolism and direct carbon emissions of passenger cars in China's mainland, 1949-2050

2.2 核算模型过程识别

2.2.1 乘用车保有量

乘用车保有量的估算分为两个阶段:过去(1949—2019年)和未来(2020—2050年)。1949—2019年乘用车保有量数据源自《中国统计年鉴》^[16]。2020—2050年的乘用车保有量(S)由未来第 t 年的人口数量(P)和第 t 年的乘用车保有率(c)估算所得^[4,17]:

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

本文根据Pauliuk等^[4]对中国乘用车的研究模型假设:乘用车保有量在2050年达到饱和并将其饱和水平(即2050年的取值)设置为高、中、低3种情景,并用Logistic方程模拟保有率在2020—2050年的变化趋势:

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

式中: $c(t)$ 为第 t 年的乘用车保有率; c_0 是 t_0 年(2019年)的乘用车保有率; d_0 是 t_0 年保有率的初始变化率; N 为乘用车保有率的饱和水平。

2.2.2 乘用车需求量和报废量

在物质流分析中,产品达到服务年限后会产生报废量(F_{out}),而新投入使用的产品称之为需求量(F_{in})。基于产品的服务年限模型(正态分布模型, $\lambda(t, t', \tau, \sigma)$),乘用车理论报废量、需求量和保有量

之间的关系如下^[17]:

$$F_{out}(t) = \sum_{i \leq t} F_{in}(t_0) \times \lambda(t, t', \tau, \sigma) \quad (3)$$

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

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

式中: F_{out} 为第 t 年乘用车的理论报废量; F_{in} 为第 t 年乘用车的理论需求量; S_t 、 S_{t-1} 分别为第 t 、 $t-1$ 年乘用车的在用存量; t' 为1949年; τ 为产品的平均使用寿命; σ 为使用寿命的标准差。

2.2.3 物质存量

本文利用自下而上法估算了乘用车中21种物质材料(表1)的存量,该方法依赖于研究系统内部工业终端产品的数量以及相应物质材料在产品中使用强度的确定:

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

式中: $M(t)$ 为第 t 年的物质存量; $I(t)$ 为第 t 年乘用车中物质的使用强度; $S(t)$ 为第 t 年的乘用车保有量。

本文假设1949—2019年21种物质材料的使用强度不变;2020—2050年乘用车中的普通钢、高强度钢和铝的使用强度随着汽车轻量化技术的变革而变化,其他物质的使用强度保持不变^[5,10](表1)。

2.2.4 物质理论报废量

第 t 年的物质理论需求量($M_{in}(t)$)和理论报废量($M_{out}(t)$)可以根据公式(6)以及乘用车的理论需求量(F_{in})和理论报废量(F_{out})获得:

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

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

2.2.5 碳排放量核算

乘用车使用过程中的碳排放量为燃油车数量与年平均行驶里程、燃油效率、燃料的能量密度和碳排放强度之积(公式(9))^[4]。

$$G(t) = S(t) \times (1 - T) \times K(t) \times F(t) \times U \times V \quad (9)$$

式中: $G(t)$ 为第 t 年的CO₂排放量(亿t); T 为纯电动车比例(%); $K(t)$ 为第 t 年平均行驶里程(km/年); $F(t)$ 为第 t 年的燃料效率(L/100km); U 为燃料的能量密度(33.3 MJ/L); V 为燃料的碳强度(70 g/MJ)。

纯电动车比例(T)的变化趋势用余弦函数进行模拟^[4]:

$$T(t) = \frac{(\hat{T} - T_0)}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{\pi(t - t_0)}{t_1 - t_0} \right) \right] + T_0 \quad (10)$$

式中: T_0 为2019年纯电动车比例; \hat{T} 为饱和比例; t_0 为初始年份(2019年); t_1 为达到饱和值时的年份。

行驶里程($K(t)$)的变化趋势用幂函数进行模拟^[4]:

$$K(t) = (K_1 - K_2) \left(\frac{t - t_1}{t_0 - t_1} \right)^{\left(\frac{dK_1(t_0 - t_1)}{K_1 - K_2} \right)} + K_2 \quad (11)$$

式中: K_1 为初始行驶里程; K_2 为饱和值; dK_1 为变化速率。

2.3 模型参数设置

人口(P): 1949—2019年的全国人口数量取自《中国统计年鉴》^[16]; 2020—2050年的全国人口数量取自联合国2017年的预测数据^[21]。联合国对于未来人口给出了3种发展情景,即到2050年中国人口最低为12.3亿、中等水平为13.6亿、最高可达15.1亿。

乘用车保有率(c): 未来乘用车保有率的饱和水平(N)根据文献调研^[4]以及专家走访等手段确定,即到2050年中国乘用车保有率为300辆/1000人(低保有率情景)、450辆/1000人(基准情景)、600辆/1000人(高保有率情景)。2020—2049年各年的乘用车保有率由公式(2)拟合所得,其中 d_0 为2019年变化率(18.8), c_0 为2019年私家车保有率(70辆/1000人)。

乘用车平均寿命(τ): 根据文献调研^[4,22]结果,本文将私家车的平均使用寿命设定为高(18年)、中(15年)和低(12年)3个情景。

寿命标准差(σ): 寿命的标准差取值为平均寿命的40%^[4,22],因此3种寿命情景对应的标准差分别为7.2、6.0和4.8。

物质使用强度(I): 1949—2019年乘用车中物质使用强度取自Wang等^[18]和Field等^[20]对乘用车材料强度的调研数据(表1);《节能与新能源汽车技术路线图2.0》^[19]中指出,汽车将加大车身、底盘和动力系统等部分的轻量化设计,加大高强度钢、铝合金等轻量化材料在汽车部件的应用。因此,本文假设2020—2050年高强度钢、普通钢和铝的使用强度会因轻量化技术而发生改变,具体的参数设置参照《中国汽车低碳行动计划研究报告2020》^[10]。高强度钢、普通钢和铝使用强度的变化过程参照Modaresi等^[5]

对全球乘用车轻量化发展模式的设置,即假设2020—2030年高强度钢、普通钢和铝的使用强度经过线性插值达到轻量化强度值,2031—2050年使用强度保持不变。

纯电动车比例(T):《中国汽车低碳行动计划研究报告2020》中指出,2019年中国乘用车中纯电动车的比例为0.9%。本文假设在现行政策推动下,纯电动车比例于2050年达到35%(基准情景),在高电动车比例情景中可达到55%^[10]。2020—2050年的纯电动车比例的变化趋势按照余弦函数曲线进行模拟(公式(10))。

燃料效率(F): 汽车制造商一直将提高燃料效率作为行业的技术研发重点。2019年中国乘用车的平均燃料效率为7.2 L/100 km^[10]。因此,本文的基准情景假设1949—2050年燃料效率没有变化。高燃料效率情景的设置参照《中国汽车低碳行动计划研究报告2020》,即2030—2050年燃料效率可提高至4.8 L/100 km(较高燃油率,未在文中讨论)或4.5 L/100 km(高燃料效率)。2019—2030年的燃料效率变化趋势利用余弦函数进行模拟(公式(10))。

行驶里程(K): 以往研究指出,2002年中国乘用车的平均行驶里程是2.6万 km/年^[4]。因此,本文假设1949—2002年中国乘用车平均行驶里程是2.6万 km/年。2003年后,中国乘用车平均行驶里程与发达国家逐步接近,并于2050年达到1.3万 km/年(基准情景)和1.2万 km/年(少行驶公里情景)。2003—2050年的行驶里程变化趋势利用幂函数进行模拟(公式(11))。

物质材料代谢以及产品使用阶段的碳排放情景预测的参数设置详见表2。

3 结果与分析

3.1 乘用车存量和流量

1949—2019年中国乘用车数量呈现指数型增长趋势,由1.6万辆增长至2.1亿辆,增长了约130倍,年均增长率为15%。1949—1990年中国乘用车保有量增速缓慢,年均增长率仅为12%;1990—2019年乘用车数量增长迅速,年均增长率高达23%,尤其是2001年中国正式加入WTO之后,随着家庭年收入的不断增加和“鼓励轿车进入家庭”政策的实施,乘用车的保有量进入了高速增长阶段。2019年中国人均乘用车保有量达到70辆/1000人。

2021年3月

表2 未来不同发展情景的参数设置

Table 2 Parameters for future scenario analysis

核算指标	情景设置	参数设置						
		P /亿	c /(辆/1000人)	τ /年	I /(t/辆)	F /(L/100 km)	T %	K /(km/年)
产品/物质代谢核算情景	基准情景	13.6	450	15	451/250/180	—	—	—
	少人口	12.3	450	15	451/250/180	—	—	—
	多人口	15.1	450	15	451/250/180	—	—	—
	低保有量	13.6	300	15	451/250/180	—	—	—
	高保有量	13.6	600	15	451/250/180	—	—	—
	短寿命	13.6	450	12	451/250/180	—	—	—
	长寿命	13.6	450	18	451/250/180	—	—	—
	低轻量化	13.6	450	15	100/339/250	—	—	—
	高轻量化	13.6	450	15	—/424/200	—	—	—
	最小值	12.3	300	18	451/250/180	—	—	—
	最大值	13.6	600	12	451/250/180	—	—	—
碳排放核算情景	高燃油效率	13.6	450	—	—	4.5	35	13000
	高电动车比例	13.6	450	—	—	4.5	55	13000
	少行驶里程	13.6	450	—	—	4.5	55	12000
	低保有量	13.6	300	—	—	4.5	55	12000
	少人口	12.3	300	—	—	4.5	55	12000

注:表中物质使用强度(I)数值分别对应普通钢/高强钢/铝的使用强度的变化,其他物质材料的使用强度保持不变(参见表1)。

然而,与发达国家乘用车的保有量相比(例如美国乘用车保有量为800辆/1000人,日本为450辆/1000人,韩国为400辆/1000人)^[4],中国的保有量水平相对较低,未来汽车市场的消费潜力巨大(图2)。

2020—2030年中国乘用车数量将稳步增长,随着未来人口的下降,2030年后乘用车数量增速变缓,并在2040年左右达到饱和,此后,乘用车数量将略有下降,2050年中国乘用车保有量将达到6.1亿

辆(基准情景),最低为3.7亿辆(少人口+低保有量情景),最高可达到9.0亿辆(多人口+高保有量情景)(图3a)。乘用车保有量的增速决定了需求量的发展趋势,当乘用车保有量增速最大时,需求量则达到最高水平。估算结果表明,乘用车需求量将在2022年左右达峰(0.3亿~0.6亿辆/年)后呈现下降趋势,2050年全国乘用车需求量将稳定在0.3亿辆/年(图3b)。与需求量的发展曲线不同,乘用车的报废量呈现S型发展趋势。由于乘用车被大规模使用的时间较晚,目前乘用车仍然未达到大规模报废的阶段。2025年后,报废车数量将逐年增加,并在2040年超过乘用车需求量,2050年,报废车数量将达到27.3百万~74.2百万辆/年(图3b)。面对即将到来的报废汽车数量急剧增加的挑战,中国报废汽车回收行业的规模还需不断壮大,同时需要引进先进的拆解工艺和设备以促进行业的市场化和规范化发展。

3.2 物质材料的存量和流量

1949—1990年乘用车中的物质存量由2.3万t增加至204.3万t,增长了近90倍。1990—2019年乘用车中的物质存量增速加快,并于2019年达到3.7亿t,30年间增长了约180倍。普通钢、高强钢、铁、塑料、铝、橡胶、玻璃、铜以及其他碎料占总存量的

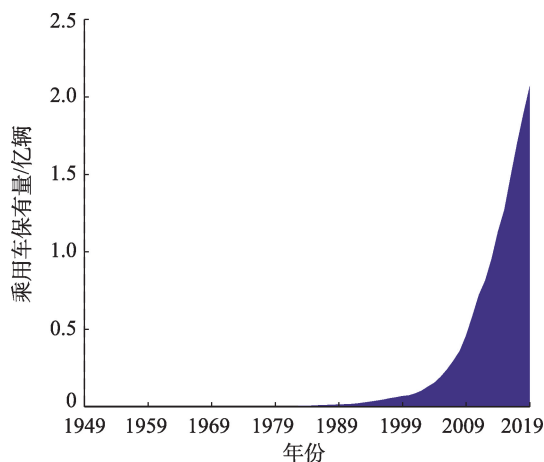


图2 1949—2019年全国乘用车保有量变化趋势

Figure 2 Passenger cars in China's mainland, 1949-2019

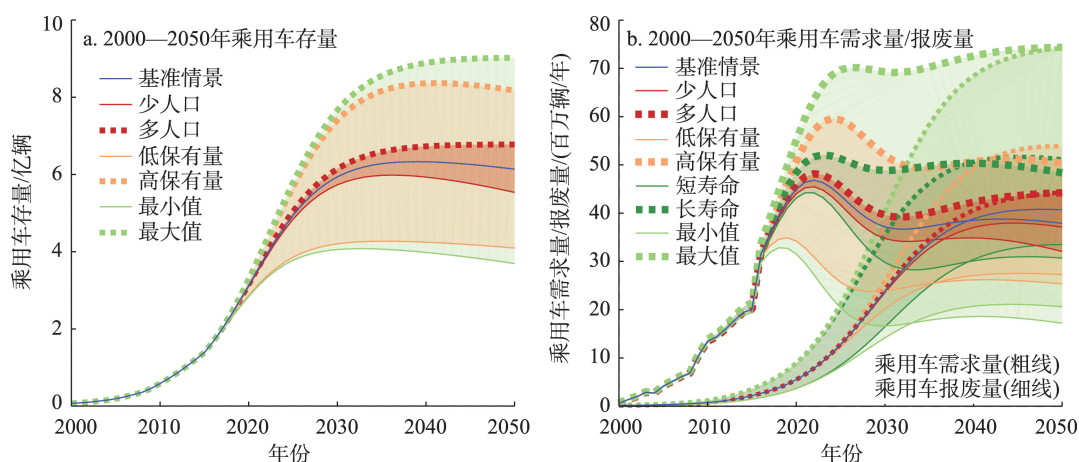


图3 2000—2050年乘用车存量(a)、需求量和报废量(b)发展情景

Figure 3 Stocks (a) and demand and scrap (b) of passenger cars in China's mainland, 2000-2050

99%,其他12种金属的存量仅占1%。2019年钢铁(包括普通钢、高强钢和铁)的存量高达1.9亿t,超过总物质存量的50%,塑料和铝的存量紧随其后,分别达到0.6亿t和0.5亿t(图4)。尽管近年来中国乘用车的平均重量和平均材料构成比例存在些许变化^[10],例如,整车平均重量从1.3 t增加至1.5 t,其中高强钢的比例从14%提高至17%,而普通钢的比例从41%降低至31%,但是钢铁仍然是汽车制造行业的重要组成材料,可以预见随着未来汽车消费市场的不断扩大,汽车行业对钢铁等原材料的需求量也会持续增加。

2020—2040年,乘用车中的物质存量经过快速增加趋近饱和。2050年物质存量达到8.4亿t(基准

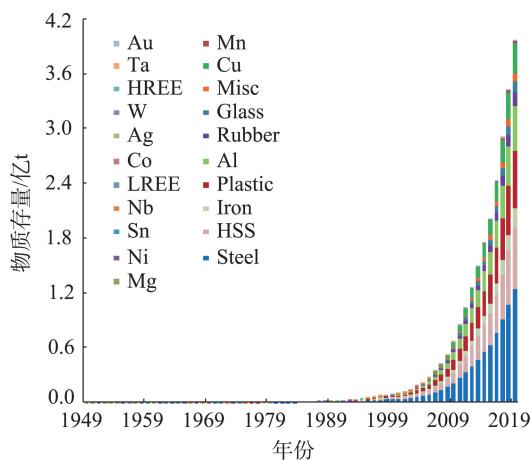


图4 1949—2019年全国乘用车物质存量变化趋势

Figure 4 Material stocks in passenger cars in China's mainland, 1949-2019

情景),最高可达11.1亿t(最大保有量情景),最低为5.6亿t(最小保有量情景)(图5a)。与乘用车需求量的变化趋势一致,2000年后乘用车中物质的需求量也会呈现逐年递增的趋势,并在2022年左右达到峰值(44.1百万~75.7百万t/年),此后略有下降,于2050年保持在34.8百万~69.2百万t/年。乘用车中的物质报废量呈现逐年递增的趋势。2040年物质报废量超过需求量。2050年物质材料的报废量将达到37.4百万~73.8百万t/年,基准情景为55.7百万t/年(图5b)。从研究结果可以看出,低乘用车保有量、较少的人口数量、轻车身重量以及长使用寿命可有效减少乘用车的产废量和对原材料的需求量。因此,引导家庭或个人对汽车的合理消费、促进共享汽车的发展模式以及推动汽车行业的轻量化技术革新可有效缓解汽车消费所带来的资源供需压力。

我们进一步分析了乘用车中使用量最大的4种材料(普通钢、高强钢、塑料和铝)存量、需求量和报废量的变化趋势。基于未来乘用车中材料的不同替代情景来看(普通钢被高强度钢和铝替代),2050年高强钢存量将达到1.0亿~2.6亿t(基准情景为1.5亿t),占有物质材料的18%;普通钢存量将达到0~3.6亿t(基准情景为2.8亿t);铝存量将达到0.7亿~1.5亿t(基准情景为1.1亿t);塑料存量将达到0.9亿~1.9亿t(基准情景为1.4亿t)。2050年,乘用车轻量化会增加高强钢和铝的需求量,其中高强钢的需求量将达到12.8百万~16.1百万t/年,比基准情景高

2021年3月

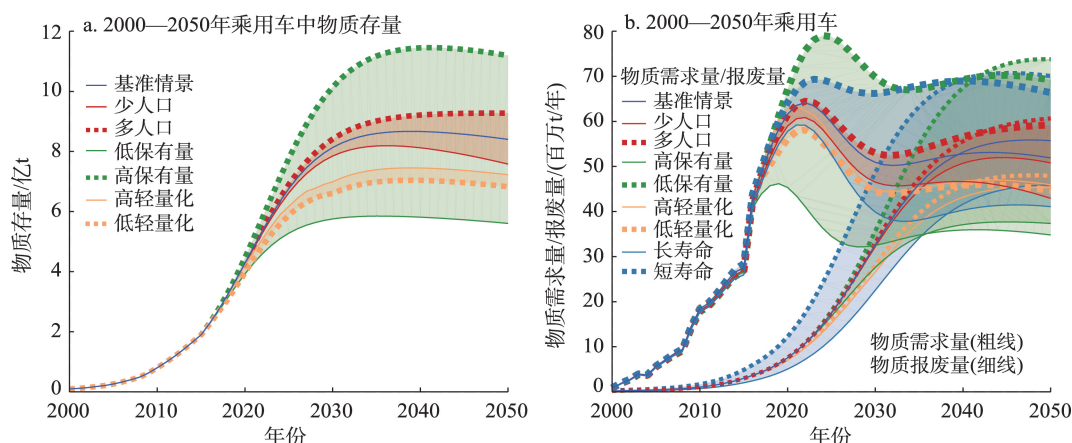


图5 2000—2050年乘用车中物质存量(a)、需求量和报废量(b)

Figure 5 Material stocks (a) and demand and scrap (b) in passenger cars in China's mainland, 2000-2050

3.4百万~6.6百万t/年;铝的需求量将达到7.6百万~9.5百万t/年,比基准情景高0.8百万~2.7百万t/年。同时,乘用车轻量化会降低普通钢的需求量,当2030年普通钢完全被高强钢替代后,普通钢的需求量则变为0。乘用车中其他物质的需求量与报废量的变化趋势与塑料一致,即延长乘用车的使用寿命和降低保有量可减少物质资源的需求量和报废量。例如,与基准情景相比,低保有量情景中塑料的需求量可降低33%(图6)。总体来看,低保有量水平、少人口和长使用寿命可有效降低普通钢、高强钢、铝和塑料的需求量和报废量。需要特别指出的是,尽管乘用车轻量化会降低普通钢的消耗,但同时会增加对高强钢和铝的消耗,因此未来研究需聚焦于乘用车全生命周期的环境影响评价,尤其是针对轻量化情景下不同材料替代所带来的资源环境效应作定量化评估,以期对汽车行业相关管理政策的制定提供科学依据。

除了以上大宗金属和物质以外,其他金属尤其是战略金属和稀贵金属也被汽车制造行业广泛应用。这些金属的用量虽然不多(对比钢铁来说),但对于新能源汽车的生产制造具有举足轻重的作用,例如,钕(钕铁硼磁体)被广泛用于汽车电动机中,具有高供应风险和经济重要性。2050年,乘用车中钕的存量达到将4.1万~8.2万t,轻稀土存量将达到3.1万~6.2万t,钴存量将达到1.7万~3.4万t,重稀土的存量将达到0.2万~0.5万t。随着乘用车报废量的增加,乘用车中战略金属和稀贵金属的报废量将在2040年左右超过需求量。届时,钕的报废量将达到

0.3万~0.5万t/年,轻稀土的报废量将达到0.2万~0.4万t/年,钴的报废量将达到0.1万~0.2万t/年(图7)。可以看出,未来乘用车中的战略金属和稀贵金属具有较高的回收潜力,但是目前从报废产品中收集、提取和分离相关金属仍然具有较大挑战。虽然日本、德国和法国已经研发出了从报废磁体中回收稀土元素的工艺流程^[5],但回收工艺的推广和应用需兼顾回收成本及其对生态环境的影响。

3.3 碳减排潜力预测

2000年之前中国乘用车在其使用阶段的碳排放量逐年增加,并于2000年达到0.3亿t。2000—2030年随着乘用车保有量的快速增加,乘用车使用阶段的碳排放量呈现指数型增长趋势。在现有政策推动下(基准情景),中国乘用车的碳排放量将在2028年左右达到峰值(10.2亿t)后逐渐减小,并在2050年降低为8.7亿t,该情景下乘用车碳排放量的变化趋势主要是由人口的发展趋势所决定,即根据联合国的未来人口预测趋势表明中国人口将在2028年左右达到峰值(约14.5亿人)后,持续下降至2050年的13.6亿人^[21]。

比对基准情景,本文识别了5种不同的减排策略,即燃油效率的提高、电动车市场比例的增加、乘用车行驶里程的减少、保有量的降低和人口的持续减少。在5种不同的减排策略中,提高燃油效率、降低保有量和提高电动车比例的碳减排潜力较大。其中,提高汽油车燃料效率的减排潜力最大,2050年可降低40%的碳排放量(约为3.3亿t);其次是降低乘用车保有量,其减排潜力可达到2.6亿t,可降低

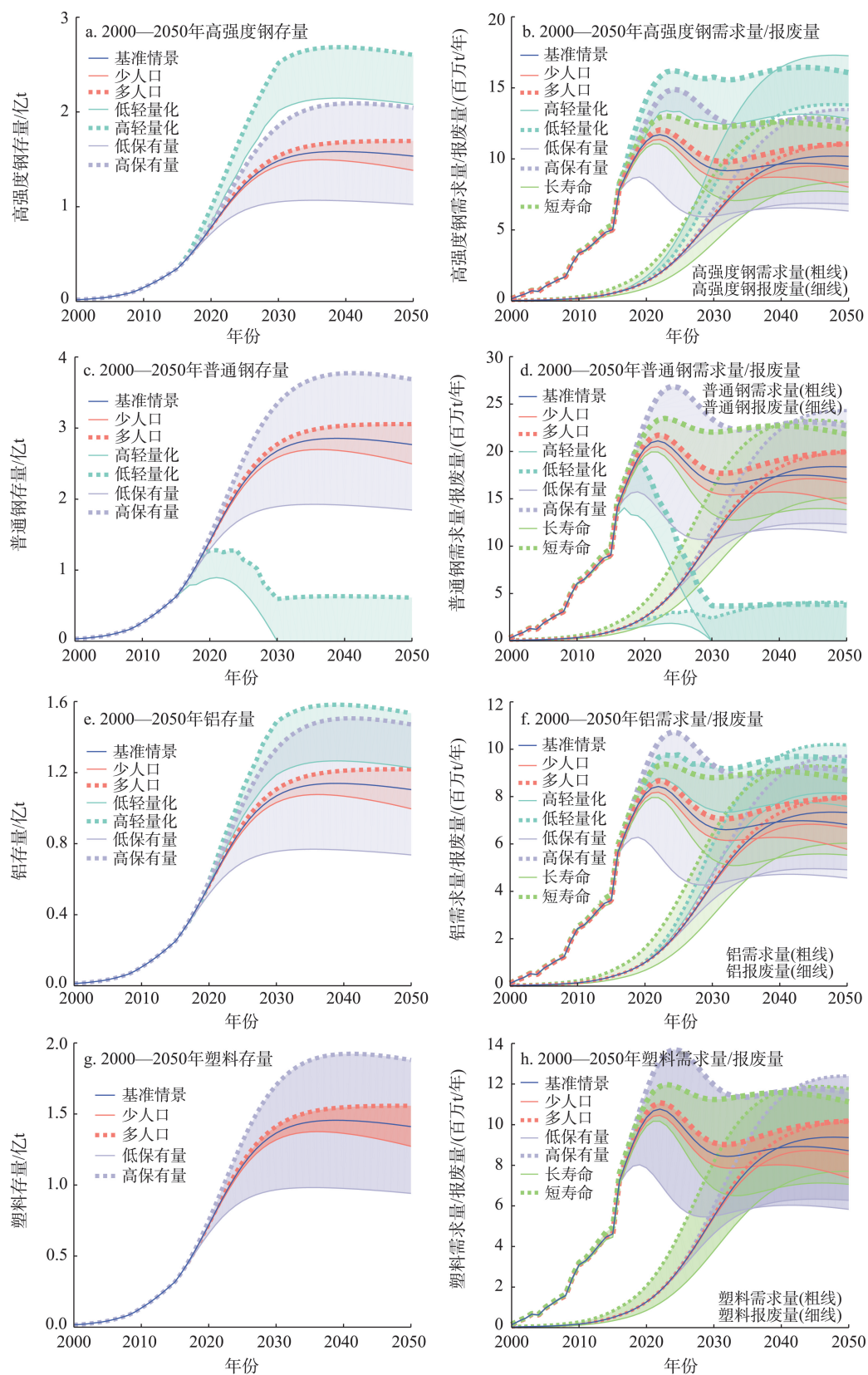


图6 2000—2050年乘用车高强钢(a、b)、普通钢(c、d)、铝(e、f)和塑料(g、h)的存量、需求量和报废量

Figure 6 Stocks and demand and scrap of high-strength steel (HSS) (a, b), steel (c, d), aluminum (e, f), and plastics (g, h) of passenger cars in China's mainland, 2000-2050

2021年3月

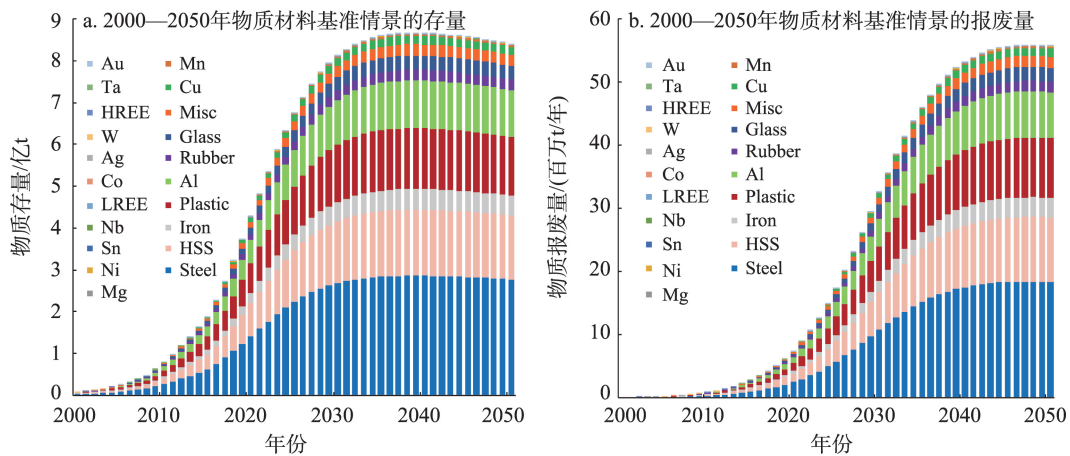


图7 2000—2050年乘用车中21种物质材料基准情景的存量(a)和报废量(b)

Figure 7 Stocks (a) and scrap (b) of different materials in passenger cars in China's mainland under the base scenario, 2000-2050

29%的碳排放量;最后,提高纯电动车比例的减排潜力为1.7亿t,可减少19%的碳排放量。若2050年所有减排策略能够有效实施,即未来燃油效率有效提高、纯电动车的市场比例提升、乘用车行驶里程减少、乘用车保有量减少以及人口数量的不断降低,乘用车使用阶段的碳排放量可降低至0.4亿t,与现有政策情景相比可减小95%(图8)。中国是全球最大的CO₂排放国,汽车行业是中国CO₂排放增长最快的领域之一,汽车行业的碳减排对于中国实现碳中和目标至关重要^[11]。为了履行中国碳减排承诺,降低汽车行业的碳排放,中国需继续开展乘用车碳排放管理政策的研究,推进汽车行业相关标准的实施,助力2030年碳排放达峰目标的实现^[10]。

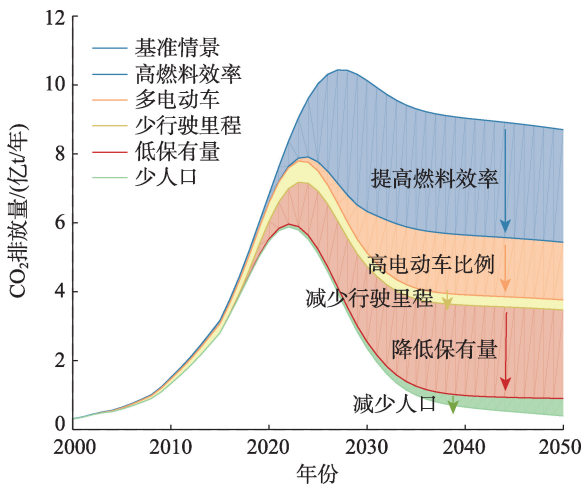


图8 2000—2050年乘用车使用阶段的碳排放量

Figure 8 Direct CO₂ emissions of passenger cars in China's mainland, 2000-2050

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文以动态物质流为基础,对产品及其不同物质材料需求量和报废量的未来发展趋势进行了模拟,同时评估了产品使用阶段的碳减排潜力。在核算过程中仍然存在一些需要完善的地方以增加估算结果的准确性。首先,物质材料的使用强度会直接影响存量的估算结果。由于乘用车中不同物质材料的使用强度会随着车辆的品牌、生产年份、排量、燃油种类与乘坐人数等因素的不同发生很大变化^[18,20]。因此,在未来工作中有必要根据产品的种类和规格确定物质材料的使用强度,从而降低估算结果的不确定性;其次,产品的平均寿命作为服务年限模型的关键参数会对报废量的估算结果产生较大影响^[4,23,24]。不同产品的平均寿命会随着地区以及年代的不同而发生变化。产品平均寿命取值越小,报废量的产生量就越大(图5)。然而,要获取产品不同年代、不同地区、不同品牌平均寿命的精确数值几乎是不可能的,因此,在核算产品报废量时,研究者可对产品的平均寿命增加多种假设从而确定报废量的取值区间。

产品及其物质材料的未来发展趋势受诸多因素的影响,而对这些影响因素进行定量评估是一项复杂的工作^[4,25]。因此,本文对产品及其物质材料的预测模拟并非是准确的核算,而是根据不同的情景假设估算的一种变化趋势。需要指出的是,在对未来的预测中,我们所考虑的情景还是非常有限的。

例如,在社会经济系统中,乘用车的保有量不仅仅受到人口数量和人均保有量的驱动,其他要素,例如人均购买力、道路长度和公共交通水平等要素,都会影响乘用车的社会保有量。因此,丰富乘用车保有量的驱动要素从而完善未来情景预测是今后开展产品尺度核算物质代谢的工作重点。

本文的研究结果可用于追踪乘用车中不同物质材料的需求量和报废量,可助力汽车制造加工企业确定物质资源的供需状况。例如,研究结果指出,乘用车中轻稀土的需求量/报废量将在2050年达到0.2万~0.4万t/年,存量将达到3.1万~6.2万t。稀土作为不可再生的关键矿产资源,是改造传统产业、发展新兴产业及国防科技工业不可或缺的“新材料之母”,是国际争夺的重要战略资源。随着新兴技术越来越复杂,稀土元素被应用得也越来越广泛。从全生命周期的视角出发,提高汽车行业资源的利用效率、降低环境污染、提高资源再生潜力是保障中国资源安全不可忽视的内容,也是未来汽车行业物质资源供应的研究方向。此外,本文的结论与Pauliuk等^[4,22]对中国2000—2050年乘用车报废量的估算结果一致,即乘用车中物质材料的需求量在2022年左右达到峰值,物质材料的报废量则会在2040年超过原生资源的需求量,并在2050年达到37.4百万~73.8百万t/年,中国将在2050年左右全面迎来废料再生产时代。届时,相关汽车制造加工企业可能需要关闭原生资源的生产加工链条转向正生资源的回收和再生产链条。此外,由于再生资源的质量较高,如何高效回收和利用报废资源可能是未来汽车加工制造企业需要关注的重点^[22,25]。

未来乘用车保有量的增长情景反映了中国赶超西方发达国家的生活愿景,同时也反映了由依赖对石油的进口向高燃油效率、低碳排放的生活方式的转变,这种转变将极大地降低交通部门的碳排放,有利于社会的可持续发展。但需指出的是,目前没有公认的确切的乘用车的最低燃油效率,但对于生活中常用的乘用车来说,未来达到3 L/100km的燃油效率还是极有可能的^[19]。根据本文的预测结果,减少汽车拥有量将极大地降低碳排放量。但在实际生活中,使得家庭或者个人降低乘用车的保有量并非易事,尤其是随着经济水平的提高,越来越

多的家庭偏好私家车出行等生活方式。此外,根据联合国对中国人口发展趋势的预测,即2050年中国人口将减少至12.3亿,本文结果表明,未来由人口数量减少所导致的碳减排潜力较小,仅为5%。因此,提高燃料效率、增加纯电动比例以及减少行驶里程将是更加有效的碳减排方式。中国快速的城市化进程决定了未来将有更多的人口生活在城市中^[26],而现在的城市结构和交通系统模式将“锁定”未来人们的消费模式^[27,28]。因此,政府管理者以及规划者应充分考虑城市交通基础设施的布局 and 规划,例如合理构建生活和工作中心,建立高效的公共交通系统从而有效降低人们购买私家车的意愿。此外,本文中碳减排潜力和减排策略的评估只限于乘用车的使用过程,未来的研究工作应聚焦于乘用车(包括新能源车)物质代谢过程中隐含碳排放的核算,以期为汽车全生命周期碳减排策略的制定提供数据支持。

4.2 结论

本文基于动态物质流模型,以中国乘用车为例,预测了乘用车及其物质材料需求量和报废量的发展趋势,评估了乘用车使用过程中的碳减排潜力。主要结论如下:

(1)中国乘用车保有量呈现“快速增加—逐渐饱和”的发展模式:1949—2019年随着居民消费水平的提高,中国乘用车数量呈现指数型增长模式。2030年后乘用车数量增速变缓,并在2040年左右达到饱和。2050年中国报废车数量将超过乘用车需求量,并达到0.3亿~0.7亿辆/年,届时,汽车制造加工企业可能需要由原生资源的生产制造转向再生资源的回收和再生产制造。

(2)未来乘用车中物质材料报废量将快速增加。乘用车中物质材料的报废量将在2040年后超过原生资源的需求量,并于2050年达到37.4百万~73.8百万t/年。其中,钢铁(包括高强钢、普通钢和铁)报废量将达到21.2百万~42.4百万t/年;其他战略金属和稀贵金属报废量将达到36.8万~59.8万t/年。降低人均保有量、减少人口、增加乘用车轻量化和延长使用寿命可有效减少乘用车的产废量。需要特别指出的是,尽管乘用车轻量化会降低普通钢的消耗,但同时会增加对高强钢和铝的消耗。

(3)提高汽油车燃油效率是最有效的减排策

2021年3月

略。在现有政策推动下,乘用车在使用过程中的碳排放量将在2028年左右达到峰值(10.2亿t)后逐渐减小,并在2050年降为8.7亿t。提高燃料效率、增加纯电动车比例、减少行驶里程、降低乘用车保有量以及减少人口等减排策略可减少95%碳排放量。其中,提高汽油车的燃料效率是最有效的减排策略,其减排潜力可达到3.3亿t,可降低40%的碳排放量;降低乘用车保有量的减排潜力仅次于提高燃料效率,其减排潜力可达到2.6亿t。

参考文献(References):

- [1] United Nations General Assembly. United Nations Resolution A/RES/70/1[R]. New York: United Nations General Assembly, 2015.
- [2] 王秋蓉, 温宗国. 循环经济是推进可持续发展的强大引擎: 访清华大学环境学院教授、循环经济产业研究中心主任温宗国[J]. 可持续发展经济导刊, 2019, (12): 35-38. [Wang Q R, Wen Z G. Circular economy is a powerful engine to promote sustainable development: Interview with Wen Zongguo, professor of the School of Environment of Tsinghua University and director of the Circular Economy Industry Research Center[J]. China Sustainability Tribune, 2019, (12): 35-38.]
- [3] 沈丽娜, 马俊杰. 国内外城市物质代谢研究进展[J]. 资源科学, 2015, 37(10): 1941-1952. [Shen L N, Ma J J. Progress on metabolism of cities[J]. Resources Science, 2015, 37(10): 1941-1952.]
- [4] Pauliuk S, Dhaniati N M, Müller D B. Reconciling sectoral abatement strategies with global climate targets: The case of the Chinese passenger vehicle fleet[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(1): 140-147.
- [5] Modaresi R, Pauliuk S, Løvik AN, et al. Global carbon benefits of material substitution in passenger cars until 2050 and the impact on the steel and aluminum industries[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(18): 10776-10784.
- [6] Serrenho A C, Norman J B, Allwood J M. The impact of reducing car weight on global emissions: The future fleet in Great Britain[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2017, DOI: 10. 1098/rsta. 2016. 0364.
- [7] Milovanoff A, Posen I D, Maclean HL. Electrification of light-duty vehicle fleet alone will not meet mitigation targets[J]. Nature Climate Change, 2020, 10(12): 1-6.
- [8] Ortego A, Calvo G, Valero A, et al. Assessment of strategic raw materials in the automobile sector[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, DOI: 10. 1016/j. resconrec. 2020. 104968.
- [9] Sharma L, Pandey S. Recovery of resources from end-of-life passenger cars in the informal sector in India[J]. Sustainable Production and Consumption, 2020, 24: 1-11.
- [10] 中汽数据有限公司. 中国汽车低碳行动计划研究报告[R]. 天津: 中汽数据有限公司, 2020. [Automotive Data of China. China Automobile Low Carbon Action Plan Research Report[R]. Tianjin: Automotive Data of China, 2020.]
- [11] International Energy Agency. Key World Energy Statistics[R/OL]. (2019-12-01) [2020-11-10]. <https://www.iea.org/topics/transport>.
- [12] Brunner P H, Rechberger H. Practical Handbook of Material Flow Analysis[M]. New York: Lewis Publishers, 2003.
- [13] 郝敏, 陈伟强, 马梓洁, 等. 2000-2015年中国铜废碎料贸易及效益风险分析[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1515-1526. [Hao M, Chen W Q, Ma Z J, et al. Benefits and risks of China's copper waste and scrap trade during 2000-2015[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1515-1526.]
- [14] 刘刚, 曹植, 王鹤鸣, 等. 推进物质流和社会经济代谢研究, 助力实现联合国可持续发展目标[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(1): 30-39. [Liu G, Cao Z, Wang H M, et al. Promoting material flow and socioeconomic metabolism analysis for achieving UN 2030 sustainable development goals[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(1): 30-39.]
- [15] Song L L, Wang P, Hao M, et al. Mapping provincial steel stocks and flows in China: 1978-2050[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10. 1016/j. jclepro. 2020. 121393.
- [16] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook 2019[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.]
- [17] 宋璐璐, 陈伟强, 代敏. 中国汽车, 船舶和家电中钢铁的存量与流量[J]. 自然资源学报, 2020, 35(4): 895-907. [Song L L, Chen W Q, Dai M. Stocks and flows of steel in automobiles, vessels and household appliances in China[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(4): 895-907.]
- [18] Wang T, Müller D B, Hashimoto S. The ferrous find: Counting iron and steel stocks in China's economy[J]. Journal of Industrial Ecology, 2015, 19(5): 877-889.
- [19] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图2.0[R]. 北京: 中国汽车工程学会, 2019. [China Society of Automotive Engineers. Energy-Saving and New Energy Automobile Technology Roadmap 2.0[R]. Beijing: China Society of Automotive Engineers, 2019.]
- [20] Field F R, Wallington T J, Everson M, et al. Strategic materials in the automobile: A comprehensive assessment of strategic and minor metals use in passenger cars and light trucks[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(24): 14436-14444.
- [21] United Nations. World Population Prospects 2019[R/OL]. (2019-02-01) [2020-08-22]. <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>.
- [22] Pauliuk S, Müller D B. The role of in-use stocks in the social metabolism and in climate change mitigation[J]. Global Environmen-

- tal Change, 2014, 24: 132–142.
- [23] Melo MT. Statistical analysis of metal scrap generation: The case of aluminium in Germany[J]. Resources Conservation & Recycling, 1999, 26(2): 91–113.
- [24] Inghels D, Dullaert W, Raa B, et al. Influence of composition, amount and life span of passenger cars on end-of-life vehicles waste in Belgium: A system dynamics approach[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2016, 91: 80–104.
- [25] Pauliuk S, Waugh R, Müller DB, et al. The steel scrap age[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(7): 3448–3454.
- [26] Cui X G, Fang C L, Liu H M, et al. Dynamic simulation of urbanization and eco-environment coupling: Current knowledge and future prospects[J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(2): 333–352.
- [27] Zhang C, Chen W Q, Liu G, et al. Economic growth and the evolution of material cycles: An analytical framework integrating material flow and stock indicators[J]. Ecological Economics, 2017, 140: 265–274.
- [28] Zhang C, Chen W Q, Ruth M. Measuring material efficiency: A review of the historical evolution of indicators, methodologies and findings[J]. Resources Conservation & Recycling, 2018, 132: 79–92.

Material metabolism and carbon emission reduction strategies of passenger cars in China's mainland

SONG Lulu^{1,2}, CAO Zhi³, DAI Min^{1,4}

(1. Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, CAS, Xiamen 361021, China; 2. Xiamen Key Lab of Urban Metabolism, Xiamen 361021, China; 3. Sustainable Buildings and Road Engineering, University of Antwerp, Antwerp 2020, Belgium; 4. Fudan Tyndall Center, Department of Environmental Science & Engineering, Fudan University, Shanghai 200438, China)

Abstract: China is the world's largest motor vehicle manufacturer and consumer. The resource consumption and greenhouse gas emissions brought by the vehicles have attracted widespread attention from scholars. Comprehensive assessment of material metabolism and carbon emission reduction potential of the vehicles are important prerequisite for policy formulation in circular economy and low-carbon development. Taking the passenger cars in China's mainland as an example, we predict the future development of material demand, scrap, and evaluate the potential of CO₂ emission reduction associated with product use based on the dynamic material flow analysis model. The results show that the demand for passenger cars will gradually decrease after reaching a peak around 2022 (30~60 million per year), and will be around 30 million per year by 2050. After 2000, the amount of scrapped passenger cars has been increasing and will exceed the demand in 2040. In 2050, the amount of scrapped passenger cars will reach 30~70 million per year. The material scrap of passenger cars will exceed the material demand after 2040, and reach 37.3~73.8 million tons per year in 2050. Among five different emission reduction strategies, improving the fuel efficiency of gasoline vehicles is an effective strategy for emission reduction. Its emission reduction potential can reach 330 million tons per year, which can reduce carbon emissions by 40%. This article discussed the potential opportunities and challenges of circular economy and low-carbon development in the vehicle sector, and prospects for the future research work.

Key words: material metabolism; stocks; flows; passenger cars; resource management; carbon emission reduction; material flow analysis; China